



HAL
open science

Evolution des composantes du niveau marin à partir d'observations de marégraphie effectuées depuis la fin du 18ème siècle en Charente-Maritime

Thomas Gouriou

► To cite this version:

Thomas Gouriou. Evolution des composantes du niveau marin à partir d'observations de marégraphie effectuées depuis la fin du 18ème siècle en Charente-Maritime. Sciences de la Terre. Université de La Rochelle, 2012. Français. NNT : 2012LAROS361 . tel-00818425

HAL Id: tel-00818425

<https://theses.hal.science/tel-00818425>

Submitted on 26 Apr 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

« EVOLUTION DES COMPOSANTES DU NIVEAU MARIN A PARTIR D'OBSERVATIONS DE MAREGRAPHIE EFFECTUEES DEPUIS LA FIN DU 18^E SIECLE EN CHARENTE-MARITIME »

Volume I : Manuscrit de thèse



THÈSE

présentée par

Thomas GOURIOU

soutenue le 26 mars 2012

pour l'obtention du grade de Docteur de l'université de La Rochelle

Discipline : Océanographie physique

JURY :

Pierre RICHARD
Nicolas FLORSCH
Paolo PIRAZZOLI
Michel BOCHACA
Alain COULOMB
Laurent TESTUT
Guy WÖPPELMANN
Bernard SIMON

Professeur, Université de La Rochelle
Professeur, Université Pierre et Marie Curie, Paris
Directeur de Recherche, CNRS, Meudon
Professeur, Université de La Rochelle
Ingénieur, IGN, Saint-Mandé
Physicien-adjoint, LEGOS, Toulouse
Maître de conférences HDR, Université de La Rochelle
Ingénieur à la retraite, SHOM, Brest

Président du jury
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur
Directeur de thèse
Invité

Illustration de couverture :

« Valse des marées »,

Œuvre de Sidonie Marty, d'après le sujet de thèse de Thomas Gouriou.
2008 - Technique mixte (triptyque : 49,5 x 110 cm + 110 x 110 cm + 49,5 x 110 cm)

Sidonie Marty : « *Trois sites de référence à partir desquels est évaluée l'évolution des marées, comme les âges de la vie, leurs hauts et leurs bas... La forme du triptyque s'est naturellement imposée. Les contrastes de luminosité rendent compte de l'alternance jour-nuit et des changements climatiques, paramètres déterminants pour le niveau de l'eau. « Lunatique », il se modifie au cours du temps, rythmé par différents instruments de mesure. Marégraphe, échelle métrique, poids et flotteur, balisent les trois panneaux, où de nombreuses formes s'apparentent à la lune. J'ai également diversifié les effets de matière, à l'image de la recherche de Thomas qui requiert un travail de terrain, tout autant que d'archives. »*



UNIVERSITÉ DE LA ROCHELLE

ÉCOLE DOCTORALE
Sciences pour l'Environnement - Gay Lussac

Laboratoire « Littoral, Environnement et Sociétés » (UMR 6250 LIENSs)

THÈSE

présentée par :

Thomas GOURIOU

soutenue le 26 mars 2012
pour l'obtention du grade de Docteur de l'université de La Rochelle

Discipline : Océanographie physique

Evolution des composantes du niveau marin à partir d'observations de marégraphie effectuées depuis la fin du 18^e siècle en Charente-Maritime

Volume I : Manuscrit de thèse

JURY :

Pierre RICHARD
Nicolas FLORSCH
Paolo PIRAZZOLI
Michel BOCHACA
Alain COULOMB
Laurent TESTUT
Guy WÖPPELMANN
Bernard SIMON

Professeur, Université de La Rochelle
Professeur, Université Pierre et Marie Curie, Paris
Directeur de Recherche, CNRS, Meudon
Professeur, Université de La Rochelle
Ingénieur, IGN, Saint-Mandé
Physicien-adjoint, LEGOS, Toulouse
Maître de conférences HDR, Université de La Rochelle
Ingénieur à la retraite, SHOM, Brest

Président du jury
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur
Directeur de thèse
Invité

LABORATOIRE DE RECHERCHE

Laboratoire « Littoral, Environnement et Sociétés » (LIENSs)
Unité Mixte de Recherche 6250 (CNRS / Université de La Rochelle)

Institut du Littoral et de l'Environnement
2 rue Olympe de Gouges
17000 La Rochelle

<http://lienss.univ-larochelle.fr/>



DIRECTEUR DE THESE

Guy Wöppelmann
Maître de conférences HDR
(guy.woppelmann@univ-lr.fr)

FINANCEMENT

Bourse du Conseil Général de
la Charente-Maritime (CG17)



EUMETSAT-CNES

PARTENAIRES



REMERCIEMENTS

Ahhh, les remerciements, enfin... Dernier acte de rédaction, synonyme de libération ! Et en même temps, il ne faut pas les négliger, car n'est-ce pas la seule partie réellement lue d'une thèse... ? Allez, c'est parti !

Je souhaite, en premier lieu, remercier Guy Wöppelmann, maître de conférences HDR à l'université de La Rochelle et directeur de thèse, pour les quatre années de collaboration sur ce travail de recherche. Mais également pour sa très grande disponibilité, que ce soit en semaine ou le week-end, pour avoir mis à ma disposition tous les moyens nécessaires à l'accomplissement de mon travail (matériel, missions en France et à l'étranger, participation à des colloques, etc.), et pour m'avoir fait confiance pour mener à bien plusieurs projets. Merci aussi de ton soutien en cette fin de thèse.

Je tiens à remercier les membres de mon jury, et notamment Nicolas Florsch, professeur à l'université Pierre et Marie Curie (Paris), et Paolo Pirazzoli, directeur de recherche au CNRS (Meudon), pour m'avoir fait l'honneur d'être les rapporteurs de ce travail. Merci à Michel Bochaca, professeur à l'université de La Rochelle, Alain Coulomb, ingénieur à l'IGN (Saint-Mandé), Laurent Testut, physicien-adjoint au LEGOS (Toulouse), et Bernard Simon, ingénieur à la retraite du SHOM (Brest), pour m'avoir fait l'honneur de leur présence dans mon jury et pour l'ensemble des discussions scientifiques engagées autour de mon travail. Enfin, un très grand merci à Pierre Richard, professeur à l'université de La Rochelle, président du jury et directeur de mon laboratoire, pour son soutien sans faille, ses encouragements et ses qualités humaines.

De très nombreuses personnes ont collaboré à ce travail de recherche, et ce manuscrit de thèse ne pourrait exister aujourd'hui sans leur contribution. Je tiens, ici, à les remercier pleinement et j'espère n'oublier personne.

Avant tout, un énorme Merci à Nicolas Pouvreau, aujourd'hui coordinateur national de l'observation *in situ* du niveau de la mer, au SHOM (Brest). Mais au-delà de ce titre, tu es et reste avant tout, un ami, ancien collègue de bureau (tu sais qu'on a toujours pas vu l'armoire de Karine ouverte ? ☺), et surtout celui qui m'a initié aux mesures historiques du niveau marin ! Je connais ton amour pour ces données archivées, merci à toi de m'avoir transmis ton expérience et merci d'avoir toujours fait tout ce qui était possible pour m'aider. Je suis heureux, pour toi et ta famille, de ta réussite actuelle et je te souhaite le meilleur pour l'avenir.

Merci également à Pascal Tiphaneau, pour son aide technique et son expérience du nivellement lors de nos nombreuses missions sur le terrain. Merci à Médéric Gravelle, pour son aide et sa bonne

humeur éternelle, en mission ou au labo, c'est un vrai plaisir de discuter avec toi ! Je tiens aussi à exprimer ma profonde gratitude envers Belén Martin Miguez, à plusieurs titres : pour m'avoir soutenu et encouragé dès le début, pour avoir apporté de la bonne humeur et de la joie au labo lors de ta présence parmi nous mais également pour ton investissement et tes encouragements des derniers mois ! Merci à Mickaël Guichard pour sa bonne humeur, nos discussions et le soutien informatique. Merci aussi aux membres de mon équipe qui ont contribué aux discussions scientifiques sur mon sujet : Xavier Bertin, Jean-François Breilh, Mikhail Karpytchev, Camille Letetrel et Florence Toubanc.

Je souhaite aussi remercier toutes les personnes du SHOM qui ont participé ou rendu possible ce travail de recherche, et je pense notamment à Lucia Pineau-Guillou et Ronan Créach pour leurs précieux conseils, à Thierry Gendrier pour son accueil et son aide aux archives, mais également à l'ensemble des membres de la cellule HDC, dont Camille Daubord, Virginie Goirand, Amandine Nicolle et Nicolas Weber. Merci à Bernard Croguennoc et Christian Kervella pour leur sympathie lors des missions d'installation de marégraphes, et notamment à Sète et Port-Vendres. Merci enfin à Bernard Simon pour les discussions toujours très intéressantes au sujet de la marégraphie.

Je tiens à remercier Alain Coulomb, responsable du département Nivellement à l'IGN, pour les nombreux échanges tout au long de ces quatre années de recherche, mais également pour son accueil lors de ma venue dans les locaux de l'IGN. Merci également aux personnes du service du Nivellement qui ont facilité mes recherches dans les archives de l'IGN. Plus globalement, merci à l'ensemble des employés des centres d'archives fréquentés et notamment à ceux du Service Historique de la Défense de Rochefort, ou encore des archives départementales de la Charente-Maritime.

Un très grand merci à Simon Holgate pour son accueil très chaleureux lors de ma venue à Liverpool et pour ses conseils précieux sur le niveau marin. Merci également à Philip L. Woodworth, Svetlana Jevrejeva et Elizabeth Bradshaw pour leur accueil et les discussions scientifiques lors de mon séjour au PSMSL.

Ce travail de recherche n'aurait pu être réalisé sans un accès à différents monuments historiques, certains privés, et je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont permis cet accès. Et plus qu'une simple permission, notre projet de recherche a toujours été accueilli très favorablement et avec enthousiasme, alors merci beaucoup à vous : Françoise Bellanné et sa famille, ainsi que Bénédicte Rousselot et sa famille, propriétaires du fort Enet, pour leur aide et leur soutien permanent à la réalisation de ce travail. Merci de nous avoir reçus chez vous avec autant de sympathie et de convivialité. Merci également à Dominique Droin, historien et guide du fort Enet, pour nous avoir facilité l'accès au fort en l'absence des propriétaires et pour les discussions toujours passionnantes au sujet de l'histoire du fort. Un grand merci à Didier Loriou (Conseil Général de la Charente-Maritime) et à Eric Buron, directeur de production de l'émission « *Fort Boyard* » pour avoir permis l'accès au fort Boyard dès que nous en

avons besoin. Merci à vous pour votre accueil toujours très chaleureux, et merci d'avoir facilité notre travail sur le fort ! Merci aussi à Laurent Fazilleau et à toute l'équipe de production présente sur le fort lors de nos missions. Troisième lieu de prestige et troisième accueil aussi chaleureux : le phare de Cordouan. Merci à Alain Fort, du Grand Port Maritime de Bordeaux, pour l'accès aux documents concernant le marégraphe du phare et surtout merci à Alain Brocard, responsable de la subdivision Phares et balises du Verdon, pour nous avoir donné l'autorisation de séjourner sur le phare de Cordouan trois jours, le temps de réaliser nos mesures. Trois jours pendant lesquels nous avons été accueillis chaleureusement par deux gardiens du phare, Serge Andron et Mark. Merci pour vos discussions, votre convivialité et pour le partage de votre expérience sur ce magnifique phare. Enfin, un énorme merci aux élus et à la population de l'île d'Aix, très enthousiastes dès le début de notre projet. Merci à Alain Burnet, le maire, mais aussi à Jean-Claude Poisson et Jean-Pierre Chaudet, qui ont tout mis en œuvre pour nous aider et nous accompagner, que ce soit un soutien logistique ou politique. L'observatoire marégraphique installé en 2011 n'aurait pu voir le jour sans leur soutien. Merci de votre accueil. Merci également à Alain Morisson, du Cercle Nautique de l'Île d'Aix, ainsi qu'à Michel et Thérèse Rautureau.

Je souhaite aussi remercier Gilles Limouzin, du Service de Prévision des Crues Littoral Atlantique (DDTM), pour son accueil dans ses locaux et sa collaboration sur ce travail. Merci de m'avoir permis d'accéder à vos archives marégraphiques. Merci à Olivier Mestre, de Météo France, pour sa collaboration sur les données historiques de pression atmosphérique.

Un grand merci à Jean-Claude Mercier pour son intérêt perpétuel pour mes recherches, pour son soutien, pour son apport d'expérience et pour les innombrables histoires, dignes des plus grands films hollywoodiens, que j'écoutais avec beaucoup de plaisir ! Merci à Claude Mercier pour sa gentillesse et son aide. Un double merci à Isabelle Brenon pour sa sympathie, son dévouement exemplaire pour l'enseignement et les étudiants, et qui a tout mis en œuvre pour faciliter mon intégration au sein de l'équipe et en tant que jeune enseignant. Merci à Micha pour sa bonne humeur et son sourire. Merci à Eric Chaumillon pour l'aide apportée lors de ma préparation des cours de sédimentologie ! Merci également à Vivien Mathé et François Lévêque, dont les discussions ont toujours été agréables au fil de ces années. Un grand merci à Sylvie Jaouen, dont les compétences, la bonne humeur et l'immense gentillesse sont à saluer !

Merci à l'ensemble des personnes qui m'ont apporté leur aide sur toutes les questions administratives ! En premier lieu, merci à Pierre Richard et Gérard Blanchard pour leur soutien crucial des derniers mois. Un Très Grand Merci à Brigitte Hudelaine et Jennifer De La Corte Gomez pour l'immense travail qu'elles fournissent auprès des doctorants et pour leurs grandes qualités humaines ! Merci aussi à Marie Chivaille, Nicolas Alligner, Johan Guiard, Patricia Caillat-Miousse et Lucia Picard, indispensables au sein de notre labo ! Merci à Thierry Guyot et Nicolas Lachaussée pour leur aide et leur

gentillesse, et un énorme merci à Armelle Combaud, toujours disponible pour nous aider avec le sourire ! Merci à Cécilia Pignon-Mussaud pour son aide précieuse sur les SIG !

Merci aux personnes qui ont facilité ma vie d'enseignant : Hervé Diot et Isabelle Brenon, mais également à l'ensemble des secrétaires ! Un grand merci à Anne Brouard, pour ses compétences et sa sympathie, mais également à Bertrand Vachon, pour son apport d'expérience, son soutien, sa patience et son calme exemplaire mais aussi pour son extrême gentillesse ! Comment ne pas remercier aussi mes étudiants, qui m'ont apporté beaucoup en quatre ans. J'ai pris énormément de plaisir à enseigner avec vous, et je garde en mémoire d'excellents souvenirs passés avec chacune des promotions que j'ai eu la chance d'avoir. Il serait trop long de citer des prénoms ici, mais je vous souhaite à tous une bonne continuation et surtout de trouver votre bonheur !

Merci à mes « petits » stagiaires, avec toute mon affection : Romain Danlos, Malory Béché, Karina Sri Bangun, Eva Cougnon et Samuel Le Pajolec ! Un merci particulier à Sam, tu sais que ton travail m'a énormément aidé et avancé et si cette thèse permet aujourd'hui de présenter des résultats de la série du Vieux port de La Rochelle, c'est en grande partie à toi qu'on le doit ! J'en profite pour remercier l'ensemble des personnes qui m'ont aidé à la numérisation fastidieuse des données anciennes : Ludivine, Nicolas, Romain, Sam et Erwan ! Merci à Julie Billy, que je n'ai pas eu la chance d'avoir en stage, pour ta joie de vivre ! Un merci particulier à Aurélie Lavenue, non seulement pour son aide bibliographique ☺, mais également pour toutes nos discussions et les moments passés ensemble !

Un travail de recherche doctoral de quatre années, ce n'est pas seulement de nombreuses heures de travail acharné devant un ordinateur, mais c'est avant tout des rencontres humaines, enrichissantes...
« Moi, si je devais résumer ma vie aujourd'hui avec vous, je dirais que c'est d'abord des rencontres, des gens qui m'ont tendu la main, peut-être à un moment où je ne pouvais pas... Et je dis merci à la vie, je lui dis merci, je chante la vie, je danse la vie... »

Mes premières pensées vont forcément vers Frédérique Deloffre-Vye, véritable guide pour moi au cours de ces dernières années ! Merci à toi pour ton implication envers les doctorants, merci pour ton apport d'expérience extrêmement enrichissant, merci de tes nombreux conseils, de ton aide, de ton soutien inconditionnel et merci de m'écouter encore aujourd'hui alors que je suis toujours aussi bavard ! Merci de ta sympathie et je te souhaite le meilleur pour les années à venir.

De même, je souhaite remercier Olivia Roquier, François Baty-Sorel, et Nicolas Moinet qui m'ont tous apporté quelque chose au cours de nos échanges, merci à vous ! Merci à Sidonie Marty de m'avoir proposé de participer à son projet très original de réaliser une œuvre artistique à partir de mon sujet de recherche ! Le résultat est magnifique ! Merci à Catherine Benguigui, Christian Goichon et

Daniel Mar pour nos collaborations sur différents projets culturels et notamment sur la réalisation des chercheurs grandeur nature ! La séance photo avec Mickaël restera inoubliable !

Ami lecteur, si à ce stade de la lecture, tu n'as pas encore vu ton nom dans les remerciements, pas de panique, il se peut qu'il soit juste en dessous. Sinon, eh bien, cela voudra dire qu'en dépit de tous mes efforts pour l'éviter, je t'ai oublié... ☹

Un énorme merci à l'ensemble des copains doctorants, et notamment à la famille des moniteurs : Andrea L-A. et Aurélie, Arnaud, Antoine, Benjamin, Guillaume D., Guillaume P., Manu, Mathéo, Matthieu, Nazir et Sloven. Merci aux doctorants « hors labo » : Mickaël, pour son côté informaticien et surtout pour m'avoir accompagné dans tous les projets farfelus qu'on ait pu trouver, Virginie et Delphine, inséparables, pour leur sympathie et pour nos nombreux moments ADocs !, Pierre (Laurence, et la petite Margot !) pour avoir eu la délicatesse de m'attendre pour soutenir ☺ et pour avoir partagé avec moi toutes les étapes de la thèse (et ce jusque sur les terrains de foot !), merci à toi Pierre et heureuse vie à ta nouvelle famille, merci à Marie, grâce à qui j'ai pu apprendre à connaître Clément (!), merci à vous deux pour votre sympathie, pour tous les bons moments passés avec vous, pour votre soutien et vivement la prochaine soirée !, merci à Vanessa pour ce que tu m'as apporté, merci à Anne-Claire (complètement fous ces juristes ! ☺), Guylain, Brice, Julien pour son côté belge ☺, Adrien D. (je suis fan !) et Alex (est chouette, je suis fan aussi !) pour les rires partagés, Zsuzsanna, Hervé, Hélène, Nicolas M., Marine bien évidemment !, Ahmed, Andrea P. (et Thibault !), Christophe, Elodie, et Agathe !

Merci également à tous les copains doctorants du labo, les anciens comme les nouveaux : Jonathan A., Mélanie, Fred, Clément, Adrien C., Benoit L. (merci pour ton coup de main à l'impression... Quoi il était 2h du matin... ?), Jonathan D., Vanessa B., Camille P. Julien C., Jean-François, Lara, Nina, Laura, Julie L et Seb ! Je vous souhaite le meilleur pour la suite de vos aventures ! Merci à Aurore, Paula et Tiphaine, pour leur douceur, leur sympathie, les filles vous êtes géniales, ne changez pas ! Esméralda, ta faculté à tenir tes convictions m'impressionne, surtout conserve là ☺, et quel plaisir de monter des projets avec toi et... mon ptit Alex ! Alex, merci de ta simplicité, merci d'avoir participé à l'élargissement de ma culture (Mr Trololo...), merci d'être toi tout simplement. Merci à Richard, ninja démocrate, pour nos discussions toujours passionnées !, merci à Céline, pour sa fraîcheur et son innocence de « 1^{ère} année », merci surtout pour nos discussions riches passées et à venir je l'espère !, merci à Florence, pardon, merci à notre Présidente, mademoiselle Florence, pour ton écoute, ton sens des responsabilités, ta grande disponibilité pour les autres et pour nos parties de rigolade ! Merci à Blanche et Joana pour tout, il y aurait tellement à dire ! Merci pour votre sens de l'écoute, pour vos blagues (même celles qui ne sont pas drôles) et je vous envoie tout mon soutien pour ces derniers mois difficiles. Merci à mes collègues de bureau : Marion et Jérôme, mais surtout à Karine, LA spécialiste du vélo, pardon du Cyclisme, la future star des JO de Londres ☺, celle dont le placard ne s'ouvre jamais, et qui a eu le mérite de me supporter pendant quatre longues années... Merci pour ces moments partagés, ça

va me manquer, collègue ! Merci à Aline, pour tous ses conseils, son aide, et nos fous rires. Merci à Margot, pour ses jeux de mots et son humour unique au monde, qui me manque tant ! Comment remercier avec de simples mots Marion D., soutien indéfectible, pilier de ce labo jusqu'à son départ, simplement irremplaçable et que j'ai eu la chance de connaître ! Merci pour ton humour, ta bonne humeur éternelle, ta vie en rose, et pour nos nombreuses discussions. Un énorme merci à Luc et Camille L., Luc pour avoir eu la décence de soutenir après moi ☺ pour nos fous rires depuis le début, pour tout ce qu'on a pu vivre ensemble, des formations aux soirées, pour ton sens de l'humour très particulier (mais que j'aime bien quand même), et pour ta discrétion à toute épreuve ☺ . Camille, merci pour Tout, pour ton sens de l'écoute, pour ton soutien, pour tout ce qu'on a vécu ensemble (ah ce petit déjeuner à Vienne à discuter !), pour ton sourire et ta bonne humeur !

Merci également à l'ensemble de mes amis, qui heureusement, ont pu me parler d'autre chose que d'université pendant ces quatre années : Séverine (trop heureux de t'avoir retrouvé !), Capucine (du stand des Francos à Léa Nature !), Céline M. (6 rue... c'est ça ? ☺), Tamara pour nos discussions surréalistes (ça va me manquer), Alex S., Kevin, Momo, Rémy et toute la clique de Sainte Soulle City pour nos soirées complètement déjantées, Pauline (et Julie) pour son soutien et son amitié à toute épreuve, tous les copains ENVOLH de Bordeaux, tous ceux de Belfort et de Besançon, sans oublier les guyanais (!), Astrid, les copains de la Croix du Mystère, et pour finir, Flora, Céline D., Florian (et Hoa) et Nicolas A., qui me suivent et m'accompagnent depuis très longtemps. Merci de votre soutien et de votre amitié.

Enfin, un dernier petit mot à ma famille qui m'a soutenu et supporté (oui oui dans les deux sens du terme) tout au long du doctorat. Merci à Aurélien et Emmanuelle pour l'abstract de fin de nuit ☺ , merci à Anne, Thierry et Papa pour la lecture et la relecture de mon manuscrit. Merci à Célia pour nos repas du midi ! Merci à ma grand-mère Mamie pour le soutien indéfectible de fin de rédaction et les bons repas qu'elle me concoctait, merci à Pirouette pour sa féline compagnie. Merci à Benjamin (et D'joulay ☺) et Emma (et Thomas ☺) et à mes parents pour leur soutien. Et merci à Ludivine, pour tout ton amour et ton soutien indispensable à l'achèvement de ce travail. Sans toi, je n'aurais pu réussir. Et ma dernière pensée sera pour ma fille d'amour, Inès : Inès, si tu lis ce mot, papa t'aime très fort !

TABLE DES MATIERES

Sigles et Abréviations	21
INTRODUCTION	25
CHAPITRE I - OBSERVATION DU NIVEAU MARIN : GENERALITES	28
I.1. Mesures du niveau de la mer	28
I.1.1. Pourquoi mesurer le niveau de la mer ?	28
I.1.2. Evolution des techniques de mesures	29
I.1.2.1 Echelle de marée.....	29
I.1.2.2. Marégraphe	30
I.1.2.2.1. Puits de tranquillisation	30
I.1.2.2.2. Marégraphe à flotteur	32
I.1.2.2.3. Marégraphe à capteur de pression.....	34
I.1.2.2.4. Marégraphes à sonde aérienne	34
I.1.2.2.5 Test de Van de Castele.....	35
I.1.2.3. Altimètre radar embarqué sur satellite.....	36
I.1.2.4. Bouée GNSS	37
I.1.3. Signaux contenus dans l'enregistrement marégraphique	38
I.1.3.1. Variations du niveau marin.....	39
I.1.3.1.1. Climatique	39
I.1.3.1.2. Astronomique : marées.....	41
I.1.3.1.3. Météorologique.....	44
I.1.3.1.4. Tsunamis.....	45
I.1.3.1.5. Seiches	46
I.1.3.2. Mouvements verticaux de l'écorce terrestre	46
I.2. Niveaux moyens.....	49
I.2.1. Niveaux moyens de la mer	49
I.2.1.1. Niveau moyen journalier	50
I.2.1.2. Niveau moyen mensuel.....	51
I.2.1.3. Niveau moyen annuel	52
I.2.2. Niveaux moyens de la marée.....	52
I.2.2.1. Niveau moyen de mi-marée.....	52
I.2.2.2. Niveaux moyens de pleine mer et de basse mer	52
I.3. Références verticales.....	53
I.3.1. Notion d'ellipsoïde	53
I.3.2. Notion de géoïde	55
I.3.3. Nivellement	56
I.3.3.1. Définitions	56
I.3.3.2. Réseaux de Nivellement Général de la France (NGF).....	57
I.3.3.2.1. Réseau NGF-Bourdalouë	58
I.3.3.2.2. Réseau NGF-Lallemand	58
I.3.3.2.3. Réseau NGF-IGN69	59
I.3.3.2.4. Incertitudes liées au passage d'un réseau NGF à un autre.....	59
I.3.3.3. Repères de nivellement et de marée	60
I.3.4. Notion de zéro hydrographique	62

I.3.5. Référence de l'appareil de mesure	62
I.4. Réseaux de stations du niveau marin et bases de données	63
I.4.1. Les différents types de données.....	63
I.4.1.1. Données du niveau de la mer	63
I.4.1.2. Données utiles à la compréhension des variations du niveau marin.....	65
I.4.1.2.1. <i>Pression atmosphérique</i>	65
I.4.1.2.2. <i>Contrôle de la stabilité des zéros</i>	66
I.4.1.2.3. <i>Mouvements terrestres verticaux</i>	66
I.4.1.2.4. <i>Rebond post-glaciaire</i>	66
I.4.2. Réseaux de stations d'observation du niveau de la mer	67
I.4.2.1. Programme mondial GLOSS	67
I.4.2.2. Exemples de réseaux régionaux.....	68
I.4.2.3. Réseaux nationaux	69
I.4.2.3.1. <i>A l'étranger</i>	69
I.4.2.3.2. <i>En France</i>	71
I.4.3. Bases de données sur internet.....	72
I.4.3.1. Bases de données mondiales.....	72
I.4.3.1.1. <i>BODC</i>	72
I.4.3.1.2. <i>PSMSL</i>	73
I.4.3.1.3. <i>IOC - Sea Level Station Monitoring Facility</i>	74
I.4.3.1.4. <i>UHSLC</i>	75
I.4.3.2. Bases de données françaises	76
I.4.3.2.1. <i>REFMAR</i>	76
I.4.3.2.2. <i>SONEL</i>	76
 CHAPITRE II. - VARIATIONS DU NIVEAU DE LA MER : CONTEXTE GLOBAL	 77
II.1. Variabilité du niveau marin	77
II.1.1. Spatiale.....	77
II.1.2. Temporelle	79
II.1.2.1. Du Pléistocène à l'Holocène	79
II.1.2.2. Variation séculaire récente	83
II.1.2.2.1. <i>Critère de sélection pour calculer une tendance séculaire</i>	83
II.1.2.2.2. <i>Evolution globale du niveau de la mer</i>	84
II.1.2.2.3. <i>Tendances individuelles de stations marégraphiques</i>	88
II.1.2.3. Période altimétrique : de 1993 à aujourd'hui	90
II.1.2.4. Tentative de prévision du futur.....	91
II.2. Séries marégraphiques longues.....	93
II.2.1. Une ressource rare.....	93
II.2.2. Quelle(s) alternative(s) aux séries marégraphiques ?	95
II.3. Potentiel marégraphique français.....	95
 CHAPITRE III - PRESENTATION DU LITTORAL CHARENTAIS	 98
III.1. Contexte historique national.....	98
III.1.1. Contexte hydrographique depuis 1775	98
III.1.2. Contexte métrologique.....	102
III.1.2.1. Unités de mesure de la longueur	102
III.1.2.2. Du Temps Solaire Vrai au Temps Universel Coordonné.....	105
III.2. Contexte géographique.....	107

III.2.1. Cadre général	107
III.2.2. Géomorphologie du pertuis d'Antioche	108
III.2.3. Impact anthropique	109
III.3. Contexte géologique.....	110
III.3.1. Cadre général	110
III.3.2. Sédimentologie de surface	111
III.3.3. Contexte sismique.....	112
III.4. Contexte hydrologique	113
III.5. Contexte hydrodynamique.....	114
III.5.1. Houle.....	114
III.5.2. Marée	115
III.5.3. Courants	115
III.6. Contexte météorologique.....	116
III.6.1. Pression atmosphérique	117
III.6.2. Vent.....	118
III.6.3. Températures, précipitations et ensoleillement	118
III.7. Contexte paléo-océanographique	119
CHAPITRE IV - SYNTHÈSE DE L'ANALYSE DOCUMENTAIRE HISTORIQUE DES OBSERVATOIRES ETUDIÉS	121
IV.1. La rade de La Rochelle.....	122
IV.1.1. Historique des observatoires du niveau de la mer	122
IV.1.1.1. Le Vieux port de La Rochelle.....	122
IV.1.1.2. Le port de La Pallice.....	127
IV.1.2. Suivi historique de la position du zéro hydrographique	129
IV.1.2.1. Au Vieux port de La Rochelle	129
IV.1.2.2. Au port de La Pallice	134
IV.1.3. Aperçu des repères inventoriés.....	136
IV.1.3.1. Au Vieux port de La Rochelle	136
IV.1.3.1.1. <i>Repères de nivellement</i>	136
IV.1.3.1.2. <i>Echelles de marée</i>	137
IV.1.3.2. Au port de La Pallice	139
IV.1.4. Relation entre les réseaux NGF	141
IV.1.5. Inventaire et description des mesures enregistrées.....	143
IV.1.5.1. Le Vieux port de La Rochelle.....	144
IV.1.5.2. Le port de La Pallice.....	152
IV.2. La rade de l'île d'Aix : île d'Aix - fort Enet - fort Boyard	153
IV.2.1. Historique des observatoires du niveau de la mer	153
IV.2.2. Suivi historique de la position du zéro hydrographique.....	164
IV.2.3. Repères inventoriés : aperçu.....	171
IV.2.3.1. A l'île d'Aix.....	171
IV.2.3.2. Au fort Enet	173
IV.2.3.2.1. <i>Repères de nivellement</i>	173
IV.2.3.2.2. <i>Echelles de marée</i>	174
IV.2.3.3. Au fort Boyard.....	175
IV.2.4. Relation entre les réseaux NGF	177

IV.2.5. Inventaire et description des mesures enregistrées.....	179
IV.2.5.1. L'île d'Aix	180
IV.2.5.2. Le fort Enet	184
IV.2.5.3. Le fort Boyard.....	187
IV.2.6. Installation d'un observatoire moderne à l'île d'Aix (en 2011).....	191
IV.3. Le phare de Cordouan	194
IV.3.1. Historique de l'observatoire du niveau de la mer.....	194
IV.3.2. Suivi historique de la position du zéro hydrographique.....	197
IV.3.3. Aperçu des repères de marée inventoriés	203
IV.3.4. Relation entre les réseaux NGF	204
IV.3.5. Inventaire et description des mesures enregistrées.....	205
IV.4. Inventaire des données du niveau de la mer répertoriées sur l'ensemble du littoral charentais	209
CHAPITRE V - CONSTRUCTION DE SERIES TEMPORELLES	212
V.1. Introduction	212
V.1.1. Définition d'une série temporelle cohérente.....	212
V.1.2. Problèmes généraux liés à une telle réalisation	213
V.2. Outils de traitement des données	216
V.2.1. Analyse harmonique de la marée.....	216
V.2.1.1. <i>mas</i>	216
V.2.1.2. <i>t_tide</i>	219
V.2.1.3. <i>r_t_tide</i>	220
V.2.1.4. Comparaisons et discussion	221
V.2.2. Numérisation des marégrammes.....	225
V.2.3. Eléments de traitements statistiques pour le niveau de la mer	227
V.3. Séries de pression atmosphérique	231
V.3.1. Introduction.....	231
V.3.2. Séries de pression atmosphérique en France au 19 ^e siècle : état des lieux	231
V.3.3. Données inédites du SHOM : présentation.....	236
V.3.4. Méthodes.....	241
V.3.4.1. Présentation	241
V.3.4.2. Applications	243
V.3.5. Contrôle qualité des séries inédites.....	246
V.3.5.1. Série de Brest	248
V.3.5.2. Série de La Rochelle	253
V.3.5.3. Série des forts Enet et Boyard.....	258
V.3.6. Résultats et discussion	263
V.4. Séries du niveau de la mer	267
V.4.1. Introduction.....	267
V.4.2. Données	268
V.4.2.1. Sauvegarde et numérisation des données historiques.....	268
V.4.2.2. Rade de la Rochelle.....	271
V.4.2.3. Rade de l'île d'Aix	272
V.4.2.4. Phare de Cordouan	274
V.4.2.5. « <i>Instructions pour les observateurs des Marégraphes</i> »	275
V.4.3. Méthodes.....	279

V.4.3.1. Détection d'erreurs et de sauts	279
V.4.3.2. Interpolation de valeurs manquantes.....	287
V.4.3.3. Extraction des PM et BM à partir des données horaires	289
V.4.3.4. Analyse des résidus	291
V.4.4. Construction des séries temporelles du littoral charentais.....	291
V.4.4.1. Analyse des conditions environnementales.....	292
V.4.4.1.1. Conditions hydrodynamiques	292
V.4.4.1.1.1. Pertuis d'Antioche	292
V.4.4.1.1.2. Phare de Cordouan.....	294
V.4.4.1.2. Stabilité du socle du marégraphe	294
V.4.4.1.2.1. Stabilité des repères de marée.....	294
V.4.4.1.2.1.1. Rade de La Rochelle.....	294
V.4.4.1.2.1.2. Rade de l'île d'Aix	297
V.4.4.1.2.2. Stabilité relative des forts Enet et Boyard.....	304
V.4.4.1.2.3. Le cas du phare de Cordouan.....	310
V.4.4.1.3. Autres.....	310
V.4.4.2. Conditions instrumentales.....	312
V.4.4.3. Unités et référentiels	314
V.4.4.3.1. Uniformisation des unités.....	314
V.4.4.3.2. Référentiels temporels et corrections associées.....	314
V.4.4.3.3. Références verticales et corrections associées.....	316
V.4.4.3.3.1. La Rochelle	316
V.4.4.3.3.2. Aix-Enet-Boyard.....	318
V.4.4.3.3.3. Phare de Cordouan.....	323
V.4.5. Contrôle qualité des séries temporelles	323
V.4.5.1. Lots de mesures enregistrées à l'échelle de marée.....	324
V.4.5.1.1. La Rochelle Vieux port : 1775-1776.....	324
V.4.5.1.2. Île d'Aix et La Rochelle Vieux port : 1824.....	327
V.4.5.1.3. La Rochelle Vieux port et La Pallice : 1887-1892	332
V.4.5.2. Lots de mesures enregistrées avec un marégraphe Chazallon (1859-1909).....	338
V.4.5.2.1. Comparaison avec une station proche ('Buddy checking').....	338
V.4.5.2.2. Etude de la stabilité des ondes de marée.....	350
V.4.5.2.3. Etude couplée « niveau marin - pression atmosphérique ».....	354
V.4.5.2.4. Etude des résidus.....	356
V.4.5.2.5. Bilan	367
V.4.5.3. Lots de mesures marégraphiques récentes (1941-2011)	368
V.4.5.3.1. Comparaison avec une station proche ('Buddy checking').....	368
V.4.5.3.2. Etude de la stabilité des ondes de marée.....	376
V.4.5.3.3. Bilan	377
V.4.5.4. Ecart-types annuels des résidus (1775-2011).....	379
V.4.6. Résultats et discussion	382
CHAPITRE VI - ETUDE DES COMPOSANTES DU NIVEAU DE LA MER.....	394
VI.1. Ondes de marée	397
VI.1.1. Dans le Pertuis d'Antioche : La Rochelle et Aix-Enet-Boyard.....	397
VI.1.1.1. Caractéristiques générales.....	397
VI.1.1.2. Asymétrie tidale.....	402
VI.1.1.3. Cycle nodal	413
VI.1.1.4. Evolution à long terme.....	417
VI.1.2. Au phare de Cordouan.....	427
VI.2. Niveaux marins moyens.....	430
VI.2.1. La Rochelle : 1775 - 2011	430
VI.2.1.1. Tendence du niveau moyen de la mer.....	430

VI.2.1.2. Tendances des niveaux moyens de la marée.....	431
VI.2.1.3. Combinaison MSL-MTL	434
VI.2.2. Aix-Enet-Boyard : 1824 - 2011	436
VI.2.2.1. Tendance du niveau moyen de la mer.....	436
VI.2.2.2. Tendances des niveaux moyens de la marée.....	438
VI.2.2.3. Combinaison MSL-MTL	440
VI.2.3. Phare de Cordouan : 1812 - 1994	441
VI.2.4. Comparaison à des séries françaises et européennes.....	442
VI.3. Effets météorologiques.....	447
VI.3.1. Baromètre inverse.....	447
VI.3.2. Niveaux extrêmes	450
VI.3.3. Surcotes	454
 DISCUSSION GENERALE	 458
 CONCLUSION	 470
Bibliographie.....	475
Communications Scientifiques	489
Liste des Annexes	491
Annexes Electroniques.....	491

SIGLES ET ABRÉVIATIONS

- AD** : du latin *Anno Domini* (utilisé pour les dates postérieures à l'an 1 du calendrier grégorien)
- AD17** : Archives Départementales de la Charente-Maritime (17)
- AD33** : Archives Départementales de la Gironde (33)
- AOPC** : Atmosphere Observation Panel for Climate
- AP** : Atmospheric Pressure (Pression atmosphérique)
- BC** : Before Christ (« Avant Jésus-Christ », utilisé pour les dates antérieures à l'an 1 AD)
- BDCLIM** : Base de Données CLIMatologiques françaises de Météo-France
- BHI** : Bureau Hydrographique International
- BM** : Basse Mer
- BP** : Before Present (utilisé pour les dates antérieures à l'année 1950 du calendrier grégorien)
- BODC** : British Oceanographic Data Centre
- CEA** : Commissariat à l'Energie Atomique
- CETE** : Centre d'Etude Technique de l'Equipement
- cf.** : expression latine abrégée de Confer (signifiant « se reporter à »)
- CG17** : Conseil Général de la Charente-Maritime (17)
- CGPM** : Conférence Générale des Poids et Mesures
- CGPS@TG** : Continuous GPS at Tide Gauges
- CLS** : Collecte Localisation Satellites
- CNES** : Centre National d'Études Spatiales
- CNRS** : Centre National de la Recherche Scientifique
- COI** : Commission Océanographique Intergouvernementale
- DDE** : Direction Départementale de l'Equipement (à l'origine : Ponts et Chaussées)
- DDTM** : Direction Départementale des Territoires et de la Mer (précédemment : DDE)
- DOM-TOM** : Départements d'Outre-Mer - Territoires d'Outre-Mer
- e.g.** : du latin *exempli gratia* qui signifie « par exemple »
- ED50** : European Datum 1950, remplacé aujourd'hui par le système ETRS89
- EMSLP** : EMulate Sea Level Pressure
- EMULATE** : European and north atlantic daily to MULTidecadal climATE variability
- ENSO** : El Niño-Southern Oscillation
- ENVISAT** : ENVIronmental SATellite
- ETRS89** : European Terrestrial Reference System 1989 (Système européen de référence terrestre)
- FFT** : Fast Fourier Transform (Transformée de Fourier rapide)
- GCN** : Global Core Network (Réseau marégraphique central de GLOSS)
- GCOS** : Global Climate Observing System
- GIA** : Glacial Isostatic Adjustment (Ajustement isostatique glaciaire)

GLOSS : Global Sea Level Observing System (à l'origine : Global Level Of the Sea Surface)

GMT : Greenwich Mean Time (TSM au méridien de Greenwich)

GNSS : Global Navigation Satellite Systems

GPMB : Grand Port Maritime de Bordeaux

GPS : Global Positioning System (Système de localisation mondial)

HadSLP2 : Hadley Sea Level Pressure 2

HDR : Habilitation à Diriger des Recherches

IAG-GRS80 : International Association of Geodesy - Geodetic Reference System 1980

IFREMER : Institut Français de REcherche pour l'exploitation de la MER

IGN : Institut Géographique National

IGS : International GNSS Service

IOC : Intergovernmental Oceanographic Commission (en français : COI)

IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change

INSU : Institut National des Sciences de l'Univers

ITRF : International Terrestrial Reference Frame (Repère international de référence terrestre)

ITRS : International Terrestrial Reference System (Système international de référence terrestre)

JCOMM : Joint Technical Commission for Oceanography and Marine Meteorology

LCHF : Laboratoire Central Hydraulique de France

LIENSs : LIttoral, ENvironnement et Sociétés

MCN : Marégraphe Côtier Numérique

MHW : Mean High Water (Niveau moyen de pleine mer)

MLW : Mean Low Water (Niveau moyen de basse mer)

MSL : Mean Sea Level (Niveau moyen de la mer)

MSLP : Mean Sea Level Pressure (Pression atmosphérique moyenne rapportée au niveau de la mer)

MTL : Mean Tide Level (Niveau moyen de mi-marée)

MTR : Mean Tidal Range (Marnage moyen)

NaN : Not a Number (utilisé pour signaler une valeur manquante)

NAO : North Atlantic Oscillation (Oscillation Nord Atlantique)

NGF : Nivellement Général de la France

NIREF : Nivellement de Référence Français

NTF : Nouvelle Triangulation de la France (coordonnées exprimées dans la projection Lambert)

NUNIEAU : NUMérisation des Niveaux d'EAU

OHI : Organisation Hydrographique Internationale

OOPC : Ocean Observations Panel for Climate

PM : Pleine Mer

POL : Proudman Oceanographic Laboratory

PPR : Plans de Prévention des Risques naturels prévisibles

PSMSL : Permanent Service for Mean Sea Level (Service permanent pour le niveau moyen des mers)

RAF09 : Référence Altimétrique Française 2009

REFMAR : Réseaux de rÉFérence des observations MARégraphiques

RGF93 : Réseau Géodésique Français 1993

RGP : Réseau national GNSS Permanent

rms : root mean square (écart quadratique moyen)

RONIM : Réseau d'Observation du NiveaU de la Mer

ROSAME : Réseau d'Observation Subantarctique et Antarctique du niveau de la MEr

SHC : Service Hydrographique du Canada

SHD : Service Historique de la Défense

SHOM : Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

SL : Sea Level (Niveau marin)

SLP : Sea Level Pressure (P_{mer} : Pression atmosphérique rapportée au niveau de la mer)

SONEL : Système d'Observation des variations du Niveau de la mEr à Long terme (à l'origine : Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales)

SPC-LA : Service de Prévision des Crues - Littoral Atlantique

TAI : Temps Atomique International

TC : Temps Civil (de Paris)

TG : Tide Gauge (Marégraphe)

TSM : Temps Solaire Moyen

TSV : Temps Solaire Vrai

TU : Temps Universel (UT en anglais)

TUC : Temps Universel Coordonné (UTC en anglais)

UHSLC : University of Hawaii Sea Level Center (Centre du niveau de la mer de l'université de Hawaï)

ULR : Université de La Rochelle

UMR : Unité Mixte de Recherche

UNESCO : United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

WGS84 : World Geodetic System 1984 (Système de référence terrestre utilisé par le GNSS)

WMO : World Meteorological Organization (Organisation mondiale de la météorologie)

INTRODUCTION

D'après Simon [2007a], le terme de marégraphie se rapporte, par son étymologie, à la description du phénomène de marée et aux instruments qui, par leurs mesures, en ont permis une meilleure connaissance. Mais cette définition de la marégraphie peut être étendue aux autres phénomènes qui affectent le niveau de la mer, et par lequel on peut les étudier : variations climatiques, variations décennales et interannuelles, grands courants océaniques, effets saisonniers, ondes de tempête, ou encore tsunamis et seiches, etc [Wöppelmann, 2007]. Les champs de recherche utilisant la marégraphie sont ainsi nombreux : océanographie, géodésie, géographie physique, changement climatique, ingénierie côtière et socio-économie des littoraux [Woodworth, 2006].

D'après la Commission Océanographique Intergouvernementale de l'UNESCO [1985], « *le fondement de toute analyse scientifique du niveau de la mer repose sur de longues séries de mesures très soigneuses* ». Or, les deux seules séries marégraphiques françaises à disposition de la communauté scientifique, dont la durée effective de mesures est supérieure au siècle, sont Brest et Marseille. Loin d'être des cas isolés, ces deux séries pourraient potentiellement être accompagnées par d'autres séries françaises, comme l'a révélé un inventaire récent des séries marégraphiques contenues dans les centres d'archive [Pouvreau, 2008]. Cet inventaire a notamment mis en lumière plusieurs lots de mesure d'importance sur le littoral charentais, et notamment : La Rochelle-Vieux port (1775 ; 1824 ; 1863-1874 ; 1887-1892), île d'Aix (1824), fort Enet (1859-1873), fort Boyard (1873-1909), Cordouan (1812 ;... ; 1994), etc. Dans le contexte actuel d'élévation globale du niveau moyen des mers, il paraît donc très intéressant de numériser ces lots de mesure

D'après Woodworth *et al.* [2011a], les études des changements à long terme du niveau moyen de la mer ne peuvent être réalisées sans posséder des jeux de données de grande qualité. De plus, ils indiquent que de nombreux efforts restent encore à produire par la communauté scientifique internationale dans la sauvegarde, la numérisation et l'exploitation de données historiques archivées (exercice de « *data archaeology* », expression consacrée par Woodworth).

Cet effort correspond à l'un des objectifs de ces travaux de recherche : l'inventaire, la sauvegarde, la numérisation, le contrôle qualité et l'exploitation de lots de mesures historiques du niveau marin sur le littoral charentais. L'objectif principal initial de la thèse était la construction d'une série temporelle de la rade de l'île d'Aix à partir des jeux de données d'Aix, Enet et Boyard. L'ambition d'un travail de référence aussi exhaustif que possible nous a également conduit à construire deux autres séries temporelles : celle de la rade de La Rochelle à partir des lots de mesures du Vieux port et de La Pallice ; et celle du phare de Cordouan. Ces nouveaux résultats nous ont amené à définir par la suite un nouvel objectif, plus ambitieux : la reconstruction d'une série composite du pertuis d'Antioche à partir des séries

des rades de La Rochelle et de l'île d'Aix. Ces reconstructions achevées, avec le plus grand soin possible, nous ont ensuite permis d'étudier les variations des composantes du niveau marin sur le littoral charentais : niveau moyen, ondes de marée et effets météorologiques.

Ce manuscrit de thèse est découpé en six chapitres, dont une brève description est donnée ci-dessous.

Le **chapitre I** vise à définir et mieux appréhender les différentes notions qui sont utilisées au cours de ces travaux de recherche. Nous présentons d'abord la notion de mesure du niveau de la mer : pourquoi le mesurer, comment le mesurer et quels sont les signaux contenus dans sa mesure par marégraphie ? Puis nous décrivons les niveaux moyens de la mer et de la marée utiles à ces travaux, avant d'aborder la notion de référence verticale : par rapport à quelle référence est mesuré le niveau de la mer et comment contrôler la continuité et la stabilité de la réalisation de cette référence ? Le chapitre I se termine par une revue non-exhaustive des données utiles à l'étude des variations du niveau marin ainsi qu'aux bases de données les hébergeant, et une présentation de plusieurs réseaux importants d'observation du niveau de la mer.

Le **chapitre II** a pour ambition de présenter un cadre général de l'étude des variations du niveau marin. Comment se traduit la variabilité spatiale et temporelle du niveau de la mer ? Quelles sont les variations estimées depuis un peu moins d'un million d'année ? Ces questions sont brièvement discutées, car elles ont pour objet de donner le contexte, et une revue des tendances de l'élévation du niveau de la mer sur le dernier siècle est présentée. Puis nous expliquons que les séries marégraphiques longues, indispensables pour estimer une évolution séculaire du niveau marin, sont plutôt rares et notamment en France, alors qu'un patrimoine historique à fort potentiel scientifique sommeille dans les centres d'archive français.

Le **chapitre III** dresse le contexte de notre zone d'étude : le littoral charentais. Tout d'abord, compte-tenu de la période étudiée (1775-2011), un bref contexte historique hydrographique et météorologique est présenté, avant de s'intéresser aux contextes géographique, géologique, hydrologique, hydrodynamique, météorologique et paléo-océanographique.

Le **chapitre IV** offre une synthèse détaillée des recherches documentaires effectuées dans les centres d'archive français. Les résultats sont regroupés en trois zones : la rade de La Rochelle, la rade de l'île d'Aix et le phare de Cordouan. L'objectif du chapitre est de présenter un grand nombre d'informations historiques utiles à la construction des séries temporelles, présentée au chapitre V. Une analyse de cette documentation historique, avec son lot de résultats intermédiaires utiles, voire indispensables, pour la construction effective des séries temporelles est également présenté. On y trouve

aussi un inventaire précis des mesures, historiques et actuelles, du niveau de la mer effectuées en Charente-Maritime.

Le **chapitre V** regroupe plusieurs exercices de construction de séries temporelles à partir de jeux de données hétérogènes, temporellement et spatialement. Les séries temporelles construites sont des séries de pression atmosphérique rapportée au niveau de la mer (Brest, La Rochelle et Enet-Boyard), et des séries du niveau marin (La Rochelle, Aix-Enet-Boyard et Cordouan). De multiples analyses sont réalisées afin d'évaluer la qualité des nouvelles séries et d'estimer le niveau de précision de nos reconstructions.

Le **chapitre VI** présente l'étude de quelques composantes du niveau de la mer : ondes de marée, niveaux marins moyens et effets météorologiques. Le but est de déterminer les tendances de ces composantes sur des périodes comprises entre 1775 et 2010 et de les comparer à d'autres résultats de la littérature.

Pour finir, la **discussion générale** est consacrée à la question de la possibilité de construire une série composite du niveau marin du pertuis d'Antioche, à partir des séries temporelles de La Rochelle et d'Aix-Enet-Boyard. La tendance de l'élévation du niveau marin dans le pertuis d'Antioche (de 1860 à 2010) est ensuite estimée et le résultat est replacé dans le contexte européen et mondial. Le cas de l'énigme Brest-Newlyn, évoqué au chapitre II, est également abordé : que peuvent apporter nos séries temporelles inédites pour contribuer à ce débat ?

A noter que plusieurs extraits d'écrits et d'imprimés historiques ont été retranscrits dans le manuscrit de thèse et dans celui des annexes. Nous avons choisi de retranscrire le plus fidèlement possible ces textes, en respectant la ponctuation utilisée, les fautes d'orthographe commises et le langage de l'époque.

CHAPITRE I - OBSERVATION DU NIVEAU MARIN :

GENERALITES

I.1. Mesures du niveau de la mer

I.1.1. Pourquoi mesurer le niveau de la mer ?

Le niveau de la mer est une grandeur observée depuis plusieurs siècles déjà. En effet, dans de nombreux pays, les peuples anciens étaient capables de relier les mouvements réguliers de la mer à ceux de la Lune et du Soleil. Mais il fallut attendre 1679 pour que les premières mesures systématiques soient publiées, à Brest puis à Nantes, par Jean-Félix Picard et Philippe de La Hire [Picard & De La Hire, 1729]. D'autres études suivirent et les mécanismes de génération de la marée ont ainsi pu être décrits et sont maintenant globalement bien connus depuis de très nombreuses années [e.g. Cartwright, 1999], même si quelques points restent encore à éclaircir [e.g. Woodworth, 2010]. Mais alors, pourquoi continuer à mesurer le niveau de la mer ?

Tout d'abord, rappelons que parmi les premières demandes d'information sur la hauteur de la mer sont venues des besoins de la navigation côtière et de l'accès dans les ports à fort marnage [e.g. Simon, 2007a]. Ensuite, parmi les principales applications, nous retrouvons, pêle-mêle, l'élaboration des cartes marines (correction de la marée sur les sondages bathymétriques), la prédiction de la marée pour la réalisation des annuaires de marée (besoin de mesures de qualité sur au moins un an) [e.g. Chazallon, 1839], ainsi que d'autres applications plus récentes, telles que l'amélioration des modèles de marée dans les zones côtières complexes (par exemple, par petits fonds [e.g. Nicolle & Karpytchev, 2007]), la mise en place de réseaux de prévision, de vigilance et d'alerte pour les événements extrêmes naturels (e.g. ondes de tempêtes et tsunamis [e.g. Courteau, 2007], ou mise en place de la nouvelle vigilance « vagues-submersion » fin octobre 2011), le contrôle et la validation des mesures des altimètres radars embarqués sur satellite [e.g. Chambers *et al.*, 1998; Leuliette *et al.*, 2004]. De même, les études portant sur l'aménagement des infrastructures portuaires, des ouvrages côtiers, des plates-formes pétrolières ou encore l'établissement de Plans de Prévention des Risques naturels prévisibles (PPR) ont en commun le besoin de connaître les niveaux maximum et/ou minimum susceptibles d'être atteints par la mer sur de très longues périodes (le siècle si possible) [e.g. Simon, 2008]. La mesure du niveau marin permet également d'étudier les effets météo-océaniques et climatiques [Tomasin & Pirazzoli, 2008]. Le niveau de la mer intègre en effet la signature de processus physiques étroitement interdépendants comme la densité

de l'eau (fonction de la température et de la salinité), les courants locaux autres que la marée, les fluctuations de la circulation océanique, les vagues, la pression atmosphérique ou le vent, par exemple. La mesure du niveau marin peut donc apporter une contribution à l'étude de chacun de ces processus.

Enfin, le niveau moyen de la mer est un indicateur indirect, mais important, des changements climatiques et de leurs processus associés, tels que la fonte des glaces (glaciers terrestres et calottes glaciaires), l'expansion thermique des océans et les modifications des gradients relatifs à la surface de la mer, en fonction des variations des courants résultant de l'équilibre géostrophique [Church *et al.*, 2008]. Cette importance est renforcée par l'impact direct de tels changements climatiques sur les populations côtières [Nicholls & Cazenave, 2010]. C'est pourquoi, aujourd'hui encore, il est très important de continuer à mesurer le niveau de la mer.

I.1.2. Evolution des techniques de mesures

I.1.2.1 Echelle de marée

L'échelle de marée est l'outil le plus ancien utilisé pour mesurer le niveau de la mer. Les premières mesures à l'aide d'une échelle de marée graduée ont en effet été publiées dans la deuxième moitié du 17^e siècle [Cartwright, 1999]. En France, parmi les plus anciennes, on trouve les mesures de pleines et basses mers diurnes effectuées à Brest de 1711 à 1717, qui ont servi à Laplace pour élaborer sa théorie dynamique de la marée [Simon, 2007a]. Aujourd'hui, l'échelle de marée est un élément indispensable d'un observatoire du niveau de la mer, selon les normes définies par le Bureau Hydrographique International (BHI), car elle constitue le seul moyen permettant de faire une lecture directe du niveau de la mer par observation à l'œil nu [UNESCO, 1985]. Son but premier est désormais le contrôle et l'étalonnage des marégraphes, c'est pourquoi il est nécessaire d'installer l'échelle à proximité directe du marégraphe, de préférence dans un lieu abrité de la houle et qui ne risque pas la destruction.

L'échelle de marée est normalement constituée par une perche graduée fixée verticalement sur un support rigide (en général, un quai) et dont l'intervalle entre le minimum et le maximum est au moins égal à la plus forte amplitude de marée à laquelle on peut s'attendre. Le matériau de construction utilisé doit être indéformable, résister à la corrosion et être facile à nettoyer, afin d'assurer une bonne lecture des graduations. Aujourd'hui fréquemment en plastique, ces échelles ont pu être, par le passé, en bois, en lave émaillée, ou même directement gravée dans le quai, comme en témoigne l'échelle gravée retrouvée à La Rochelle (*figure I-1a*). D'après Simon [2007a], l'ajustement du zéro de l'échelle au niveau du zéro hydrographique est recommandé, afin d'éviter toute mauvaise interprétation. Autrefois graduée en Pieds et en pouces, les graduations des échelles actuelles répondent au système métrique (*figure I-1b*). Dernier point, mais fondamental, la cote de l'échelle de marée doit être établie par rapport à un minimum de trois

repères fixes à terre (appelés repères de marée). L'emplacement de ces repères doit être choisi judicieusement : ils ne doivent pas être trop proches les uns des autres, afin d'éviter une destruction simultanée. L'un des repères (souvent celui offrant les meilleurs garanties de pérennité) est alors choisi comme le repère fondamental de l'observatoire [Simon, 2007a].

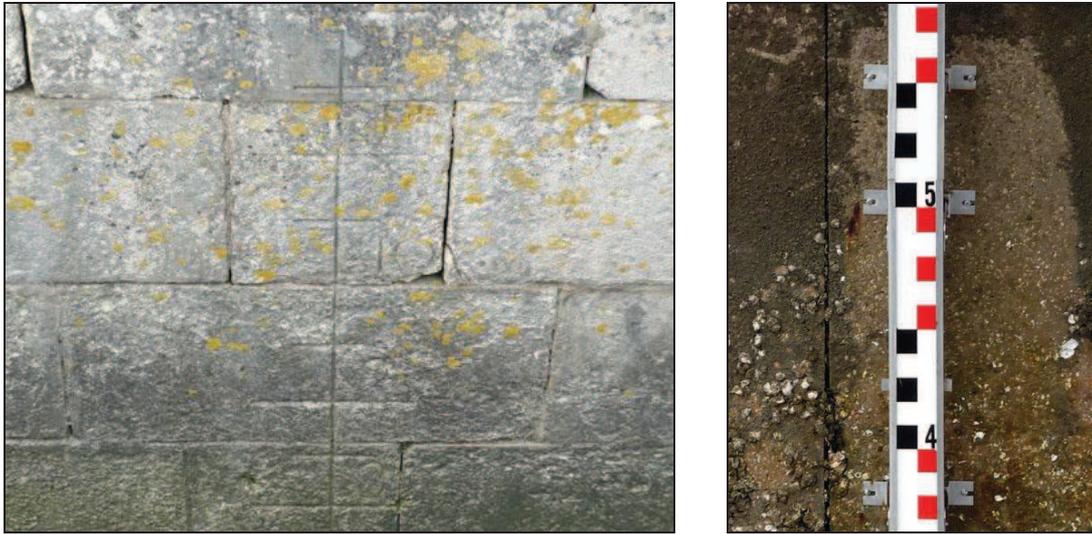


Figure I-1 : (a) échelle de marée en pieds et en pouces gravée dans le mur du quai de la porte des Deux-Moulins (La Rochelle, 2010 ; la photo est centrée sur la graduation 10 Pieds) ; (b) type d'échelle de marée utilisée actuellement en France par le SHOM : les carrés rouges et noirs ont 10 cm de côté.

I.1.2.2. Marégraphe

I.1.2.2.1. Puits de tranquillisation

Un puits de tranquillisation consiste en un puits ou un tube placé verticalement dans l'eau et dont la longueur est suffisante pour couvrir l'étendue du plus grand marnage observable sur le site d'installation. Le fond du puits est fermé à l'exception d'une petite ouverture qui permet à l'eau d'entrer et de sortir (*figure I-2*), tandis que le sommet du puits est ouvert. Il existe deux types principaux de puits : avec une petite ouverture directement sur la mer (par exemple : fort Boyard), ou avec un long tube d'admission reliant le puits à la mer (fort Enet). Dans tous les cas, le rôle du puits est d'amortir les perturbations de haute fréquence, telles que la houle, le clapot ou les seiches (oscillations de niveaux des bassins portuaires ou des baies). Cependant, le filtrage des signaux haute fréquence réalisé par le puits n'est pas linéaire et introduit donc certaines erreurs [Lennon, 1993].

Outre l'erreur intrinsèque liée à la nature de la réponse du système hydraulique que représente le puits de tranquillisation, les erreurs de mesures peuvent avoir plusieurs origines. L'accumulation de vase ou de sable et la présence d'organismes marins provoquent un rétrécissement de l'ouverture se traduisant initialement par un déphasage de la marée, sans modification sensible de son amplitude [Simon, 2007a].

La différence de densité de l'eau entre l'intérieur et l'extérieur du puits est également une autre source d'erreur : si la densité de l'eau contenue dans le puits est plus élevée, alors son niveau sera plus bas qu'à l'extérieur. Ce cas peut se produire à proximité de l'embouchure des estuaires, lorsque la température et la salinité de l'eau varient de façon importante au cours d'un cycle de marée, ou encore lors de la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique sur les parois de puits profonds et de grands diamètres. Dernière erreur courante, la présence de courants à proximité immédiate du puits. En effet, l'eau qui s'écoule au voisinage de l'ouverture du puits provoquera une diminution locale de la pression et réduira le niveau d'eau à l'intérieur du puits, par effet Venturi. Cet effet commence à s'observer lorsque la vitesse des courants est supérieure à $0,7 \text{ m.s}^{-1}$ environ. Ces différentes erreurs sont généralement peu importantes dans les lieux à fort marnage, voire même négligeables selon l'application visée [Simon, 2007a].

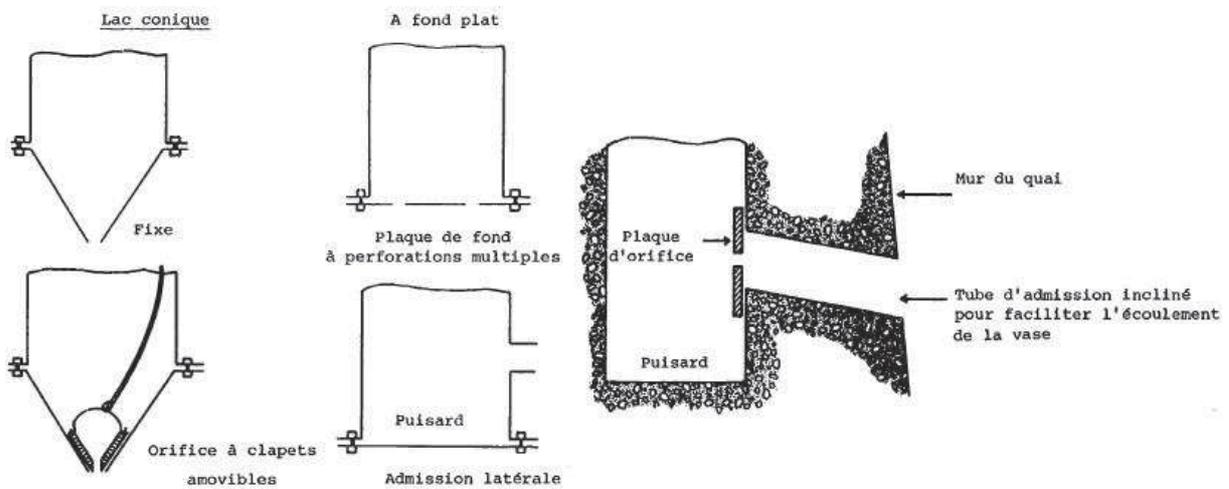


Figure I-2 : Différents systèmes d'admission d'un puits de tranquillisation [UNESCO, 1985].

Le puits de tranquillisation était l'un des éléments indispensables d'un observatoire marégraphique il y a encore peu de temps. Dès la mise en place des premiers marégraphes, Chazallon explique la nécessité de construire ce type de puits en 1844, dans l'annuaire des marées : « *Concevons un puits mis en communication avec la mer ; plaçons-y un flotteur armé d'une longue tige verticale faisant corps avec lui et portant à son extrémité supérieure un crayon horizontal. Alors, à mesure que la mer s'élèvera ou s'abaissera à l'extérieur, elle s'élèvera ou s'abaissera également à l'intérieur du puits...* ». L'UNESCO [1985] recommande également l'installation d'un puits pour tout nouvel observatoire du niveau de la mer, en respectant certaines règles :

- la profondeur de l'eau doit être au moins 2 m en dessous du niveau des plus basses mers astronomiques
- l'orifice du puits doit être nettement au-dessus du fond de la mer

Aujourd'hui, selon le choix de la technologie employée, les puits de tranquillisation ne sont plus forcément une nécessité, répondant ainsi à une avancée technologique des marégraphes à capteur radar à air libre, mais également à la volonté d'enregistrer les signaux haute fréquence pour établir un système d'alerte aux ondes de tempêtes ou aux tsunamis.

I.1.2.2.2. Marégraphe à flotteur

Le marégraphe à flotteur est un marégraphe mécanique à enregistrement automatique dont l'invention est attribuée à un ingénieur anglais, Henry Palmer, en 1831 [Palmer, 1831]. Son prototype a été installé à Sheerness (Angleterre), mais n'a été utilisé que ponctuellement. Des sources écrites [Le Chatelier, 1849] indiquent qu'un dispositif similaire avait déjà été utilisé ponctuellement à Cherbourg, avant celui de Sheerness. En France, c'est l'ingénieur hydrographe Chazallon qui a mis au point le premier marégraphe à flotteur opérationnel pour des observations de longue durée entre 1840 et 1844 [Pouvreau, 2008]. Il obtiendra la médaille d'argent de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale en 1850 pour cette invention. L'implantation de ces premiers marégraphes sur le littoral français contribua à la réalisation du premier réseau d'observation systématique du niveau marin. En 1859, il en existait une dizaine sur le littoral français¹.

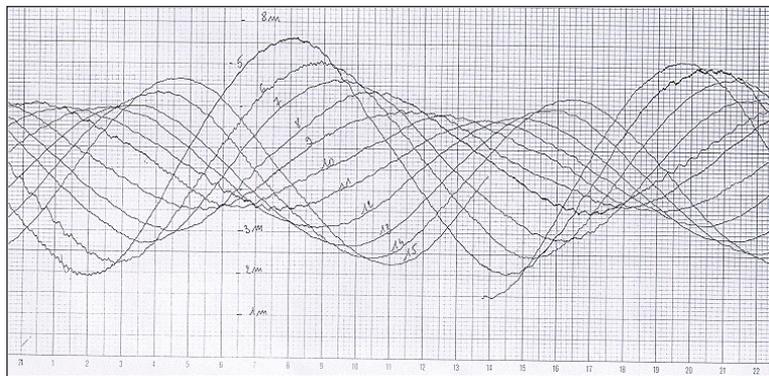


Figure I-3 : Exemple de marégramme à Brest (source : SHOM).

Le principe de mesure est simple : un stylet assure le tracé du niveau marin sur une feuille quadrillée (appelée marégramme², *figure I-3*), qui est enroulée sur un tambour enregistreur dont la rotation est réglée par une horloge (*figure I-4*). Les variations du niveau marin sont alors transmises par un fil reliant le flotteur situé dans le puits de tranquillisation au tambour enregistreur. Dans un environnement semi-diurne, tel que le littoral charentais, les marégrammes peuvent enregistrer jusqu'à 15 jours de mesure, en conservant une bonne lisibilité, en raison du décalage de la marée d'environ 50 minutes par jour. Afin de protéger le marégraphe des conditions météorologiques extrêmes, l'appareil est généralement situé dans un bâtiment ou un abri. C'était par exemple le cas à La Rochelle (1863-1874) ou au fort Boyard (1873-1909). Au fort Enet, nous verrons que l'abri du marégraphe était soumis à rude épreuve lors des tempêtes et que l'appareil subissait parfois les assauts de la houle, ou la pluie. Afin d'éviter au maximum les frottements, il est également recommandé d'installer le marégraphe directement au-dessus du puits (*figure I-4*), lorsque cela est possible (comme au fort Enet par exemple). Au fort Boyard, cela était impossible, et de nombreux jeux de poulies étaient nécessaires pour relier le flotteur au tambour enregistreur.

¹ « Lettre à l'Ingénieur en Chef », Chazallon, le 30 décembre 1859. Archives du SHOM

² Graphe de la hauteur de la mer en fonction du temps.

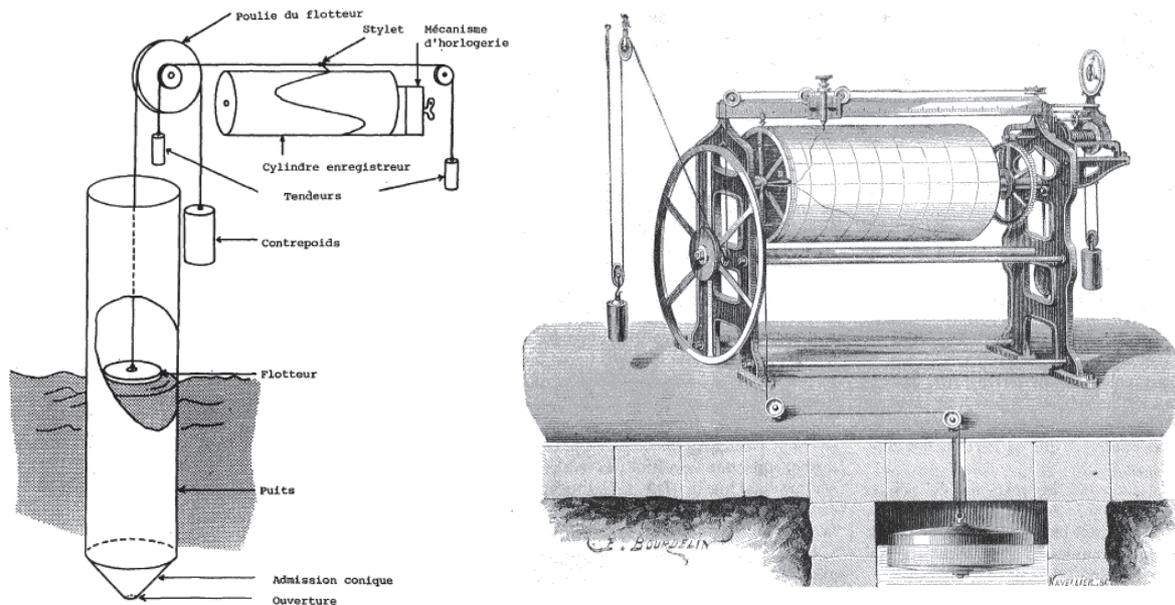


Figure I-4 : A gauche : schéma du principe de fonctionnement d'un marégraphe à flotteur [UNESCO, 1985] ; à droite : vue d'artiste d'un marégraphe à flotteur (1875, source : <http://cnum.cnam.fr/>, consulté le 1/12/11).

Le marégraphe de Chazallon (*figure I-5*), construit par Wagner [Le Chatelier, 1849], est composé :

1. d'un cylindre horizontal en métal, sur lequel on enroule un marégramme.
2. d'un mécanisme d'horlogerie qui fait tourner le cylindre.
3. d'une forte règle correspondant à l'arête supérieure du cylindre, et sur laquelle roule un chariot
4. du chariot qui porte le stylet traceur (pointe sèche, rigide dans le sens horizontal).
5. d'un flotteur placé dans un puits de tranquillisation.
6. de deux poulies, dont l'une reçoit le fil auquel est suspendu le flotteur, et dont l'autre, réduite, porte un fil qui fait courir le chariot sur son support.

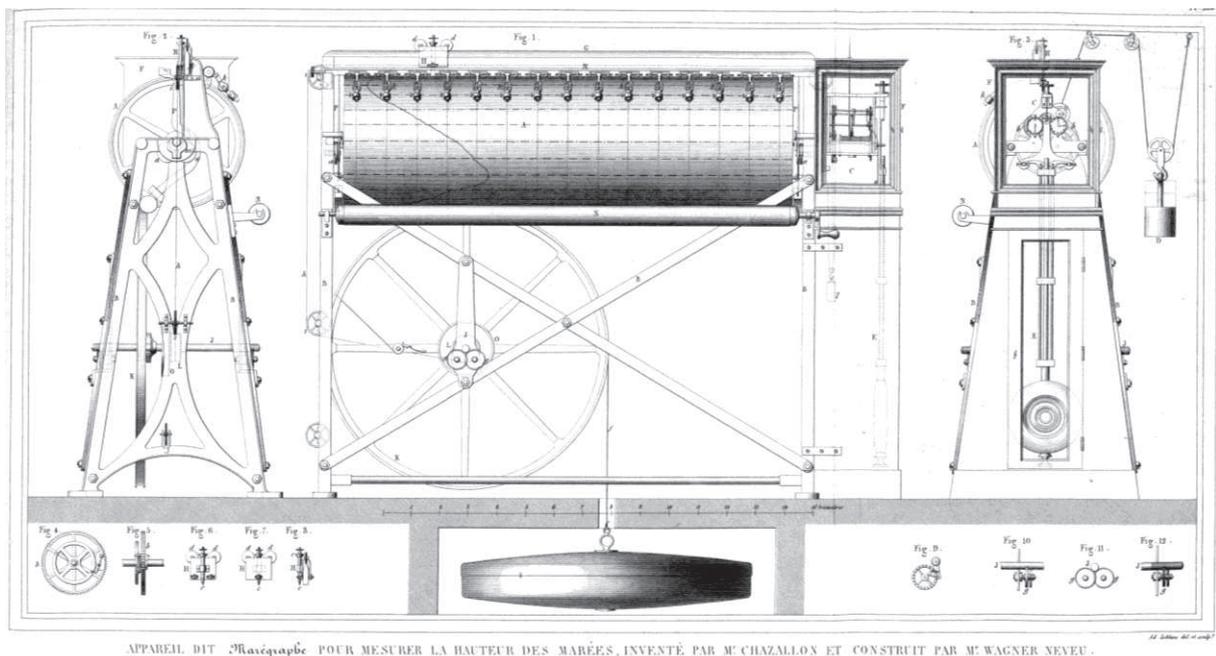


Figure I-5 : Marégraphe à flotteur inventé par Chazallon (source : <http://cnum.cnam.fr/>, consulté le 1/12/11).

Diverses erreurs, d'origine différente, peuvent affecter l'enregistrement du niveau de la mer à l'aide d'un marégraphe à flotteur [Simon, 2007a] :

- Sur la mesure de la hauteur : mauvais calage vertical du marégraphe après son remplacement, variations de l'échelle de hauteur de la feuille sous l'effet de l'humidité ou de la température.
- Sur la mesure du temps : mauvais calage horizontal du marégraphe après son remplacement, feuille non conforme au diamètre du tambour, retard ou avance de l'horloge, variation de la vitesse de rotation du tambour liée aux défauts des engrenages d'entraînement.

Malgré ces nombreuses erreurs possibles, les marégraphes à flotteur (modernisés) sont encore très courants. Selon une enquête menée en 1983 par le Service Permanent pour le Niveau Moyen des Mers (PSMSL), 90% des marégraphes mondiaux étaient de ce type cette année-là [UNESCO, 1983]. Actuellement, cette situation tend à s'inverser avec l'apparition de nouveaux appareils, que nous décrivons succinctement ci-après.

I.1.2.2.3. Marégraphe à capteur de pression

Le premier appareil permettant d'enregistrer les variations de pression en eau profonde fut mis au point à la fin du 19^e siècle [Cartwright, 1999], mais il fallut attendre 1964 pour que ce type d'appareil fournisse des résultats fiables [Eyries, 1968]. La principale motivation de la construction de ce type de marégraphe était la possibilité de pouvoir mesurer les variations du niveau marin au large, contrairement aux marégraphes à flotteur, limités à la côte. Il existe différents types de marégraphes à capteur de pression : marégraphe pneumatique (phare de Cordouan, par exemple), à jauges de contrainte et à quartz piézoélectrique ; tous sont immergés. Ce type de marégraphe est particulièrement adapté aux sites dépourvus d'infrastructures importantes, ou encore, aux observatoires qui sont soumis à des conditions environnementales difficiles. Le principe de fonctionnement est simple : le marégraphe utilise la relation entre la hauteur d'eau et la pression hydrostatique correspondante. Il mesure la pression exercée par la colonne d'eau et par l'atmosphère au-dessus du point de mesure immergé, et on obtient ensuite la valeur de la hauteur d'eau H au dessus de la référence interne du marégraphe, à l'aide de l'équation :

$$H = \frac{P_{\text{mesurée}} - P_{\text{atmosphérique}}}{\rho \cdot g} \quad (1.1)$$

Avec ρ : la densité de l'eau de mer et g : l'accélération de la pesanteur.

I.1.2.2.4. Marégraphes à sonde aérienne

Les marégraphes à sonde aérienne sont de deux types : ultrasonique (ou acoustique) et radar (ou électromagnétique). Le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) appelle ce type d'appareil, des Marégraphes Côtiers Numériques (MCN). Le principe de mesure de ces marégraphes est fondé sur la mesure du temps de parcours aller-retour d'une onde (acoustique ou électromagnétique)

émise par un transducteur au-dessus de la surface de l'eau et réfléchi par cette dernière. La connaissance de la vitesse de propagation de l'onde dans l'atmosphère permet alors de convertir la mesure de temps en mesure de distance.

Les marégraphes ultrasoniques étaient couramment utilisés dans les années 1980 car ils représentaient un bon compromis entre la qualité de la mesure du niveau marin et le coût global (acquisition, exploitation et maintenance) sur une vingtaine d'années. Mais ils présentent au moins deux défauts : un puits de tranquillisation est nécessaire pour augmenter leur durée de vie et optimiser la mesure ; les variations de température dans le puits entraînent des erreurs non-négligeables sur la mesure du niveau de la mer [UNESCO, 2003]. Les marégraphes radar sont donc actuellement en train de remplacer les marégraphes ultrasoniques, en France [Le Roy, 2006]. En effet, contrairement aux ultrasoniques, les marégraphes radar sont indépendants des conditions environnementales sur de petites distances, suffisantes pour mesurer le niveau d'eau [Kranz *et al.*, 2001]. De plus, les derniers marégraphes radars développés sont des capteurs à air libre permettant de s'affranchir d'un puits de tranquillisation (*figure I-6*) [Woodworth & Smith, 2003]. Le choix du lieu d'installation n'est donc plus limité par la présence d'un puits et ce critère répond également au besoin d'enregistrer les variations hautes fréquences pour la mise en place de réseaux d'alerte aux ondes de tempêtes ou aux tsunamis.



Figure I-6 : Marégraphe radar à air libre, sans puits de tranquillisation. Île d'Aix, 2011.

I.1.2.2.5 Test de Van de Castele

Le 26 juin 1962, Charles Van de Castele, ingénieur en chef géographe de l'Institut Géographique National (IGN), exposa une méthode expérimentale qu'il venait d'inventer pour juger de la qualité et du bon fonctionnement d'un marégraphe [Wöppelmann, 1997]. Très vite, cette méthode fut employée par de nombreux pays et la Commission Océanographique Intergouvernementale (COI) de l'UNESCO [1985] la recommande dans son manuel sur la mesure et l'interprétation du niveau de la mer.

Selon Van de Castele [1962], la qualité et la marche d'un marégraphe peuvent être appréciées seulement de manière expérimentale. Le test s'appuie sur la comparaison, pendant un cycle de marée complet, des mesures simultanées du marégraphe et d'un outil de mesure indépendant mis en place pour le test (généralement une sonde lumineuse, parfois une échelle de marée). La différence des valeurs doit rester, en théorie, constante et égale à zéro si le marégraphe est « parfait », autrement dit, s'il est bien réglé. En pratique, ce cas est rarement détecté et la forme du diagramme réalisé à l'aide des résultats du test permet de repérer le type de défaut du marégraphe. Pour construire ce diagramme, il faut porter en abscisses les différences entre le marégraphe et la sonde lumineuse, et en ordonnée la hauteur d'eau de l'étalon (sonde lumineuse). La *figure I-7* présente l'allure caractéristique de quelques défauts typiques du marégraphe à flotteur : jeu dans le mécanisme du marégraphe, frottements (mécanisme du marégraphe ou flotteur), erreur d'échelle (diamètre du fil ou rapport d'engrenage), erreur d'échelle sur une partie de la plage de mesure et décalage dans les mécanismes du marégraphe.

A noter que ce test, prévu initialement pour s'appliquer aux marégraphes mécaniques à flotteur peut également s'adapter au contrôle des marégraphes modernes, comme le montrent Martin Miguez *et al.* [2008b].

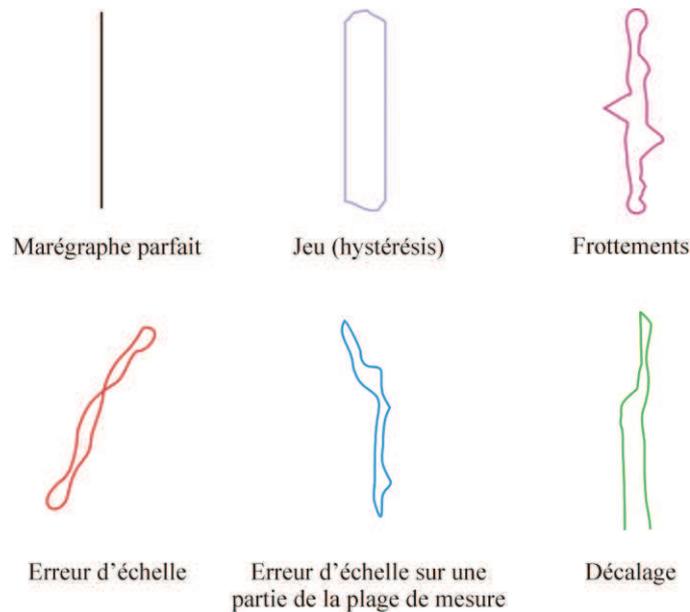


Figure I-7 : Interprétation des diagrammes du test de Van de Castele (SHOM, adapté de l'UNESCO [1985b]).

I.1.2.3. Altimètre radar embarqué sur satellite

La mesure du niveau de la mer par un altimètre radar embarqué sur satellite repose sur le même principe que ceux des marégraphes à sonde aérienne. La mesure de la distance verticale entre le satellite et la surface de la mer s'établit en mesurant le temps de parcours vertical aller-retour de l'impulsion électromagnétique émise par le radar embarqué et réfléchi par la mer. Cependant, ici, la distance parcourue par l'onde est beaucoup plus importante (de l'ordre de 2 000 km) et elle traverse des

environnements différents, tels que la troposphère ou l'ionosphère. Il est donc nécessaire d'apporter des corrections environnementales relatives aux effets troposphériques (secs et humides) et ionosphérique sur la propagation de cette impulsion.

D'autres corrections sont également apportées : instrumentales (dépointage, effet Doppler, biais, etc.), géophysiques (marée, géoïde, vents, etc.), corrections de biais (d'obliquité et électromagnétique) [Fu & Cazenave, 2001]. En réalité donc, les mesures altimétriques ne sont pas le produit d'un simple instrument, mais le résultat d'un système de mesure complexe constitué de quatre composantes principales :

1. la mesure du temps de parcours de l'onde radar
2. le positionnement précis du satellite dans un référentiel terrestre
3. la connaissance de l'indice de réfraction de l'atmosphère qui affecte la durée de propagation
4. l'état de la mer sur une zone de plusieurs kilomètres

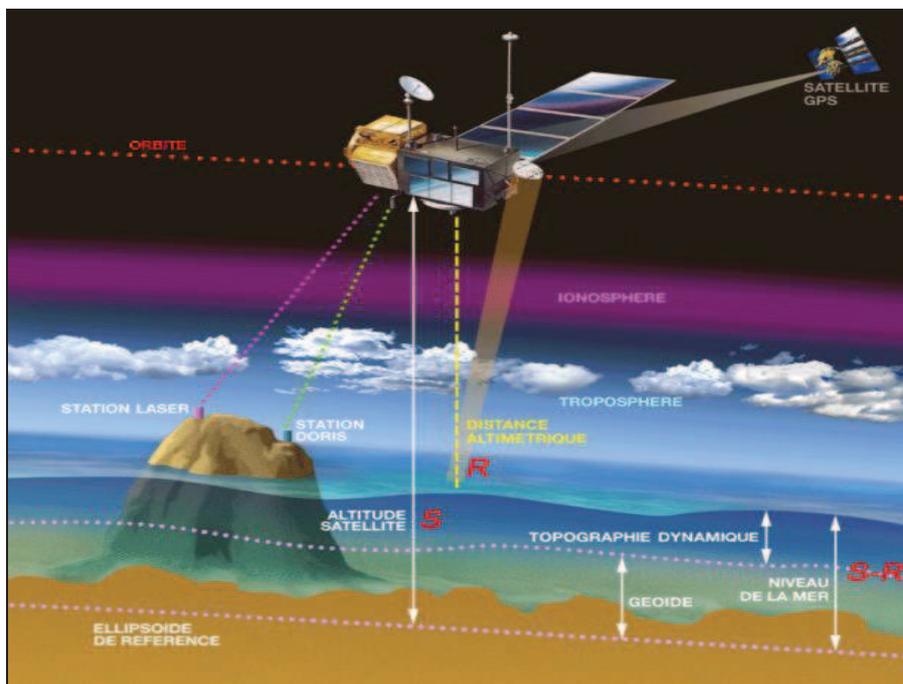


Figure I-8 : Schéma du principe de mesure du niveau marin par altimétrie satellitale (source : <http://www.avisioceanobs.com/>, consulté le 1^{er} décembre 2011).

I.1.2.4. Bouée GNSS

Les premières bouées GNSS sont apparues au début des années 1990 [Hein *et al.*, 1992]. L'objectif premier de la mesure de la surface libre de l'eau de mer était la calibration des altimètres radar embarqués sur satellite. Au début des années 2000, les bouées GNSS ont été utilisées avec succès lors des campagnes de calibrage et de validation des satellites Jason 1 et ENVISAT [Watson *et al.*, 2004].



Figure I-9 : Exemple de bouée GNSS simple [Calzas et al., 2010].

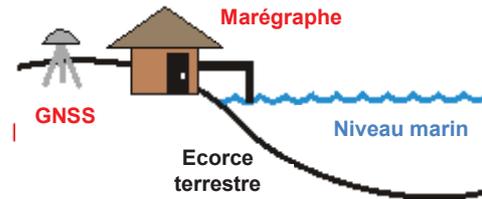
Selon l'application recherchée, les conditions logistiques, et l'état de mer, différents types de bouées GNSS sont utilisées. Les bouées les plus simples sont uniquement équipées d'une antenne GNSS (*figure I-9*), et peuvent être remorquées par un navire. D'autres bouées, plus grandes et contenant plus d'instruments de mesures existent, comme la récente bouée mise au point en 2010 par l'Institut National des Sciences de l'Univers (INSU, *figure I-10*). Selon de récentes études [e.g. Calzas *et al.*, 2010; Testut *et al.*, 2010a], le système de bouée GNSS est capable d'observer le niveau de la mer avec une précision comparable à celle d'un très bon capteur de pression, c'est-à-dire, de l'ordre du centimètre [Martin Miguez *et al.*, in press]. L'amélioration des traitements GNSS et des méthodes de filtrage des données hautes fréquences de la bouée permettront à la fois d'améliorer la précision et l'exactitude de la mesure, mais aussi d'obtenir des informations pertinentes sur le contenu haute fréquence (de la seconde à la minute) du niveau marin.



Figure I-10 : Bouée GNSS mise au point par l'Institut National des Sciences de l'Univers [Calzas et al., 2010].

I.1.3. Signaux contenus dans l'enregistrement marégraphique

Le niveau de la mer à la côte est facilement mesurable mais difficile à interpréter en raison des nombreux facteurs l'influençant, locaux ou globaux, et intervenant à des échelles de temps différentes. De même, l'écorce terrestre peut subir des mouvements verticaux qu'il est important de prendre en compte, comme le montre le schéma simplifié ci-dessous.



Ce schéma montre comment un marégraphe, installé solidement à la côte, est solidaire des mouvements de l'écorce terrestre. Le marégraphe mesure des variations de la surface du niveau de la mer relatives à sa position sur la terre. Ainsi, si l'écorce terrestre s'abaisse ou si la surface de la mer s'élève, le marégraphe mesurera une élévation du niveau de la mer. Et inversement. Par conséquent, ces deux effets ne peuvent pas être séparés avec les seules données marégraphiques. Or il est nécessaire de prendre en compte les mouvements verticaux terrestres lorsqu'on utilise des mesures marégraphiques pour évaluer les effets du changement du climat océanique sur le niveau marin à la côte.

I.1.3.1. Variations du niveau marin

Les signaux des variations du niveau marin contenus dans les enregistrements marégraphiques peuvent avoir plusieurs origines : climatique (*e.g.* variations de densité et de la masse d'eau des océans), astronomique (variations de la marée), météorologique (*e.g.* ondes de tempête), sismique (*e.g.* tsunamis), etc. Les principaux signaux sont présentés ici succinctement.

I.1.3.1.1. Climatique

Les variations à long terme du niveau moyen global de la mer sont principalement d'origine climatique et s'expliquent en partie par des changements de la densité des océans (par effets de la dilatation thermique ou de la contraction du volume des océans) et par des échanges d'eau entre les océans et d'autres réservoirs (*e.g.* calottes glaciaires, glaciers de montagne, réservoirs d'eau dans le sol et l'atmosphère) modifiant ainsi la masse de l'océan. Une variation de densité en raison des changements de température et de salinité peut également provoquer des changements régionaux du niveau de la mer.

- *Variations de la densité des océans*

Le changement de la densité de l'eau de mer causé par une variation de la température et de la salinité s'appelle l'effet stérique et a des conséquences sur le volume des océans, et par conséquent sur le niveau marin. Lorsque la température de l'océan augmente, l'eau se dilate ce qui provoque une augmentation de son volume, et donc une élévation du niveau de la mer. On observe toutefois un retard de quelques mois dans ce processus, correspondant au laps de temps nécessaire à la température pour se

diffuser depuis la surface jusque dans les profondeurs de l'océan [Antonov *et al.*, 2005]. Les océans peuvent ainsi réagir en quelques années à un réchauffement climatique. La quantité de sels dissous dans l'eau de mer a également un impact sur le niveau marin, puisqu'elle change la densité de l'eau. Les variations de salinité peuvent être causées par un apport d'eau douce (augmentation du ruissellement, de la pluviosité ou fonte des glaces), qui diminue la salinité, ou par une évaporation accrue ou une glaciation, qui l'augmentent.

- *Variations de la masse d'eau des océans*

Les transferts de l'eau entre les océans et les autres réservoirs existants jouent un rôle important dans la variation du niveau marin. La principale source terrestre d'eau douce étant l'eau gelée dans les glaciers continentaux et les calottes glaciaires, les variations du niveau de la mer seront donc affectées par des changements de ces deux réservoirs [Cazenave & Nerem, 2004]. D'ailleurs, lors de la dernière période de glaciation de la Terre, il y a 20 000 ans, le niveau de la mer était environ 120 m plus bas qu'aujourd'hui, en raison de l'étendue des calottes glaciaires qui recouvraient alors de grandes parties des continents de l'hémisphère nord [Lambeck & Chappell, 2001]. Certaines activités humaines peuvent également contribuer au changement de la masse d'eau des océans, particulièrement par l'extraction d'eau des sous-sols et la construction de réservoirs artificiels. Parmi les réservoirs d'eau douce, susceptibles de provoquer une variation du niveau marin, on trouve :

- **les glaciers continentaux** : leur fonte a contribué et contribue de façon significative à l'élévation du niveau de la mer observée au cours du 20^{ème} siècle jusqu'à aujourd'hui [Church *et al.*, 2001].
- **les calottes polaires glaciaires** : les variations de masses des calottes polaires (Groenland et Antarctique) ont une influence sur le niveau de la mer. Au Groenland et dans la zone du Pôle Nord, le réchauffement est plus rapide que celui de l'ensemble de la planète. Les températures d'été sont assez élevées pour faire fondre les calottes de cette zone [Cazenave *et al.*, 2000].
- **la banquise (ou glace de mer)** : qu'elle soit sous forme solide ou liquide, la glace de mer occupe un volume faisant partie intégrante du volume des océans. Lorsqu'elle fond, elle n'intervient donc pas directement sur la hausse du niveau des mers mais sa fonte provoque une petite diminution de la salinité. Par effet stérique, elle contribue donc légèrement à l'augmentation du niveau de la mer [Bindoff *et al.*, 2007].
- **les réservoirs d'eau dans le sol et l'atmosphère** : une pluviosité plus forte au-dessus des océans, une augmentation du ruissellement et du débit des fleuves, en bref une modification du cycle de l'eau douce peut également augmenter le niveau marin. En revanche, une augmentation de l'évaporation peut contribuer à sa diminution. Les variations des stocks d'eaux continentales peuvent être la conséquence d'activités humaines, telles que la construction de barrages ou encore le prélèvement intensif d'eau dans les nappes phréatiques. Le pergélisol (sous-sol gelé en permanence) peut également contribuer à l'élévation du niveau de la mer par sa fonte [Chao *et al.*, 2008].

- Variations de la circulation océanique

La variation du niveau des mers, notamment au niveau local, peut être due à des changements dans la circulation océanique. En effet, il existe un gradient dans la pente de la surface du niveau moyen de la mer perpendiculaire aux courants océaniques [Church *et al.*, 2001]. Une variation de la force des courants entrainera donc une variation de ce gradient et donc de la surface du niveau moyen de la mer. A ce titre, on peut tenter d'évaluer la force d'un courant passant entre deux îles en étudiant la différence de niveau moyen de la mer entre les marégraphes de ces deux îles. A noter qu'il existe également un lien entre la densité des masses d'eau (effet stérique) et la circulation générale thermohaline des océans, qui transporte des masses d'eaux froide ou chaude à travers le globe [Bindoff *et al.*, 2007].

- Variations régionales interannuelles et décennales

Le niveau régional de la mer peut aussi être affecté par la variabilité climatique à une courte échelle de temps, par exemple associée aux phénomènes ENSO (*El Niño-Southern Oscillation*) ou NAO (Oscillation Nord Atlantique) [Douglas *et al.*, 2001; Pugh, 2004]. Ces variations régionales interannuelles peuvent être bien plus fortes ou plus faibles que la tendance globale du niveau de la mer, ce qui nécessite de posséder de longues séries d'observations pour espérer tirer une tendance fiable de l'évolution à long terme du niveau marin.

I.1.3.1.2. Astronomique : marées

La marée océanique est la variation périodique du niveau de la mer due à l'attraction gravitationnelle de la Lune et du Soleil. C'est généralement le signal le plus important contenu dans un enregistrement marégraphique, et il est assez facile de le distinguer parmi d'autres signaux en raison de ses périodes plutôt bien définies. Attention cependant, le signal de la marée est très complexe en soi, et il n'existe pas de période au bout de laquelle les variations de la hauteur d'eau se reproduisent exactement à l'identique. De même, l'amplitude de la marée est différente en chaque lieu du globe, en fonction de la profondeur et de la dimension des bassins océaniques. Une des caractéristiques de la marée est aussi son mode de propagation : elle se propage en tournant autour de points amphidromiques où son amplitude est nulle. La marée résulte principalement de la superposition d'une composante semi-diurne (2 cycles de marée par jour) et d'une composante diurne (1 cycle par jour). L'importance relative de ces deux composantes étant variables géographiquement, il existe quatre types différents de marée, selon la classification française :

- marée de type semi-diurne
- marée de type diurne

- marée de type semi-diurne à inégalités diurnes
- marée de type mixte

L'historique de la connaissance et de l'étude de la marée a déjà été traité par plusieurs auteurs, nous ne reviendrons donc pas dessus ici. Le lecteur intéressé par l'histoire de la marée peut se référer à l'ouvrage complet de Cartwright [1999]. La résultante de la force d'attraction exercée par les astres sur les océans et de la force d'inertie générée par les mouvements orbitaux de la Terre (force centrifuge) constitue la force génératrice de la marée. Cette force met en mouvement les particules liquides en générant les ondes qui constituent la marée. L'amplitude de la force génératrice de la marée varie au cours du temps et un des effets les plus visibles est la création d'un cycle vives-eaux / mortes-eaux (période de 14,8 jours).

La force génératrice de la marée peut être décomposée comme la superposition de forces périodiques élémentaires, et à chacune de ces forces est associée une variation de la hauteur d'eau appelée composante harmonique [Simon, 2007a]. A ces composantes harmoniques élémentaires s'ajoutent des composantes d'interaction qui sont générés lors de la propagation de l'onde de marée par petits fonds. L'ensemble des composantes harmoniques existantes est extrêmement grand, mais on peut se limiter à un certain nombre pour les applications numériques (une centaine par exemple). La représentation graphique de ces composantes, classées en espèces de marée (groupement par fréquences voisines), selon leur amplitude, leur phase et leur période s'appelle un spectre de marée. A noter que les paramètres de l'amplitude et de la phase d'une composante harmonique sont appelés les constantes harmoniques. Hormis les espèces diurnes et semi-diurnes, déjà évoquées, on observe des composantes tiers-diurnes, quart-diurnes, etc. L'opération mathématique permettant de déterminer un spectre de marée s'appelle une analyse spectrale et elle permet d'identifier les composantes harmoniques d'un lieu en particulier, qui constituent une empreinte propre à ce lieu [Pugh, 1987].

Le calcul des constantes harmoniques de chacune des composantes d'un lieu est une opération mathématique appelée analyse harmonique : chaque hauteur de marée est traitée comme la somme de composantes harmoniques dont les périodes sont connues [Doodson, 1921]. L'efficacité de ce calcul dépend de la durée des observations disponibles pour l'analyse. On aura ainsi beaucoup de difficultés à distinguer deux composantes dont les fréquences sont proches si cette durée n'est pas suffisante. Il est recommandé d'utiliser au moins un an de données pour séparer les composantes de la marée les plus importantes, mais on peut envisager une analyse avec moins de données si les observations sont de bonne qualité. En toute rigueur, l'idéal serait d'utiliser une série contenant au moins 18,61 ans d'observations, correspondant à la période du Saros, qui est la composante nodale de la marée (plus grande période de l'ensemble des composantes).

Lorsque l’empreinte (ou la carte d’identité) de la marée a été dressée en un lieu, on peut alors envisager de prédire les hauteurs de la marée, aussi bien dans le passé que dans le futur. Les résultats de la prédiction seront d’autant plus justes que les constantes harmoniques des composantes de la marée seront restées stables au fil des siècles. Prédire la hauteur de la marée h à n’importe quel moment t implique d’additionner les contributions de toutes les composantes harmoniques, définies par leurs amplitude, phase et période, et d’ajouter cette somme au niveau moyen de la mer, selon l’équation [Simon, 2007a] :

$$h(t) = Z_0 + \sum A_i \cdot \cos (q_i \cdot t + V_{0i} - G_i) \quad (1.2)$$

Avec Z_0 : niveau moyen de la mer ; A_i et G_i : constantes harmoniques (respectivement amplitude et phase) de la composante harmonique i ; q_i : vitesse angulaire de la composante harmonique ; V_{0i} : valeur de l’argument astronomique pour $t = 0$.

La valeur de l’argument astronomique V_{0i} est déterminée à partir de l’équation :

$$V_{0i} = n_1 \cdot s + n_2 \cdot h + n_3 \cdot p + n_4 \cdot N' + n_5 \cdot p_1 + n_6 \cdot D \quad (1.3)$$

- Où
- $s = 78,16^\circ$ (longitude moyenne de la lune)
 - $h = 279,82^\circ$ (longitude moyenne du soleil)
 - $p = 349,50^\circ$ (longitude du périégée de la lune)
 - $N' = 208,10^\circ$ (longitude du nœud ascendant de la lune)
 - $p_1 = 282,6^\circ$ (longitude du périégée du soleil)
 - $D = 90^\circ$ (constante)

Pour exemple, voici les valeurs caractéristiques de quelques composantes harmoniques de la marée en Charente-Maritime, dont nous aurons besoin par la suite :

COMPOSANTES HARMONIQUES (ondes de marée)								
Symbole	Vitesse angulaire (°/h)	Argument littéral étendu	Coefficients					
			n_1	n_2	n_3	n_4	n_5	n_6
M2	28,98410424	BZZZZZ	0	0	0	0	0	0
S2	30,00000000	BBXZZZ	2	-2	0	0	0	0
M4	57,96820848	DZZZZZ	0	0	0	0	0	0
MN4	57,42383379	DYZAZZ	-1	0	1	0	0	0
MS4	58,98410424	DBXZZZ	2	-2	0	0	0	0
Z_0	0,00000000	ZZZZZZ						

Tableau I-1 : Caractéristiques de quelques composantes harmoniques.

Pour plus de détails sur la connaissance de la marée océanique côtière, le lecteur est invité à consulter l’excellent ouvrage de Simon [2007a].

I.1.3.1.3. Météorologique

- *Ondes de tempête*

Les ondes de tempête sont la résultante de basses pressions atmosphériques et de forts vents, provoquant une élévation anormale du niveau de la mer, appelée surcote. La surcote étant définie comme la différence positive³ entre le niveau marin réellement observé et le niveau prédit de la marée [Pineau-Guillou, 2008]. Lorsque l'apparition d'une onde de tempête coïncide avec une marée haute, il peut se produire d'importantes submersions marines des zones terrestres, dont le danger le plus immédiat est la noyade des populations. Elles peuvent également entraîner la désorganisation de services normalement assurés, tels que la distribution en eau potable et l'évacuation des eaux usées, générant ainsi un risque sanitaire pour les populations. De plus, après avoir été submergées d'eau de mer, les terres précédemment fertiles deviennent impropres à la culture pendant plusieurs années en raison des dépôts salins qui demeurent après le retrait des eaux [UNESCO, 1985].

Concrètement, l'atmosphère exerce sur la mer deux actions physiques différentes. La première est appelée l'effet du baromètre inverse : les variations de la pression atmosphérique se répercutent sur la pression qui agit verticalement sur la surface de la mer [Ponte, 1994]. Ainsi, une augmentation de la pression de 1 hPa entraîne une diminution du niveau de la mer de 1 cm (en réalité, des effets dynamiques liés aux vents peuvent compliquer cette description simple du baromètre inverse sur de courtes échelles de temps) [Wunsch & Stammer, 1997]. Deuxièmement, l'effet de friction du vent sur la surface de la mer est proportionnel (en première approximation) au carré de la vitesse du vent [Ducet *et al.*, 1999].

- *Houle (ondes de surface)*

La houle est probablement la variation la plus apparente de la surface de la mer pour un observateur occasionnel. Elle a été relativement peu étudiée jusqu'à maintenant car la plupart des marégraphes sont conçus pour filtrer les ondes à haute fréquence telles que la houle. Cependant, la variabilité de la houle pourrait avoir un impact sur les variations du niveau de la mer, en produisant une légère surélévation du niveau marin à l'approche de la côte. L'amplitude de cette surélévation dépend de plusieurs facteurs, notamment la bathymétrie à l'approche du marégraphe et l'amplitude de la houle [Castelle, 2004]. L'élévation due à ce phénomène peut être de l'ordre de quelques dizaines de centimètres pendant une grosse tempête.

³ Si la différence est négative, elle est appelée décote.

I.1.3.1.4. Tsunamis

Un tsunami est une onde générée par un déplacement vertical de la colonne d'eau généralement d'origine sismique (tremblements de terre), mais gardons à l'esprit que d'autres phénomènes peuvent générer un tsunami : glissements de terrain, éruptions volcaniques, explosions, ou même, impact de météorites.

La longueur d'onde d'un tsunami peut être supérieure à 100 km et sa période peut varier de quelques minutes à plus d'une heure, en fonction du mécanisme générateur de l'onde. Sa longueur d'onde étant grande par rapport à la profondeur, il obéit aux mêmes lois qu'une vague en eau peu profonde. Sa vitesse de propagation est donc égale à la racine carrée du produit de l'accélération de la pesanteur et de la profondeur. Par exemple, si la profondeur est de 4 000 m, un tsunami se déplace à environ 200 m/s, soit un peu plus de 700 km/h. La hauteur d'un tsunami n'est pas très importante au large (environ 1 m), mais celle-ci est sensiblement amplifiée en s'approchant de la côte, et peut atteindre 10 m (30 m dans les cas extrêmes). Non seulement les tsunamis se propagent à très grande vitesse, mais ils peuvent également parcourir de grandes distances sans perdre d'énergie (*figure I-11*). Ainsi, quand ils atteignent la côte, ils peuvent causer de sérieux dégâts matériels et d'importantes pertes humaines [Merrifield *et al.*, 2005].

Notre capacité à prévenir de l'arrivée d'un tsunami dépend de nombreux paramètres, en particulier l'acquisition de données sismiques, mais également d'un réseau de marégraphes afin de surveiller la progression de l'onde et ainsi, estimer l'heure d'arrivée sur une côte éloignée et les secteurs littoraux probablement impactés. Le tsunami se propageant à une très grande vitesse, il est primordial que le réseau marégraphique transmette ses données en temps-réel.

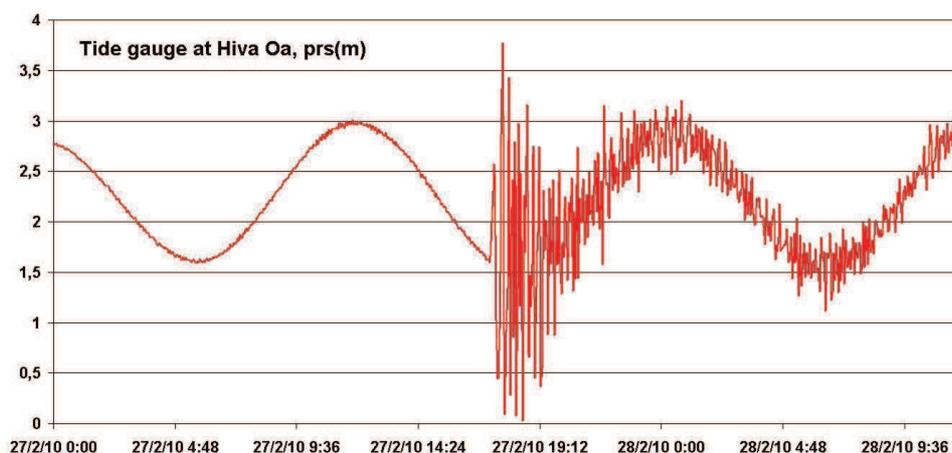


Figure I-11 : Enregistrement marégraphique à Hiva Oa (Îles Marquises) suite au séisme de magnitude 8,8 du 27 février 2010 au Chili engendrant un tsunami trans-Pacifique (source : <http://www-dase.cea.fr/>, consulté le 1/12/11).

I.1.3.1.5. Seiches

Les seiches (*figure I-12*) sont de faibles variations périodiques de la surface de l'eau habituellement générée par une perturbation telle qu'un vent violent, un fort courant, un changement soudain de la pression atmosphérique ou même un tsunami [Vilibic, 2006]. Dans les lacs et les baies, leur période est contrôlée par les dimensions du bassin et leur durée de vie est déterminée par les effets de frottements. Leurs périodes sont de l'ordre de quelques minutes à quelques heures, et leurs amplitudes varient du centimètre au mètre [Tomasin & Pirazzoli, 1999]. Elles peuvent être enregistrées par des marégraphes dans presque toutes les régions du monde. Les seiches ont souvent été ignorées lors des études du niveau de la mer, principalement en raison de leur effet local, mais leur connaissance est importante aussi bien pour l'ingénierie côtière que pour la réalisation de travaux portuaires. Les seiches de petite amplitude peuvent en effet être associées à de forts courants à l'entrée des ports.

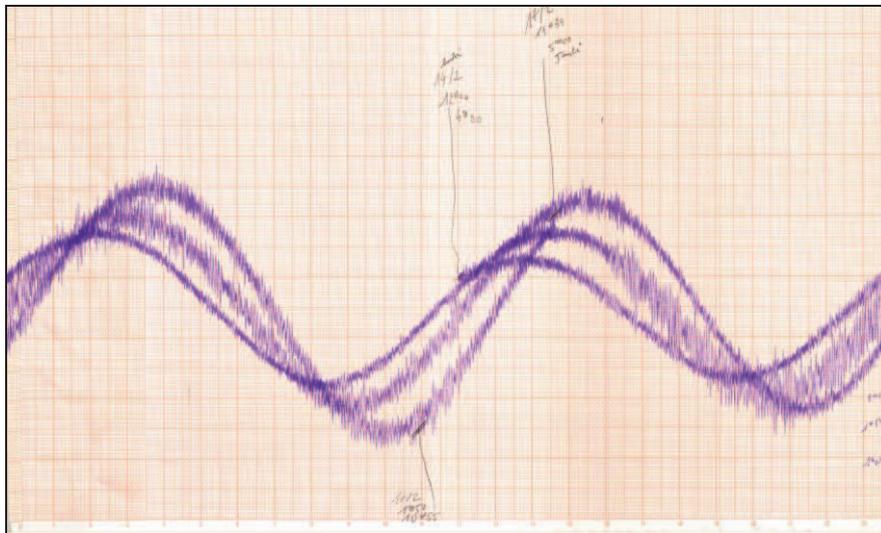


Figure I-12 : Exemple de seiche d'environ 1 m à Port-Tudy (France) le 15 février 2011 (source : REFMAR).

I.1.3.2. Mouvements verticaux de l'écorce terrestre

Nous l'avons vu en introduction des signaux contenus dans les enregistrements marégraphiques, un marégraphe est solidaire des mouvements de l'écorce terrestre. De fait, ses enregistrements contiennent la signature de divers mouvements verticaux, dont une liste non-exhaustive est présentée ci-dessous succinctement. Pour visualiser directement les effets des mouvements verticaux dans les enregistrements marégraphiques, nous avons représenté, sur la *figure I-13*, différentes courbes typiques.

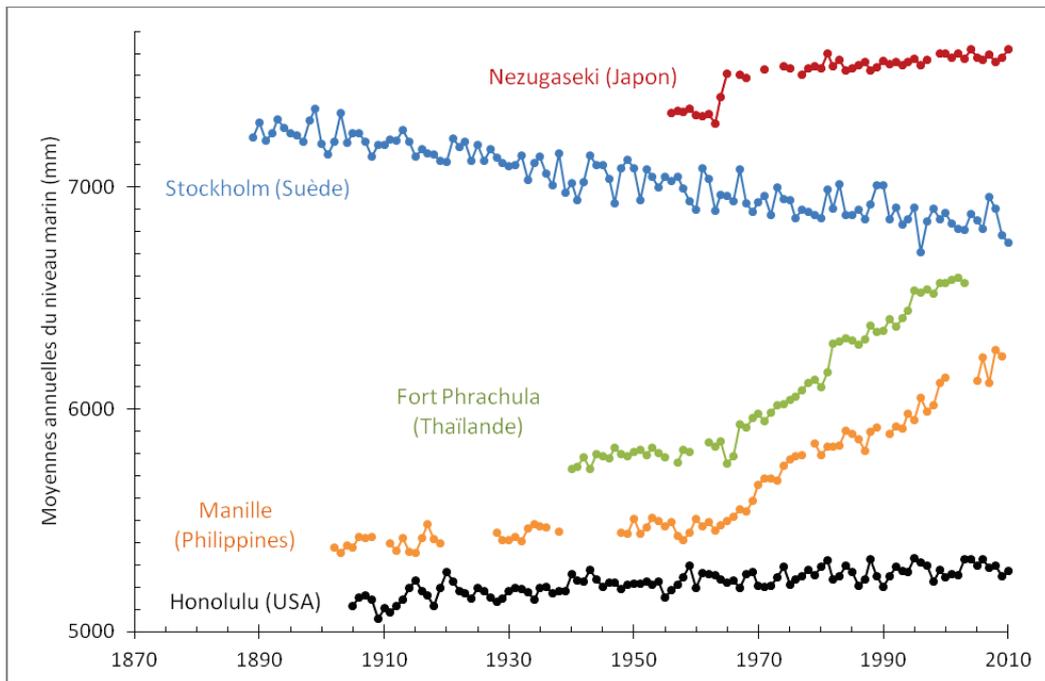


Figure I-13 : Moyennes annuelles du niveau marin (source : PSMSL) de sites affectés par des mouvements verticaux : Nezugaseki (tremblement de terre), Stockholm (rebond postglaciaire), fort Phrachula (extraction accrue des nappes phréatiques), Manille (phénomène de sédimentation). Honolulu est une courbe témoin sans mouvements terrestres verticaux sur la période de l'enregistrement marégraphique.

La courbe d'Honolulu est représentée ici à titre comparatif. Hawaï est en effet éloignée des effets du rebond postglaciaire et n'a pas été soumise à d'importants mouvements verticaux sur la durée de l'enregistrement marégraphique. Toutefois, les îles hawaïennes ne doivent pas être considérées comme stables, au sens absolu du terme, comme en témoigne leur activité volcanique passée. En règle générale, aucun endroit sur terre ne peut réellement être considéré comme stable, ce qui implique qu'un enregistrement marégraphique contient toujours une part de variabilité liée aux mouvements verticaux de l'écorce terrestre.

- Mouvements tectoniques

La dérive des plaques tectoniques entraîne des contacts entre celles-ci, provoquant des processus de subduction, de plissement, ou des séismes qui provoquent un déplacement vertical de l'écorce terrestre. Ils peuvent être classés en deux catégories selon leur échelle de temps :

- A court terme : les séismes, ou tremblements de terre. Par exemple, l'enregistrement du niveau de la mer à Nezugaseki (Japon) montre un saut brusque suite au tremblement de terre de 1964 (*figure I-13*).
- A long terme : mouvements tectoniques de l'écorce terrestre affectant le contour des bassins océaniques contenant la masse d'eau des océans.

- Rebond postglaciaire (ou Ajustement Isostatique Glaciaire, GIA)

Le niveau marin à Stockholm (Suède) montre une grande tendance négative due au soulèvement de l'écorce terrestre appelée rebond postglaciaire (*figure I-13*). C'est une conséquence de la fonte, encore relativement récente, des calottes glaciaires qui couvraient l'Amérique du nord et la Scandinavie il y a

environ 20 000 ans, lors de la dernière période glaciaire, et de l'allègement de l'écorce terrestre qui en est résulté. Cet ajustement continue à se produire bien après la fin de la fonte des calottes glaciaires, et ses effets se font ressentir au-delà des limites de l'ancien positionnement des calottes.

- Sédimentation

Les dépôts sédimentaires charriés par le fleuve dont l'embouchure débouche à Manille (Philippines) provoquent une subsidence locale importante, entraînant une augmentation anormale du niveau de la mer (*figure I-13*). En effet, le transfert des sédiments du continent vers la mer a deux conséquences : l'allègement du continent et l'alourdissement du bassin océanique recueillant les sédiments. Ce phénomène peut être accentué par des actions anthropiques entraînant une modification du flux sédimentaire naturel : construction de barrages ou de digues, extraction importante de sédiments dans les fleuves, etc.

- Affaissements d'origine anthropique

- exploitation des richesses souterraines : minerais, hydrocarbures, eau contenue dans les nappes phréatiques (par exemple : fort Phrachula, en Thaïlande, en raison de l'extraction accrue d'eaux souterraines contenues dans les nappes phréatiques depuis environ 1960, l'écorce terrestre s'est affaissée entraînant une élévation relative du niveau de la mer, *figure I-13*)
- aménagement du littoral par la construction de ports, d'usines, etc.
- tassement des fondations du support du marégraphe : bâtiment, quai ou port.

- Quelques exemples d'autres phénomènes [Wöppelmann, 1997]

- *hydroisostasie* : la fonte des glaces continentales augmente la masse d'eau dans les bassins océaniques, enfonçant ces derniers et soulevant les continents par transfert de masse en profondeur depuis les océans.

- *surcharge océanique* : effet périodique de la charge provoquée par la marée océanique au voisinage du littoral. L'effet est très localisé et l'amplitude du mouvement vertical est de l'ordre de plusieurs centimètres.

- *effet de charge atmosphérique* : variations de la pression atmosphérique pouvant entraîner des déformations verticales de l'écorce terrestre de l'ordre de quelques centimètres sur quelques jours à quelques mois.

- *marées terrestres* : déformations élastiques de l'écorce terrestre due à l'action des forces gravitationnelles de la Lune et du Soleil. L'amplitude du déplacement périodique n'excède pas quelques dizaines de centimètres et dépend de l'emplacement géographique.

En conclusion, on peut estimer que les enregistrements marégraphiques reflètent tout autant des déformations de l'écorce terrestre que des variations du niveau de la mer (*figure I-14*). Pour découpler les mouvements terrestres des variations du niveau marin, on utilise des mesures GPS colocalisées [Wöppelmann *et al.*, 2009; Bouin & Wöppelmann, 2010; Letetrel, 2010], c'est-à-dire réalisées à quelques dizaines de mètres ou plus (généralement moins de quelques kilomètres) de l'emplacement du marégraphe.

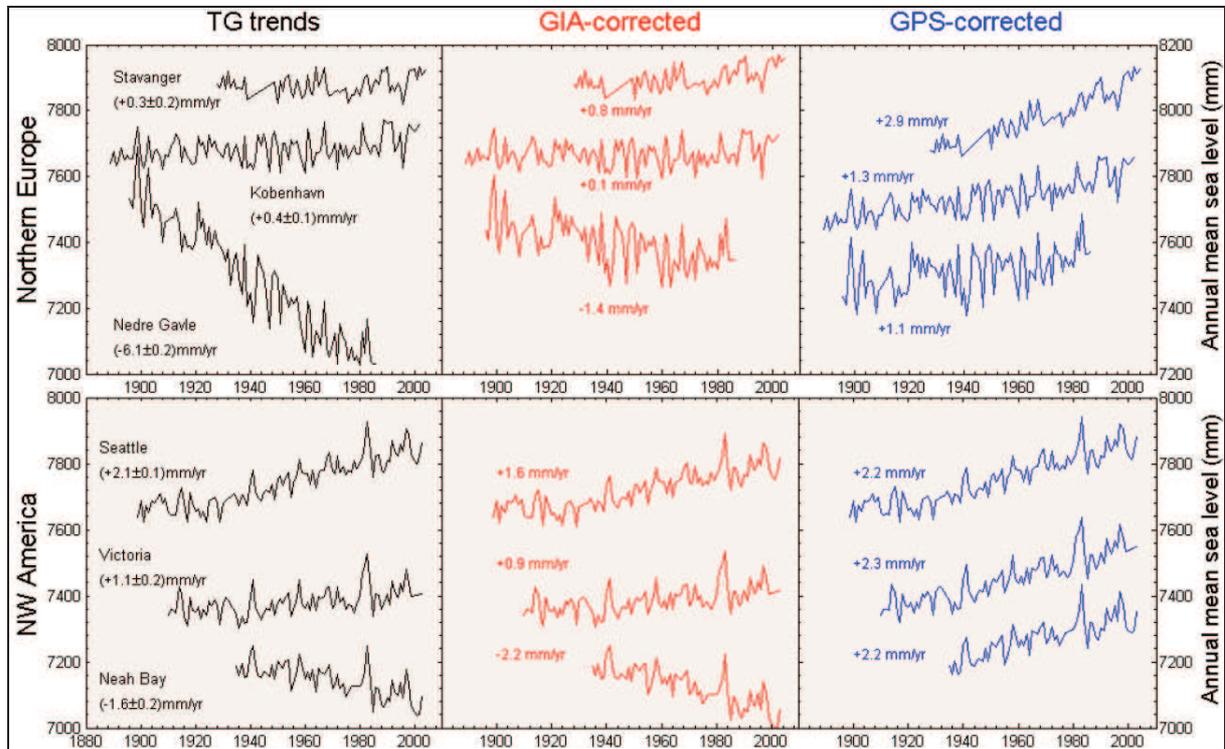


Figure I-14 : Séries temporelles du niveau marin moyen annuel issues de l'analyse des marégraphes : (à gauche) sans corrections ; (au milieu) corrigées des prédictions du modèle ICE5G (VM2) (rebond postglaciaire) de Peltier ; (à droite) corrigées des résultats GPS de l'ULR exprimés dans le repère géocentrique ITRF2005 [Wöppelmann *et al.*, 2009].

I.2. Niveaux moyens

I.2.1. Niveaux moyens de la mer

Le concept de niveau moyen de la mer (*mean sea level*, MSL), souvent utilisé, est un concept ambiguë si celui-ci n'est pas correctement défini au préalable [Wöppelmann, 1997; Simon, 2007a]. En effet, la notion de niveau moyen peut laisser supposer qu'il s'agit d'une moyenne arithmétique simple de hauteurs d'eau sur une période donnée. La Commission Océanographique Intergouvernementale (COI) définit le niveau moyen comme la valeur moyenne du niveau de la mer calculée à partir d'une série suffisamment longue de données (le niveau de la mer étant défini comme le niveau de la surface de la mer observé par rapport à un niveau de référence prédéfini, à un instant quelconque) [UNESCO, 1985].

D'après Simon [2007a], la définition du niveau moyen, admise selon l'usage en marégraphie, est le résultat d'une opération sur les hauteurs mesurées tendant à éliminer la marée astronomique. Mais sur quelle période de temps est effectuée cette opération ? Quel doit-être l'échantillonnage des données ? Quelle est la méthode employée pour calculer ce niveau moyen ? C'est ce que nous allons définir au travers de trois niveaux moyens couramment utilisés : les niveaux moyens journalier, mensuel et annuel.

I.2.1.1. Niveau moyen journalier

Selon la définition du niveau moyen donné par Simon [2007a], le résultat de l'opération sur les hauteurs d'eau doit éliminer au maximum la marée astronomique. Or, la période de la marée ($\approx 24,84$ h) est plus grande que la durée d'un jour (24h). Ainsi, pour calculer un niveau moyen journalier, on ne peut effectuer une simple moyenne arithmétique des 24 hauteurs horaires, car celle-ci laisserait un résidu des composantes de la marée, préjudiciable pour l'étude des niveaux moyens journaliers. Il est donc nécessaire de filtrer les mesures de hauteurs d'eau, afin d'éliminer un maximum de composantes de la marée.

Le filtrage des hauteurs d'eau consiste à associer un coefficient a à une grandeur horaire observée $h(t)$, de part et d'autre de l'instant t auquel le filtre est appliqué. En d'autre terme, si l'on souhaite calculer la moyenne journalière du jour j à 12h à l'aide d'un filtre contenant 13 coefficients $a(t)$, on effectuera une moyenne pondérée de part et d'autre de 12h, en attribuant aux 13 valeurs situées avant 12h, et aux 13 valeurs situées après 12h le coefficient a propre à chaque valeur.

Il semble qu'un consensus se soit dégagé sur le nombre maximum de coefficients à utiliser : 36 [Simon, 2007a]. Comme les coefficients sont à appliquer de part et d'autre de la valeur centrale (souvent 12h), ce nombre de valeurs permet de réaliser un filtrage dont la hauteur moyenne journalière est attribuée à l'instant de la mi-journée d'un jour donné, en prenant en compte les mesures disponibles sur 3 jours (la veille, le jour même et le lendemain), soit 72 heures. Différents filtres numériques passe-bas existent pour le calcul du niveau moyen journalier, contenant plus ou moins de coefficients a . Parmi ces filtres, nous retrouvons : W_{25} (moyenne de 25 hauteurs horaires), Doodson (39 hauteurs horaires), Munk (49), Godin (69), Demerliac (71). Les coefficients de ces filtres sont répertoriés dans le *tableau I-2*. La qualité de ces filtres est jugée par leur capacité à éliminer les composantes de la marée. Sans surprise, les plus efficaces sont ceux possédant le plus de coefficients : Godin et Demerliac [Pugh, 1987]. Pour la suite de nos travaux, nous n'utiliserons que le filtre de Demerliac, comme c'est l'usage au SHOM depuis 1973 [Demerliac, 1973]. A noter que le PSMSL recommande, lorsque la série comporte de petites lacunes, d'interpoler les valeurs manquantes avant le calcul du niveau moyen journalier. Toutefois, aucune précision n'est apportée sur le nombre maximal de valeurs manquantes que l'on peut interpoler (cf. *V.4.3.2. Interpolation de valeurs manquantes*).

Heure	W_{25}	Doodson	Munk	Godin	Demerliac
m	$25a_m$	$30a_m$	$10^7 a_m$	$14400a_m$	$24576a_m$
0	1	0	395287	444	768
1	1	2	386839	443	766
2	1	1	370094	440	762
3	1	1	354118	435	752
4	1	2	338603	428	738
5	1	0	325633	419	726
6	1	1	314959	408	704
7	1	1	300054	395	678
8	1	0	278167	380	658
9	1	2	251492	363	624
10	1	0	234033	344	586
11	1	1	219260	323	558
12	1	1	208050	300	512
13		0	195518	276	465
14		1	180727	253	435
15		0	165525	231	392
16		0	146225	210	351
17		1	122665	190	325
18		0	101603	171	288
19		1	85349	153	253
20			72261	136	231
21			60772	120	200
22			47028	105	171
23			30073	91	153
24			13307	78	128
25				66	105
26				55	91
27				45	72
28				36	55
29				28	45
30					32
31				15	21
32				10	15
33				6	8
34				3	3
35				1	1

Tableau I-2 : Principaux filtres numériques pour le calcul du niveau moyen journalier à partir de hauteurs horaires. D'après Simon [2007a].

I.2.1.2. Niveau moyen mensuel

Le calcul du niveau moyen mensuel est plus simple : il s'effectue simplement en réalisant la moyenne arithmétique des niveaux moyens journaliers sur un mois. Ce nouveau calcul constitue un nouveau degré de filtrage, qui atténue encore un peu plus les résidus des composantes de la marée. Le PSMSL recommande de ne pas calculer de moyenne mensuelle lorsque 15 jours (ou plus) de données sont manquants dans le mois. De plus, le nombre de jours utilisé pour le calcul du niveau moyen mensuel doit être mentionné, et sera utile pour le calcul du niveau moyen annuel.

I.2.1.3. Niveau moyen annuel

Le calcul du niveau moyen annuel est réalisé en effectuant une moyenne pondérée des niveaux moyens mensuels. Le poids de chaque mois correspond au nombre de valeurs journalières utilisées pour le calcul du niveau moyen mensuel. Selon les règles du PSMSL, un niveau moyen annuel ne peut être calculé que s'il y a 11 ou 12 moyennes mensuelles dans l'année. Autrement dit, si deux (ou plus) moyennes mensuelles sont manquantes, la moyenne annuelle ne doit pas être calculée.

I.2.2. Niveaux moyens de la marée

I.2.2.1. Niveau moyen de mi-marée

Le niveau moyen de mi-marée (ou *mean tide level*, MTL) est défini comme la moyenne de l'ensemble des hauteurs de pleine mer et de basse mer sur une période donnée [Pugh, 1987]. La COI recommande d'utiliser le même nombre de valeurs de pleine mer et de basse mer pour le calcul des niveaux moyens de mi-marée mensuels et annuels [UNESCO, 1985]. Ce niveau peut être proche du niveau moyen de la mer (MSL) et même identique si le signal de la marée est parfaitement symétrique au port étudié, c'est-à-dire si la durée du montant est parfaitement égale à la durée du perdant. Dans tous les autres cas, lorsqu'il existe une asymétrie tidale, les niveaux moyens de la mer (MSL) et de mi-marée (MTL) sont différents. Cette différence peut être définie par la comparaison directe d'observations horaires et de pleines et basses mers, ou bien s'estimer au moyen de la formule suivante [Pugh, 1987] :

$$MTL - MSL = A_{M4} \cdot \cos(2 \cdot G_{M2} - G_{M4}) \quad (1.4)$$

Où A_{M4} est l'amplitude de la composante harmonique M4, G_{M2} et G_{M4} sont les phases des composantes harmoniques M2 et M4. Le calcul du niveau moyen de mi-marée est très utile lors des études historiques des variations du niveau marin. En effet, bien souvent, les mesures les plus anciennes sont uniquement des mesures de pleines et basses mers, avec lesquelles on ne peut calculer un niveau moyen de la mer (MSL) [Pouvreau, 2008].

I.2.2.2. Niveaux moyens de pleine mer et de basse mer

Le niveau moyen de pleine mer (*mean high water*, MHW) est défini comme la moyenne de l'ensemble des hauteurs des pleines mers sur une période donnée. De même, le niveau moyen de basse mer (*mean low water*, MLW) est défini comme la moyenne de l'ensemble des hauteurs des basses mers. Comme pour le niveau moyen de mi-marnage, ces deux niveaux moyens portent la signature du cycle nodal de 18,61 ans. Le niveau moyen de pleine mer est parfois le seul indicateur disponible pour évaluer

la tendance du niveau marin dans le passé. En effet, les premières mesures du niveau de la mer étaient souvent des mesures de la hauteur de la pleine mer, comme ce fut le cas à La Rochelle du mois de mai 1775 au mois de mai 1776 (cf. *IV.1.5.1. Le Vieux port de La Rochelle*).

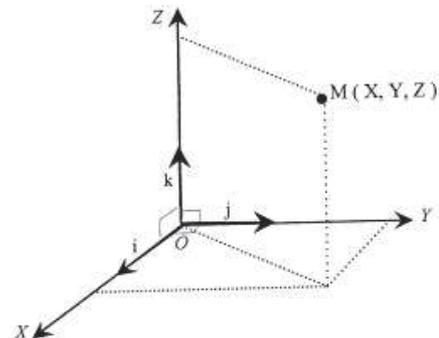
I.3. Références verticales

Plusieurs types de référence verticale peuvent être utilisés pour caractériser l'origine du niveau de la mer. Il est donc essentiel de savoir par rapport à quel « zéro » est mesuré le niveau marin. Pour éclairer le lecteur, nous présentons succinctement, du global au local, les différentes références verticales intervenant lors de la construction de séries temporelles du niveau de la mer : ellipsoïde, géoïde, réseaux du Nivellement Général de la France (NGF), zéro hydrographique ainsi que la référence propre à l'appareil de mesure. Les informations fournies proviennent essentiellement de l'IGN et du SHOM, dépositaires, en France, de la définition et de la réalisation de ces références verticales.

I.3.1. Notion d'ellipsoïde

Pour définir mathématiquement la position d'un point M sur la Terre d'une façon univoque, un système de référence géodésique est indispensable. Il s'agit généralement d'un repère tridimensionnel orthonormé tel que :

- le centre O est proche du centre de gravité de la Terre :
à moins de 500 mètres pour les systèmes terrestres
à moins de 10 mètres pour les systèmes spatiaux
- l'axe OZ est proche de l'axe de rotation de la Terre
- le plan (OX,OY) est le plan de l'équateur
- le plan (OX,OZ) est le plan méridien origine⁴

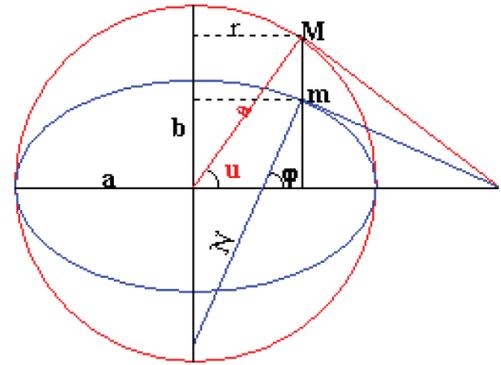


La réalisation concrète et numérique de ce référentiel s'appelle un repère terrestre. Le point M de la surface terrestre est repéré dans ce repère par ses coordonnées (X,Y,Z). Pour exprimer sa position en coordonnées géographiques, on associe au repère un ellipsoïde⁵, qui est une représentation mathématique simple de la figure de la Terre. Un ellipsoïde est parfaitement défini par deux des valeurs suivantes :

⁴ Les longitudes sont le plus souvent comptées positivement vers l'est, par rapport à un méridien origine. Ce méridien origine peut être celui de Greenwich (méridien international), ou encore propre à la géodésie d'un pays (méridien de Paris pour la France).

⁵ Surface de révolution engendrée par une ellipse tournant autour de son petit axe, définie par le rayon équatorial et un paramètre d'aplatissement, et sensiblement géocentrique.

- demi grand-axe : a
- demi petit-axe : b
- inverse de l'aplatissement : $1/f$
- première excentricité : e
- deuxième excentricité : e'



(avec u : latitude paramétrique, N : grande normale, r : rayon du parallèle)

On peut alors déterminer les coordonnées géographiques (λ, ϕ, h) du point M (figure I-15), où λ est la longitude du lieu, ϕ la latitude et h la hauteur ellipsoïdale. La hauteur ellipsoïdale correspondant à la différence de hauteur h entre le point M et le pied de la normale à l'ellipsoïde de référence. Cette valeur est définie dans un repère terrestre donné et peut différer de l'altitude (cf. I.3.1.2. Notion de géoïde) de plusieurs dizaines de mètres.

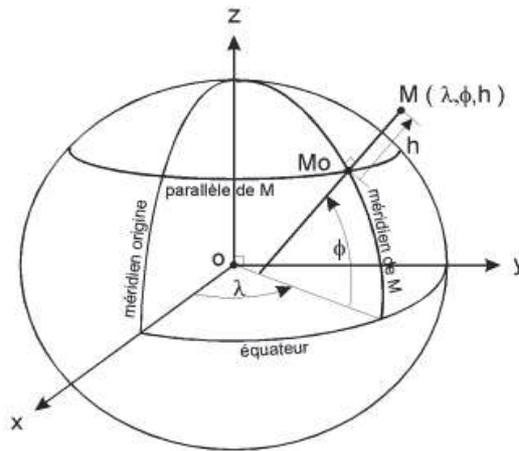


Figure I-15 : Détermination des coordonnées géographiques (λ, ϕ, h) du point M dans un repère terrestre auquel on associe un ellipsoïde.

De nombreux systèmes géodésiques coexistent, en raison de dispositions légales, réglementaires, ou historiques, de l'amélioration des techniques et des modèles, ainsi que de l'élargissement de la zone d'application des techniques à la Terre entière. En France, le système géodésique légal est le RGF93, qui est une réalisation régionale des systèmes ETRS89 (européen) et ITRS (international). L'ellipsoïde associé au RGF93 est le GRS80. Le tableau I-3 donne les constantes de définition de quelques ellipsoïdes couramment utilisés.

Nom	Système associé	Demi grand axe (a)	Aplatissement (f) ou demi petit-axe (b)
IAG GRS 80	RGF93	6 378 137,0 m	$f = 1/298,257222101$
WGS84	WGS84	6 378 137,0 m	$f = 1/298,257223563$
International Hayford 1909	ED 50	6 378 388,0 m	$f = 1/297$
Clarke 1880 IGN	NTF	6 378 249,2 m	$b = 6 356 515,0$ m

Tableau I-3 : Constantes de définition de quelques ellipsoïdes couramment utilisés.

I.3.2. Notion de géoïde

Le géoïde reflète le champ de gravité de la Terre (*figure I-16*). Il est défini comme la surface équipotentielle du champ de pesanteur terrestre, coïncidant « au mieux » avec le niveau moyen des océans. Ses ondulations, dont les variations de hauteurs avoisinent une centaine de mètres sur des distances de plusieurs milliers de kilomètres, sont engendrées par la distribution hétérogène des masses à l'intérieur de la croûte, du manteau ou du noyau terrestres. En mer, la topographie sous-marine peut également engendrer de plus petites irrégularités de hauteurs sur des distances plus faibles.

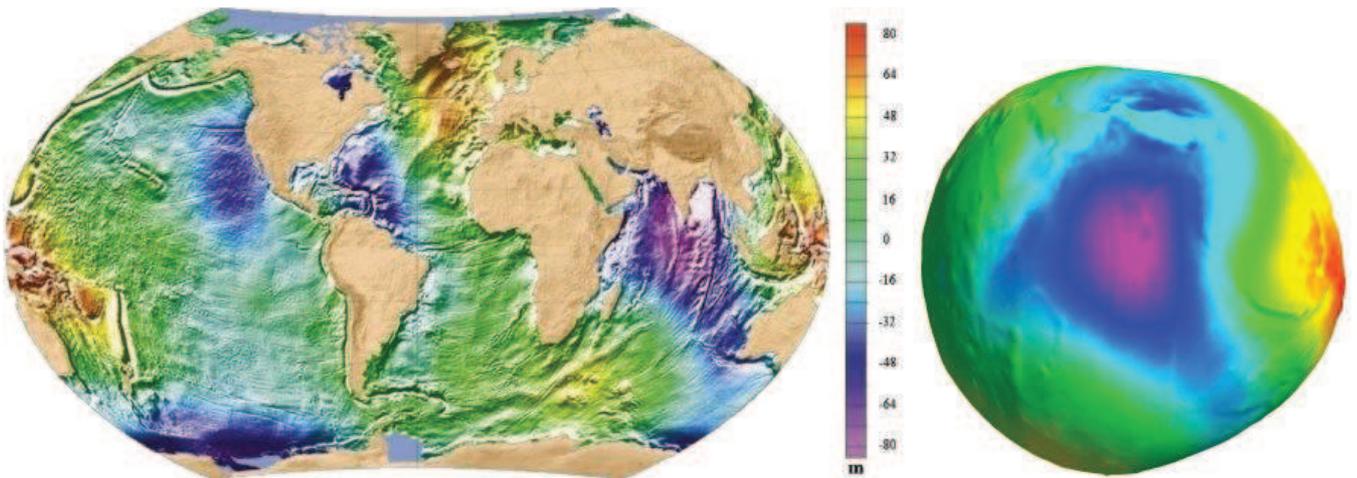


Figure I-16 : A gauche : Surface Moyenne Océanique représentant le niveau de la mer dû aux phénomènes constants, calculée à partir de dix années de données altimétriques. Cette Surface Moyenne Océanique est la résultante de deux phénomènes essentiels : les courants océaniques permanents et surtout, le géoïde. (Crédits CLS). A droite : Géoïde à grande longueur d'onde (les hauteurs sont exagérées par rapport au diamètre de la Terre) (Crédits CNES). Source : <http://www.aviso.oceanobs.com/> (consulté le 1^{er} décembre 2011).

Toutefois, en raison des variations de la masse volumique de l'eau, des vents et courants dominants, des variations de pression atmosphérique, la surface moyenne des océans n'est pas une surface équipotentielle. D'autre part, la façon dont le géoïde coïncide « au mieux » avec la surface moyenne des océans est ambiguë. Il s'ensuit que le géoïde ne peut pas être défini de manière univoque. Pour définir un géoïde, on peut donc convenir :

- soit qu'il s'agit de l'équipotentielle qui passe par un point particulier, par exemple le niveau moyen enregistré par un marégraphe (ou une moyenne de plusieurs marégraphe) pendant une période donnée
- soit que son potentiel prend une valeur conventionnelle, choisie de telle manière que le géoïde soit proche de la surface moyenne de l'océan

Pour transformer les coordonnées géographiques (λ, φ, H) du point M par rapport à un géoïde, on convertit la hauteur ellipsoïdale h en altitude H à l'aide d'une grille de conversion. L'altitude du point M

est ainsi définie comme l'écart vertical entre M et une surface de référence proche du géoïde. En France métropolitaine, on utilise la grille de conversion altimétrique RAF09 (Référence Altimétrique Française, 2009) pour réaliser la référence d'altitude NGF-IGN69 dans le système de référence géodésique RGF93. La précision sur l'altitude obtenue lors de cette transformation est comprise entre 1 et 5 cm à l'aide du programme *Circé France*.

I.3.3. Nivellement

I.3.3.1. Définitions

Le nivellement est l'ensemble des opérations fournissant des éléments chiffrés pour traduire le relief. Dans le cadre du contrôle de la référence verticale d'un observatoire marégraphique, le nivellement est un outil indispensable pour vérifier la stabilité des repères de marée, dont la cote par rapport au zéro hydrographique est déterminée avec précision. La pérennité de la référence de l'observatoire peut ainsi être assurée dans le temps, sur plusieurs siècles, et permettre la construction de séries temporelles du niveau marin. Il existe plusieurs méthodes de nivellement :

- le nivellement direct (ou géométrique) :
- le nivellement indirect (ou trigonométrique)
- le nivellement par GNSS

Le **nivellement direct** est une méthode de mesure de dénivelée (distance verticale entre points proches) par différence de lectures faites sur deux mires de nivellement, calculée dans le sens de marche (lecture arrière - lecture avant). En toute rigueur, une dénivelée géométrique n'est pas une différence d'altitudes. Cette opération s'effectue à l'aide d'un niveau permettant de matérialiser une ligne de visée horizontale et placé à égale distance des deux points, ainsi que d'une règle graduée appelée mire, tenue verticalement sur les deux points dont la différence verticale est à mesurer. Supposons l'altitude du point A connue (*figure I-20a*). A l'aide du niveau fixé sur un trépied, l'opérateur effectue, en regard de l'axe optique, une première lecture sur la mire placée au point A. Cette opération est appelée le coup arrière (lecture sur la mire = L_{AR}). Puis il effectue une deuxième lecture, sur la mire placée au point B. C'est le coup avant (lecture sur la mire = L_{AV}). De façon pratique, l'altitude du point B s'obtient alors selon l'équation :

$$Alt_B = Alt_A + L_{AR} - L_{AV}$$

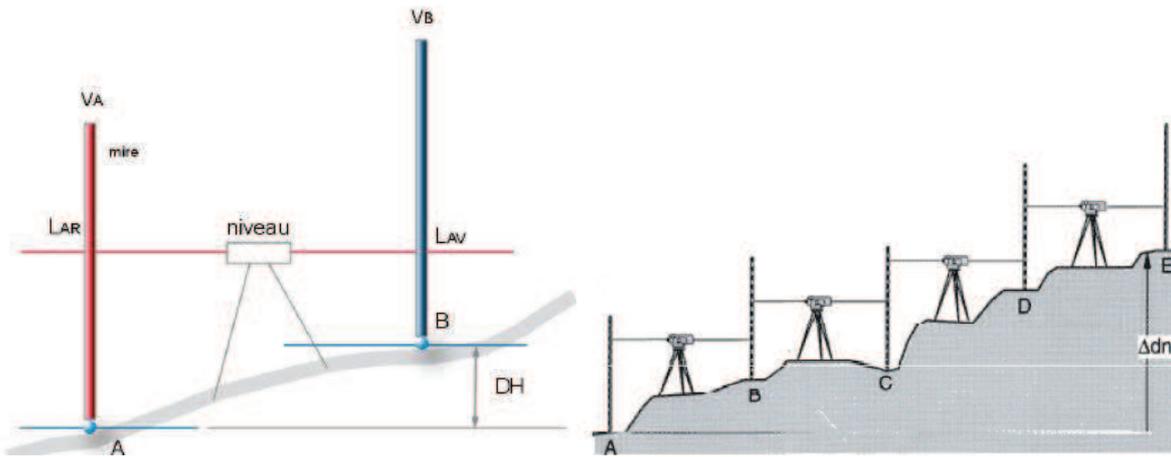


Figure I-20 : (a) principe du nivellement direct ; (b) principe du cheminement (source : IGN).

Ensuite la mire avant, restée stable au point B, devient mire arrière pour la nivelée suivante. La succession de nivelées effectuées pour déterminer la différence de hauteur entre les points A et E s'appelle un cheminement (figure I-20b).

Le **nivellement indirect** consiste à déterminer la dénivelée entre deux points par la mesure d'un angle (distance zénithale) et de la distance spatiale séparant ces deux points, à l'aide d'un théodolite (figure I-21).

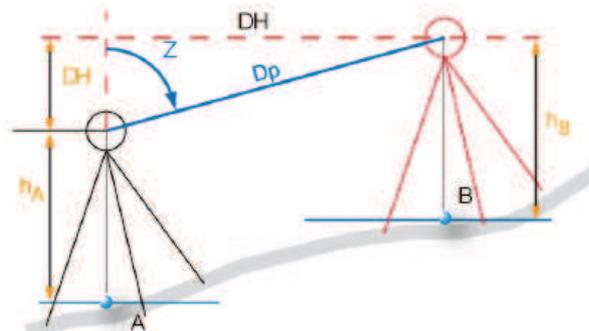


Figure I-21 : Principe du nivellement trigonométrique, ou nivellement indirect (source : IGN).

Le **nivellement par GNSS** correspond à la détermination des coordonnées d'un point à l'aide du système GNSS. Cette méthode est basée sur la mesure du temps de propagation d'une onde électromagnétique entre le satellite et l'antenne réceptrice. Les coordonnées obtenues peuvent être cartésiennes (X,Y,Z) ou géographiques (λ,φ,h). Pour rappel, pour convertir la hauteur ellipsoïdale h (définie dans le système géodésique RGF93) en altitude NGF-IGN69, on utilise, en France métropolitaine, la grille de conversion altimétrique RAF09.

I.3.3.2. Réseaux de Nivellement Général de la France (NGF)

Un réseau de nivellement est la réalisation pratique et matérielle d'un système de référence vertical. Il est constitué d'un ensemble de points matérialisés, formant un canevas de points altimétriques,

dont l'altitude est connue et diffusée. Il est étudié de manière à desservir chaque commune. Actuellement, le réseau français de nivellement de précision établi en métropole se nomme NGF-IGN69. Mais ce n'est pas le premier ; depuis 1857, trois réseaux de nivellement primordial se sont succédé en France métropolitaine, établis par : Paul Adrien Bourdalouë, Charles Lallemand et l'Institut Géographique National (IGN). Nous présentons ici un bref historique de ces réseaux, en partie issu de l'excellent ouvrage de Bonnetain [1987].

I.3.3.2.1. Réseau NGF-Bourdalouë

Paul Adrien Bourdalouë (1798-1868), conducteur des Ponts et Chaussées, fut le véritable créateur du nivellement moderne. Il eut l'idée de raccourcir les visées, d'introduire la méthode d'observation par portées égales et de remplacer les mires coulissantes, trop longues à manœuvrer, par des mires parlantes. Cette méthode, consacrée par le nivellement du Canal de Suez, attira l'attention des Travaux Publics car elle pouvait permettre la liaison de tous les nivellements régionaux en évitant la multiplication des systèmes d'altitude, source de constantes confusions. L'introduction de l'égalité des portées marquait un progrès important parce qu'elle affranchissait, en grande partie, les observations des erreurs instrumentales et des erreurs de réfraction. Vers 1855, la création des chemins de fer et l'extension des voies navigables donnèrent un essor considérable aux travaux publics : la mise en place d'un réseau de nivellement de précision devint alors impérative. Ce réseau de 15 000 km, formé de 38 polygones, fut établi de 1857 à 1864 sous le contrôle de Bourdalouë. Il semble que son erreur kilométrique ait été voisine du centimètre. L'origine des altitudes du nivellement fut fixée par une décision ministérielle du 13 janvier 1860 : le trait 0,40 m de l'échelle de marée du fort Saint-Jean (Marseille) fut assimilé au niveau moyen de la Méditerranée. Ce zéro est appelé zéro Bourdalouë.

I.3.3.2.2. Réseau NGF-Lallemand

Dès 1878, le Ministère des Travaux Publics décide de poursuivre les travaux de Bourdalouë en effectuant un nivellement général plus complet suivi d'un canevas au maillage plus serré. Le service du Nivellement Général de la France (NGF), est alors créé en 1884, sous la direction de Charles Lallemand (1857-1938), pour reprendre, vérifier et compléter le réseau Bourdalouë. Entre 1884 et 1892, neuf campagnes furent nécessaires pour mener à bien le réseau de 1^{er} ordre qui comprenait 32 polygones de périmètres variables, dont la longueur moyenne était de 550 km. Le réseau, d'un développement de 11 723 km, présentait une erreur probable kilométrique de 1,7 mm. En 1920-1922, il fut complété par la maille d'Alsace-Lorraine, et de 1926 à 1931 le 1^{er} ordre de Corse fut exécuté portant la longueur totale du réseau à 12 715 km. Le zéro du nivellement Lallemand (appelé « zéro normal ») a été fixé au moyen d'observations marégraphiques exécutées à Marseille du 1^{er} février 1885 au 1^{er} janvier 1897. Ces observations ont permis de fournir un zéro correspondant à la cote 0,329 m de l'échelle du fort Saint-Jean,

soit à 71 mm au dessous du zéro Bourdalouë. Les altitudes orthométriques de ce réseau prennent en compte des valeurs de pesanteur théorique.

I.3.3.2.3. Réseau NGF-IGN69

Le réseau primordial établi par Lallemand ne fut pas entretenu d'une manière systématique et il ne présentait plus les garanties d'homogénéité suffisantes requises par un grand réseau moderne. L'IGN décida alors la remise en état du réseau de base (réseau de 1^{er} ordre) de 1962 à 1969, en conservant l'origine du réseau Lallemand (*figure I-17*). Sa longueur est de 13 754 km et il comporte aujourd'hui environ 22 440 repères. Les nouvelles altitudes étant de type normal, elles prennent en compte un modèle utilisant des mesures de pesanteur réelle. Ce réseau est appelé NGF-IGN69 pour la France continentale et NGF-IGN78 pour la Corse (dont l'origine est le niveau moyen de la mer à Ajaccio). Le réseau NGF-IGN69 comprend 40 polygones fermés de 1^{er} ordre. Chaque polygone de 1^{er} ordre est divisé environ en 7 mailles de 2^e ordre et chaque maille de 2^e ordre est divisée en 10 à 15 mailles de 3^e ordre. Il existe, à l'intérieur des mailles de 3^e ordre, des traverses de 4^e ordre. L'erreur probable du réseau de nivellement primordial est de 1,3 mm par kilomètres. Le repère fondamental du réseau est un rivet déjà scellé dans le bâtiment abritant le marégraphe de Marseille (anse Calvo), dont l'altitude est de 1,661 m.

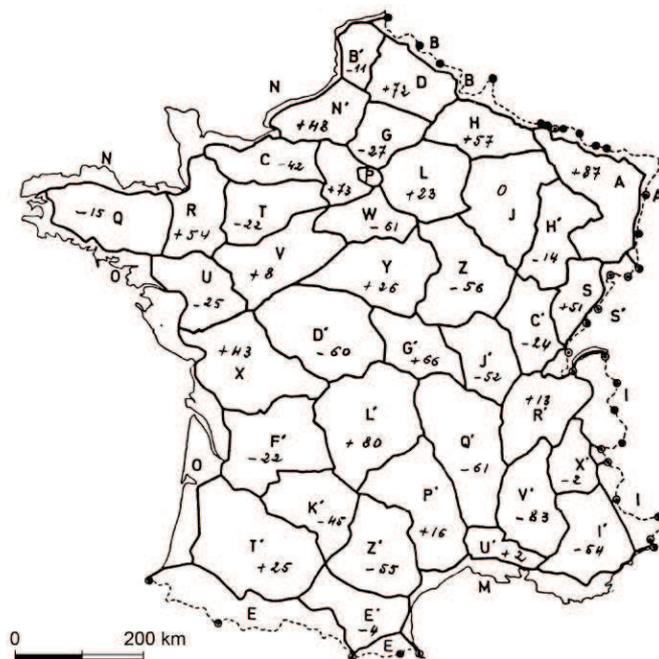


Figure I-17 : Mailles de 1^{er} ordre du réseau NGF-IGN69 [Rebischung & Duquenne, 2008].

I.3.3.2.4. Incertitudes liées au passage d'un réseau NGF à un autre

Le passage d'un réseau NGF à un autre est source d'incertitudes qu'il faut avoir à l'esprit. En effet, les trois réseaux ont été observés et calculés différemment et ne sont pas sujets aux mêmes erreurs.

Les altitudes du réseau Bourdalouë sont presque partout supérieures à celles du réseau Lallemand, ainsi que les altitudes du réseau IGN69 sont supérieures à celles du réseau Lallemand (de 60 cm à Dunkerque et d'environ 33 cm à Paris) et à chaque fois, leurs écarts ne sont donc pas constants sur l'ensemble du territoire. En effet, il existe, par exemple, une pente Nord-Sud entre les réseaux NGF-Lallemand et NGF-IGN69 [Kasser, 1989]. Il convient donc de définir précisément les valeurs de conversion entre les trois réseaux NGF selon le site étudié.

A noter que le réseau NGF-IGN69 n'est pas parfait, lui non plus, et qu'un biais important Nord-Sud, de l'ordre d'une vingtaine de centimètres, a été également introduit lors de sa réalisation (*figure I-18*). C'est une des raisons pour lesquelles l'IGN a établi un nouveau réseau de nivellement, dénommé NIREF (Nivellement de Référence Français), mais uniquement pour améliorer la recherche et les études en cours. Celui-ci n'est en effet pas destiné à devenir le nouveau système vertical officiel en France [Rebischung & Duquenne, 2008].

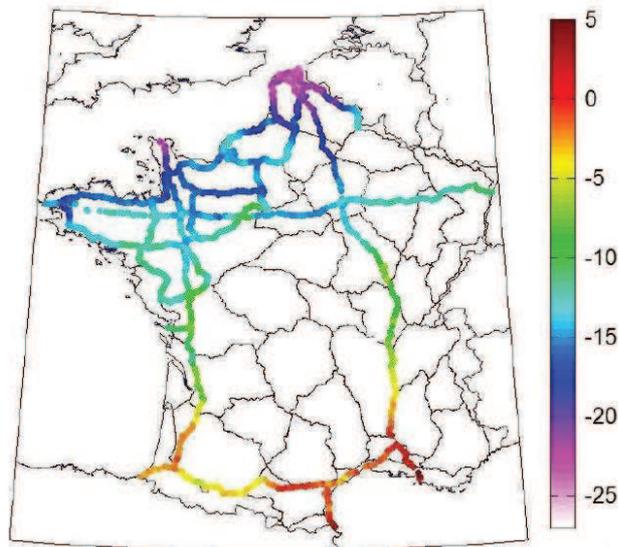


Figure I-18 : Ecarts (en centimètres) entre les réseaux NGF-IGN69 et NIREF. Une pente Nord-Sud de l'ordre d'une vingtaine de centimètres est clairement identifiable [Rebischung & Duquenne, 2008].

I.3.3.3. Repères de nivellement et de marée

Un repère de nivellement est défini comme un point matérialisé dont l'altitude est déterminée avec précision. Parmi ces repères, on désigne un repère fondamental, dont l'altitude est fixée conventionnellement et sert de point de départ aux calculs de toutes les altitudes d'un réseau de nivellement (l'altitude d'un point fondamental est en général fixée conventionnellement à partir des observations d'un marégraphe dont il est proche). En France métropolitaine, ces repères donnent accès au système de référence NGF-IGN69. Leurs fiches signalétiques sont accessibles sur le serveur <http://geodesie.ign.fr/fiches/> (consulté le 1^{er} décembre 2011). Les repères du réseau sont posés sur les supports les plus stables et les plus durables possibles.

Il existe de nombreux types de repères de nivellement (généralement métalliques), de forme et de nature différente (*figure I-19*). Ce qui importe est la définition précise de la partie du repère à laquelle se rapportera l'altitude déterminée. L'erreur correspondante (accidentelle) doit être de l'ordre du dixième de millimètre. En France, les principaux repères de nivellement posés depuis 1884 portent systématiquement une pastille hémisphérique sur laquelle vient reposer le talon de la mire. C'est donc le sommet de cette pastille qui est déterminé en altitude, car parfaitement défini. Les types de repères existants sont :

- Repère Bourdalouë (depuis 1850 environ) : repère cylindrique d'environ 13 cm de diamètre
- Repère cylindrique de type médaillon
 - ↳ NGF : avec pastille sur une tablette
 - ↳ IGN : avec pastille directement sur la partie cylindrique
- Repère boule, de type T.S. (Travaux Spéciaux)
- Repère à console
- Repères locaux de forme variable...
- Rivets en acier en queue de carpe
- Repères naturels : points facilement identifiables (sommets de bornes ou de marches, échelle graduée, seuil d'une porte ou base d'un quai, etc.)

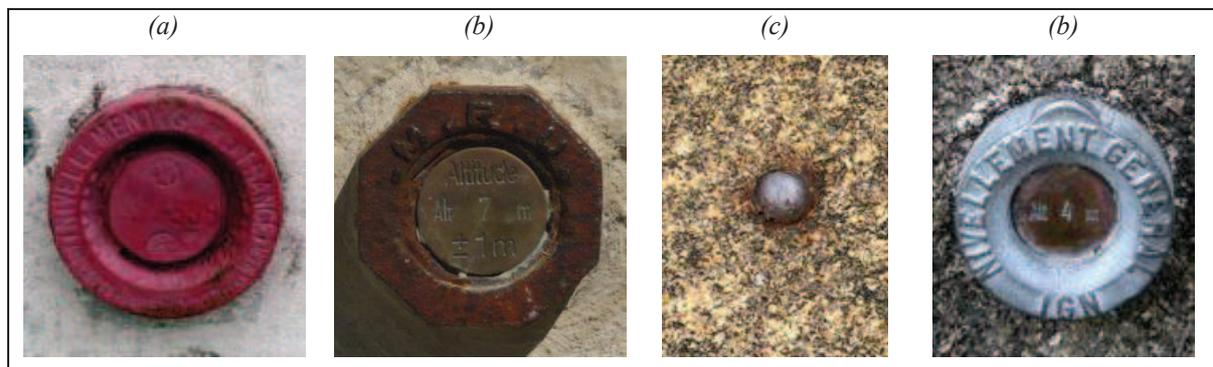


Figure I-19 : (a) Repère Bourdalouë ; (b) repère local octogonal (M.R.U.) ; (c) rivet en acier ; (d) repère cylindrique type M (IGN).

Les repères de marée constituent un ensemble de repères de nivellement proche d'un observatoire marégraphique, dont l'objectif premier est d'assurer la pérennité de la référence verticale des mesures du marégraphe. Le SHOM recommande l'implantation d'au moins trois repères fixes autour d'un observatoire, et suffisamment éloignés les uns des autres afin d'éviter leur destruction simultanée, notamment lors de travaux portuaires. L'un de ces repères est désigné comme le repère fondamental de l'observatoire, et il s'agit de préférence d'un repère de nivellement intégré au réseau NGF-IGN69. Les cotes de l'ensemble des repères de marée, par rapport au zéro hydrographique et au réseau NGF-IGN69 sont consignées dans une fiche d'observatoire de marée, ainsi que des plans et des photos des repères, aidant à les retrouver.

I.3.4. Notion de zéro hydrographique

Le zéro hydrographique, ou zéro des cartes marines, est le niveau de référence à partir duquel sont comptées, positivement vers le nadir, les sondes portées sur les cartes marines et, positivement vers le zénith, les hauteurs de marée fournies par l'annuaire des marées [Wöppelmann *et al.*, 1999]. En d'autres termes, c'est l'équivalent en mer de la surface de référence des altitudes terrestres (NGF-IGN69). Il est défini en fonction de critères visant à assurer la meilleure sécurité possible aux navigateurs. En France, il est choisi comme le niveau des plus basses mers astronomiques, en conformité avec les recommandations de l'OHI (Organisation Hydrographique Internationale) [Simon, 2007a]. Le niveau réel de la mer ne descend donc que très exceptionnellement en dessous de ce niveau théorique.

Le choix du zéro hydrographique est donc conventionnel, et sauf cas exceptionnel, il doit également être définitif. En effet, bien que cela soit possible et tentant, au vu des progrès technologiques et de l'amélioration de la précision obtenue, la réalisation du zéro hydrographique ne devrait pas être remise en cause, en raison de la stabilité recherchée de cette référence. Or, en pratique, cette règle n'est pas souvent respectée, comme nous le verrons dans la rade de l'île d'Aix, par exemple.

Le zéro hydrographique est coté par rapport à des repères de marée stables installés à proximité de l'observatoire marégraphique qui sont eux-mêmes cotés dans le système de référence NGF-IGN69. Mais désormais, il est aussi coté dans un système de référence internationale, l'ITRS (*International Terrestrial Reference System*). L'une des particularités du zéro hydrographique est que le résultat de sa réalisation n'est pas le même sur l'ensemble du littoral français. En effet, les régimes de marée ainsi que les effets météorologiques et océanographiques étant différents d'un lieu à l'autre du littoral, le zéro hydrographique est associé à une zone de marée restreinte, pour laquelle est désigné un port de référence [Wöppelmann, 1997].

I.3.5. Référence de l'appareil de mesure

La référence de l'appareil de mesure correspond traditionnellement à la graduation (virtuelle ou réelle) zéro de cet appareil. S'il s'agit d'une échelle de marée, la graduation zéro mètre, ou zéro Pied est la référence des mesures, s'il s'agit d'un marégraphe, d'un altimètre ou encore d'une bouée GNSS, la référence instrumentale est alors un plan horizontal virtuel indiquant le niveau zéro de l'appareil. Il est recommandé de caler la référence de l'appareil de mesure de telle sorte qu'elle se confonde avec le zéro hydrographique, afin d'éviter toute confusion dans l'utilisation future des mesures. Si aujourd'hui cette règle est bien respectée, ce n'était pas systématiquement le cas aux 18^e et 19^e siècles. Il convient alors de retrouver la correspondance entre le zéro des mesures et le zéro hydrographique.

Dans le cas des marégraphes à flotteur mis en place par Chazallon dès le milieu du 19^e siècle, la référence de l'appareil devait être identique à celle de l'échelle de contrôle, installée à proximité visuelle immédiate du marégraphe. En pratique, cette règle était difficile à respecter, pour diverses raisons : absence de l'échelle de contrôle, emportée par la mer lors d'une tempête ; mauvais réglage du marégraphe lorsque celui-ci est remis en marche suite à la rupture du fil du flotteur lors d'une tempête ; mauvais réglage du marégraphe après avoir remplacé le marégramme, etc. Cette non-correspondance entre la référence du marégraphe et la référence de l'échelle de marée entraîne de nombreuses difficultés dans la construction d'une série temporelle cohérente. De même, le zéro de l'échelle de contrôle devait être confondu (identique) au zéro hydrographique en vigueur. Cette règle, bien respectée par la suite, a connu de nombreux balbutiements lors de la mise en place des premiers marégraphes, et notamment lors de l'installation de celui du fort Enet.

I.4. Réseaux de stations du niveau marin et bases de données

I.4.1. Les différents types de données

I.4.1.1. Données du niveau de la mer

Il existe différents types de données du niveau marin, que l'on peut différencier par leur échantillonnage d'une part, et leur mode d'enregistrement d'autre part. Du mode d'enregistrement dépendra également le mode d'archivage des données.

Les données les plus anciennes étaient en effet consignées dans des cahiers de registres, rédigés à la main. Parmi ces données se trouvent des hauteurs de pleines mers, des hauteurs de pleines et basses mers, ainsi que des hauteurs d'eau mesurées à un pas de temps donné (15 minutes ou 1 heure par exemple). Puis, au milieu du 19^e siècle sont apparus les premiers marégraphes, et avec eux, la mesure en continu des variations de la hauteur d'eau. Ces variations étaient enregistrées sous la forme de courbes sur une feuille appelée marégramme. En France, en plus des marégrammes, les hauteurs d'eau tous les quarts d'heure étaient reportées à la main sur un registre des marées. L'ensemble de ces mesures anciennes est aujourd'hui conservé dans des centres d'archive, et n'est pas accessible sous forme numérique. Le premier inventaire de ces mesures, non exhaustif, n'a d'ailleurs été réalisé que récemment (inventaire disponible en annexe du manuscrit de thèse de Pouvreau [2008]), avec difficulté car, avec le temps, les documents archivés ont changé de localisation (parfois plusieurs fois) avec des logiques d'archivage qui ont, elles aussi, évoluées. On retrouve, par exemple, des mesures du fort Boyard dans les archives du

SHOM, à Brest, alors que leur description (parfois appelée métadonnée) est conservée dans les archives du Service Historique de la Défense, à Rochefort.

Ces données anciennes constituent un patrimoine précieux qu'il conviendrait de sauvegarder et de valoriser. Une des pistes de sauvegarde, mise en place par le BODC (British Oceanographic Data Centre) est la numérisation systématique de tous les registres de marée et marégrammes anciens. On peut d'ailleurs consulter en ligne⁶ quelques-uns de ces documents historiques (figure I-22).

Historical UK tide gauge data - scanned charts and ledgers

View image

Fixed station : Sheerness
 Location : 51.445°N 0.74517°E
 Period : 1870-05-01 — 1870-05-31
 Data themes : Sea level, Air pressure, Wind speed and direction, Other meteorological measurements
 Originator : Ministry of Defence, Hydrographic Dept.
 Download original scan : JPEG (~ 1.9 MB)

New query | Results | Found 429 | Show 5 |

Day		High Water				Barometer at High Water	Low Water				Barometer at Low Water	Range of Tide F. I.	Moon's Age	Wind		Turn of Stream		
		Time		Height			Time		Height					Direction	Force	Flood		Ebb
		H.	M.	F.	I.		H.	M.	F.	I.						H.	M.		H.
1	A.M.	0-50	3-0	29-8	7-0	7-2	29-60	16-2					NW	4	FB			
	P.M.	1-0	8-3	29-4	6-50	7-2	29-50	15-5					NW	3	6			
2	A.M.	0-15	8-4	29-60	7-20	7-2	29-65						NW	5	9			
	P.M.	1-20	8-2	29-70	7-20	7-2	29-70	14-11					NW	4	9			
3	A.M.	1-30	8-1	29-80	7-55	6-10	29-75	14-11					NW	4	9			
	P.M.	1-45	8-8	29-80	7-45	6-4	29-80	15-0					NW	3	9			
4	A.M.	2-0	8-4	29-80	7-50	7-4	29-90	15-8					NW	3	9			
	P.M.	2-10	8-2	29-10	8-30	7-1	29-20	15-3					NW	3	9			

Figure I-22 : Extrait du registre de marée de Sheerness (mai 1870), disponible sur le site internet du BODC. Un outil de zoom est proposé en ligne, comme le montre le cercle noir sur l'image.

Depuis la fin du 20^e siècle et l'avènement des marégraphes côtiers numériques, le mode d'enregistrement des hauteurs d'eau est numérique, ce qui facilite à la fois leur disponibilité et leur archivage. L'échantillonnage des données peut varier, d'une minute à une heure. Depuis cette révolution technologique, de très nombreuses données sont disponibles, aussi bien pour la communauté scientifique que pour le grand public et de nombreux efforts sont réalisés depuis plusieurs années pour organiser l'archivage et la mise à disposition des données. Afin de faciliter les éventuelles recherches du lecteur, nous présentons, ci-après, un aperçu, non exhaustif, des bases de données du niveau de la mer.

⁶ https://www.bodc.ac.uk/data/online_delivery/historical_uk_tide_gauge_data/, consulté le 1^{er} décembre 2011.

I.4.1.2. Données utiles à la compréhension des variations du niveau marin

I.4.1.2.1. Pression atmosphérique

Les données de pression atmosphérique sont souvent utilisées pour corriger les données du niveau de la mer. Nous présentons ici, quelques jeux de données de pression atmosphérique utilisables pour une étude couplée avec le niveau marin. A noter que beaucoup d'études se servent de champs de pression reconstitués selon des grilles d'interpolation, plutôt que de séries temporelles d'une seule station, en raison du manque de données pour les stations individuelles dans de nombreuses régions du monde.

Le PSMSL recommande l'utilisation du jeu de données HadSLP2 pour les études du niveau marin. HadSLP2 est une production du *Met Office Hadley Centre's* et a été créé à partir d'observations terrestres et d'observations marines de 2 228 stations dans le monde (*figure I-23*). Ces observations ont été mélangées et les champs de pression ont été reconstruits suivant un procédé optimal d'interpolation. Le résultat est un ensemble de champs de pression mensuels à l'échelle mondiale, selon une grille de 5° de latitude et longitude, de 1850 à 2004 [Allan & Ansell, 2006].

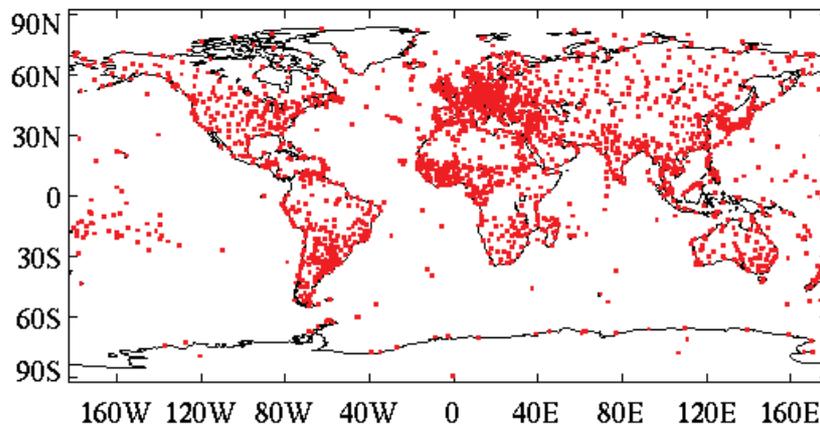


Figure I-23 : Répartition géographique des 2 228 stations ayant servi à la construction de HadSLP2 (source : Met Office Hadley Centre's).

Il existe d'autres jeux de données, et notamment EMSLP, une grille (5° x 5°) de champs de pression journaliers couvrant l'Atlantique nord et l'Europe, sur la période 1850-2003, et réalisé à partir de 86 stations. Pour plus de détails sur les jeux de données disponibles, vous pouvez consulter les pages internet du PSMSL⁷ ainsi que du groupe de travail GCOS-AOPC/OOPC⁸.

⁷ http://www.psmsl.org/train_and_info/geo_signals/atm.php, consulté le 1^{er} décembre 2011.

⁸ http://www.esrl.noaa.gov/psd/gcos_wgsp/, consulté le 1^{er} décembre 2011.

I.4.1.2.2. Contrôle de la stabilité des zéros

Le contrôle de la stabilité des zéros d'un observatoire est primordial. Pour cela, des mesures régulières de nivellement des repères de marée de l'observatoire doivent être effectuées. Ces mesures répondent à deux objectifs : d'une part le contrôle de la référence (souvent le zéro hydrographique en France) des hauteurs d'eau du marégraphe, d'autre part le contrôle de la stabilité locale du site sur lequel est installé l'observatoire (par comparaison des campagnes de nivellement successives). Les résultats de ces mesures de nivellement sont parfois mis à disposition des utilisateurs des données du niveau marin, comme sur le serveur SONEl⁹ en France ou sur le site du SHC¹⁰ (Canada). L'IGN¹¹ met également à disposition sa base de données de l'ensemble des repères de nivellement français, qui regorge d'informations précieuses pour le contrôle de la stabilité des zéros d'un observatoire marégraphe.

I.4.1.2.3. Mouvements terrestres verticaux

Les mouvements terrestres verticaux peuvent résulter de différents processus. Les marégraphes étant rattachés à la terre, ces mouvements sont enregistrés par les marégraphes. Dans certains cas, par exemple la détermination des zones potentiellement inondables, l'utilisateur est intéressé par la variation relative du niveau marin, et ne souhaite pas s'affranchir de ces mouvements terrestres. Mais d'autres études nécessitent de retirer l'impact du mouvement de la croûte terrestre pour obtenir une mesure de la variation absolue du niveau marin. Une solution est alors d'enlever ces mouvements verticaux estimés à partir de mesures GNSS. Ces dernières années, des progrès considérables ont été accomplis dans la réalisation d'un jeu global d'estimations GNSS colocalisées avec les marégraphes. Pour trouver des estimations GNSS, plusieurs solutions sont possibles. L'IGS (*International GNSS Service*) possède une page web de projet pilote de surveillance des repères de marée par GNSS¹². Le site internet CGPS@TG¹³ (*Continuous GPS at Tide Gauges*) offre également de telles données, et on peut trouver, sur le serveur SONEl¹⁴, une carte mondiale regroupant les mesures GNSS colocalisées aux marégraphes ; ainsi que des résultats d'analyses GNSS.

I.4.1.2.4. Rebond post-glaciaire

Egalement appelé ajustement isostatique glaciaire (GIA), le rebond post-glaciaire est l'un des signaux géophysiques présents dans les enregistrements marégraphe les plus modélisés. Il s'agit d'un

⁹ <http://www.sonel.org/-Controles-.html>, consulté le 1^{er} décembre 2011.

¹⁰ <http://www.meds-sdmm.dfo-mpo.gc.ca/isdm-gdsi/twl-mne/maps-cartes/benchmarks-reperes-fra.asp>, (1/12/11)

¹¹ <http://geodesie.ign.fr/fiches/>, consulté le 1^{er} décembre 2011.

¹² http://adsc.gfz-potsdam.de/tiga/index_TIGA.html, consulté le 1^{er} décembre 2011.

¹³ http://www.soest.hawaii.edu/cgps_tg, consulté le 1^{er} décembre 2011.

¹⁴ <http://www.sonel.org/-GPS-.html>, consulté le 1^{er} décembre 2011.

ajustement de la croûte terrestre suite à la fonte des calottes de la dernière période glaciaire. Le processus d'ajustement étant beaucoup plus lent que celui de la fonte, on enregistre encore aujourd'hui des variations de la croûte terrestre non négligeables dues au rebond post-glaciaire. Par exemple, lorsqu'un observatoire est situé dans un lieu soumis à une surrection, dont la vitesse est plus rapide que celle de l'élévation du niveau de la mer, la tendance du niveau marin relatif enregistré est alors à la baisse (c'est le cas de Stockholm par exemple). La *figure I-24* est un exemple de modèle des taux de mouvements de la croûte terrestre dus au rebond post-glaciaire. Les données de ce modèle sont disponibles sur le site du PSMSL¹⁵.

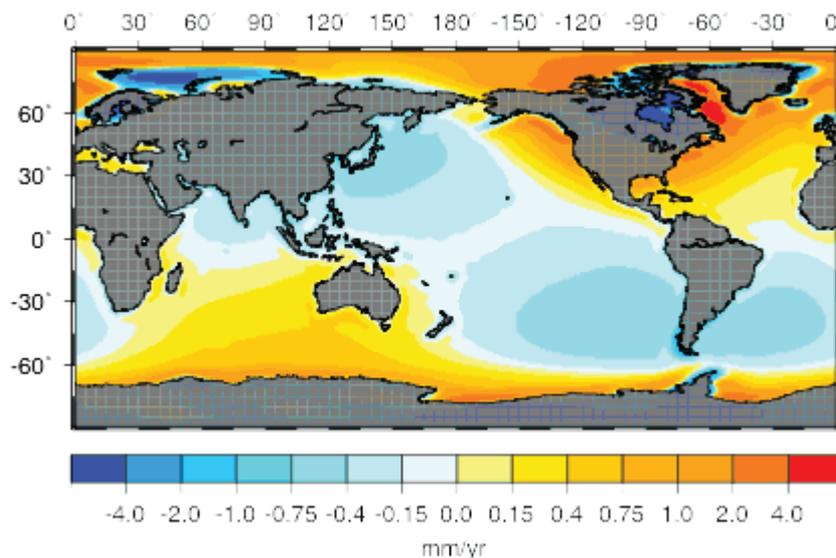


Figure I-24 : Prédications du modèle de Peltier indiquant les tendances (mm/an) des mouvements terrestres issu de l'ajustement isostatique, à partir de la solution ICE-5G (VM2) de résolution 1° x 1° [Peltier, 2004].

I.4.2. Réseaux de stations d'observation du niveau de la mer

I.4.2.1. Programme mondial GLOSS

GLOSS¹⁶ (*Global Sea Level Observing System*) est un programme international piloté conjointement par la Commission Océanographique Intergouvernementale (COI) de l'UNESCO et le JCOMM (*Joint Technical Commission for Oceanography and Marine Meteorology*) de l'Organisation Mondiale de la Météorologie (WMO). L'objectif de ce programme est la mise en place de réseaux de stations d'observation du niveau de la mer à l'échelle globale et régionale, avec comme objectif de fournir des informations essentielles aux programmes de recherche océanographique internationaux, et parmi eux ceux dédiés à l'étude des changements climatiques.

¹⁵ http://www.psmsl.org/train_and_info/geo_signals/gia/peltier/index.php, consulté le 1^{er} décembre 2011.

¹⁶ <http://www.gloss-sealevel.org/>, consulté le 1^{er} décembre 2011.



Figure I-25 : Répartition des stations du réseau GLOSS-GCN.

La composante principale de GLOSS est le réseau central (GCN) comprenant environ 290 stations réparties dans le monde (*figure I-25*). GLOSS est aussi concerné par l'installation de marégraphes en un certain nombre de sites sélectionnés, principalement des îles, pour la calibration des altimètres (l'ensemble GLOSS-ALT), ainsi que par des sites d'un intérêt particulier pour les études de la circulation océanique (l'ensemble GLOSS-OC). Enfin, GLOSS s'attache également à maintenir les observations du niveau marin en des sites où existent des enregistrements historiques de longue durée. La plupart de ces stations, dites GLOSS Tendances à Long Terme (LTT), sont dans l'hémisphère nord. De plus, depuis la 6^e session du groupe d'experts de GLOSS, en 1999, le potentiel de très grande valeur que représentent les mesures historiques archivées du niveau marin a été reconnu. Les données des marégraphes de GLOSS sont disponibles dans les centres de données océanographiques nationales et dans les centres internationaux du niveau de la mer, que nous décrivons un peu plus loin.

I.4.2.2. Exemples de réseaux régionaux

GLOSS a également stimulé le développement de plusieurs réseaux régionaux de marégraphes avec une plus grande densité spatiale que celle apportée par le GCN, pour répondre aux intérêts océanographiques particuliers de ces régions. Quelques exemples: le réseau IOCARIBE dans les Caraïbes, MedGLOSS, en Méditerranée et la Mer Noire (*figure I-27*), et ODINAFRICA en Afrique. Des études régionales particulières sont aussi en cours dans l'océan tropical Pacifique, l'Océan Indien, et les océans du Sud.

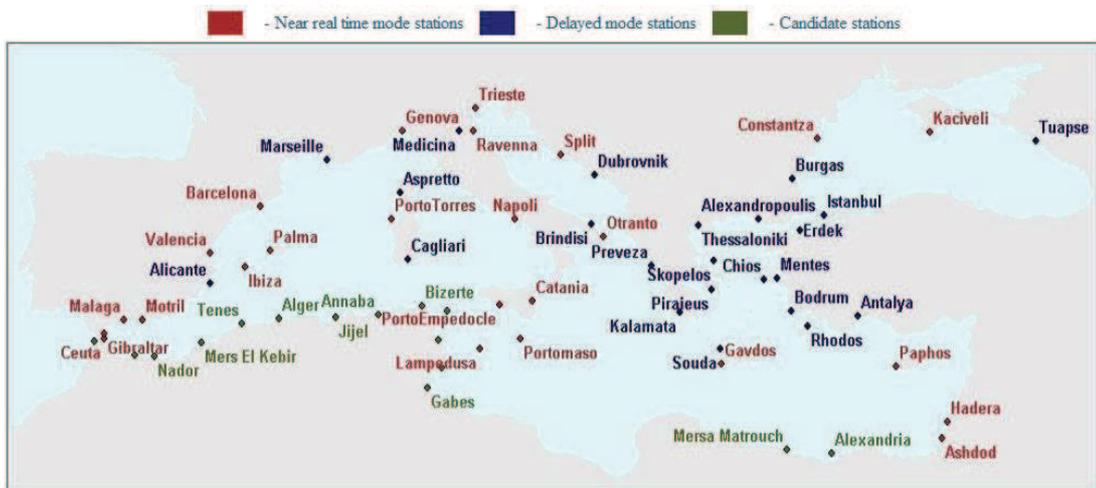


Figure I-27 : Carte des 43 stations composant le réseau MedGLOSS.

I.4.2.3. Réseaux nationaux

I.4.2.3.1. A l'étranger

Il existe de très nombreux réseaux nationaux de surveillance du niveau de la mer dans le monde. Ceux que nous listons ici permettent d'accéder aux observations réalisées. Cette liste est non-exhaustive et est présentée par ordre alphabétique. Les liens internet ont été consultés le 24 novembre 2011.

- *Allemagne*

Le serveur PEGELONLINE met à disposition les valeurs quotidiennes mesurées de différents paramètres, dont le niveau d'eau de la mer : <http://www.pegelonline.wsv.de/gast/start>

- *Australie*

Le National Tidal Centre (NTC), organisme fédéral, centralise le recueil des données. Ce réseau couvre les côtes australiennes et les îles du Pacifique Sud (Tonga, Vanuatu, Fidji, Papouasie...), soit une trentaine d'observatoires permanents :

<http://www.bom.gov.au/oceanography/projects/ntc/ntc.shtml>

- *Canada*

Le site internet du Service Hydrographique du Canada donne les prédictions des heures et des hauteurs des pleines et des basses mers ainsi que les niveaux d'eau horaires pour plus de sept cents stations au Canada. Il est également possible d'obtenir sur le site web les observations des niveaux d'eau pour certaines stations sur les Grands Lacs et le fleuve Saint-Laurent :

<http://www.charts.gc.ca/twl-mne/index-fra.asp>

- Espagne

Trois organismes gouvernementaux ont un réseau de marégraphes (24 observatoires sur l'ensemble des côtes espagnoles, y compris les îles Canaries) : l'Institut Géographique National espagnol, les Ports d'Etat et l'Institut Espagnol d'Océanographie :

http://www.puertos.es/en/oceanografia_y_meteorologia/redes_de_medida/index.html

- Etats-Unis

Le réseau comprend des observatoires tout le long des côtes mais aussi à l'étranger, principalement dans le Pacifique, soit plus de 190 stations marégraphiques. Ce sont, pour la plupart, des marégraphes acoustiques reliés en réseau :

<http://tidesandcurrents.noaa.gov/index.shtml>

<http://uhslc.soest.hawaii.edu/>

- Irlande

Le réseau irlandais (*Irish National Tide Gauge Network*) est en développement continu impliquant de nombreux organismes publics et privés, dont le Marine Institute. Le réseau permanent de surveillance du niveau de la mer comprend entre 35 et 40 stations :

<http://www.marine.ie/home/services/operational/oceanography/TideGauge.htm>

- Italie

Le portail IDROMARE met à disposition les données des 26 marégraphes composant le réseau de surveillance du niveau marin italien : <http://www.idromare.it/>

- Japon

Plusieurs organismes gouvernementaux possèdent des réseaux d'observatoires. Ce réseau est répertorié auprès du JODC (*Japanese Oceanographic Data Center*) :

<http://www.jodc.go.jp/data/tide/sea-level.html>

- Pays-Bas

Depuis soixante ans, les Pays-Bas ont mis en place un réseau d'alerte aux ondes de tempête le long de leurs côtes et le long de tous leurs cours d'eau. Ce réseau comporte actuellement 41 observatoires dont 5 observatoires au large et 36 observatoires côtiers. Il est géré par le ministère du Transport et de l'Équipement : http://www.rijkswaterstaat.nl/geotool/waterhoogte_tov_nap.aspx?cookieLoad=true.

- Royaume-Uni

Le réseau comprend actuellement 45 stations réparties sur l'ensemble des côtes de Grande-Bretagne et est géré par le NOC (*National Oceanography Centre*). Les données sont disponibles à l'ensemble de la communauté scientifique : <http://www.pol.ac.uk/ntslf/> (*National Tidal and Sea Level Facility*).

I.4.2.3.2. En France

Il existe, en France, plusieurs réseaux de surveillance du niveau de la mer. Depuis la signature de l'instruction permanente¹⁷ du Premier ministre le 20 avril 2010, le SHOM est le référent national pour l'observation in situ du niveau de la mer, la gestion et la diffusion des mesures en résultant, et fédère ainsi les réseaux de marégraphes existants en France (cf. I.4.3.2.1. *REFMAR*). Parmi ceux-ci, on retrouve les réseaux de (liste non exhaustive) :

- RONIM : 41 marégraphes (*figure I-28*)
- Service de Prévisions des Crues (SPC) : 12 marégraphes
- Grand Port Maritime de Bordeaux (GPMB) : 9 marégraphes
- Grand Port Maritime de Nantes-Saint-Nazaire : 7 marégraphes
- Office de l'eau de la Réunion : 4 marégraphes
- ROSAME : 4 marégraphes
- Université de Polynésie française : 3 marégraphes
- Observatoire de la côte d'azur (OCA) : 2 marégraphes

D'autres organismes possèdent au moins un marégraphe, parmi lesquels : les Ports Normands Associés, le Commissariat à l'Energie Atomique (CEA), l'IGN, le Conseil Général de la Martinique, l'Institut de Physique du Globe de Paris, etc.

- *Présentation succincte de RONIM*

Le projet RONIM a pour objectif la mise en place et le maintien en condition opérationnelle d'un réseau moderne de marégraphes, dans les ports principaux de France métropolitaine et d'outre-mer depuis 1992 [Dupuy & Batany, 1992]. Le projet vise à assurer la diffusion des données du réseau vers les usagers en temps réel et en temps différé. 42 MCN sont installés à la date du 1^{er} novembre 2011, dont 7 dans les territoires d'outre-mer, un en Principauté de Monaco et un dans le port de Toamasina (Madagascar). Les ports suivants sont prévus d'être équipés d'ici 2013 : Port Ferréol - Les Issambres et Saint Pierre et Miquelon. Pour plus d'informations : http://www.shom.fr/fr_page/fr_act_oceano/maree/maree14.htm

¹⁷ Instruction du Premier ministre Relative à l'observation du niveau de la mer et à la gestion et la diffusion des données en résultant, N°863/SGMER, Paris, le 20 avril 2010.

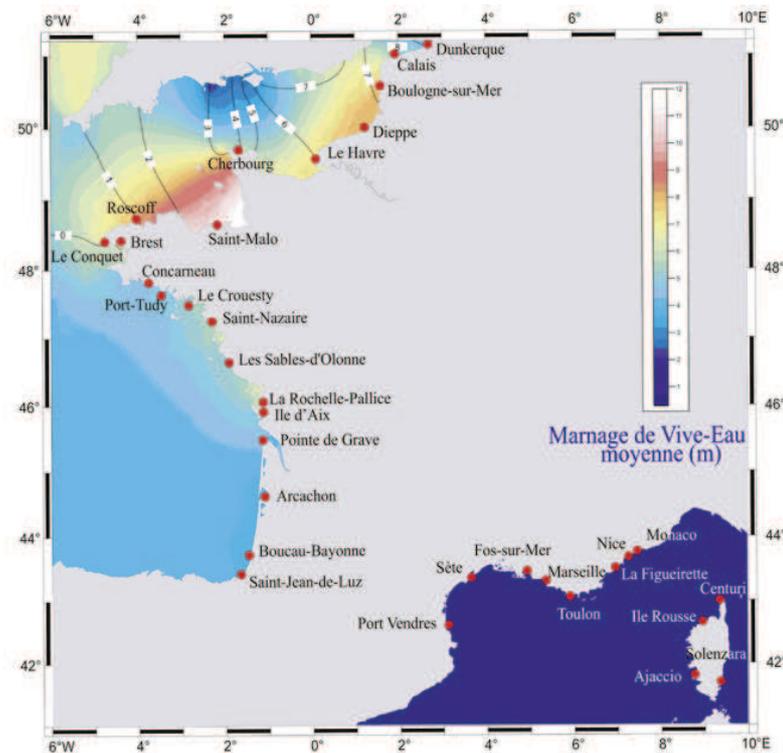


Figure I-28 : Répartition géographique des observatoires du réseau RONIM en France métropolitaine.

I.4.3. Bases de données sur internet

I.4.3.1. Bases de données mondiales

I.4.3.1.1. BODC¹⁸

Le BODC (British Oceanographic Data Centre) est un service national anglais de centralisation et de distribution de données relatives à l'environnement marin. Le portail du niveau marin sur le site internet du BODC fournit diverses données du niveau de la mer, de différentes stations : du Royaume-Uni et à travers le monde. Les données distribuées sont aussi bien numériques qu'analogiques. Par exemple, les

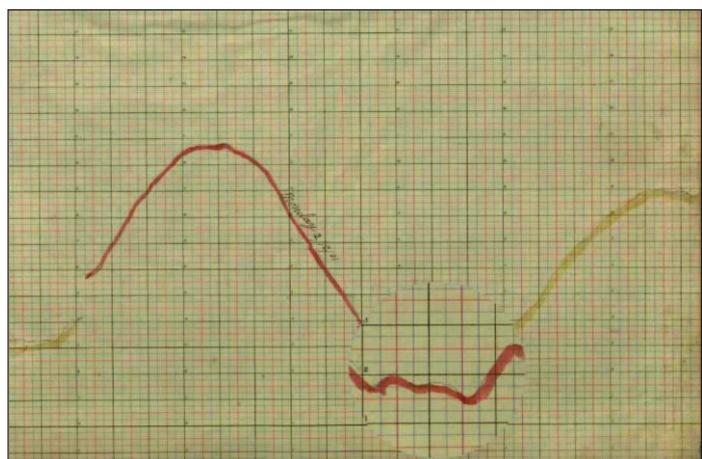


Figure I-29 : Marégramme du 2 décembre 1901 enregistré à Belfast, disponible sur le site internet du BODC. Un outil de zoom est proposé en ligne, comme le montre le cercle en bas de l'image.

¹⁸ https://www.bodc.ac.uk/data/portals_and_links/sea_level/, consulté le 1^{er} décembre 2011.

marégrammes historiques de la station de Belfast sont consultables en ligne (*figure I-29*). Le BODC est également un centre d'archives du programme GLOSS. A ce titre, environ 3 550 années de données provenant de 160 stations de 20 pays différents sont disponibles en téléchargement (*figure I-30*).

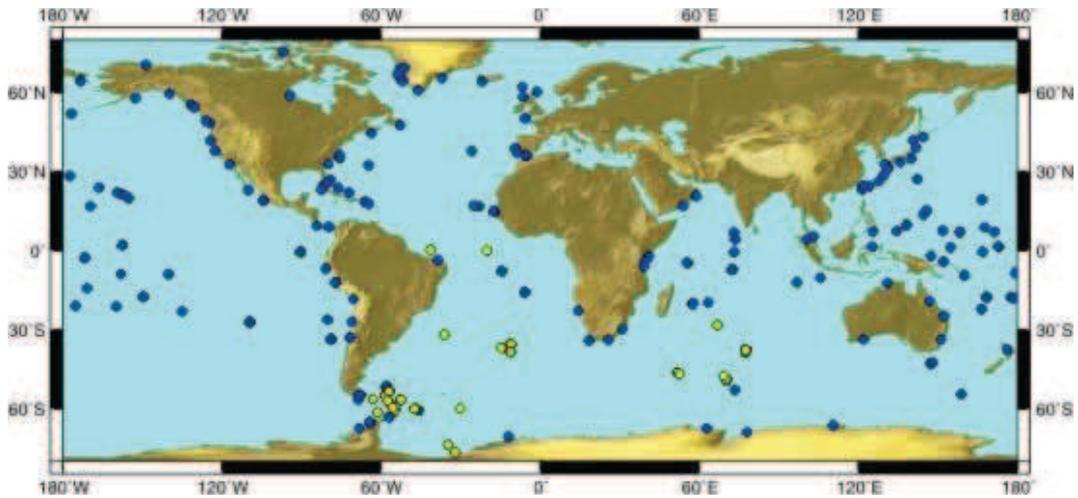


Figure I-30 : Répartition géographique des données du niveau marin disponibles sur le serveur du BODC. En bleu : stations marégraphiques côtières ; en jaune : marégraphes à capteurs de pression.

I.4.3.1.2. PSMSL¹⁹

Le Service Permanent pour le Niveau Moyen des Mers (PSMSL) a été établi à l'Observatoire de Bidston en 1933 comme un centre de données international du niveau moyen de la mer. Aujourd'hui il est responsable de la collecte, de la publication et de la distribution des données, ainsi que de l'analyse de ces données [Woodworth & Player, 2003]. Le site donne également des informations et des conseils sur les aspects pratiques de la mesure du niveau de la mer. La banque de données contient actuellement les séries d'un peu plus de 2 000 stations (2 111 au 7 décembre 2011, *figure I-31*), en constante augmentation en accord avec la politique de recherche continuelle de nouvelles données.

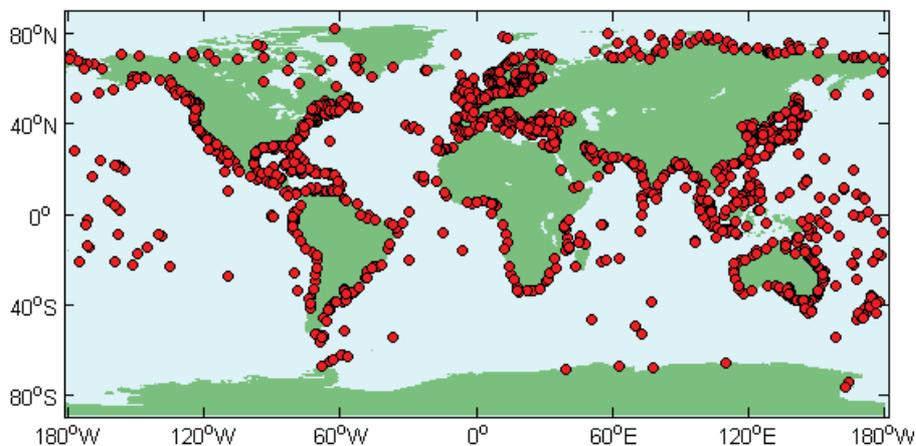


Figure I-31 : Répartition géographique des stations de la banque de données du PSMSL.

¹⁹ <http://www.psmsl.org/>, consulté le 1^{er} décembre 2011.

Les données du niveau marin fournies sont des moyennes mensuelles et annuelles. L'ensemble des informations documentaires nécessaires à l'exploitation des hauteurs d'eau est également disponible. Dernièrement, quelques outils ont également fait leur apparition, comme une carte interactive des anomalies du niveau marin pour chaque station répertoriée (depuis le 2 novembre 2011) ou comme une autre carte interactive, permettant d'observer les tendances relatives du niveau de la mer de l'ensemble des stations du PSMSL, sur une période commune choisie (*figure I-32*).

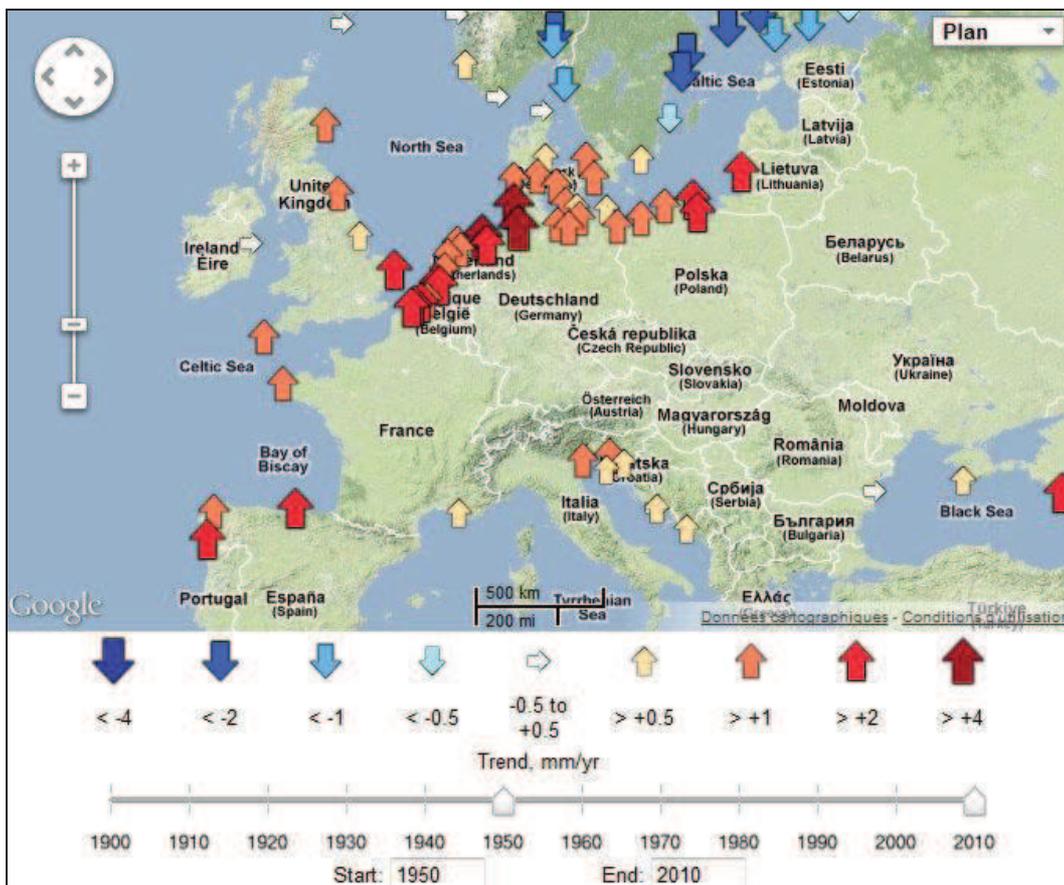


Figure I-32 : Carte interactive des tendances du niveau marin des stations du PSMSL. L'utilisateur a le choix de la période analysée, en modifiant les curseurs situés en dessous de la carte.

I.4.3.1.3. IOC - Sea Level Station Monitoring Facility²⁰

Le service de visualisation en temps réel du niveau de la mer, devenu depuis peu le centre de données temps réel de GLOSS (VLIZ), développé par la COI (UNESCO), a pour objectifs de fournir un aperçu du statut opérationnel des réseaux marégraphiques en temps réel ainsi qu'un service de visualisation des données brutes acquises par les marégraphes, également en temps réel. Pour exemple, la *figure I-33* présente les informations de la station de La Rochelle. Ce site offre notamment un aperçu des stations marégraphiques du programme GLOSS. A noter que la distribution de données de qualité à

²⁰ <http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/>, consulté le 1^{er} décembre 2011.

destination du monde de la Recherche n'est pas l'objectif de ce service. Ici, il s'agit uniquement de visualiser et contrôler en temps réel les réseaux marégraphiques opérationnels. Au 23 novembre, 61 stations françaises sont accessibles sur ce site.

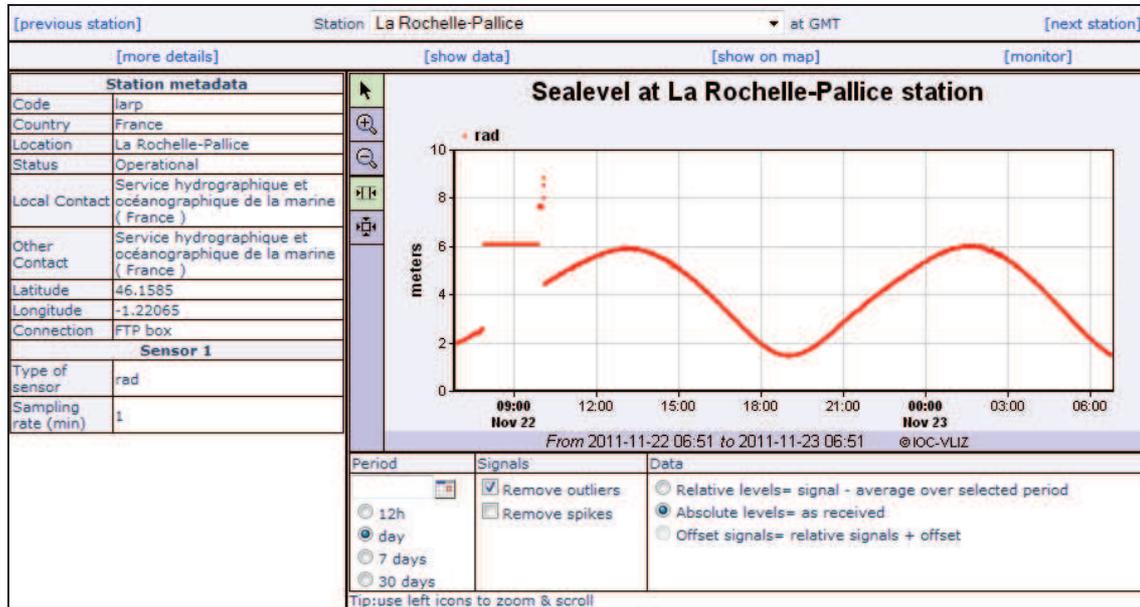


Figure I-33 : Copie d'écran des informations de la station de La Rochelle disponibles sur le serveur de l'IOC.

I.4.3.1.4. UHSLC²¹

Le centre du niveau de la mer de l'université de Hawaï (*University of Hawaii Sea Level Center*, UHSLC) collecte, organise, et distribue des données du niveau marin. Parmi ses fonctions principales, l'UHSLC a la responsabilité de la maintenance d'un réseau de marégraphes dans les océans pacifique et indien. De plus le service assure la collecte et le contrôle qualité de données du niveau de la mer de diverses stations du monde entier, notamment dans le cadre du programme GLOSS, pour lequel l'UHSLC est un fournisseur de données marégraphiques en temps réel dans le cadre du *Fast GLOSS*. Les observations marégraphiques (données horaires et moyennes journalières) de près de 500 stations de 70 organismes internationaux sont disponibles sur le site de l'UHSLC

²¹ <http://uhslc.soest.hawaii.edu/>, consulté le 1^{er} décembre 2011.

I.4.3.2. Bases de données françaises

I.4.3.2.1. REFMAR²²

Fédérer les réseaux existants et veiller à l'intégration des réseaux émergeant à l'échelle territoriale pour une diffusion pratique au travers d'un portail unique est l'un des objectifs des Réseaux de Référence des observations MARégraphiques (REFMAR) inscrit dans l'instruction du Premier ministre²³ relative à l'observation du niveau de la mer et à la gestion et à la diffusion des données en résultant. Le site REFMAR est hébergé par le SHOM et a pour objectif le développement d'un portail internet relatif aux observations du niveau de la mer permettant de regrouper puis de diffuser les données de différents producteurs, les informations relatives aux observatoires, des recommandations et bonnes pratiques de mesure ainsi que les informations nécessaires permettant de satisfaire les besoins inscrits dans l'instruction du Premier ministre. REFMAR s'attache notamment à la diffusion des mesures du niveau de la mer des réseaux actuellement déployés en assurant les conditions d'accessibilité et d'utilisation.

Les observations du niveau de la mer disponibles sur REFMAR sont :

- des hauteurs d'eau non validées (brutes) : mises à disposition en temps réel ou différé
- des hauteurs validées : elles sont disponibles en temps différé après contrôle
- des valeurs de surcotes et décotes visualisables en temps réel

I.4.3.2.2. SONEL²⁴

SONEL (Système d'Observation des variations du Niveau de la mEr à Long terme, anciennement Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales) vise le développement raisonné et rationnel des efforts portés dans le domaine de l'observation « in situ » du niveau marin à la côte par marégraphie ; l'échange de savoir-faire et de résultats ; le sauvetage d'observations historiques ; la valorisation scientifique des observations acquises par des organismes qui n'en ont pas toujours la vocation. Les principaux éléments d'observation disponibles sur SONEL sont :

- des moyennes journalières, mensuelles et annuelles du niveau marin
- des mesures de stations GNSS permanentes proches de marégraphes, mais aussi ailleurs lorsque celles-ci contribuent à la réalisation du repère de référence terrestre
- des rattachements géodésiques entre repères de marée et repères GNSS. Il s'agit souvent de différences de coordonnées ou de dénivelés issus de nivellement de précision ou de GNSS.
- des mesures d'étalonnage des marégraphes, mesures indépendantes du marégraphe avec sondes étalons lumineuses ou sonores.

²² <http://refmar.shom.fr/fr/>, consulté le 1^{er} décembre 2011.

²³ <http://refmar.shom.fr/fr/documents-officiels/>, consulté le 1^{er} décembre 2011.

²⁴ <http://www.sonel.org/>, consulté le 1^{er} décembre 2011.

CHAPITRE II. - VARIATIONS DU NIVEAU DE LA MER : CONTEXTE GLOBAL

II.1. Variabilité du niveau marin

On estime que le niveau moyen de la mer s'est globalement élevé à une vitesse de $1,7 \pm 0,2$ mm/an au cours du 20^e siècle [Church & White, 2011]. Ce chiffre et cette idée d'élévation globale du niveau marin sont généralement deux éléments qui marquent les esprits du grand public. Mais cette estimation mondiale cache une variabilité spatiale et temporelle importante, rendant la situation beaucoup plus complexe lorsqu'on s'y intéresse en détail. Ce chapitre est donc consacré à la variabilité de la partie basse fréquence du niveau marin, c'est-à-dire ses tendances.

II.1.1. Spatiale

L'analyse des tendances des différents enregistrements marégraphiques du 20^e siècle l'avait déjà laissé entrevoir : la vitesse de l'élévation du niveau marin n'est pas uniforme sur la planète. On constate, par exemple, une élévation de l'ordre de 3,00 mm/an à New York et 1,38 mm/an à Brest (calculées à partir des données du PSMSL), villes situées respectivement à l'ouest et à l'est du bassin atlantique. Ainsi, en dépit d'une tendance globale à l'élévation, il existe de grandes disparités régionales, représentant la variabilité spatiale du niveau marin.

Cette variabilité a pu être confirmée et mieux appréhendée avec l'avènement de la mesure du niveau de la mer par altimétrie satellitale, qui a l'avantage de couvrir l'ensemble des bassins océaniques du globe (contrairement aux marégraphes, installés à la côte). Comme le montre la *figure II-1*, les mesures altimétriques ont révélé d'importantes variabilités régionales du niveau marin, de l'ordre de ± 20 mm/an sur la période 1993-2008 [Cazenave & Llovel, 2010], reflète notamment :

- de la distribution non-uniforme du contenu thermique de l'océan [e.g. Ishii *et al.*, 2006], impliquant des variations des grands courants océaniques [e.g. Church *et al.*, 2008]
- de la fonte des glaces continentales et des effets gravitationnels associés à la redistribution des masses d'eau [e.g. Tamisiea & Mitrovica, 2011]
- de la redistribution des champs de pression atmosphérique [e.g. Woodworth *et al.*, 2010]
- des mouvements verticaux de l'écorce terrestre [e.g. Bouin & Wöppelmann, 2010].

Ces différences soulignent la difficulté de s'accorder sur les causes exactes de l'élévation du niveau de la mer et montrent toute l'importance de la variabilité spatiale. Il existe cependant des moyens de la réduire. Par exemple, on enregistre une diminution du niveau marin dans les régions scandinaves, principalement due à des mouvements verticaux de l'écorce terrestre, qu'il est possible de corriger si l'on détermine le mouvement du marégraphe dans un système de référence terrestre approprié [e.g. Wöppelmann *et al.*, 2009].

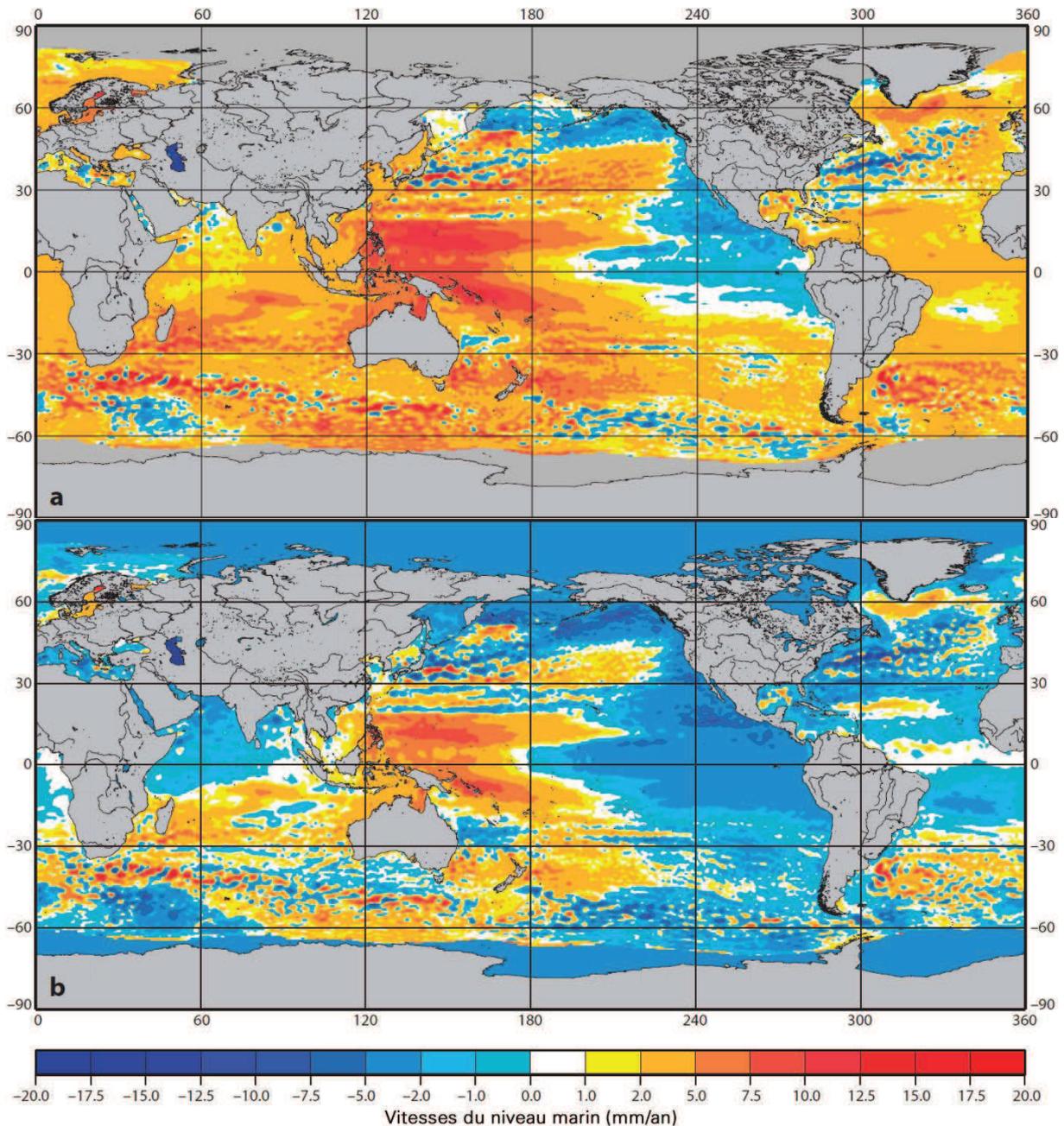


Figure II-1 : (a) Distribution géographique des vitesses du niveau de la mer entre janvier 1993 et décembre 2008, à partir des données de Topex/Poseidon et Jason 1. (b) Identique à (a) mais après retrait d'une tendance globale et uniforme de 3,4 mm/an [Cazenave & Llovel, 2010].

La *figure II-1* révèle que dans certaines régions, telles que l'ouest de l'océan Pacifique (phénomène cyclique ENSO), le Groenland, le sud de l'océan Indien et l'océan austral, les vitesses de

l'élévation du niveau marin sont près de trois fois supérieures à la moyenne mondiale ($+3,4 \pm 0,4$ mm/an), sur la période 1993-2008 [Cazenave & Llovel, 2010]. Cela correspond à une augmentation d'environ 15 cm depuis 16 ans. Plus récemment, Becker *et al.* [2012] ont confirmé et étendu cette observation à la période 1950-2009 pour l'ouest de l'océan Pacifique. Parmi leurs résultats, ils indiquent que la vitesse de l'élévation du niveau marin sur l'île de Funafuti (archipel des Tuvalu) est près de trois fois supérieure à la moyenne mondiale ($\approx 1,7$ mm/an) sur les soixante dernières années, soit une élévation de 30 ± 4 cm depuis 1950.

II.1.2. Temporelle

Nous allons le voir, la variabilité temporelle des tendances du niveau de la mer peut être très importante. C'est pourquoi il est impératif, en fonction du paramètre que l'on souhaite étudier, de bien définir la fenêtre d'étude (*e.g.* 400 000 ans, 20 000 ans, 300 ans, ou 10 ans, etc.) mais également la durée effective minimale nécessaire pour tirer des conclusions fiables. Nos travaux de recherche se placent à l'échelle séculaire des variations du niveau marin, c'est-à-dire que la fenêtre d'étude est le siècle. L'un des objectifs est de tirer une tendance fiable de l'évolution du niveau de la mer, dans le contexte de changement climatique. Quelle doit être la durée effective minimale des données à utiliser ? Nous répondrons à cette question, après avoir présenté brièvement l'évolution du niveau marin de 1 000 ka BP (= 1 000 000 ans *before present*) à aujourd'hui.

II.1.2.1. Du Pléistocène à l'Holocène

Le Pléistocène est la première époque géologique du Quaternaire, regroupant la plupart des dernières glaciations terrestres. Le début de cette période est approximativement estimé à 2 500 ka BP, mais nous ne décrivons le niveau marin qu'à partir de 1 000 ka BP ici. Ce million d'années nous permettant déjà d'avoir un aperçu de la variation du niveau marin lors des dernières périodes de glaciations de la Terre. Quant à la période de l'Holocène, elle représente environ les 10 000 dernières années (10 ka).

- 1 000 ka BP – 140 ka BP

Depuis des millénaires, le climat de la Terre varie selon les époques et les lieux. Les glaciations du Pléistocène présentent un caractère cyclique, provoquant une alternance des périodes glaciaires et interglaciaires. L'hypothèse du forçage climatique par des variations de l'orbite terrestre (cycles de Milankovitch) est ancienne et soutenue par des données expérimentales cohérentes [Hays *et al.*, 1976].

La *figure II-2* présente les variations du niveau marin de 1 000 ka BP environ à aujourd'hui [Bintanja *et al.*, 2005]. On constate que lors du dernier million d'années, le niveau de la mer a oscillé entre -140 m et +10 m par rapport au niveau actuel. Vers 400 ka BP et 120 ka BP, le niveau marin était à chaque fois supérieur à au niveau d'aujourd'hui, respectivement d'environ 10 m et 5 m. La *figure II-2a* montre également que les fluctuations globales du niveau marin étaient principalement dominées par la calotte glaciaire de l'Amérique du Nord.

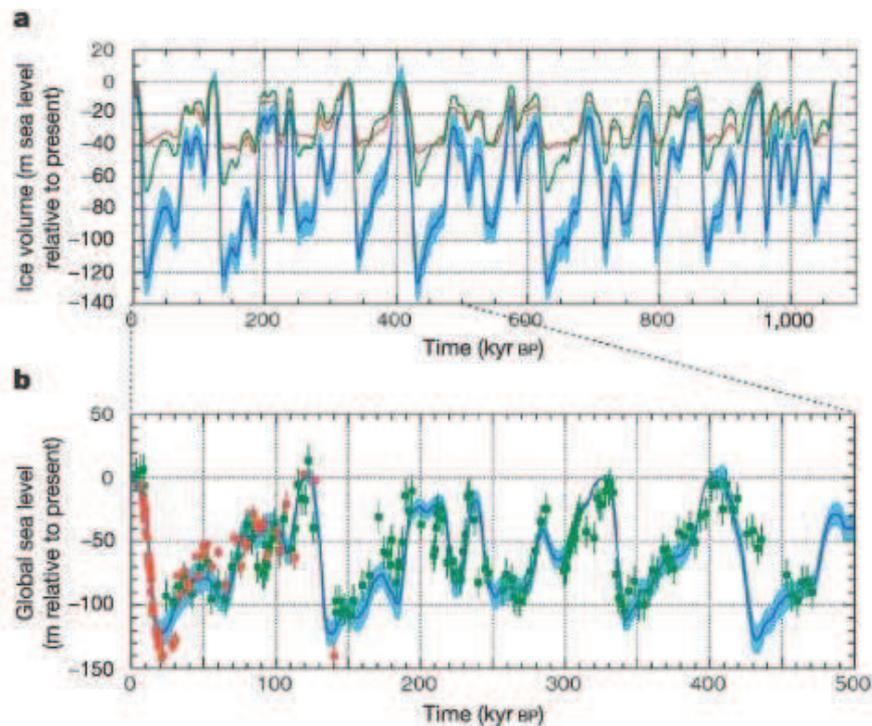


Figure II-2 : (a) Niveau marin global reconstruit de 1 050 ka BP à aujourd'hui (bleu), avec la contribution de l'Eurasie (rouge) et de l'Amérique du Nord (vert). (b) Identique à (a) mais centré sur la période 500 ka BP à aujourd'hui et comparé aux données sédimentologiques de la mer Rouge (carrés verts) et aux données des coraux de Nouvelle-Guinée et de la Barbade (carrés rouges) [Bintanja *et al.*, 2005].

• 140 ka BP – 20 ka BP

Le niveau de la mer a varié d'un peu plus de 120 mètres lors du dernier cycle glaciaire-interglaciaire (*figure II-3*), en raison des variations de la masse des calottes glaciaires principales de l'hémisphère nord [Lambeck & Chappell, 2001]. Les paléo-données des coraux indiquent que le niveau marin était de 4 à 6 m environ au-dessus du niveau actuel au cours de la dernière période interglaciaire, il y a environ 125 ka [Stirling *et al.*, 1998; Overpeck *et al.*, 2006]. Les modèles de simulation climatique et de variation de la calotte glaciaire [Otto-Bliesner *et al.*, 2006] indiquent que la température atmosphérique du Groenland était alors d'environ 3°C plus élevée qu'aujourd'hui et que la contribution de la fonte des calottes glaciaires de l'hémisphère nord à l'augmentation du niveau de la mer était de l'ordre de 2,2 à 3,4 m. Ces modèles indiquant que la majorité de l'élévation provenait de la fonte partielle de la calotte glaciaire du Groenland.

Pendant la dernière période glaciaire, le niveau marin s'est abaissé de plus de 120 mètres en dessous du niveau actuel. L'eau était alors stockée dans les calottes glaciaires de l'Amérique du Nord (Laurentides, Cordillères), du Groenland, de l'Europe du nord (Fenno-Scandinavie et région de Barents) et de l'Antarctique [Church *et al.*, 2008].

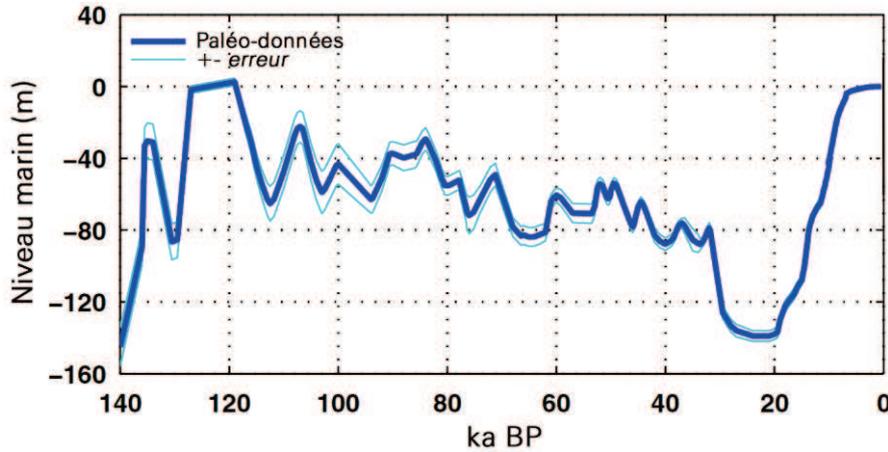


Figure II-3 : Estimation des variations du niveau marin depuis 140 ka. Modifié d'après Church *et al.*, [2008].

• 20 ka BP – 2 ka BP

Nous décrivons, ici, la variation globale du niveau de la mer sur la période 20 ka BP – 2 ka BP (figure II-4). Une présentation de la variation du niveau marin relatif à l'Holocène sur le littoral charentais est décrite au paragraphe III.7. *Contexte paléo-océanographique*. Nous venons de voir que lors de la dernière glaciation (20 ka BP), le niveau marin était environ 120 m plus bas qu'aujourd'hui. La fonte des principales calottes glaciaires de l'hémisphère nord a entraîné une remontée rapide du niveau, de 10 mm/an en moyenne, avec un pic de l'ordre de 40 mm/an, de 15 ka BP environ à 7 ka BP [Pirazzoli, 1996; Lambeck *et al.*, 2002]. Depuis 7 ka BP, des observations géologiques et archéologiques suggèrent que le niveau marin a peu varié, avec une tendance globale d'un peu moins de 0,1 mm/an [Gehrels *et al.*, 2011; Smith *et al.*, 2011].

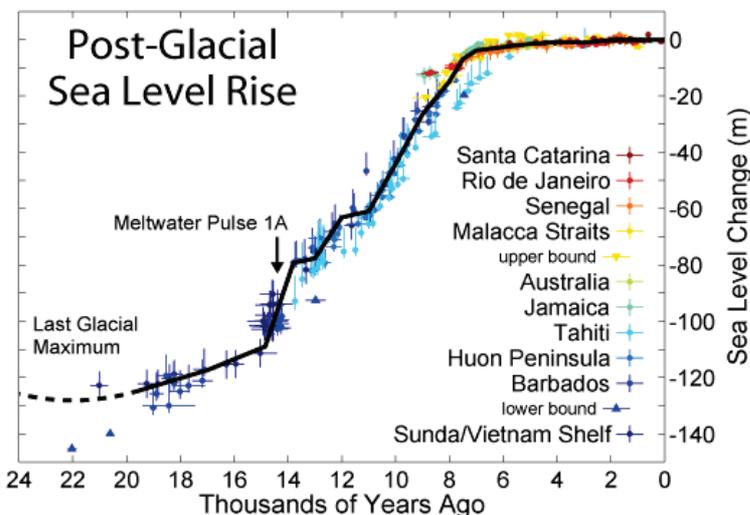


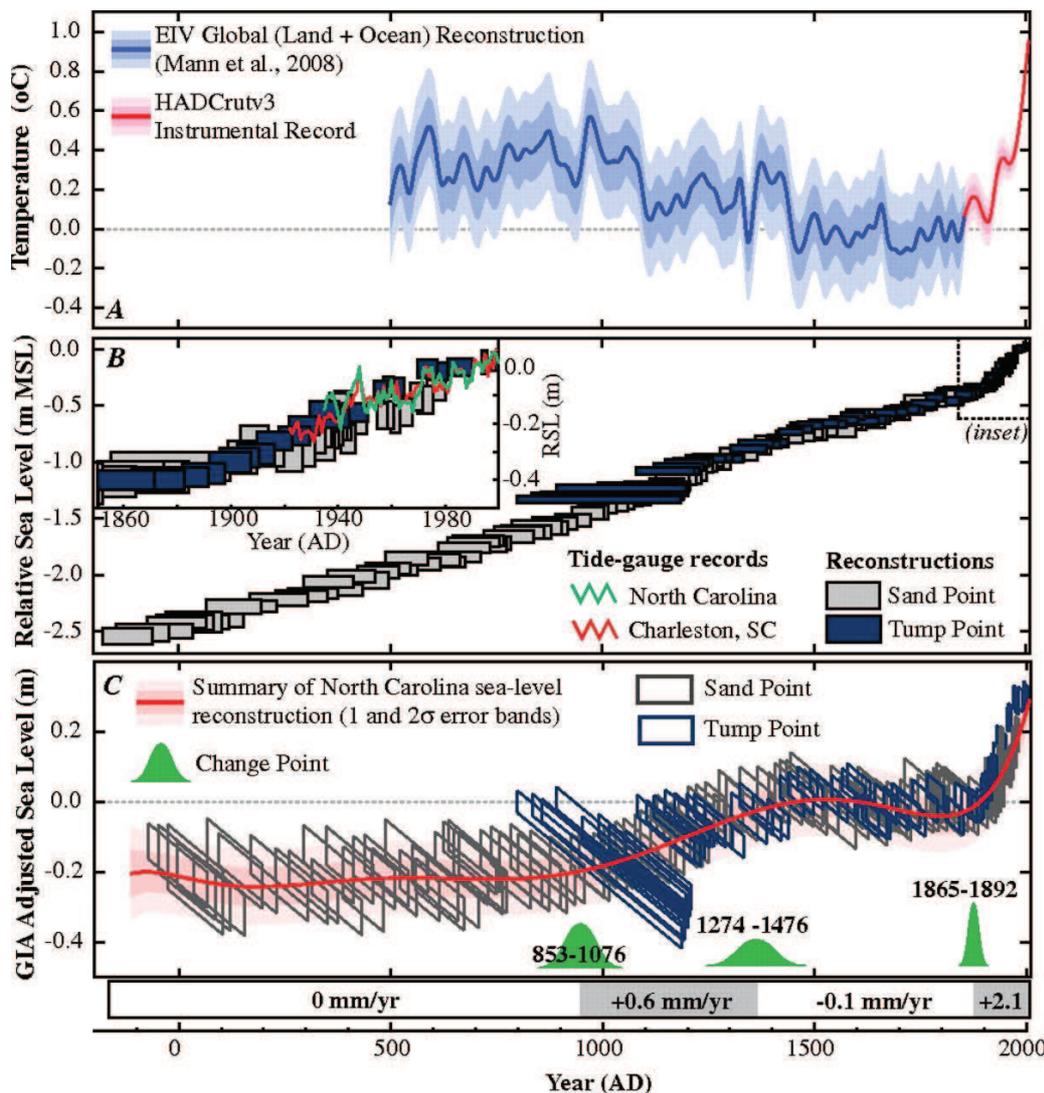
Figure II-4 : Estimation des variations du niveau marin depuis 20 ka. Image réalisée par Robert A. Rohde (*Global Warming Art*) à partir des données de Fleming *et al.* [1998], Fleming [2000] et Milne *et al.* [2005].

• *2 ka BP – aujourd’hui*

Plusieurs types de paléo-données peuvent être utilisés pour quantifier les variations du niveau marin sur les deux derniers millénaires (cf. II.2.2. *Quelle(s) alternative(s) aux séries marégraphiques ?*). La récente étude de Kemp *et al.* [2011] présente une nouvelle reconstruction du niveau marin depuis 2 ka BP, basée sur des enregistrements sédimentaires de marais salants de la côte atlantique des Etats-Unis (*figure II-5*). Les auteurs identifient quatre phases significatives, après correction du rebond postglaciaire :

- de 100 BC à l’année 960 environ : le niveau marin est stable (0 mm/an)
- de 960 à 1375 environ : légère élévation du niveau de la mer (+0,6 mm/an)
- de 1375 à 1880 environ : stabilité, voire légère baisse du niveau marin (-0,1 mm/an)
- de 1880 à aujourd’hui : élévation importante du niveau de la mer (+2,1 mm/an)

L’élévation du niveau marin depuis la fin du 19^e siècle correspond ainsi à l’élévation la plus rapide des deux derniers millénaires, à l’échelle séculaire. Le point d’inflexion de cette élévation est estimé entre 1865 et 1892. Notez la corrélation entre cette soudaine élévation et la variation de la température atmosphérique globale.



*Figure II-5 : (A) Construction composite de la température atmosphérique globale (océans + continents) filtrée avec une moyenne mobile sur 30 ans. (B) Construction du niveau marin relatif, comparé à des enregistrements marégraphiques. (C) Construction du niveau marin corrigé du GIA [Kemp *et al.*, 2011].*

II.1.2.2. Variation séculaire récente

II.1.2.2.1. Critère de sélection pour calculer une tendance séculaire

Pour évaluer une tendance fiable du niveau marin, il est nécessaire de travailler avec de longues séries marégraphiques, de préférence les plus longues possibles, et temporellement cohérentes, en dépit des changements de matériel de mesures ou du déplacement de repères de marée [Douglas, 2001]. En effet, la variabilité temporelle du niveau de la mer est importante et une tendance calculée sur 15 ans n'aura pas la même signification qu'une autre calculée sur 100 ans, en raison de la présence d'oscillations inter-décennales (cf. *I.1.3.1. Variations du niveau marin*).

Plusieurs auteurs ont proposé un critère de sélection pour le choix de séries marégraphiques, en fonction de leurs longueurs minimales. Quelle doit être cette durée effective minimale de données ? Citons quelques études parmi les nombreuses réalisées. Barnett [1984] n'utilise que des séries présentant plus de 30 ans de données. Pirazzoli [1986] estime que le critère de sélection doit être fixé à 50 ans, mais que l'on peut aussi utiliser des séries de plus de 30 ans après les avoir analysées en détail. Trupin & Wahr [1990] fixent la limite basse à 40 ans, Peltier & Tushingham [1991] choisissent la valeur de 50 ans, et Douglas [1991; 1992] élève encore le critère de sélection à 60 ans, puis à 70 ans Douglas [1997]. Plus récemment, Douglas [2001] explique que les séries de 10 à 20 ans ne sont pas adaptées à ce type de calcul et d'après Pugh [2004], les séries de moins de 25 ans sont celles qui présentent la plus grande variabilité. Dernièrement, Haigh *et al.* [2009] ont proposé une méthode permettant d'utiliser des séries d'au moins 30 ans, contre 50 ans classiquement. Cette nouvelle méthode nécessite d'étudier simultanément plusieurs stations voisines et de leur retirer leur variabilité commune avant le calcul de tendances.

La *figure II-6* a été réalisée à partir des 1 284 séries marégraphiques RLR du PSMSL (au 7 décembre 2011). Elle représente les tendances (ainsi que leurs écarts-types associés) de ces séries, estimées par régression linéaire à partir de moyennes annuelles. On constate que les séries de moins de 20 ans sont fortement perturbées par la variabilité inter-annuelle à décennale du niveau marin.

Douglas [2001] précise toutefois qu'il est important de ne pas appliquer un critère de sélection strict : chaque série doit être examinée avec soin afin de déterminer si, oui ou non, elle est suffisamment longue pour l'estimation d'une tendance fiable du niveau marin. Cela explique sans doute pourquoi les critères utilisés sont souvent propres à chaque étude, même si un consensus semble se dégager pour retenir un critère de l'ordre de 40 à 50 ans [Wöppelmann, 1997].

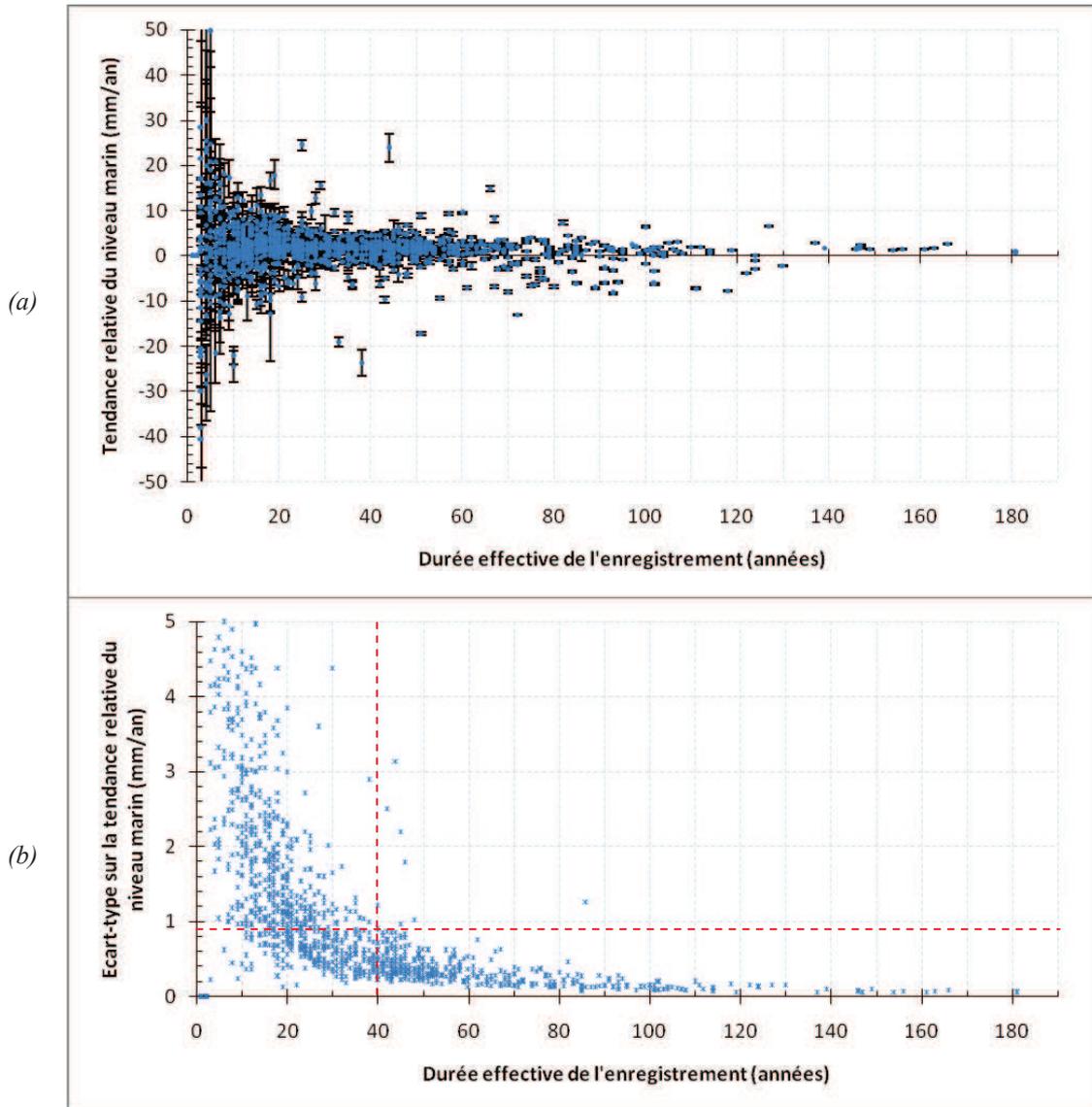


Figure II-6 : (a) Tendances relatives du niveau marin (mm/an) estimées par régression linéaire à partir des moyennes annuelles RLR du PSMSL, en fonction de la durée effective de l'enregistrement marégraphique. (b) Idem mais avec l'écart-type calculé sur la tendance.

II.1.2.2.2. Evolution globale du niveau de la mer

Jusqu'à présent, deux types d'approches ont été utilisés pour reconstruire une courbe d'évolution globale du niveau marin, puis calculer sa tendance. La première consiste à effectuer la moyenne des enregistrements marégraphiques, corrigés des mouvements verticaux terrestres, de différentes stations à travers le monde. Lorsque le nombre de stations choisies pour cette reconstruction est restreint et que les enregistrements sont globalement tous de la même longueur, cette méthode est relativement simple à appliquer. Cependant, lorsque le nombre de stations choisies est important, un problème apparaît : les séries n'ont pas toutes la même longueur et ne débute pas la même année. Il est alors nécessaire d'effectuer un découpage par période du calcul des tendances, puis de les regrouper pour obtenir une tendance globale. C'est par exemple la méthode employée par Holgate & Woodworth [2004]. Sur ce même principe, Jevrejeva *et al.* [2006] ont estimé la tendance d'une station mondiale virtuelle à partir des

moyennes du niveau marin de douze régions du monde. L'inconvénient de cette méthode est de ne prendre en compte que les mesures marégraphiques réalisées à la côte (îles ou continents). Mais, d'après White *et al.* [2005] et Prandi *et al.* [2009], les tendances à long terme du niveau marin global et côtier sont semblables. La deuxième approche consiste à utiliser des fonctions spatiales représentant des modes à grande échelle de la variabilité du niveau marin. Ces fonctions sont utilisées pour interpoler spatialement les différentes observations existantes (marégraphie et altimétrie) et obtenir ainsi une tendance globale du niveau marin, couvrant l'ensemble des océans (côte + large). Cette méthode a, par exemple, été employée par Church *et al.* [2004] et Church & White [2006; 2011].

Depuis un peu plus de 50 ans, de nombreuses études ont tenté d'établir une tendance globale ou régionale du niveau marin. Une revue non exhaustive de ces tendances est présentée dans le *tableau II-1*. Les tendances estimées sont très variables en fonction de la période d'étude, du nombre de stations marégraphiques utilisés, de la méthode employée, du critère de sélection des stations, de la répartition géographique de celles-ci, ou encore des corrections appliquées aux données (mouvements terrestres, effets saisonniers, etc.).

D'après Church & White [2006], le niveau global de la mer s'est élevé à la vitesse moyenne de $1,7 \pm 0,3$ mm/an au 20^e siècle. Ces mêmes auteurs ont récemment effectué une mise à jour de leur estimation : $1,7 \pm 0,2$ mm/an entre 1900 et 2009 (*figure II-7a*) [Church & White, 2011]. Les principales reconstructions effectuées ces dix dernières années (*tableau II-1*) sont en accord avec cette estimation de la tendance pour le 20^e siècle. Le point d'inflexion du début de l'élévation rapide du niveau marin semble se situer à la fin du 19^e siècle, aux alentours de 1880, d'après les reconstructions effectuées, en cohérence avec les résultats de stations marégraphiques individuelles [*e.g.* Wöppelmann *et al.*, 2006; Wahl *et al.*, 2011] ou des indicateurs paléo-environnementaux [*e.g.* Kemp *et al.*, 2011].

Globalement, avant les années 1930, la vitesse de l'élévation du niveau marin était inférieure à 1 mm/an. A la fin des années 1930 et jusqu'à la fin des années 1950, l'élévation s'est accélérée (un peu plus de 2 mm/an) atteignant même un pic d'élévation à 2,5 mm/an. De 1963 à 1991, de nombreuses éruptions volcaniques explosives ont eu lieu à travers le monde, provoquant un refroidissement de la température de surface des océans. Ce refroidissement a compensé une partie de l'élévation du niveau marin par effet de contraction thermique (= baisse du niveau), entraînant une légère diminution de la vitesse à moins de 2 mm/an [Church & White, 2006]. Le même phénomène s'est produit de 1990 à 1993 où l'éruption du volcan Bâti Pinatubo en juin 1991 a très probablement atténué l'élévation actuelle du niveau marin [Church & White, 2011].

La *figure II-7b* présente la reconstruction du niveau marin global depuis 1700 à aujourd'hui réalisée par Jevrejeva *et al.* [2008] à partir de 1 023 stations marégraphiques. D'après cette reconstruction, les auteurs estiment que l'accélération de l'élévation du niveau marin a débuté à la fin du

18^e siècle. L'estimation de l'élévation du niveau de la mer est de l'ordre de 6 cm au 19^e siècle et de 19 cm au 20^e siècle.

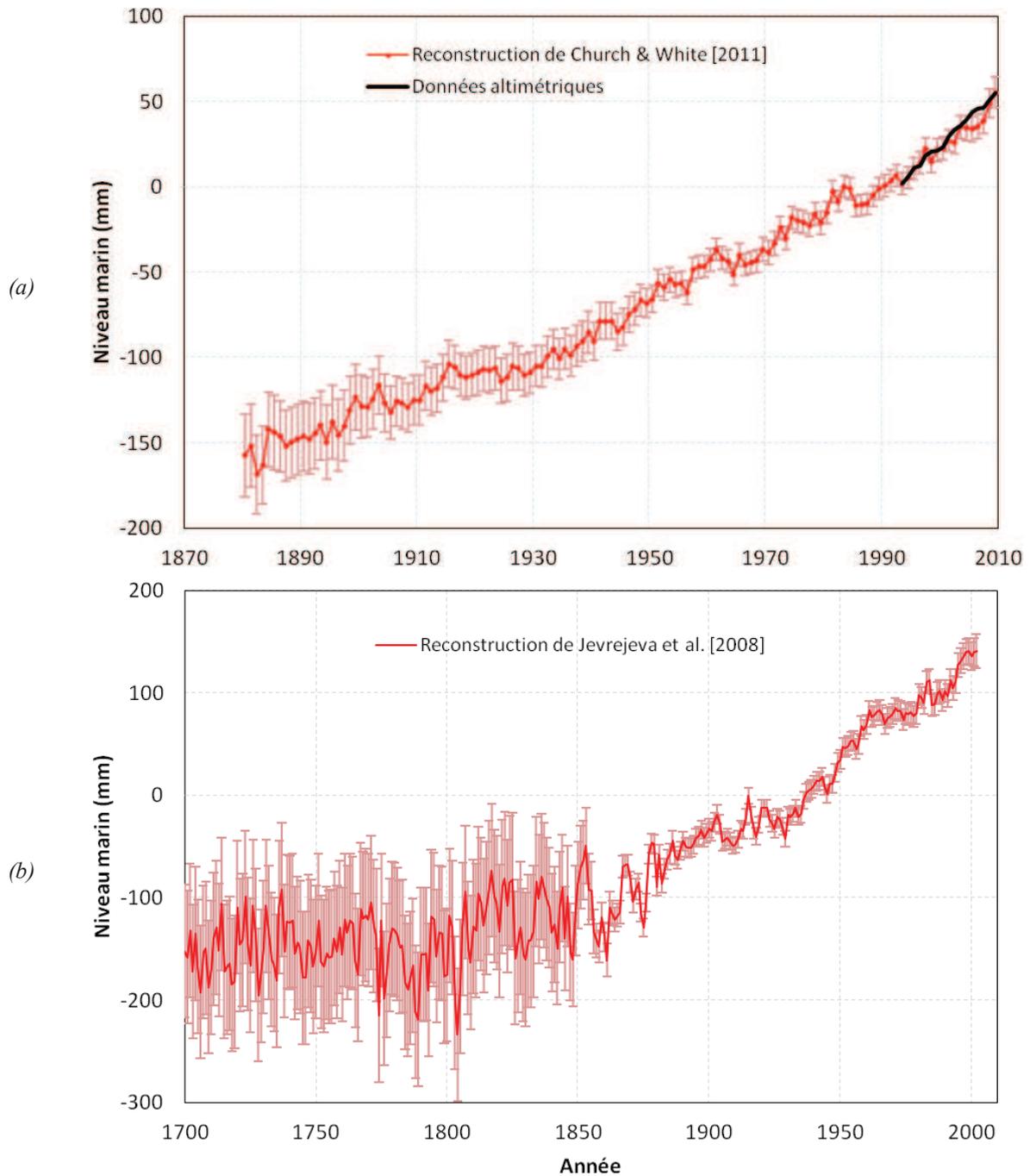


Figure II-7 : (a) Niveau moyen global de la mer de 1880 à 2010. Réalisé à partir des données de Church & White [2011]. (b) Niveau moyen global de la mer de 1700 à 2003. Réalisé à partir des données de Jevrejeva et al. [2008].

Auteur(s)	Période	Tendance (mm/an)	Commentaires
Vignal [1935]		1 à 2	23 stations marégraphiques en Méditerranée
Gutenberg [1941]	1807-1939	1,1 ± 0,8	69 stations marégraphiques
Cailleux [1952]	1885-1951	1,3	76 stations marégraphiques
Lisitzin [1974]	1807-1943	1,1 ± 0,4	6 stations marégraphiques
Gornitz <i>et al.</i> [1982]	1880-1980	1,2	193 stations marégraphiques
Barnett [1984]	1881-1980	1,4 ± 0,1	155 stations marégraphiques (> 30 ans)
	1930-1980	2,3 ± 0,2	plusieurs stations par région
Pirazzoli [1986]	1807-1984	Variable	229 marégraphes => impossible de tirer une tendance
Pirazzoli [1989]	1880-1980	0,52	58 stations marégraphiques en Europe
Trupin & Wahr [1990]	1900-1980	1,7 ± 0,13	84 stations marégraphiques (> 37 ans)
Warrick & Oerlemans [1990]	1890-1990	1 à 2	IPCC, rapport n°1
Peltier & Tushingham [1991]	1920-1970	2,4 ± 0,9	500 stations marégraphiques (> 10 ans)
Emery & Aubrey [1991]	1878-1984	0,8	uniquement sur les côtes stables
Douglas [1991]	1880-1980	1,8 ± 0,1	21 stations marégraphiques (> 60 ans)
Shennan & Woodworth [1992]	1901-1988	1,0 ± 0,2	33 stations marégraphiques (Nord Ouest de l'Europe)
Mitrovica & Davis [1995]	1880-1980	1,4 ± 0,4	idem Douglas [1991]
Warrick <i>et al.</i> [1995]	1895-1995	1,8 ± 0,8	IPCC, rapport n°2
Davis & Mitrovica [1996]		1,5 ± 0,3	côte Est de l'Amérique du Nord
Peltier [1996]		1,9 ± 0,6	côte Est de l'Amérique du Nord
Douglas [1997]		1,8 ± 0,1	
Woodworth <i>et al.</i> [1999]		1,0	Royaume-Uni
Church <i>et al.</i> [2001]	20 ^e siècle	1,5 ± 0,5	IPCC, rapport n°3
Douglas [2001]	1900-1997	1,71 ± 0,5	27 stations marégraphiques (> 70 ans)
Peltier [2001]	1900-1997	1,84 ± 0,35	27 stations marégraphiques (> 70 ans)
Hannah [2004]	1901-2000	1,6 ± 0,2	4 stations marégraphiques en Nouvelle-Zélande
Holgate & Woodworth [2004]	1948-2002	1,8 ± 0,2	177 stations réparties dans 13 régions du monde
Church <i>et al.</i> [2004]	1950-2000	1,8 ± 0,3	de 154 (1950) à 317 (1986) stations marégraphiques
Miller & Douglas [2004]	20 ^e siècle	1,5 à 2	9 stations marégraphiques stables
White <i>et al.</i> [2005]	1950-2000	1,8 ± 0,3	
Church & White [2006]	1870-1935	0,7 ± 0,4	de 10 (1870) à 300 (1980) stations marégraphiques + données altimétriques
	1936-2004	1,8 ± 0,2	
	1870-2004	1,7 ± 0,3	
Jevrejeva <i>et al.</i> [2006]	1920-1945	2,5 ± 1,0	1023 stations marégraphiques
	1900-2000	1,8	
Bindoff <i>et al.</i> [2007]	20 ^e siècle	1,7 ± 0,5	IPCC, rapport n°4
	1961-2003	1,8 ± 0,5	
Marcos & Tsimplis [2007]	1960-2000	2,3 ± 0,6	Atlantique Nord Ouest (11 stations marégraphiques)
Holgate [2007]	1904-1953	2,03 ± 0,35	9 stations marégraphiques
	1954-2003	1,45 ± 0,34	
	1904-2003	1,74 ± 0,16	
Church <i>et al.</i> [2008]	20 ^e siècle	1,7	
Domingues <i>et al.</i> [2008]	1961-2003	1,6 ± 0,2	
Jevrejeva <i>et al.</i> [2008]	19 ^e siècle	0,6	
	20 ^e siècle	1,9	
Calafat & Gomis [2009]	1945-2000	0,7 ± 0,2	Méditerranée (stations marégraphiques + altimétrie)
Woodworth <i>et al.</i> [2009b]	1901-2006	1,4 ± 0,2	24 stations marégraphiques du Royaume-Uni
Bouin & Wöppelmann [2010]	20 ^e siècle	1,8 ± 0,5	
Calafat <i>et al.</i> [2010]	1948-2000	1,2 ± 0,2	Méditerranée
Church & White [2011]	1900-2009	1,7 ± 0,2	de 38 (1900) à 235 (1985) stations marégraphiques
	1961-2009	1,9 ± 0,4	
Wahl <i>et al.</i> [2011]	1843-2008	2,0 ± 0,1	13 stations marégraphiques de la baie allemande
	1901-2008	1,7 ± 0,1	
	1951-2008	2,1 ± 0,4	
Ray & Douglas [2011]	1900-2010	1,70 ± 0,26	89 stations marégraphiques + données altimétriques
Wöppelmann & Marcos [2011]	1940-2010	1,7 ± 0,4	Méditerranée

Tableau II-1 : Synthèse non exhaustive des déterminations des tendances globale ou régionale du niveau marin à partir de données marégraphiques et altimétriques. Modifié et mis à jour à partir de Wöppelmann [1997], Douglas *et al.* [2001] et Pouvreau [2008]

La *figure II-8* présente une estimation de différentes contributions à l'élévation globale du niveau marin sur la période 1961-2003 (bleu) et sur la période 1993-2003 (marron). On constate que la dilatation thermique des océans a fortement augmenté sur la période 1993-2003, probablement parce qu'elle était préalablement atténuée par les nombreuses éruptions volcaniques explosives sur la période 1963-1991, comme nous venons de le voir. Sur la période 1961-2003, la somme des contributions est égale à 1,1 mm/an, alors que les observations indiquent une élévation de 1,8 mm/an.

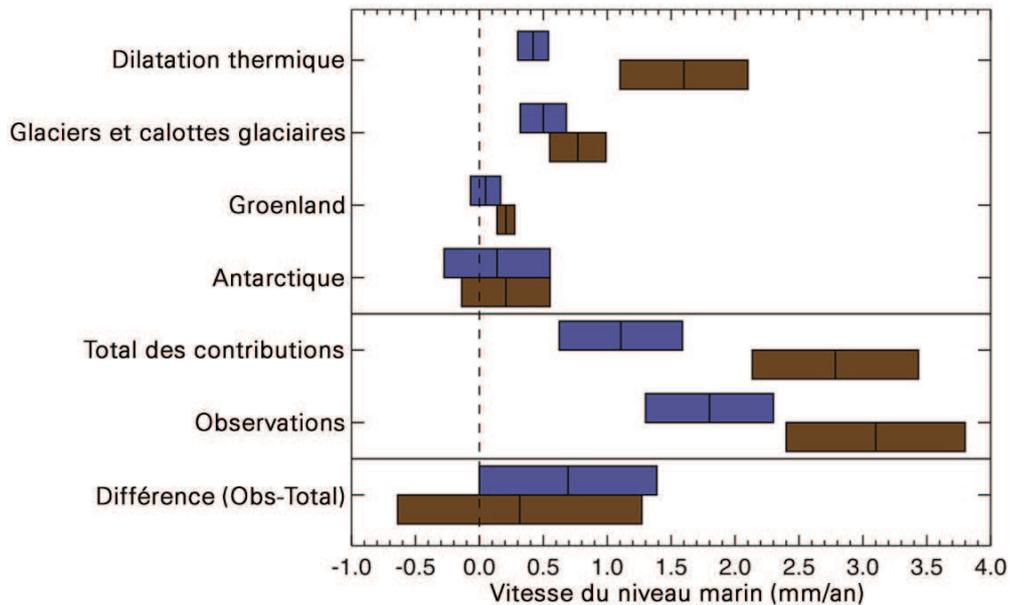


Figure II-8 : Estimations de différentes contributions à l'élévation globale du niveau marin sur la période 1961-2003 (bleu) et sur la période 1993-2003 (marron). Modifié d'après Bindoff et al. [2007].

II.1.2.2.3. Tendances individuelles de stations marégraphiques

Le *tableau II-2* présente une liste non exhaustive des tendances du niveau marin estimées à partir de données marégraphiques de stations individuelles. Parmi ces valeurs, deux retiennent notre attention : la tendance du niveau marin au 20^e siècle est estimée à $1,3 \pm 0,2$ mm/an à Brest et à $1,7 \pm 0,1$ mm/an à Newlyn, alors même que ces deux stations sont situées à environ 200 km l'une de l'autre. Douglas [2001] suggère qu'il existe une discontinuité dans la série de Brest, suite au bombardement de la ville en 1944, car les deux tendances sont statistiquement différentes avec un intervalle de confiance à 95%. En comparant cette série à celle de Newlyn, il estime qu'un saut de l'ordre de 20 mm a eu lieu après 1944 à Brest. Wöppelmann *et al.* [2008] ont démontré que le zéro du marégraphe n'avait pas subi de discontinuité, en analysant la position de repères de marée sur plus d'un siècle. De fait, leur comparaison avec les séries de Saint-Servan (Saint-Malo) et Liverpool confirme leur analyse (*figure II-9*). Nous verrons (cf. *Discussion générale*) ce que peuvent apporter nos données à ce débat.

Auteur(s)	Période	Tendance (mm/an)	Lieu
Hunter <i>et al.</i> [2003]	1841-2002	$0,8 \pm 0,2$	Port Arthur, Tasmanie (Australie)
Raichich [2007]	1875-2004	$1,3 \pm 0,1$	Trieste (Italie)
Testut <i>et al.</i> [2006]	1949-2005	$1,1 \pm 0,7$	Kerguelen, Terres australes et antarctiques (France)
Testut <i>et al.</i> [2010b]	1874-2009	$-0,1 \pm 0,3$	Saint-Paul, Terres australes et antarctiques (France)
Woodworth [1999a]	1858-1997	$1,23 \pm 0,12$	Liverpool (Royaume-Uni)
Woodworth [1999b]	20 ^e siècle	$1,22 \pm 0,25$	Liverpool (Royaume-Uni)
	19 ^e siècle	$0,39 \pm 0,17$	
Pouvreau [2008]	20 ^e siècle	$1,14 \pm 0,18$	Brest (France)
	19 ^e siècle	$0,42 \pm 0,18$	
Wöppelmann <i>et al.</i> [2006]	1807-1890	$-0,09 \pm 0,15$	Brest (France)
	1890-1980	$1,3 \pm 0,15$	
	1980-2004	$3,0 \pm 0,5$	
Wahl <i>et al.</i> [2010]	1844-2008	$1,75 \pm 0,17$	Cuxhaven (Allemagne)
	1953-2008	$1,81 \pm 0,44$	Heligoland (Allemagne)
		$1,85 \pm 0,42$	Heligoland (Allemagne)
	1993-2008	$6,4 \pm 3,1$	Cuxhaven (Allemagne)
$8,5 \pm 2,3$		Heligoland (Allemagne)	
Woodworth [2003]	1901-2000	$1,22 \pm 0,11$	Marseille (France)
	1901-1992	$1,16 \pm 0,12$	Gênes (Italie)
	1905-2000	$1,14 \pm 0,13$	Trieste (Italie)
	1886-2000	$1,27 \pm 0,09$	Marseille (France)
	1884-1992	$1,20 \pm 0,07$	Gênes (Italie)
Araújo [2005]	1915-2005	$1,77 \pm 0,12$	Newlyn (Royaume-Uni)

Tableau II-2 : Table non exhaustive des tendances du niveau marin à partir de données marégraphiques de stations individuelles.

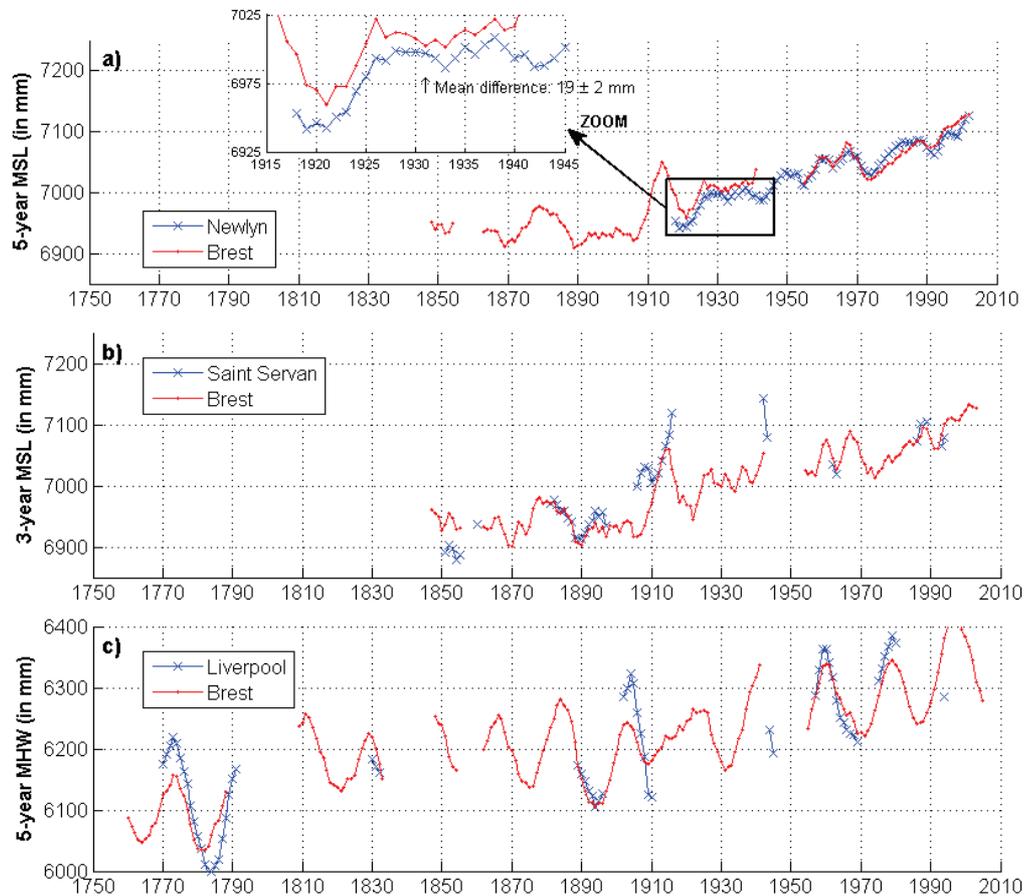


Figure II-9 : Moyennes mobiles de (a) Brest et Newlyn (MSL) ; (b) Brest et Saint-Servan (MSL) ; (c) Brest et Liverpool (MHW). Les séries de Newlyn, Saint-Servan et Liverpool ont été décalées de façon à correspondre à la série de Brest d'après 1944 [Wöppelmann *et al.*, 2008].

II.1.2.3. Période altimétrique : de 1993 à aujourd'hui

Depuis le mois de janvier 1993, les satellites altimétriques (notamment Topex/Poseidon et Jason) surveillent en permanence les variations du niveau de la mer, avec une précision remarquable et une couverture globale. Ces mesures permettent, pour la première fois, d'obtenir une image précise du niveau moyen global et de sa variabilité sur un peu plus de 18 ans. Sur cette période, le niveau moyen global a augmenté de l'ordre de 3 mm/an (*figure II-10* et *tableau II-3*). De nombreuses études ont été réalisées pour déterminer une vitesse d'élévation globale et la comparer aux mesures marégraphiques. Une revue non exhaustive de ces études est synthétisée dans le *tableau II-3*.

Auteur(s)	Période	Tendance (mm/an)	Commentaires
Cazenave & Nerem [2004]	1993-2003	$2,8 \pm 0,4$	Données altimétriques globales
White <i>et al.</i> [2005]	1993-2000	$2,6 \pm 0,7$	Données altimétriques globales
Jevrejeva <i>et al.</i> [2006]	1993-2000	$2,4 \pm 0,7$	
Bindoff <i>et al.</i> [2007]	1993-2003	$3,1 \pm 0,7$	IPCC, rapport n°4
Marcos <i>et al.</i> [2007]	1993-2002	$3,09 \pm 0,21$	Golfe de Gascogne, Altimétrie + Marégraphie
Rahmstorf <i>et al.</i> [2007]	1993-2006	$3,3 \pm 0,4$	Données altimétriques globales
Cazenave <i>et al.</i> [2008]	1993-2008	$3,1 \pm 0,1$	Données altimétriques globales
Domingues <i>et al.</i> [2008]	1993-2003	2,3	Stations marégraphiques
Jevrejeva <i>et al.</i> [2008]	1992-2002	3,4	
Prandi <i>et al.</i> [2009]	1993-2007	$3,4 \pm 0,1$	Données altimétriques globales
		$3,3 \pm 0,5$	91 stations marégraphiques à la cote
Cazenave & Llovel [2010]	1993-2008	$3,4 \pm 0,4$	Données altimétriques globales
Fenoglio-Marc & Tel [2010]	1993-2008	$2,9 \pm 0,4$	Données altimétriques globales
		$2,3 \pm 0,5$	Données altimétriques à la côte
		$2,4 \pm 0,6$	267 stations marégraphiques à la cote
Church & White [2011]	1993-2009	$3,2 \pm 0,4$	Données altimétriques globales
		$2,8 \pm 0,8$	Données marégraphiques globales

Tableau II-3 : Revue non exhaustive des déterminations de la tendance globale du niveau marin depuis 1993 à partir de données marégraphiques et altimétriques.

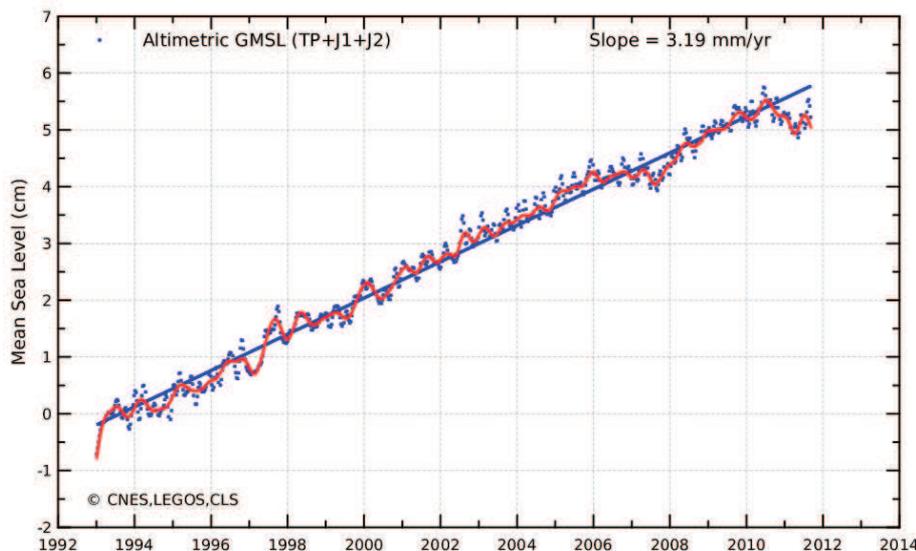


Figure II-10 : Niveau moyen global de la mer, mesuré par altimétrie. Un filtrage à 2 mois est appliqué sur les points bleus, tandis qu'un filtrage à 6 mois est effectué sur la courbe rouge. L'analyse de l'incertitude de chaque correction altimétrique pour le calcul du niveau moyen ainsi que la comparaison aux marégraphes permet d'estimer l'erreur sur la pente du niveau moyen global, proche de 0,6 mm/an dans un intervalle de confiance de 90% (source : <http://www.aviso.oceanobs.com/>, consulté le 1er décembre 2011).

II.1.2.4. Tentative de prévision du futur

D'après le dernier rapport du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Bindoff *et al.*, 2007], le changement climatique actuel va entraîner une élévation du niveau marin sur plusieurs siècles. Ces prévisions sont réalisées à partir de simulations numériques de l'évolution future du système climatique, pour différents scénarios plausibles d'émissions de gaz à effet de serre et d'expansion démographique (*figure II-11*). Quel que soit le scénario, la hausse du niveau de la mer se poursuivra au cours des prochains siècles à une vitesse dépendant du scénario étudié, mais en général supérieur à ce que nous connaissons aujourd'hui. Il semblerait cependant que les dernières prévisions du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat aient été sous-estimées (*figure II-12*). Ceux-ci prévoyaient une élévation comprise entre 20 et 60 cm en 2099, alors que de récentes études l'estiment entre 80 et 180 cm [Vermeer & Rahmstorf, 2009].

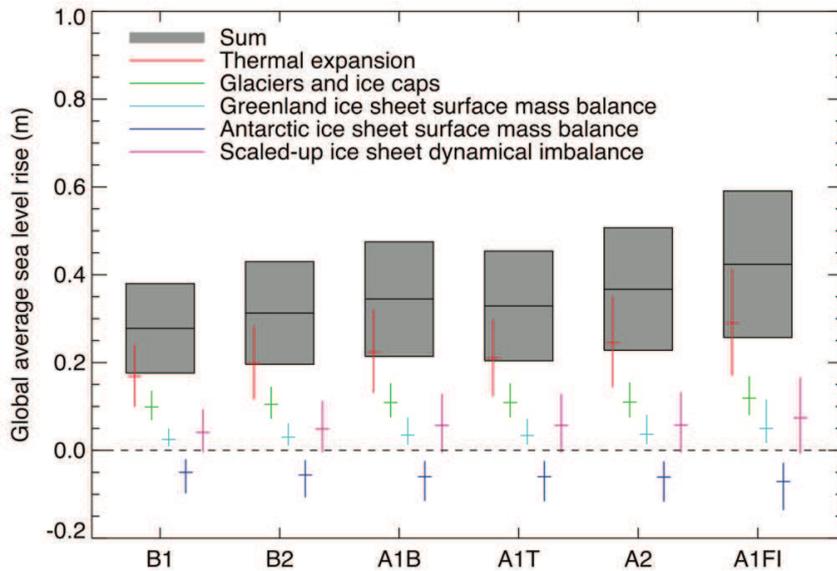


Figure II-11 : Prévisions d'élévation du niveau moyen global de la mer et de ses composantes pour la période 2090-2099 (par rapport à 1980-1999) à partir de six scénarios : scénarios d'émissions de gaz à effet de serre, de croissance de la population mondiale, de croissance économique, etc. (IPCC AR4) [Bindoff *et al.*, 2007].

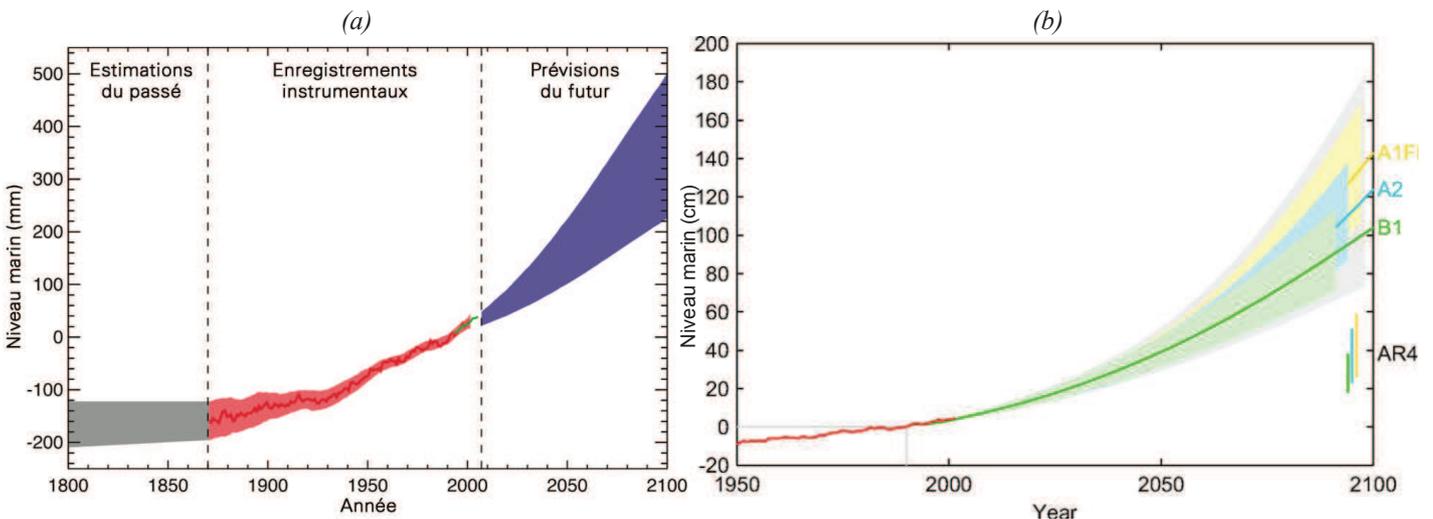


Figure II-12 : (a) Niveau moyen global de la mer passé et prévu pour le futur (par rapport à 1980-1999, IPCC AR4) [Bindoff *et al.*, 2007]. (b) Niveau moyen global de la mer passé et prévu pour le futur selon trois scénarios de températures, et comparaison avec AR4 (a) [Vermeer & Rahmstorf, 2009].

A noter que si le niveau marin augmentait d'un mètre, cela aurait des conséquences importantes sur le littoral charentais, comme le montre la simulation ci-dessous (*figure II-13*). Cette simulation simple ne prend pas en compte les structures de défense côtière (comme les digues, par exemple), mais permet de se rendre compte de la vulnérabilité naturelle du littoral de notre région. Des travaux de recherche sont actuellement en cours pour dresser une carte précise et réaliste des aléas et des risques de submersion marine sur le littoral charentais (cf. <http://lienss.univ-larochelle.fr/Jean-Francois-BREILH.html>, consulté le 1^{er} décembre 2011).



Figure II-13 : Simulation de submersion marine suite à une élévation du niveau marin de 1 m sur le littoral charentais (source : <http://mondedurable.science-et-vie.com/quand-la-mer-monte/>, consulté le 1^{er} décembre 2011).

II.2. Séries marégraphiques longues

II.2.1. Une ressource rare

D'après la COI de l'UNESCO [1985], « *le fondement de toute analyse scientifique du niveau de la mer repose sur de longues séries de mesures très soigneuses* ». De plus, nous venons de voir que des séries temporelles de plus de 40-50 ans sont indispensables pour tirer des tendances à long terme sur les composantes du niveau (cf. II.1.2.2.1. *Critère de sélection pour calculer une tendance séculaire*). Enfin, aucune accélération de l'augmentation du niveau de la mer n'a été détectée en ne prenant en compte que les mesures marégraphiques du 20^e siècle [e.g. Woodworth *et al.*, 2009a], alors qu'une analyse des séries pluri-centenaires semble indiquer que celle-ci aurait débutée à la fin du 19^e siècle [e.g. Woodworth, 1999b; Ekman, 2003; Kemp *et al.*, 2011]. Il apparaît donc primordial de s'intéresser aux longues séries d'observations marégraphiques. Malheureusement, la grande majorité (environ 75%) des séries répertoriées par le PSMSL (au 7 décembre 2011) a un nombre d'années effectives de mesures inférieur ou égal à 40 ans (*figure II-14*) et les séries supérieures au siècle ne représentent que moins de 3%.

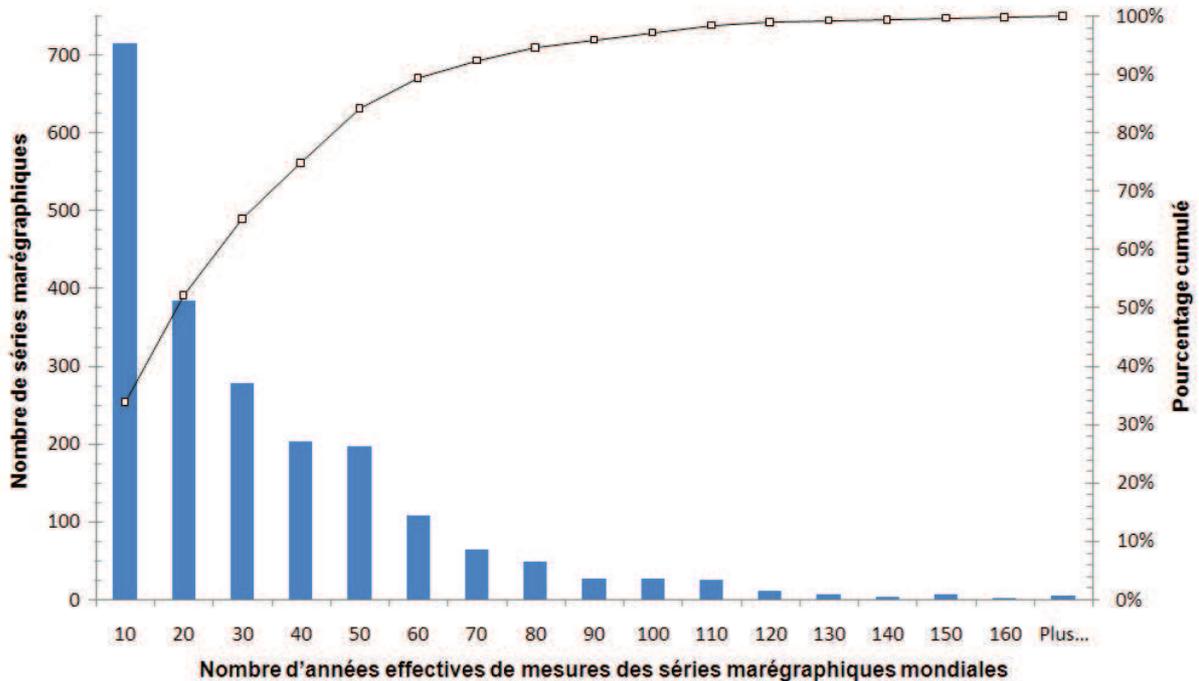


Figure II-14 : Histogramme du nombre d'années effectives des enregistrements marégraphiques mondiaux. Réalisé à partir des 2 111 stations marégraphiques répertoriées par le PSMSL au 07 décembre 2011.

De plus, les séries marégraphiques longues sont très mal réparties à travers le monde, comme le montre les *figures II-15* et *16*. On peut alors se poser la question de la représentativité mondiale des tendances calculées à l'aide de quelques séries de l'hémisphère nord. La *figure II-15* représente la répartition temporelle des séries collectées par le PSMSL depuis 1807. On distingue nettement la très

forte disproportion entre les séries de l'hémisphère nord (beaucoup plus nombreuses) et l'hémisphère sud, à la fois pour les séries récentes que pour les longues séries. La *figure II-16* présente le même constat : les séries possédant au moins 50 années de mesures effectives (points rouges sur la carte) sont en très grande majorité dans l'hémisphère nord. Deux explications peuvent être avancées : la faible étendue de terres dans l'hémisphère sud (en comparaison du nord) et le développement industriel plus précoce sur les côtes de l'hémisphère nord, notamment en Europe et aux Etats-Unis. Les échanges commerciaux se développant, la connaissance de la marée pour assurer la sécurité de la navigation poussait les autorités à équiper leurs ports de marégraphes.

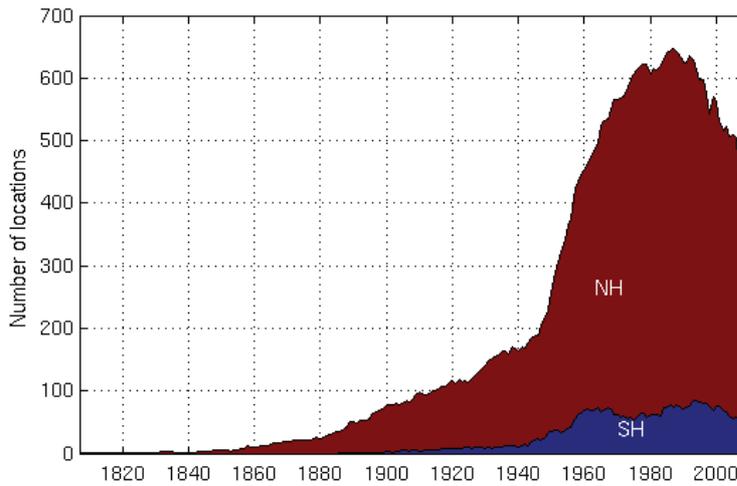


Figure II-15 : Répartition temporelle des séries collectées par le PSMSL, depuis 1807. En rouge les séries de l'hémisphère Nord ; en bleu les séries de l'hémisphère Sud (au 7 décembre 2011).

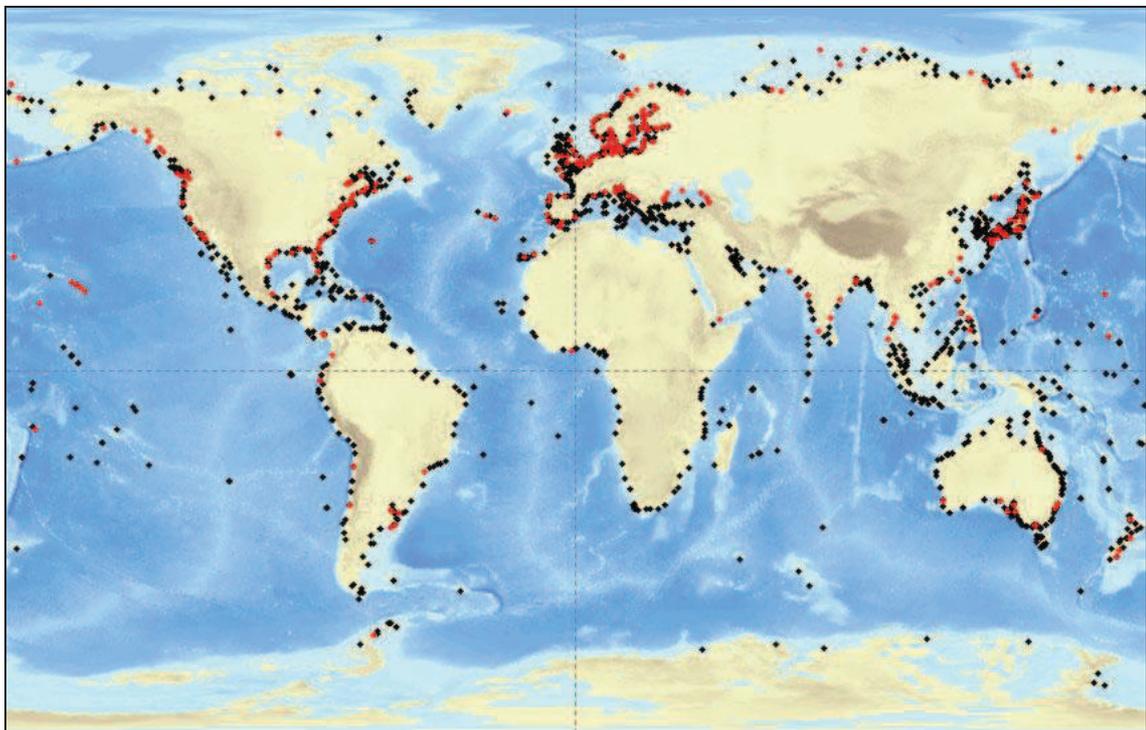


Figure II-16 : Répartition géographique des séries disponibles sur le site du PSMSL (au 7 décembre 2011). En rouge : les séries possédant au moins 50 années effectives de mesures. En noir : autres séries (< 50 ans). Fond de carte issu du serveur Sextant de l'IFREMER.

II.2.2. Quelle(s) alternative(s) aux séries marégraphiques ?

Nous venons de le voir, les séries marégraphiques longues sont encore trop rares et mal réparties géographiquement pour une étude pluriséculaire des variations du niveau marin. Bien sûr, une solution existe, consistant à numériser et valoriser les mesures historiques archivées [e.g. Woodworth, 1999a; Gouriou & Wöppelmann, 2010; Testut *et al.*, 2010b], créant ainsi des séries marégraphiques pouvant dépasser 300 ans (e.g. Brest [Pouvreau, 2008]). Mais ce n'est pas la seule solution. On peut en effet retracer l'évolution du niveau marin à partir d'autres paramètres, tels que l'étude des mollusques ou des foraminifères fossilisés dans les sédiments côtiers [e.g. Poirier, 2010], l'étude de la datation de la formation des coraux [Chappell & Polach, 1991]. Lambeck *et al.* [2004] étudient les paléo-rivages, et plus précisément les anciennes écluses à poisson en Italie, construites par les Romains. Ces écluses ayant été conçues au niveau de la mer de l'époque afin de piéger les poissons, on peut aujourd'hui estimer l'élévation du niveau marin en comparant le niveau actuel par rapport aux écluses. Récemment, Rossi *et al.* [2011] ont réalisé une étude du paléo-niveau marin dans le golfe du Morbihan, en Bretagne (France), à partir de foraminifères. La *figure II-17* présente la courbe du niveau marin déduite de cette étude, comparée à l'enregistrement marégraphique de Brest. La tendance du niveau marin obtenue par Rossi *et al.* [2011] est de $+1,6 \pm 0,5$ mm/an sur la période 1890-1980 (tendance marégraphique sur la même période : $+1,5 \pm 0,2$ mm/an), prouvant toute la qualité d'une telle reconstruction.

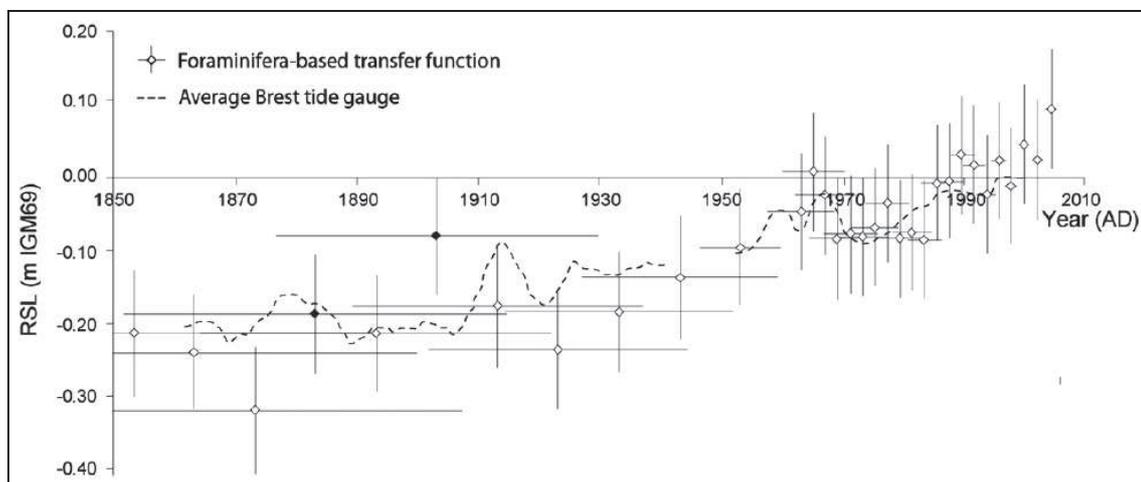


Figure II-17 : Evolution du niveau marin relatif après application d'une fonction de transfert aux foraminifères d'un schorre du golfe du Morbihan. La courbe marégraphique de Brest est tracée pour comparaison [Rossi *et al.*, 2011].

II.3. Potentiel marégraphique français

Nous venons de voir que les observations marégraphiques historiques ont un fort intérêt dans le contexte actuel de changement climatique et que très peu de séries dépassent la durée du siècle. L'évolution du niveau marin pouvant également varier d'une côte à l'autre, qu'en est-il des séries

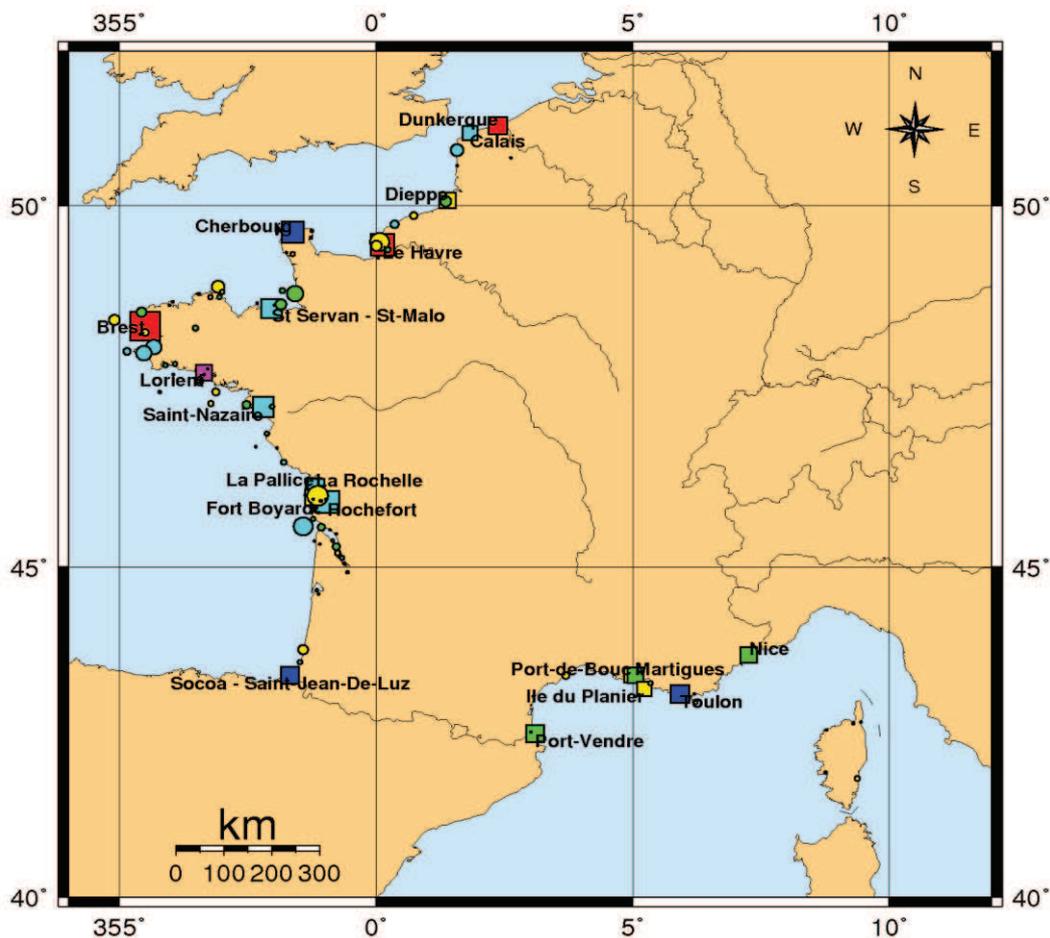
marégraphiques françaises ? Sont-elles nombreuses ? Ont-elles une durée importante ? Sont-elles exploitables pour contribuer à l'étude des variations du niveau de la mer le long des côtes françaises ?

Avant de s'intéresser en détail au patrimoine marégraphique français, il faut savoir qu'une petite partie de celui-ci est déjà connu et disponible à la communauté scientifique via SONEL (REFMAR) et le PSMSL. Il est donc possible, à travers ces différents services, d'accéder à une partie du patrimoine marégraphique français. Mais une autre partie de ce patrimoine reste encore inconnue de la communauté car découverte récemment dans les centres d'archives français. Ces découvertes font suite à un inventaire des mesures historiques du niveau de la mer archivées en France, débuté en 2004 et qui a révélé un patrimoine français à fort potentiel scientifique [Pouvreau, 2008]. Bien que cet inventaire soit, *a priori*, encore perfectible, il semble déjà assez conséquent. Le tableau suivant (*tableau II-4*) a été mis à jour et modifié d'après Gouriou *et al.* [2008], à partir de l'inventaire de Pouvreau [2008] et des données de SONEL (REFMAR). Il dresse un état des lieux des séries marégraphiques françaises dont le nombre d'années effectives de mesures est supérieur ou égal à 30 ans.

Observatoire	Potentiel total de mesures		=	Mesures analogiques inventoriées		+	Mesures numériques actuelles	
	Nombre d'années effectives	Période couverte		Nombre d'années effectives	Période couverte		Nombre d'années effectives	Période couverte
Brest	194	1679 - auj.		175	1679 - 1993		19	1993 - auj.
Cherbourg	129	1789 - auj.		111	1789 - 1993		18	1994 - auj.
Le Havre	125	1701 - auj.		107	1701 - 1991		18	1993 - auj.
Marseille	120	1885 - auj.		108	1885 - 1996		12	1998 - auj.
Saint Servan - Saint Malo	95	1829 - auj.		86	1829 - 2002		9	2003 - auj.
Saint-Nazaire	94	1867 - auj.		89	1867 - 2001		5	2007 - auj.
Rochefort	85	1824 - auj.		81	1824 - 2007		4	2008 - auj.
Socoa - Saint Jean de Luz	79	1875 - auj.		74	1875 - 1996		5	2004 - auj.
Toulon	72	1777 - auj.		59	1777 - 1997		13	1998 - auj.
Dieppe	70	1834 - auj.		67	1834 - 1994		3	2009 - auj.
Dunkerque	67	1701 - auj.		52	1701 - 1985		15	1996 - auj.
Cordouan	66	1812 - auj.		66	1812 - auj.		/	/
Aix - Enet - Boyard	55	1824 - auj.		54	1824 - 1974		1	2011 - auj.
Port-Vendres	54	1895 - auj.		50	1895 - 1982		4	2007 - auj.
Nice	51	1896 - auj.		39	1896 - 1990		12	1998 - auj.
La Rochelle - La Pallice	50	1885 - auj.		36	1885 - 1979		14	1997 - auj.
La Rochelle - Vieux Port	19	1775 - 1966		19	1775 - 1966		/	/
Calais	46	1836 - auj.		36	1836 - 1982		10	1998 - auj.
Le Conquet	39	1971 - auj.		20	1971 - 1992		19	1992 - auj.
Lorient	36	1716 - 1951		36	1716 - 1951		/	/
Port Tudy	33	1969 - auj.		32	1969 - 2010		1	2011 - auj.
Roscoff	31	1973 - 2008		24	1975 - 2003		7	2004 - auj.
Martigues	30	1895 - 1983		30	1895 - 1983		/	/

Tableau II-4 : Potentiel des séries marégraphiques françaises dont le nombre d'années effectives de mesures est supérieur ou égal à 30 ans. Mis à jour et modifié d'après Gouriou et al. [2008], à partir de l'inventaire de Pouvreau [2008] et des données de SONEL (REFMAR). Légende : auj. = 2011.

Jusqu'à présent, seules les séries de Brest et Marseille étaient recensées dans la catégorie des séries marégraphiques dépassant la durée du siècle [Woodworth & Player, 2003]. A travers cet inventaire, nous constatons que les séries de Cherbourg et Le Havre peuvent prétendre rejoindre cette catégorie puisqu'elles dépassent toutes 120 ans, venant ainsi s'ajouter aux moins de 3% de séries marégraphiques supérieures à 100 ans dans le monde. D'ici cinq ans, les séries de Saint-Malo et Saint-Nazaire pourront également entrer dans cette catégorie. De même, une douzaine de séries françaises dépasse le demi-siècle, soit la durée minimale pour pouvoir tirer des tendances à long terme significatives sur les composantes du niveau marin. Enfin, la période couverte par ces séries est également très importante puisque les séries de Brest, Le Havre et Dunkerque couvrent un peu plus de 300 ans. Mais tout l'intérêt scientifique de ce patrimoine est suspendu à une question essentielle : ces mesures marégraphiques historiques sont-elles exploitables ? Pour le savoir, il convient d'abord de numériser ces données anciennes qui se trouvent, pour l'heure, sous forme papier puis de les traiter et de les analyser.



Localisation des mesures historiques du niveau de la mer					
◆ 000-050	◆ 051-100	◆ 101-150	◆ 151-200	◆ 201-250	◆ sup. à 250
Couleurs déterminant la durée totale des observations (en années)					
○ 03ans	○ 06ans	○ 09ans	○ 12ans	○ 15ans	
Taille des cercles proportionnelle au nombre d'années effectives (jusqu'à 15ans)					
□ 025ans	□ 075ans	□ 125ans	□ 175ans	□ 225ans	
Taille des carrés proportionnelle au nombre d'années effectives (supérieur à 15ans)					

Figure II-18 : Localisation des mesures marégraphiques historiques françaises [Pouvreau, 2008].

CHAPITRE III - PRESENTATION DU LITTORAL CHARENTAIS

III.1. Contexte historique national

III.1.1. Contexte hydrographique depuis 1775

Le contexte hydrographique français de 1775 à nos jours, décrit ici, est extrait et résumé du manuscrit de thèse très complet de Pouvreau [2008] sur ce sujet.

La fin du 18^e siècle marque le début d'une ère nouvelle pour la mesure du niveau de la mer, plus de cinquante ans après le dernier article publié par Cassini sur le flux et le reflux de la mer (1720). De La Lande, savant de l'Académie royale des Sciences, explique dans un rapport de 1763, qu'il est nécessaire « *de rassembler des observations de tous les Pays de la Terre* » afin de perfectionner les connaissances sur le flux et le reflux de la mer. Il s'emploie alors à récupérer et publier tous les jeux de mesures dont il a connaissance. C'est ainsi qu'on lui transmet, en 1773, une cinquantaine de hauteurs de pleine et basse mer observées à Fouras (Charente-Maritime) entre 1771 et 1773. Ces observations avaient été réalisées dans le but d'améliorer la navigation sur la Charente pour rejoindre l'arsenal de Rochefort.

Des mesures du niveau de la mer avaient déjà été initiées par l'Académie royale des Sciences (en 1701 : Dunkerque et Le Havre ; en 1716 : Brest et Lorient) mais les registres originaux contenant les détails de ces mesures ayant été perdus (ils seront retrouvés bien plus tard dans les archives personnelles de Cassini, aujourd'hui conservés à la bibliothèque de l'Observatoire de Paris, communication personnelle de Nicolas Pouvreau), l'Académie, consciente de la nécessité de se procurer de nouvelles observations, demande des ordres du Roi pour la réalisation de mesures, notamment dans les ports de La Rochelle, Lorient, Brest, Le Havre, Saint-Malo, Dunkerque, et Toulon [De La Lande, 1777]. Dans chacun de ces ports, il est demandé d'observer, pendant une année entière, la hauteur et l'heure des pleines et basses mers, avec beaucoup de soin et de précautions. Les observations obtenues par l'Académie suite à cette campagne de mesures sont relativement modestes et assez disparates : Lorient et Toulon ont réalisé les observations en suivant de près les recommandations de De La Lande, La Rochelle et Brest se sont éloignées de ces recommandations pour des raisons qui leur sont propres, tandis que Saint-Malo et Le Havre n'ont apparemment envoyé aucune observation à l'Académie.

Entre 1780 et 1803, il n'y eut pas, ou peu, d'observations du niveau marin. Les écrits mentionnent que les rares observations eurent lieu en Basse-Normandie, à Brest, à Bordeaux et en Guadeloupe. En

1803, Lévêque, Rochon et Laplace publient un nouveau protocole pour la mesure du niveau de la mer. Mais peu d'observations sont réalisées à la suite de ce protocole : seules Audiernois, Granville et Brest ont effectué des mesures. En 1843, un ouvrage publié par le Bureau des Longitudes consigne les heures et hauteurs des pleines et basses mers à Brest ainsi que diverses informations météorologiques pour la période comprise entre 1807 et 1835. Jusqu'à présent, effectuer des mesures précises et rigoureuses du niveau de la mer relevait uniquement de la bonne volonté des professeurs d'hydrographie locaux, à la demande des savants de l'Académie royale des Sciences. Ce n'est qu'à partir de 1807, à Brest, qu'une contrepartie financière est attribuée aux observateurs. Dès lors, les mesures seront réalisées avec plus d'assiduité et de sérieux.

Au début du 19^e siècle, de très nombreuses campagnes de mesures du niveau marin sont réalisées sous la direction de l'ingénieur hydrographe Beautemps-Beaupré, qui est chargé de reconnaître les côtes conquises lors de la révolution et de l'épopée napoléonienne. Entre 1816 et 1838, il s'attèle à la réalisation du « *Pilote français* », rassemblant l'ensemble des reconnaissances hydrographiques des côtes de France, contenant, entre autres, 249 cartes marines et 184 tableaux d'observations du niveau marin sur l'ensemble des côtes françaises. C'est la première grande campagne de mesures du niveau de la mer. En 1829, Beautemps-Beaupré et Daussy améliorent le protocole d'observation du niveau marin, nommé « *Observations du mouvement des eaux* », en prenant en compte l'expérience accumulée lors de leurs multiples campagnes hydrographiques.

A la fin des années 1830, le monde est en effervescence : révolution industrielle, découverte de nouveaux territoires à conquérir, intensification des échanges commerciaux maritimes, etc. Dans ce contexte, Arago, alors député, milite pour que l'on mesure le niveau de la mer en continu (jour et nuit) dans plusieurs ports français à l'aide d'outils modernes, nouvellement inventés. Ainsi, dès 1837 au moins, De Rosamel (ministre de la marine), présente son désir de faire observer le niveau marin par « *des machines ingénieuses d'une invention récente* » : les marégraphes, dont l'une des premières machines, fabriquée par Palmer (ingénieur civil anglais), fonctionna du 6 au 21 septembre 1831 à Sheerness. Avec le développement des échanges maritimes et l'arrivée des bateaux à vapeur, indépendants du vent pour naviguer, l'ingénieur hydrographe Chazallon prend conscience que les navigateurs de tous bords vont avoir besoin de connaître les heures et les hauteurs des pleines et basses mers pour mieux gérer leurs trajets. Ainsi, il publie en 1839 le premier annuaire des marées au monde, un an avant l'annuaire anglais de Whewell. La même année, Chazallon fut nommé à la direction du Service des Marées, prélude à la mise en place du premier réseau d'observatoires permanents du niveau de la mer.

Dès sa nomination, Chazallon parcourt une partie du littoral français afin de préparer l'installation du futur réseau marégraphique. Le rapport qu'il rédige en 1840 précise que les ports de Brest, Saint-Servan et Cherbourg présentent toutes les qualités requises pour l'installation d'un observatoire du niveau marin. Il s'attarde aussi à expliquer le fonctionnement du marégraphe qu'il met au point et l'installation

obligatoire de l'appareil dans un puits de tranquillisation. En 1843, il précisera, dans une lettre à sa hiérarchie, que « *l'on ne doit pas perdre de vue surtout qu'il est extrêmement important que ces travaux soient exécutés d'une manière solide et durable, de telle sorte que, dans cinq à six siècles, nos successeurs puissent s'assurer, par les repères tracés sur le parement des puits, s'il est survenu un changement quelconque dans le niveau d'équilibre des mers et puissent mesurer l'étendue de ce changement. Diverses causes pourraient produire cet effet [...] nos prédécesseurs ne nous ont malheureusement laissé aucun terme précis pour point de comparaison. Les Egyptiens seuls avaient gravé des points de repère dans leurs nilomètres ; mais les documents de ce peuple si remarquable sont perdus pour nous* ». Cette précision de Chazallon est remarquable, il était conscient de la nécessité de garder une référence stable pour les mesures réalisées, et cela à travers les siècles à venir, pour contribuer à l'étude de l'évolution du niveau marin.

En 1843, le premier port équipé d'un marégraphe français ne se trouve pas en métropole mais à Alger, jeune colonie française depuis 1830. Il faudra attendre fin 1845 pour voir le port de Brest accueillir l'installation du premier marégraphe sur la côte atlantique française, qui ne fonctionnera qu'à partir de janvier 1846. L'observatoire de Saint-Servan débutera, lui, ses mesures en 1850. D'autres observatoires tels que Marseille et Toulon, en Méditerranée, Le Havre, Cherbourg, fort Enet et Rochefort sont progressivement mis en place jusqu'au début des années 1860. En 1863, deux nouveaux observatoires viennent compléter le réseau en place : Saint-Nazaire et La Rochelle. Le nouveau bassin à flot de La Rochelle est en effet construit de 1855 à 1862, au moment même où le réseau marégraphe de Chazallon se met en place. Les ingénieurs en profitent donc pour construire un puits de tranquillisation directement intégré au quai de ce nouveau bassin, afin d'y installer un marégraphe. En 1873, notamment en raison de l'envasement fréquent du puits de tranquillisation, Bouquet de la Grye, propose de déplacer le marégraphe du fort Enet au fort Boyard. En 1874, c'est au tour du marégraphe installé à La Rochelle d'être déplacé à Saint-Jean-de-Luz, en raison des perturbations causées par la proximité de l'écluse du bassin à flot.

Le cas de l'observatoire du fort Boyard est atypique dans le réseau marégraphe. Des lacunes de plusieurs mois apparaissent dans l'enregistrement du niveau marin en raison de la grande difficulté à recruter des observateurs qui accepteraient de travailler sur le fort. Ceux-ci ont en effet des réticences à aller vivre en permanence sur un fort isolé en mer, subissant les assauts fracassants de la houle en hiver et qui ne peut parfois pas être ravitaillé en raison de la dangerosité d'accoster au fort lors d'une tempête. Cette dernière raison est sans doute celle qui revient le plus fréquemment : « *la difficulté de se procurer des vivres [...] effraie les observateurs* ». De plus, l'isolement des observateurs est alors total : pendant de nombreuses années, ils ne seront pas autorisés à communiquer avec la petite garnison stationnée au fort, ni même à leur acheter des vivres si l'observateur venait à en manquer. Après le départ de l'observateur Pillet fin août 1881, l'administration ne parvient pas à recruter son remplaçant et un projet de transfert du marégraphe est alors étudié jusqu'en 1882. De nombreuses commissions d'étude proposent de déplacer

l'observatoire sur l'île d'Aix, sur la toute nouvelle jetée Sainte-Catherine que vient de construire les Ponts-et-Chaussées. Des plans détaillés sont même réalisés, ainsi que plusieurs estimations de coût. *Pour l'anecdote, il est amusant de noter que l'emplacement du nouveau marégraphe installé en 2011 correspond à celui envisagé en 1882.* Finalement, concluant que la seule raison d'un tel transfert était la difficulté de recruter un observateur et devant le coût important que représenterait ce déplacement, il sera décidé d'augmenter le salaire des observateurs du fort Boyard. Ainsi, alors que partout ailleurs le salaire d'un observateur s'élève à 800 francs germinal, il est de 1 400 francs à partir de 1882 au fort Boyard. Malgré cette hausse de salaire importante, les recrutements étaient toujours délicats et lorsque l'observateur Bourdin donna sa démission en mai 1909, il ne fut pas remplacé, ce qui scella la fin de l'observatoire du fort Boyard.

Entre 1917 et 1920, le ministère de la Marine se désengage de cinq autres observatoires : Le Havre, Saint-Servan, Saint-Nazaire, Rochefort et Saint-Jean-de-Luz. Il est possible que le Service des marées ait jugé que les séries de mesures étaient suffisamment longues pour permettre le calcul de prédictions fiables pour la publication de l'annuaire des marées. Certains observatoires furent démontés, d'autres passèrent sous l'autorité des Ponts et Chaussées qui poursuivirent les mesures (Le Havre, Cherbourg et Saint-Nazaire). A partir de 1920, le réseau mis en place par Chazallon et géré par le Service Hydrographique de la Marine ne compte plus qu'un seul observatoire : Brest. Pour leurs propres besoins, les Ponts-et-Chaussées, le Service du Nivellement Général et les Travaux Hydrauliques prennent alors la direction de certains observatoires. Et alors que l'observation marégraphe est délaissée en France, plusieurs pays de l'hémisphère nord redoublent d'efforts pour installer des observatoires et observer la mer. C'est ainsi qu'est fondé, en 1933, le PSMSL, localisé à l'Observatoire de Bidston, au Proudman Oceanographic Laboratory (POL), en Grande Bretagne (cf. *I.4.3.1.2. PSMSL*), qui est un centre de données international du niveau moyen de la mer.

Lors de la seconde guerre mondiale, les forces occupantes vont mettre en place un nouveau réseau marégraphe en France, notamment en installant des observatoires dans les ports militaires n'ayant pas fait l'objet de mesures du niveau de la mer depuis plusieurs décennies : Boulogne-sur-Mer, Calais, Cherbourg, Lorient et La Rochelle-La Pallice, par exemple. Les bombardements alliés mettront fin à ce réseau en 1944, détruisant au passage le dernier observatoire géré par le Service Hydrographique de la Marine, celui de Brest, qui ne redémarrera qu'en 1952. Dans les années 1980, la mesure du niveau de la mer profite d'un formidable regain d'intérêt dans le contexte de l'étude du changement climatique. En 1984, une enquête est menée auprès des organismes français possédant des marégraphes : 80 observatoires permanents sont recensés en France métropolitaine et dans les DOM-TOM. En 1992, le projet RONIM est lancé, dont l'objectif est la mise en place et le maintien en condition opérationnelle d'un réseau moderne de marégraphes, dans les ports principaux de France métropolitaine et d'outre-mer.

III.1.2. Contexte métrologique

III.1.2.1. Unités de mesure de la longueur

Ce bref historique de l'évolution du système de mesure d'une longueur depuis le milieu du 18^e siècle est une synthèse des publications de Lacroix [1826], Guilhiermoz [1913], Lacombe [1979], Armoghatte [2001] et Février [2007].

De l'apparition des premières unités de mesure jusqu'à la fin du 18^e siècle, les mesures sont d'une extrême diversité. L'unité de mesure d'une même grandeur peut en effet avoir de multiples appellations selon les provinces, les villes et mêmes les villages. A l'inverse, une appellation identique ne garantit pas que le contenu physique mesuré soit le même. Au fil des siècles, de nombreux projets d'unification sont proposés sans jamais réussir à s'imposer, face à l'hostilité des seigneurs locaux qui y voyaient une perte de pouvoir local : Charles le Chauve (édit de Pitres, en 864), Louis le Hutin, Philippe le Long, François 1^{er} (édits sur l'aunage, en 1540-1545), Henri II (1557), « Suppliques des Etats généraux » (en 1560, 1576, 1614), Henri IV, Colbert, Laverdy (1764), Trudaine, Marigny (1766). Les noms des anciennes unités de mesures sont alors très diversifiés et souvent imagés en rapport aux dimensions humaines (pied, pouce, doigt, yard, etc.) ou à ses aptitudes (journal : étendue de terre travaillée en un jour, galopin : quantité de vin que l'on peut boire pendant un repas, etc.) ou même à des facteurs naturels (picotin : ration d'un cheval, pieds de vigne, toise, etc.) Cette très forte hétérogénéité dans les unités de mesure utilisées est alors considérée au 18^e siècle, comme extrêmement gênante pour les activités administratives, commerciales et scientifiques.

De 1668 à 1776, l'étalon prototype royal de longueur est la Toise du Châtelet, fixée à l'extérieur du Grand Châtelet et détruit en 1802. Comme la précédente, elle est constituée par une barre de fer, terminée par deux redans dont la distance détermine la longueur de la Toise. C'est sur cet étalon de 1668 que sont ajustées en 1735 deux toises (fabriquées par Langlois) utilisées pour la mesure d'arcs de méridien, l'une à l'équateur (de 1736 à 1744) appelée plus tard Toise du Pérou, l'autre en Laponie (de 1736 à 1738) dénommée plus tard Toise du Nord. Mais la Toise du Châtelet, en fer et dont la fabrication avait été assez rudimentaire, est soumise aux chocs et à l'usure du temps. En effet, la méthode utilisée pour vérifier une mesure de longueur était d'introduire l'élément à contrôler entre les redans de l'étalon royal, usant ainsi lentement ses faces internes. C'est cette déformation qui incitera, plus tard, les savants français à chercher un étalon naturel, ne dépendant pas d'un objet matériel. En réponse à l'usure de la Toise du Châtelet de 1668, La Condamine propose en 1747 d'adopter comme étalon prototype la Toise du Pérou (déposée au cabinet de l'Académie des Sciences au Louvre, puis conservée à l'Observatoire de Paris). Le 16 mai 1766, Louis XV approuve cette proposition et charge Tillet (de l'Académie Royale des Sciences), de faire exécuter 80 copies de cette toise, désormais appelée Toise de l'Académie. A noter que

c'est la longueur déterminée par la Toise de l'Académie qui sera utilisée pour définir le mètre provisoire en 1795 et le mètre définitif en 1799.

La concordance des mesures employées par les membres de l'Académie des Sciences à partir du milieu du 18^e siècle provient tout simplement du fait qu'à partir de cette époque leurs instruments furent tous construits par un même constructeur, Langlois (auquel succéda son neveu Canivet), qui les construisait au moyen d'un étalon établi pour son usage personnel. Auparavant, les instruments variaient suivant le constructeur car la grossièreté de l'étalon du Châtelet rendait incertains les véritables points extrêmes de la mesure.

Le 9 mars 1790, l'évêque de Talleyrand-Périgord propose de créer une nouvelle unité de mesures basée sur la longueur du pendule simple battant la seconde à la latitude de 45° (ce qui équivaut, à Paris, à 0,9938263 m). Le 8 mai 1790, l'Assemblée Nationale adopte le principe de l'uniformisation des poids et mesures et choisit, comme unité de base, le pendule battant la seconde. Des délégués sont alors envoyés en Espagne, en Angleterre et aux Etats-Unis, dans le but de fixer définitivement l'unité de longueur avec les gouvernements de ces pays. Mais l'Angleterre et les Etats-Unis, d'abord favorables, changent d'avis à la fin de l'année 1790. Une nouvelle définition est donc proposée par l'Académie Royale des Sciences le 19 mars 1791 : la mesure de la grandeur du quart du méridien terrestre plutôt que la longueur du pendule qui faisait intervenir le temps et l'intensité de la pesanteur (opération *a priori* plus universelle). L'Académie propose également d'utiliser un système décimal, plus simple que les systèmes en base 11 ou 12, etc. en vigueur à l'époque. Condorcet l'explique à l'Assemblée Nationale le 26 mars 1791 : *« L'Académie a cherché à exclure toute condition arbitraire, tout ce qui pourrait faire soupçonner l'influence d'un intérêt particulier à la France, ou d'une prévention nationale ; elle a voulu en un mot que si les principes et les détails de cette opération pouvaient seuls passer à la postérité, il fût impossible de deviner par quelle nation elle a été exécutée »*. En réponse de quoi, l'Assemblée décrète, le même jour : *« Considérant que, pour parvenir à établir l'uniformité des poids et mesures, il est nécessaire de fixer une unité de mesure naturelle et invariable et que le seul moyen d'étendre cette uniformité aux nations étrangères et de les engager à convenir d'un système de mesure est de choisir une unité qui ne renferme rien d'arbitraire ni de particulier à la situation d'aucun peuple sur le globe, ..., adopte la grandeur du quart du méridien terrestre pour base du nouveau système de mesures qui sera décimal ; les opérations nécessaires pour déterminer cette base, notamment la mesure d'un arc de méridien depuis Dunkerque jusqu'à Barcelone seront incessamment exécutées »*.

A la suite de cette décision, ce sont les astronomes Delambre et Méchain qui se chargent de la mesure de l'arc du méridien par la méthode de la triangulation. Les mesures s'effectueront de 1792 à 1798, interrompues entre 1793 et mai 1795, période trouble de la Terreur, pendant laquelle la France déclare la guerre à l'Espagne (7 mars 1793) et l'Académie des Sciences est supprimée (8 août 1793). D'ailleurs, sous la contrainte du temps, un système provisoire est adopté par la loi du 1^{er} août 1793, suite

à un rapport de l'Académie des Sciences du mois de mai (basé sur les travaux de La Condamine en 1735 au Pérou, Maupertuis en Laponie, Cassini en 1740 de Dunkerque à Perpignan) :

- la nouvelle unité de mesures, fondée sur la mesure du méridien de la terre, ainsi que la division décimale, serviront dans toute la République
- l'unité de mesure linéaire : la dix millionième partie du quart du méridien terrestre est appelée « mètre », nom adopté par Borda (donné par Leblond, du grec *metron* : mesure) et vaut 3 Pieds 11,44 lignes de Paris (soit la fraction 0,513243 de l'étalon Toise de l'Académie, ancienne Toise du Pérou)

La période trouble de la Terreur passée, Delambre et Méchain ont pu terminer leurs mesures de l'arc du méridien, ce qui conduit à fixer le mètre définitif à une longueur de 3 Pieds 11,296 lignes de la Toise de l'Académie (soit la fraction 0,513074 de l'étalon Toise de l'Académie, ancienne Toise du Pérou). Les nouveaux étalons prototypes définitifs en platine du mètre sont fabriqués et la loi du 19 frimaire an VIII (10 décembre 1799) les consacre comme étalons définitifs des mesures de longueur dans toute la République.

Afin de faciliter la mise en œuvre du tout nouveau système métrique, le gouvernement prescrit par un arrêté du 13 brumaire an IX (4 novembre 1800) : *« pour faciliter cette exécution, les dénominations données aux poids et mesures pourront dans les actes publics, comme dans les usages habituels, être traduites par les noms français qui suivent : »*, le kilogramme peut ainsi s'appeler la livre, le centimètre peut être nommé le doigt, le litre peut s'appeler la pinte, et ainsi de suite. Par ce retour au vocabulaire traditionnel, le gouvernement espérait familiariser plus facilement les usagers avec le nouveau système, mais ces tolérances d'appellations sont en réalité des sources constantes de confusion et de fraudes. Cette situation perdure jusqu'en 1812, où un nouveau décret impérial ajoute à la confusion. En effet, le 12 février 1812 le décret autorise l'abandon de la division décimale et le retour aux subdivisions anciennes, tout en précisant : *« il ne sera fait aucun changement aux unités des poids et mesures de la France, mais il sera confectionné pour l'usage du commerce, des instruments de pesage et de mesurage qui présentent soit les fractions, soit les multiples desdites unités les plus en usage dans le commerce et accommodés aux besoins du peuple »*. Les textes d'applications insistent sur le fait que *« ces dispositions n'étant relatives qu'à l'emploi des mesures et des poids dans le commerce de détail et dans les usages journaliers, les mesures légales continueront à être seules employées dans tous les travaux publics, le commerce en gros, et toutes les transactions commerciales. Le système légal sera aussi seul enseigné dans les écoles publiques »*. Il s'agit de *« mesures simplement tolérées »*, portant toujours l'indication de leur correspondance en valeurs métriques. Ainsi, à partir de 1812, les marchands peuvent utiliser *« une toise de 2 mètres, se divisant en 6 pieds ; le pied valant ainsi un tiers de mètre, se divisant en 12 pouces, le pouce en 12 lignes. »*. Cela explique que les hauteurs d'eau mesurées lors des campagnes hydrographiques officielles de Beautemps-Beaupré en 1824 soient en Pieds et en pouces, alors que le système légal restait le système métrique.

Devant la confusion croissante, l'arrêté est abrogé en 1825 et un « *recueil d'instructions sur les poids et mesures* » paraît en 1827. Puis, la loi du 4 juillet 1837 rend obligatoire le système métrique mis en place suite à la Révolution : « *à partir du 1^{er} janvier 1840, tous poids et mesures autres que les poids établis par les lois des 18 germinal an III et 19 frimaire an VIII, constitutives du système métrique décimal, seront interdits sous les peines portées par l'article 479 du code pénal* ».

La première Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM) se réunit à Paris en septembre 1889. Les prototypes internationaux en platine iridié du mètre sont placés dans le dépôt souterrain du Pavillon de Breteuil, où ils sont encore conservés aujourd'hui. Lors de la 11^e CGPM, la définition du mètre est remplacée par une définition fondée sur la longueur d'onde d'une radiation du krypton 86, afin d'améliorer l'exactitude de la réalisation de sa définition. En 1983, la 17^e CGPM remplace de nouveau cette définition par la définition actuellement en vigueur : « le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de 1/299 792 458 de seconde ». Ainsi, les conceptions initiales des fondateurs du système métrique ont été respectées : le mètre étalon est naturel, invariable, reproductible en tous temps et tous lieux, et ne renferme rien de particulier à aucun peuple.

III.1.2.2. Du Temps Solaire Vrai au Temps Universel Coordonné

Les informations de ce paragraphe sont extraites et résumées de l'ouvrage complet du Bureau des Longitudes [2011] sur ce sujet.

La mesure du temps est un exercice fondamental dans bien des domaines. La mesure de la hauteur de l'eau en fonction du temps en est un. Dès les premières mesures, l'Homme va utiliser l'alternance des jours et des nuits pour quantifier le temps, et donc le mouvement apparent du Soleil dans le ciel. Historiquement, la mesure du temps était donc de nature astronomique, nous verrons qu'aujourd'hui, c'est une affaire de physiciens.

L'utilisation du mouvement apparent du Soleil est le principe de base du fonctionnement d'un cadran solaire. Le temps donné par un cadran solaire est appelé, en astronomie, le **Temps Solaire Vrai** (TSV) d'un lieu. Il est défini en un lieu comme l'angle horaire du Soleil. Par définition, il est donc local et non-uniforme en raison des variations du mouvement du Soleil sur son orbite elliptique. Cet inconvénient est résolu en utilisant le **Temps Solaire Moyen** (TSM) d'un lieu. Le TSM est donné par un soleil moyen (fictif) qui se déplace sur une orbite circulaire, à vitesse constante, dans le plan de l'équateur céleste. Le TSM est ainsi corrigé des inégalités de l'ascension droite du Soleil : c'est donc la partie linéaire, par rapport au temps, du TSV. La différence entre TSM et TSV s'appelle l'équation du temps.

Le TSM apporte une amélioration importante à la mesure du temps, mais reste dépendant du lieu où on se trouve. Pour y remédier, on utilise d'abord le **Temps Civil** (TC) de Paris, défini comme étant le TSM de Paris augmenté de 12 heures. Ainsi, chaque lieu en France utilise la même heure : celle de Paris. Cette évolution devenait indispensable avec l'avènement des nouveaux moyens de communication, et notamment le développement croissant des compagnies ferroviaires au 19^e siècle. Mais cette méthode, basée pour un pays sur le TSM de l'une de ses villes pose désormais le problème de la coordination du temps dans le monde entier, le TSV grandissant à mesure que l'on s'éloigne du lieu de référence. Cette constatation a poussé les différents pays à se mettre d'accord sur la définition du **Temps Universel** (TU), référence mondiale unique, ainsi que sur la définition de fuseaux horaires afin d'adapter cette référence localement, par décalage d'un nombre entier d'heures (TU+1, TU+2, etc.).

Par convention, le TU est le TSM de Greenwich (GMT), augmenté de 12 heures. Mais le TU est une échelle de temps étroitement liée à la rotation diurne de la Terre qui n'est pas uniforme. Un nouveau système a alors été introduit, le Temps des Ephémérides, plus stable et basé sur la révolution de la Terre autour du Soleil. Celle-ci n'étant pas parfaitement stable non plus, les paramètres astronomiques sont abandonnés pour la définition du temps, laissant place à la physique : la seconde actuelle est conçue à partir d'horloges atomiques (en mesurant la fréquence des atomes) et est particulièrement stable. En additionnant ces secondes, on fabrique ainsi une nouvelle échelle de temps, le **Temps Atomique International** (TAI). L'utilisation du TAI, extrêmement stable, entraîne un léger décalage avec la rotation de la Terre, et donc avec le TU, ce qui implique de recalibrer le TAI régulièrement (en fonction des variations de la rotation de la Terre) par l'ajout d'une seconde. Cette échelle de temps atomique modifiée s'appelle le **Temps Universel Coordonné** (TUC) et elle est régulièrement modifiée de telle sorte que sa différence avec le TU n'excède pas 0,9 seconde en valeur absolue.

Le temps légal est le temps utilisé sur l'ensemble d'un territoire d'un pays donné, fixé par le gouvernement. Intéressons-nous brièvement à sa définition en France. En 1875, les conclusions d'un congrès international se déroulant à Paris préconisent l'utilisation d'un méridien unique à partir duquel on compterait les longitudes. Ce méridien sera choisi en 1884, lors de la conférence de Washington, il s'agira du méridien de Greenwich. Cependant, le temps légal français reste le TSM de chaque préfecture jusqu'en 1891, avant que le TC ne soit adopté comme le temps unique du territoire. La loi du 9 mars 1911 définit le nouveau temps légal en France, en accord avec les définitions des pays étrangers : l'heure légale devient l'heure du TSM de Paris retardée de 9 minutes et 21 secondes (correspondant à la différence de longitude entre Paris et Greenwich). Cela signifie que le temps légal devient le TU. Cette loi est remplacée par un décret du 9 août 1978 stipulant que « *le temps légal est obtenu en ajoutant ou en retranchant un nombre entier d'heures au Temps Universel Coordonné* ». Ce nouveau décret prévoit l'usage d'une heure d'été, apparue pour la première fois en 1916. Actuellement, en France, le temps légal est le TUC + 1 heure en hiver, et TUC + 2 heures en été.

III.2. Contexte géographique

III.2.1. Cadre général

Le littoral charentais désigne, dans ce travail de recherche, l'ensemble de la frange littorale, comprenant à la fois la bande côtière continentale (de la ville de Charron, au nord, à celle de Mortagne, au sud), les îles (Ré, Oléron, Aix, Madame), les édifices en mer (fort Boyard et fort Enet) ainsi que la zone maritime des pertuis charentais. Le phare de Cordouan est également un édifice en mer, situé à l'embouchure de l'estuaire de la Gironde et marque une sorte de frontière maritime entre les deux départements voisins de la Charente-Maritime et de la Gironde.

Le littoral charentais (*figure III-1*) est situé au milieu de la façade atlantique française, le long du golfe de Gascogne, entouré par le littoral rocheux du Sud-Bretagne, au nord, et celui d'Aquitaine, rectiligne et sableux, au sud. Il est composé d'environ 460 km de côte, principalement en raison de la présence de deux îles importantes que sont l'île de Ré et l'île d'Oléron (environ 200 km de côte). Ces îles sont séparées du continent par des zones maritimes appelées localement pertuis, qui correspondent à des segments de vallées incisées s'inscrivant dans les dépressions du substratum mésozoïque [Chaumillon & Weber, 2006]. Ces pertuis charentais sont au nombre de trois :

- le pertuis Breton, entre l'île de Ré et la côte sud-vendéenne
- le pertuis d'Antioche, entre l'île de Ré et l'île d'Oléron
- le pertuis de Maumusson, entre la pointe sud de l'île d'Oléron et la côte sauvage

Le pertuis Breton et le pertuis d'Antioche communiquent entre eux par un bras de mer, appelé localement « *le coureau de La Pallice* ». Le pertuis d'Antioche est le plus grand des trois pertuis et comprend à la fois les sites de la rade de La Rochelle (au nord) et celle de l'île d'Aix (au sud). Les trois pertuis sont alimentés par des rivières : le Lay et la Sèvre Niortaise pour le pertuis Breton, l'estuaire de la Charente pour le pertuis d'Antioche et la Seudre pour le pertuis de Maumusson. Les deux îles principales, Ré et Oléron, d'orientation Nord-Est / Sud-Ouest protègent de la houle océanique les zones situées entre elles et le continent, formant ainsi des baies tidales. La principale est la baie de Marennes-Oléron (160 km²), située au sud du pertuis d'Antioche entre l'île d'Oléron et le continent. Elle est caractérisée par de nombreux et vastes platiers intertidaux (environ 60 % de la superficie totale) entrecoupés de petits chenaux de marée. Ces environnements semi-fermés ont un fonctionnement identique à celui d'estuaires et sont de type mixte à marée dominante.

A terre, globalement, le littoral charentais est constitué de plaines et de bas plateaux, peu boisés au nord du département. Le relief est plutôt plat et les altitudes sont généralement peu élevées, et l'on peut noter la présence de nombreux et vastes marais sur une grande partie du littoral, qui s'inscrivent dans

les dépressions du substratum rocheux mésozoïque et sont isolés par des cordons littoraux ou des digues. Ils représentent environ 25% du territoire départemental ; parmi les plus importants, on trouve, du nord au sud : le marais Poitevin, les marais de Voutron, de Rochefort, de Brouage et de la Seudre. Le littoral charentais est donc fortement exposé aux risques de submersions marines.

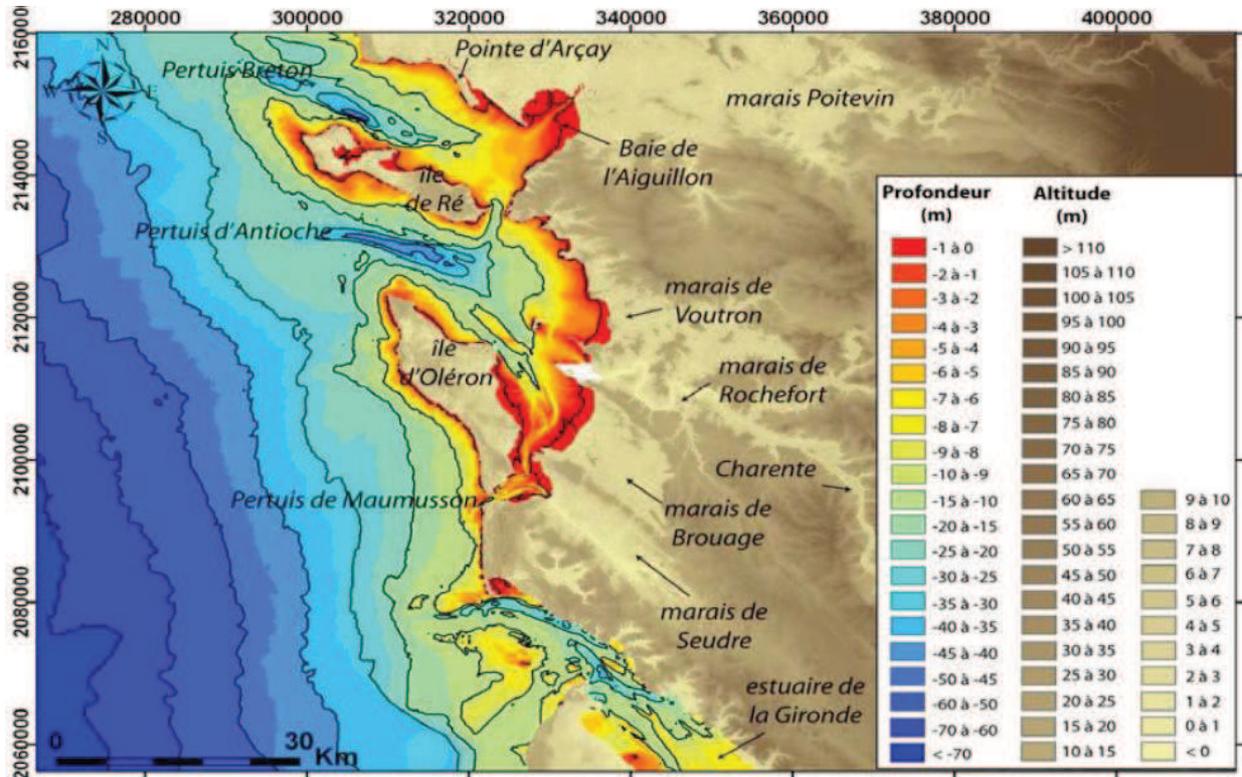


Figure III-1 : Présentation bathymétrique et topographique du littoral charentais. Assemblage des données du SHOM, du GPMB, de la DDTM 17 et de l'IGN [Allard, 2008].

III.2.2. Géomorphologie du pertuis d'Antioche

Du nord vers le sud, on peut caractériser les pertuis charentais en trois zones différentes. Le pertuis Breton correspond à la vallée incisée de la Sèvre Niortaise et du Lay, le pertuis d'Antioche correspond à celle de la Charente, et le pertuis de Maumusson à celle de la Seudre. Nous ne décrivons ici que notre zone d'étude principale : le pertuis d'Antioche.

Le pertuis d'Antioche mesure environ 30 km de long pour 10 km de large. La bathymétrie de la zone augmente progressivement du continent vers le large pour atteindre un maximum de 66 m à la limite du plateau continental du golfe de Gascogne. Globalement, les pertuis charentais sont une zone peu profonde, à l'exception de deux fosses, dont l'une est située dans le pertuis d'Antioche (profondeur de l'ordre de 40 m), d'orientation Ouest-Nord-Ouest / Est-Sud-Est, isolée à l'Ouest du plateau continental par un haut fond culminant à - 19 m : le seuil Inter-Insulaire. Cette fosse s'est formée par l'écoulement de la Charente pendant le dernier stade glaciaire pléistocène [André, 1986].

La partie interne du Pertuis d'Antioche, appelée la rade des Basques, se caractérise par des fonds de moins en moins profonds à mesure que l'on se dirige vers l'embouchure de la Charente. Elle se caractérise également par plusieurs pointes et presqu'îles rocheuses (pointe des Minimes, pointe du Chay, pointe de Châtelailon, presqu'île de Fouras, platiers des Palles). Le chenal de marée, situé dans le prolongement de l'embouchure de la Charente, est bordé par un banc de sable allongé orienté Nord-Ouest / Sud-Est, appelé localement la longe de Boyard, et situé à l'extrémité sud du pertuis d'Antioche, entre l'île d'Aix et l'île d'Oléron. Ce banc mesure environ 8 km de long pour 2 km de large et jusqu'à 10 m d'épaisseur [Chaumillon *et al.*, 2008b]. Il est bordé par deux chenaux, pouvant atteindre localement jusqu'à 15 m de profondeur, qui assurent la communication entre le pertuis et la baie de Marennes-Oléron.

III.2.3. Impact anthropique

Le développement des cultures des huîtres et des moules sur l'ensemble du littoral charentais débute dès le 19^e siècle. La baie de Marennes-Oléron est aujourd'hui l'un des centres conchylicoles les plus importants d'Europe avec un stock ostréicole d'environ 95 000 tonnes pour une production annuelle d'environ 35 000 à 40 000 tonnes [Modéran, 2010]. Il s'agit également de la première zone européenne de commercialisation de l'huître creuse « *Crassostrea gigas* » : 60 000 tonnes par an, soit la moitié de la quantité commercialisée en France [Pigeot, 2001]. La distribution des tables ostréicoles dans la baie représente environ 36 km², soit près de 40 % de la superficie totale des zones intertidales [Bertin, 2005]. Cette importante activité économique a cependant des conséquences sur l'évolution morphologique de la baie.

En effet, les installations conchylicoles (tables, bouchots) favorisent la sédimentation en diminuant l'hydrodynamisme du milieu (obstacles aux courants de marée). De plus, la forte concentration en huître et en moule, qui filtrent la matière en suspension dans l'eau, entraîne une surproduction de déchets organiques piégés par les particules argileuses [Sornin, 1981], participant à l'augmentation de la sédimentation locale. En conséquence, les taux de sédimentation de la baie sont trois fois plus élevés à proximité des parcs à huîtres [Gouleau *et al.*, 2000]. Bertin & Chaumillon [2006] ont estimé un volume de 35.10⁶ m³ de sédiment accrété sous les installations ostréicoles depuis 1824, soit environ 30% du volume total de sédiment déposé dans la baie de Marennes-Oléron depuis cette date.

A noter qu'il existe également une prolifération de crépidules dans les pertuis charentais, qui comme les huîtres et les moules, provoque une forte sédimentation des particules fines. Ces colonies de crépidules sont responsables de l'envasement progressif du substrat d'origine et stabilisent la vase en un fond plus cohésif et difficilement remaniable par les houles et les courants de marée. Il en résulte un rehaussement des fonds et un changement progressif de l'hydrodynamisme [Weber, 2004].

III.3. Contexte géologique

III.3.1. Cadre général

Le lecteur intéressé trouvera une synthèse bibliographique de la géologie des pertuis charentais dans le manuscrit de thèse de Weber [2004]. Les pertuis charentais sont localisés sur un vaste monoclinale de pendage général Sud-Sud-Ouest composé principalement de calcaires et de marnes mésozoïques (Jurassique et Crétacé, *figure III-2*) reposant sur le socle hercynien (à 300 m de profondeur environ) [Poirier, 2010]. Ce monoclinale mésozoïque est secondairement affecté par une série de plissements de faible amplitude [Bourgueil & Moreau, 1974] engendrés au cours de la compression pyrénéenne au Paléogène.

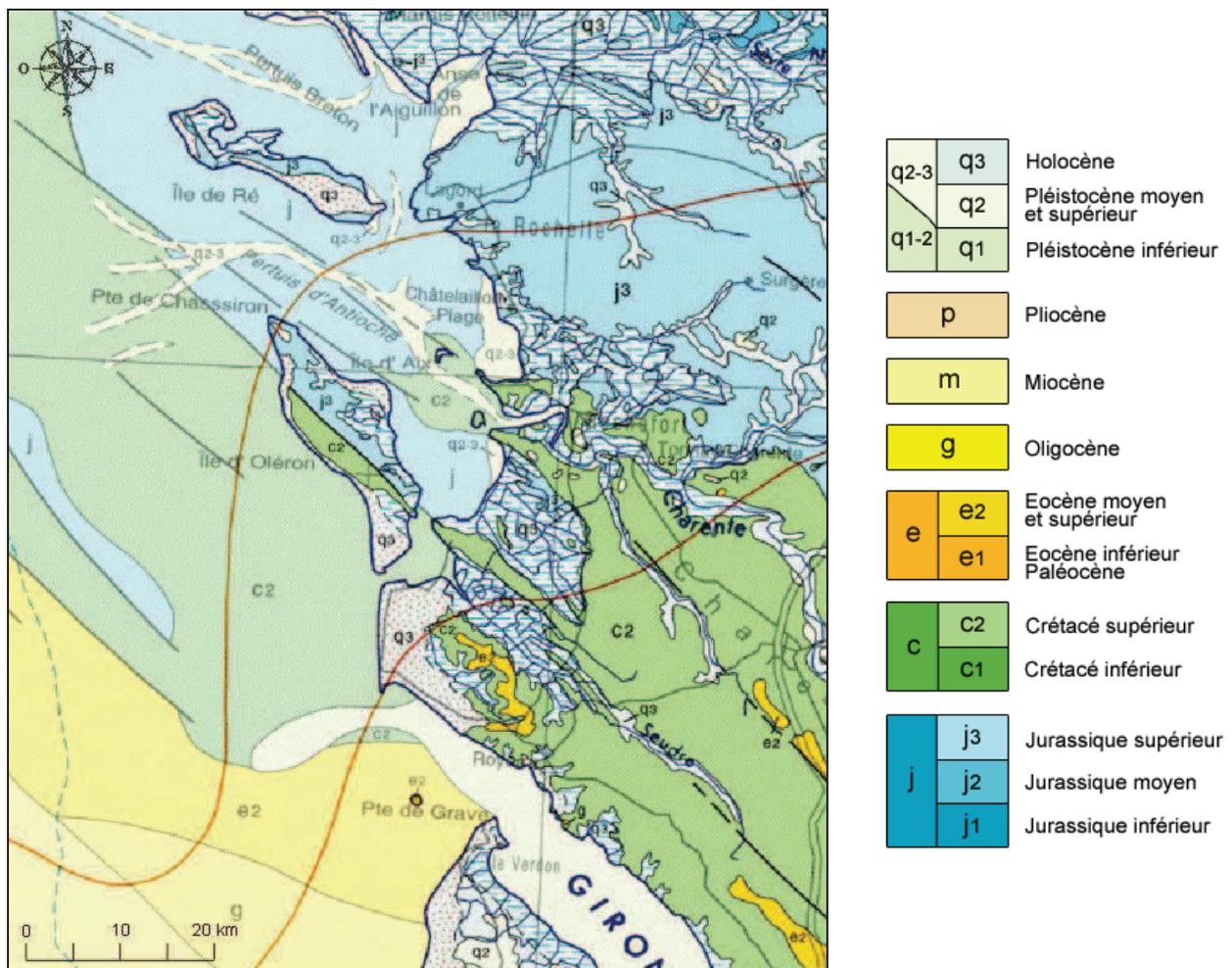


Figure III-2 : Carte géologique imprimée 1/1 000 000 du littoral charentais (source : BRGM via <http://infoterre.brgm.fr>, consulté le 1^{er} décembre 2011).

Dans la région des pertuis charentais, les structures plissées dominantes correspondent au synclinal de Saintes et à l'anticlinal de Saintonge de direction hercynienne [Néraudeau & Moreau, 1989]. L'érosion différentielle au cours du Pléistocène des roches plus tendres localisées dans les couches du

vaste monoclinale ou des petits synclinaux a créé des dépressions globalement orientées le long d'un axe Nord-Ouest / Sud-Est, comblées à l'Holocène par des sédiments meubles. De nombreuses failles d'orientation Nord-Ouest / Sud-Est affectent ces strates, l'une des plus importantes à l'échelle régionale étant celle de Dolus (île d'Oléron). L'ensemble de ces déformations structurales est clairement dominé par des directions hercyniennes (120° nord), qui s'expriment également au niveau de la morphologie côtière, comme par exemple dans l'orientation Nord-Ouest / Sud-Est des îles de Ré et Oléron ou encore l'orientation des vallées incisées (fosses des pertuis).

III.3.2. Sédimentologie de surface

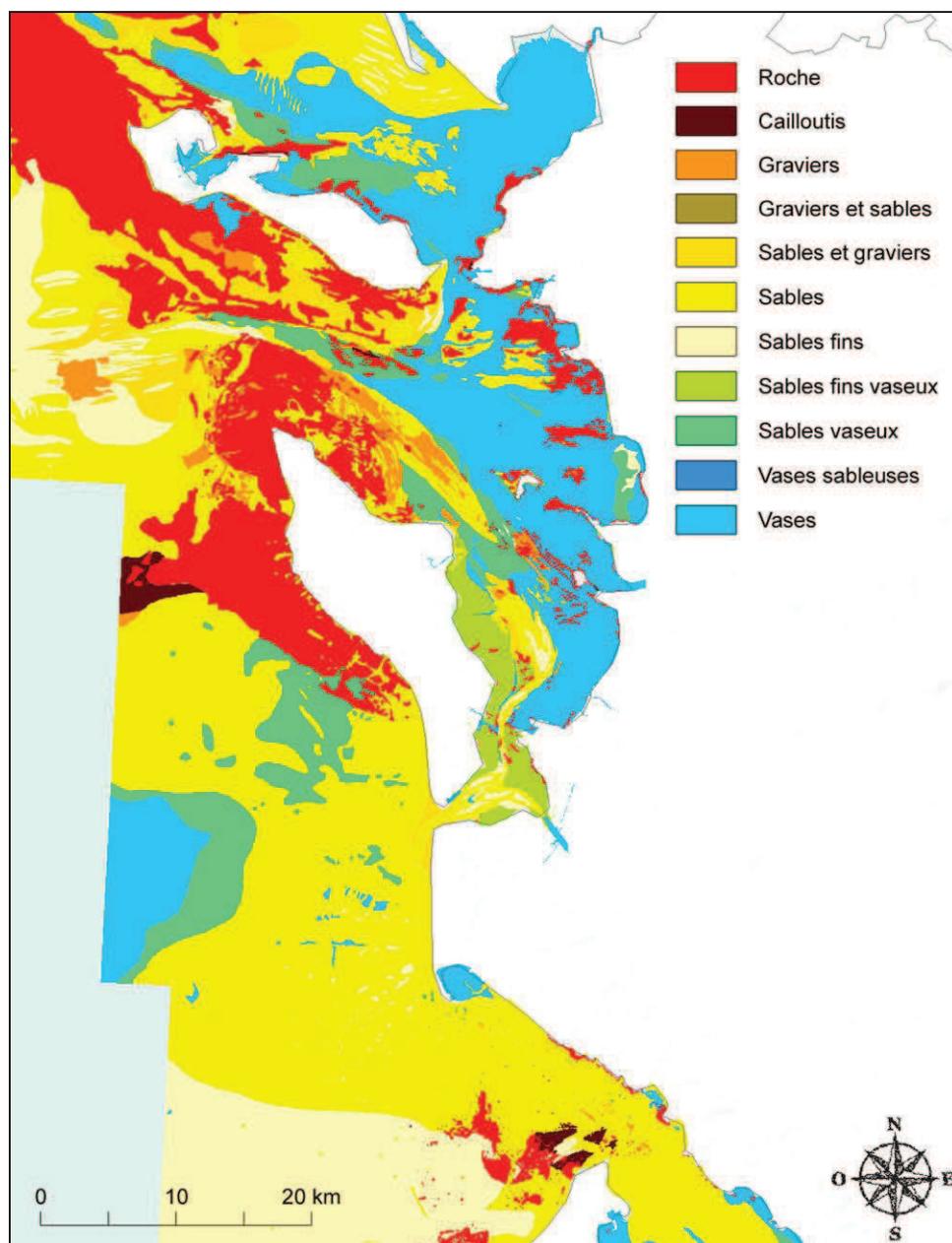


Figure III-3 : Carte sédimentologique synthétique du littoral charentais (© SHOM - 2011)

Les sédiments sont distribués de manière complexe dans les pertuis Charentais (*figure III-3*). D'après la carte synthétique de la sédimentologie de surface, réalisée par le SHOM, on peut distinguer quatre grands types de sédiments : substratum rocheux, graviers, sable et vase. Le substratum rocheux correspond à de larges platiers que l'on retrouve majoritairement à l'ouest des îles de Ré et Oléron où de forts courants empêchent le dépôt de sédiments, ainsi qu'aux alentours de la fosse du pertuis d'Antioche. Des platiers de taille plus modeste se situent également dans le prolongement des pointes rocheuses, comme c'est le cas au fort Enet par exemple. L'intérieur des pertuis est majoritairement recouvert par des sédiments fins, de type vase, depuis la baie de l'Aiguillon jusqu'à la baie de Marennes-Oléron. On distingue nettement la longe de Boyard, entre l'île d'Oléron et l'île d'Aix, composée de sable, ainsi que de graviers sur son toit. D'autres bancs de sable apparaissent, notamment au niveau du pertuis de Maumusson, en raison des forts courants de marée qui y dominent.

III.3.3. Contexte sismique

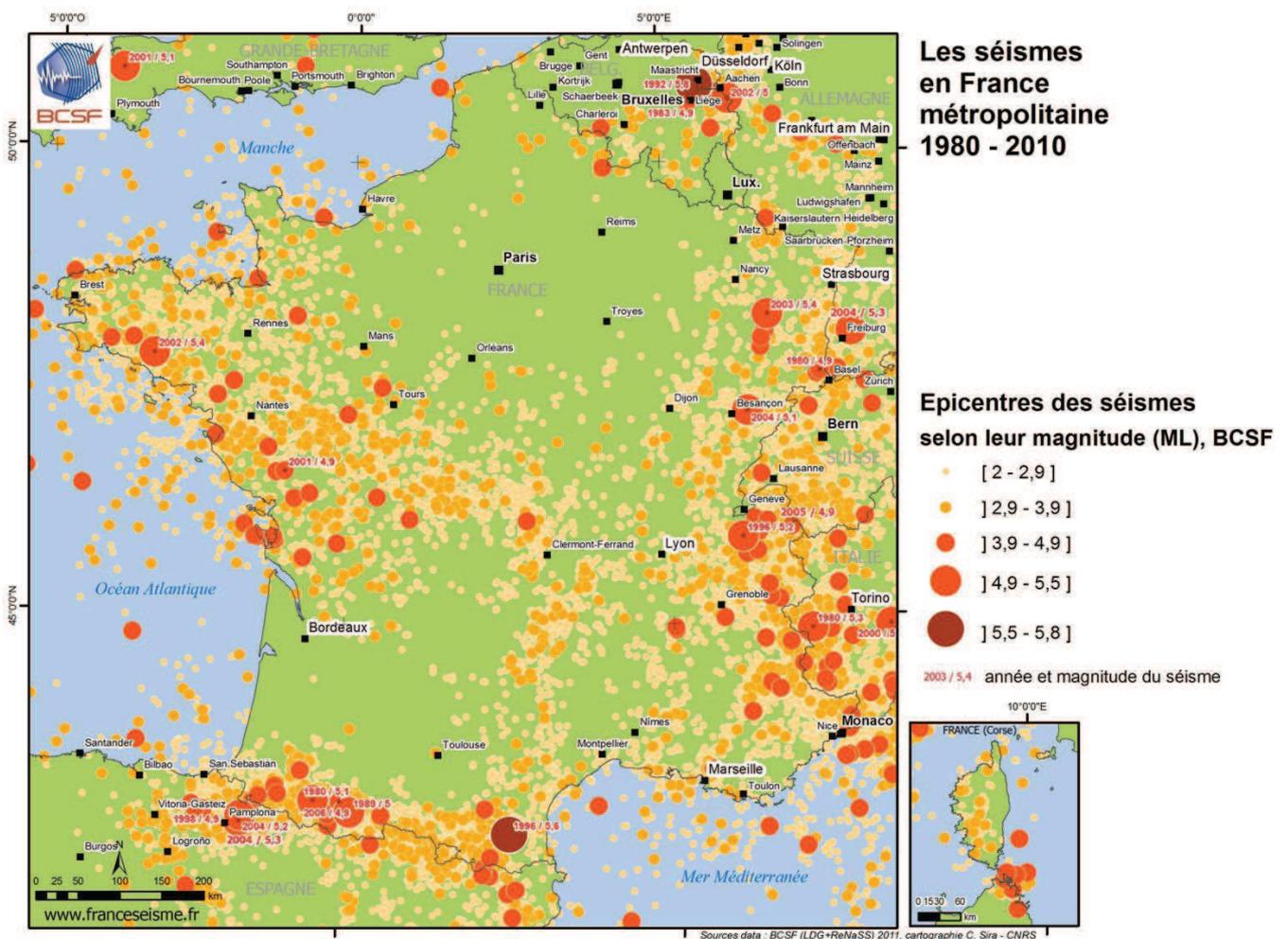


Figure III-4 : Carte des épocentres des séismes en France métropolitaine de 1980 à 2010 (source : <http://www.franceseisme.fr>, consulté le 1^{er} décembre 2011).

L'activité sismique dans la région est modérée [Müller *et al.*, 1992] (185 séismes entre 1995 et 2003 de magnitude variant entre 1.5 et 5). Elle résulte de la réactivation de failles d'orientation hercynienne (Nord-Ouest / Sud-Est) du fait de contraintes à la limite sud de la plaque européenne [Gabilly, 1978]. Sur le littoral charentais, cette activité est concentrée au niveau de l'ouest de l'île d'Oléron ainsi qu'à terre au nord du marais Poitevin (*figure III-4*). Les mécanismes aux foyers montrent des rejets horizontaux généralement dextres [Rothé, 1983].

III.4. Contexte hydrologique

Quatre rivières se déversent dans les pertuis charentais, après avoir parcouru les marais : Le Lay, la Sèvre Niortaise, la Charente et la Seudre. Les débits et les bassins versants de ces quatre cours d'eau sont faibles en comparaison de ceux de l'estuaire de la Gironde, situé à la limite sud du littoral charentais, comme le montre le *tableau III-1*.

Rivière	Bassin versant (km ²)	Longueur (km)
Lay	978	55
Sèvre Niortaise	3 620	95
Charente	10 550	365
Seudre	955	46
Gironde	74 000	585

Tableau III-1 : Aires des bassins versants et longueurs des rivières qui se déversent dans les pertuis charentais (Lay, Sèvre Niortaise, Charente et Seudre) et ceux de la Gironde pour comparaison. Modifié d'après Weber [2004].
Source : Lorin [1970]; Tesson [1973]; Castaing [1981]; L.C.H.F. [1987].

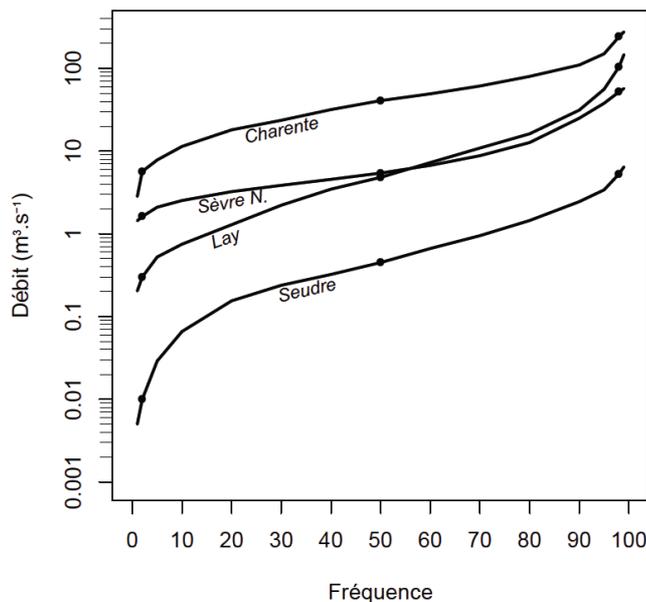


Figure III-5 : Débits des quatre cours d'eau s'écoulant dans les pertuis charentais. Les points indiquent les débits en étiage (fréquence 2%), en situation normale (50%) et en crue (98%). Données issues de la Banque Hydro [Poirier, 2010].

Le débit de la Charente est de l'ordre de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ [Tesson, 1973] et peut atteindre jusqu'à $250 \text{ m}^3/\text{s}$ en période de crue (*figure III-5*). Les débits du Lay et de la Sèvre Niortaise sont de l'ordre de $5 \text{ m}^3/\text{s}$, tandis que celui de la Seudre est extrêmement faible (environ $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$). Même en période de crue, ces volumes restent très faibles face aux volumes d'eau déplacés par la marée [Tesson, 1973; Bertin *et al.*, 2005; Chaumillon *et al.*, 2008b]. Une quarantaine de marais littoraux de moindre importance, dont les exutoires fournissent un apport supplémentaire d'eau douce dans les Pertuis, sont également répartis le long des côtes [Weber, 2004; Poirier, 2010]. Les apports sédimentaires dans le pertuis d'Antioche attribué à la Charente seraient de l'ordre de 41 000 tonnes par an [Gonzalez *et al.*, 1991]. Bien que la plus grande station de lagunage d'Europe soit située à Rochefort, à 15 km en amont de l'embouchure de la Charente, son impact sur la rivière ne représente seulement que $0,05 \text{ m}^3/\text{s}$, ce qui est négligeable [Modéran, 2010].

III.5. Contexte hydrodynamique

III.5.1. Houle

La houle est formée au large sous l'action du vent, avant de se propager et d'atteindre la côte. Elle présente une forte variation saisonnière dans le golfe de Gascogne, et plus particulièrement sur le littoral charentais [Castelle, 2004; Bertin *et al.*, 2008]. Bertin *et al.* [2008] ont montré qu'il existait deux périodes caractéristiques de la houle, à partir de données sur la période 1997-2005 :

- la houle estivale (avril à octobre) : représente entre 58 à 69% du climat annuel de houle, orientée Ouest-Nord-Ouest, amplitude comprise entre 0,8 et 2,5 m, période variant de 6 à 12 s, et direction de 274 à 292°N.

- la houle hivernale (novembre à mars) : représente entre 15 à 27% du climat annuel de houle, orientée Ouest, amplitude comprise entre 2,5 et 9,4 m, période variant de 11 à 15 s, et direction de 265 à 280°N.

Lors des saisons d'automne et de printemps, les résultats des simulations de Bertin *et al.* [2008] proposent des climats de houle intermédiaires. A l'entrée des pertuis, la houle est réfractée et atténuée par les seuils et les flancs des fosses, notamment celle d'Antioche. Elle atteint la côte avec un angle d'incidence élevé qui induit une dérive littorale globalement orientée du nord vers le sud.

III.5.2. Marée

Les caractéristiques de la marée sur le littoral charentais seront analysées à partir de nos jeux de données et peuvent être retrouvées au chapitre VI (cf. *VI.1.1.1. Caractéristiques générales*). De façon générale, le littoral charentais est caractérisé par une marée de type semi-diurne (deux cycles de pleine et basse mer par jour lunaire de 24h50), tout comme le golfe de Gascogne. D'après les chiffres officiels publiés par le SHOM [SHOM, 2011], le marnage de vive-eau moyenne est de 5,10 m à La Rochelle et de 5,20 m à l'île d'Aix. Les côtes du littoral charentais sont donc de type macrotidales. Le marnage de morte-eau moyenne est plus faible : 2,45 m à La Rochelle et 2,50 m à l'île d'Aix. Le marnage maximal atteint par la seule marée astronomique est de 6,69 m à La Rochelle et de 6,68 m à l'île d'Aix. La marée se propage dans le golfe de Gascogne du sud vers le nord. En entrant dans les pertuis charentais, elle s'amplifie et se déforme (cf. *VI.1.1.2. Caractérisation de l'asymétrie tidale*).

III.5.3. Courants

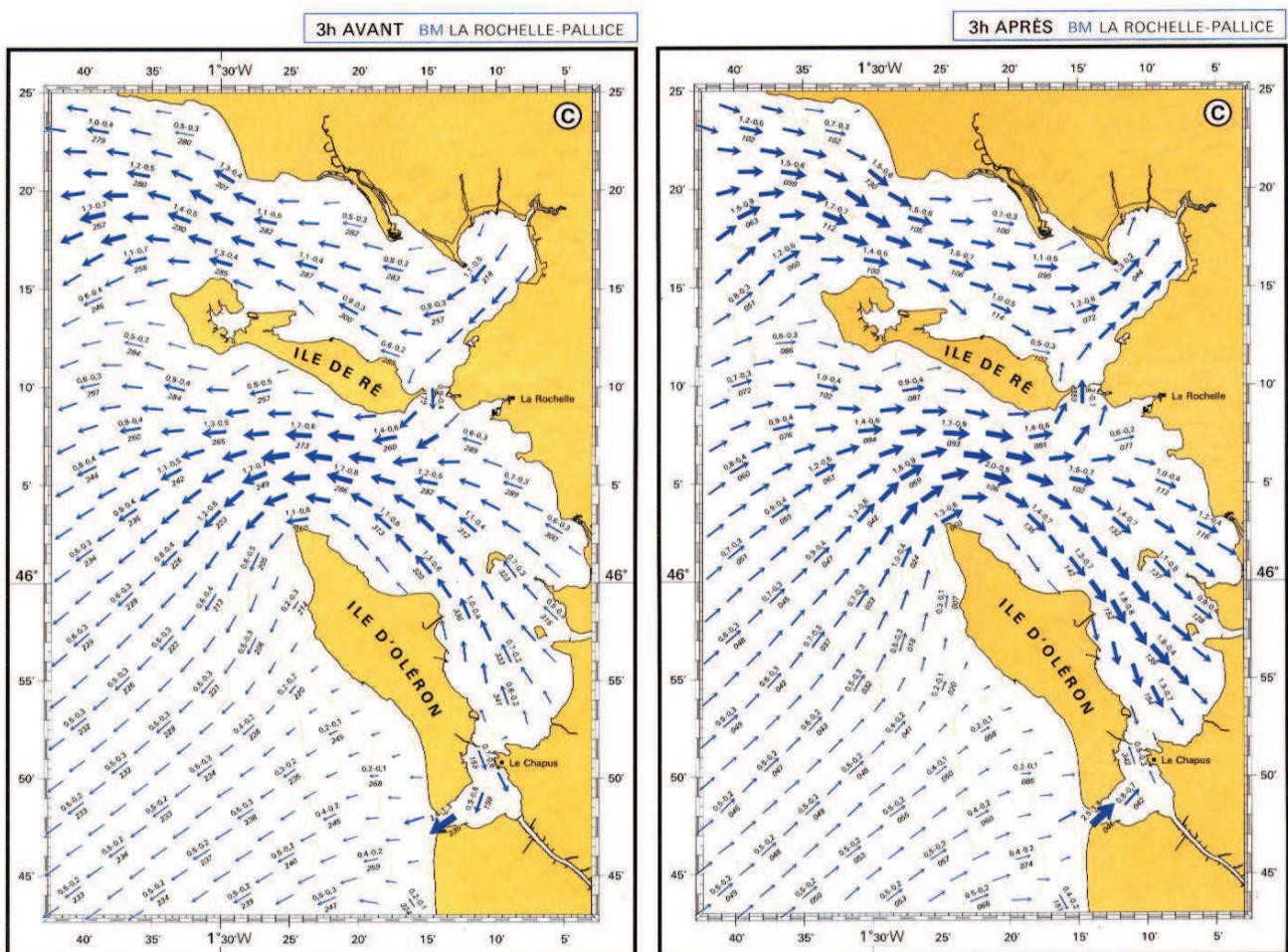


Figure III-6 : Cartes des courants de marée en surface pour les périodes situées trois heures avant et après la basse mer du port de La Pallice (© SHOM - 1993).

Les courants marins sont caractérisés à un instant donné et en un lieu donné par leur direction et leur vitesse. Par convention et contrairement au vent, la direction d'un courant est celle vers laquelle il porte. On peut distinguer plusieurs types de courants marins :

- les courants de marée
- les courants formés par la houle
- les courants de dérive dus au vent
- les courants de pente dus aux surélévations du niveau de la mer près des côtes
- les courants de densité, liés aux mouvements relatifs des masses d'eau océanique

Parmi ces différents courants, le courant de marée se distingue souvent par sa vitesse relativement élevée, particulièrement près des côtes et notamment le long du littoral charentais. Les vitesses maximales atteignent 2 à 3,5 nœuds et se situent au niveau des deux pointes occidentales des îles de Ré et d'Oléron, ainsi qu'au niveau du pertuis de Maumusson (*figure III-6*). On constate qu'il n'existe pas de différences majeures dans la force et la direction des courants de l'île d'Aix, du fort Enet et du fort Boyard.

III.6. Contexte météorologique

Essentiellement balayée par des vents chargés d'humidité venus de l'Atlantique et à l'abri des invasions d'air froid en provenance de l'Arctique, la France bénéficie d'un climat dit « tempéré ». Toutefois, les trois façades maritimes (Manche, Atlantique et Méditerranée) et les trois importants massifs montagneux (Pyrénées, Massif central, Alpes) confèrent à notre pays une grande diversité de climats régionaux.

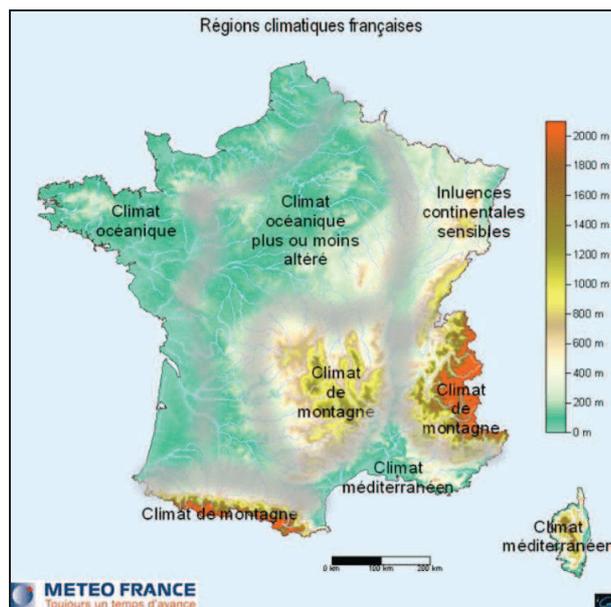


Figure III-7 : Répartition géographique des types de climat en France métropolitaine. Les zones ombrées correspondent à des aires de transition, une délimitation stricte des climats étant en effet impossible (source : <http://climat.meteofrance.com/>, consulté le 1^{er} décembre 2011).

En première approche, on distingue, en France métropolitaine, cinq grands types de climats (*figure III-7*) : océanique, océanique plus ou moins altéré, de montagne, méditerranéen et avec des influences continentales sensibles. Comme le montre la *figure III-7*, le littoral charentais est soumis à un climat océanique : températures douces et pluviométrie modérée (en relation avec les perturbations atlantiques) du fait de l'éloignement de tout relief.

III.6.1. Pression atmosphérique

Les quelques statistiques du régime des pressions atmosphériques du littoral charentais sont calculées à partir des jeux de données de pression rapportée au niveau de la mer d'Enet-Boyard, sur la période 1860-1909 (cf. V.3. *Séries de pression atmosphérique*). La *figure III-8* représente les moyennes mensuelles minimales, moyennes et maximales sur l'ensemble de la période 1860-1909, réparties par mois, de janvier (1) à décembre (12). On peut distinguer deux périodes saisonnières classiques : l'hiver (de novembre à mars) où les écarts entre les moyennes mensuelles minimales et maximales sont élevés (supérieurs à 20 hPa) traduisant d'importants et rapides changements atmosphériques, et l'été (de mai à août) où les écarts sont plus faibles (globalement inférieurs à 10 hPa), ce qui signifie que l'atmosphère est plus calme, et que ses changements sont moins importants. En règle générale, les valeurs de pression atmosphérique mesurées sur le littoral charentais peuvent parcourir une plage d'environ 85 hPa, de 967 hPa à 1050 hPa.

Les valeurs caractéristiques relevées sur la période 1860-1909 sont les suivantes :

- Moyenne mensuelle minimale : 1003,12 hPa (février 1900)
- Moyenne mensuelle maximale : 1029,62 hPa (janvier 1880)
- Valeur instantanée minimale : 967,65 hPa (31 décembre 1896)
- Valeur instantanée maximale : 1049,91 hPa (28 janvier 1905)

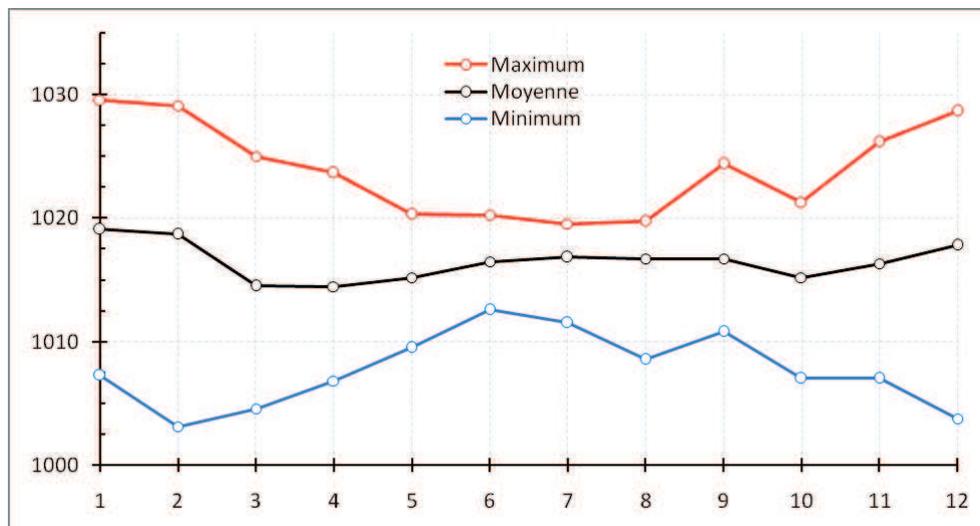


Figure III-8 : Moyennes mensuelles de pression de 1860 à 1909 (Enet-Boyard).

III.6.2. Vent

Les vents du littoral charentais sont mesurés en continu depuis un peu plus d'une cinquantaine d'années, par l'intermédiaire des stations de La Rochelle, et des sémaphores de Chassiron et de la Coubre. Les statistiques réalisées par Météo France, à partir des données recueillies par les sémaphores de la Marine Nationale sur le Golfe de Gascogne, permettent d'observer une certaine homogénéité des conditions de vent entre la Loire et la Gironde. Les vents les plus répandus sont d'origine marine issus des directions Nord-Ouest à Sud-Ouest (50% des observations, *figure III-9*). Dans cette catégorie, 75 % des vents montrent des vitesses comprises entre 4 et 16 nœuds²⁵ sur toute l'année. Les vents les plus forts (supérieur à 25 nœuds) sont généralement enregistrés de septembre à avril et représentent alors, durant cette période, 25% des observations [Weber, 2004].

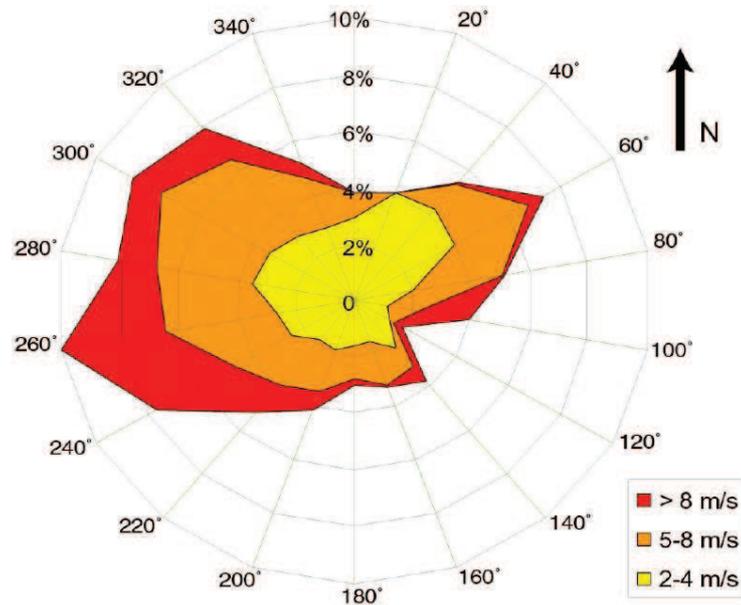


Figure III-9 : Rose des vents réalisée à partir des données du sémaphore de la Coubre (1961-1990) [Bertin, 2005].

III.6.3. Températures, précipitations et ensoleillement

Le climat océanique du littoral charentais est caractérisé par une pluviométrie élevée en automne et en hiver, avec un bon ensoleillement et un hiver doux (6,5°C en moyenne) soumis à la brise de mer. Les valeurs caractéristiques relevées à La Rochelle sur la période 1971-2000 sont les suivantes :

- Nombre de jours avec précipitations (> 1 mm), total annuel moyen : 116 jours
- Hauteur de précipitations, cumul annuel moyen : 763,5 mm
- Température minimale, moyenne annuelle : 9,5°C

²⁵ 1 nœud = 0,514 m/s

- Température maximale, moyenne annuelle : 16,6°C
- Durée d'insolation, cumul annuel moyen : 2 055 heures
- Nombre de jours avec un faible ensoleillement : 116 jours
- Nombre de jours avec un fort ensoleillement : 77 jours

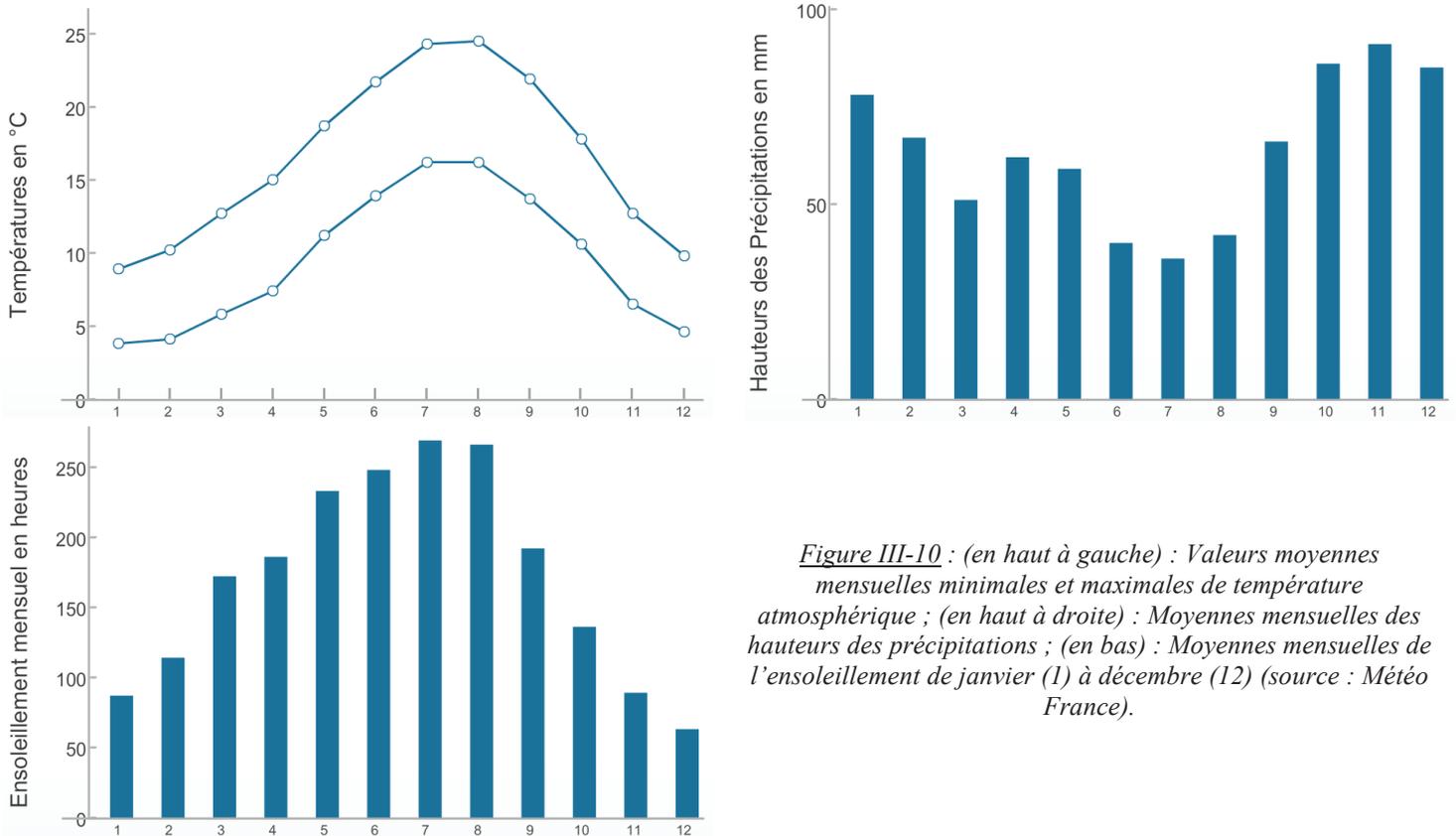


Figure III-10 : (en haut à gauche) : Valeurs moyennes mensuelles minimales et maximales de température atmosphérique ; (en haut à droite) : Moyennes mensuelles des hauteurs des précipitations ; (en bas) : Moyennes mensuelles de l'ensoleillement de janvier (1) à décembre (12) (source : Météo France).

III.7. Contexte paléo-océanographique

Les variations du niveau marin relatif constituent le paramètre de contrôle primordial du comblement des vallées incisées pendant l'Holocène [Chaumillon *et al.*, 2010]. La *figure III-11* présente différentes courbes de variations du niveau marin relatif à l'Holocène disponibles pour le littoral charentais, obtenues soit par modélisation des processus iso- et eustatiques [Lambeck, 1997], soit par datations au carbone 14 de marqueurs anciens de la position du trait de côte [Ters, 1986]. La *figure III-11* montre trois phases majeures :

- Entre 18 000 et 14 000 ans BP (*before present*) environ le niveau marin relatif moyen s'élève d'environ -81 à -75 m à Royan (*figure III-11c*), soit un rythme d'environ 1,5 mm/an.

- Entre 14 000 et 8 000 ans BP, le niveau marin relatif moyen s'élève d'environ -75 à un niveau compris entre -20 m (*figure III-11a et d*) et -15 m (*figure III-11c*), soit une vitesse moyenne comprise 9,2 et 10 mm/an. Poirier [2010] suggère que cette vitesse avoisinait les 13 mm/an (*figure III-11b*).

- Entre 8 000 et 6 000 ans BP, le niveau marin relatif moyen s'élève d'environ 10 à 12 m (de -15 à -5 m, *figure III-11c* ; de -20 à -8 m, *figure III-11a*), soit une vitesse moyenne comprise 5 et 6 mm/an. La *figure III-11b* montre bien la décélération progressive de la vitesse d'élévation du niveau marin lors de cette période.

- A partir de 6 000 ans BP, le rythme de montée est plus lent et plus ou moins stable, compris entre 0,8 et 1,3 mm/an.

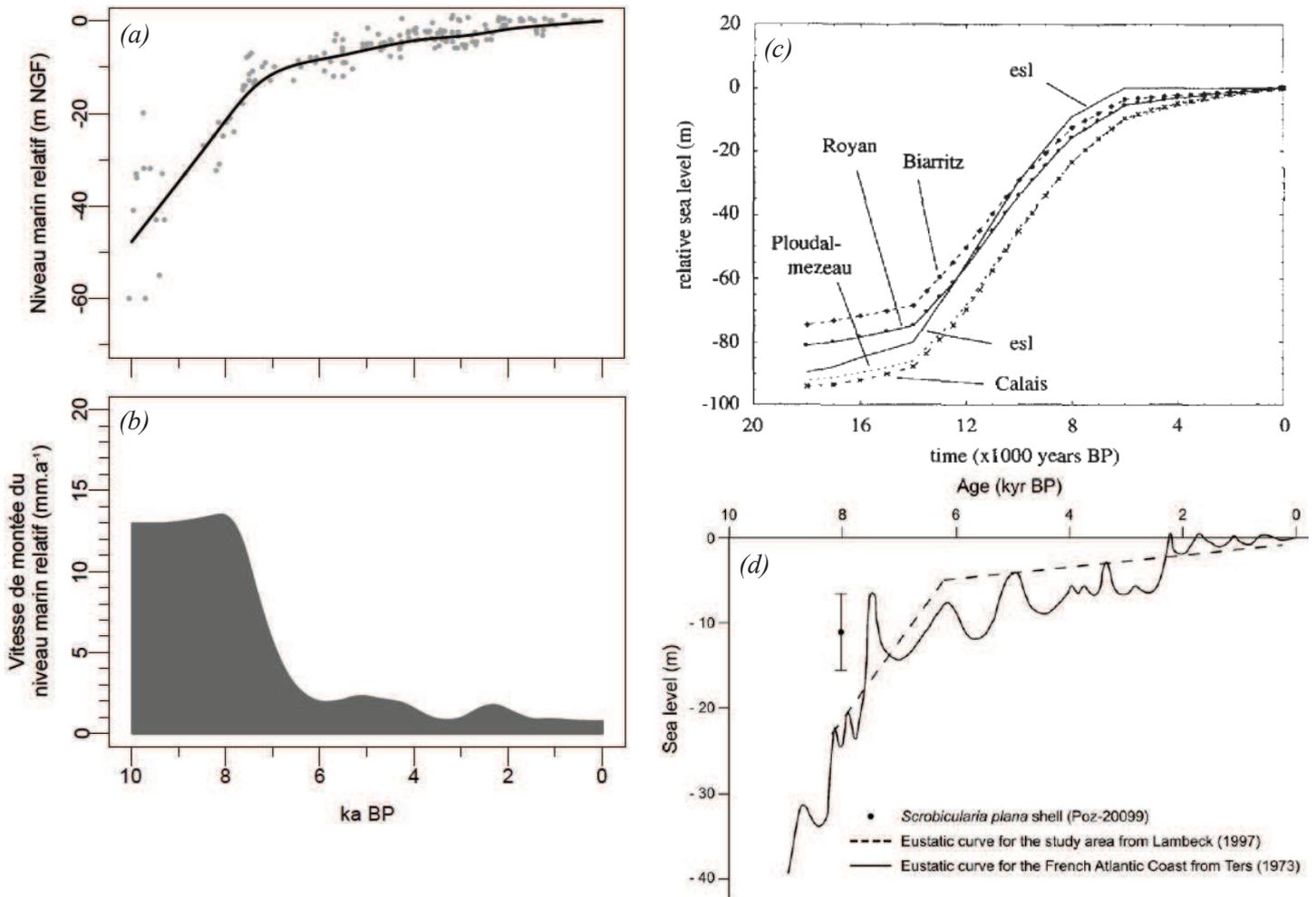


Figure III-11 : Variations du niveau marin relatif le long de la côte atlantique française (a) et vitesses de remontée de ce niveau (b) depuis 10 000 ans. Poirier [2010], modifié d'après Ters [1986]. (c) : Variations du niveau marin relatif depuis 20 000 ans d'après Lambeck [1997]. (d) : Courbes de niveau marin pour les côtes atlantiques françaises au cours des derniers 10 000 ans d'après Ters et Lambeck., [Allard et al., 2010].

CHAPITRE IV - SYNTHÈSE DE L'ANALYSE DOCUMENTAIRE HISTORIQUE DES OBSERVATOIRES ETUDIÉS

L'objectif de ce chapitre est de présenter une synthèse détaillée des recherches réalisées dans les centres d'archives. Ces recherches avaient un double but, d'une part, établir un inventaire précis des mesures du niveau de la mer actuelles et historiques effectuées en Charente-Maritime et, d'autre part, retrouver toutes les informations utiles à la compréhension et à l'interprétation de ces mesures. Il nous a semblé plus pertinent de regrouper ces informations par zone géographique. Du nord au sud, nous nous intéresserons donc à la rade de La Rochelle, qui comprend à la fois le Vieux port de La Rochelle et le port de La Pallice, puis à la rade de l'île d'Aix, incluant l'île d'Aix, le fort Enet et le fort Boyard et enfin au phare de Cordouan (*figure IV-1*).

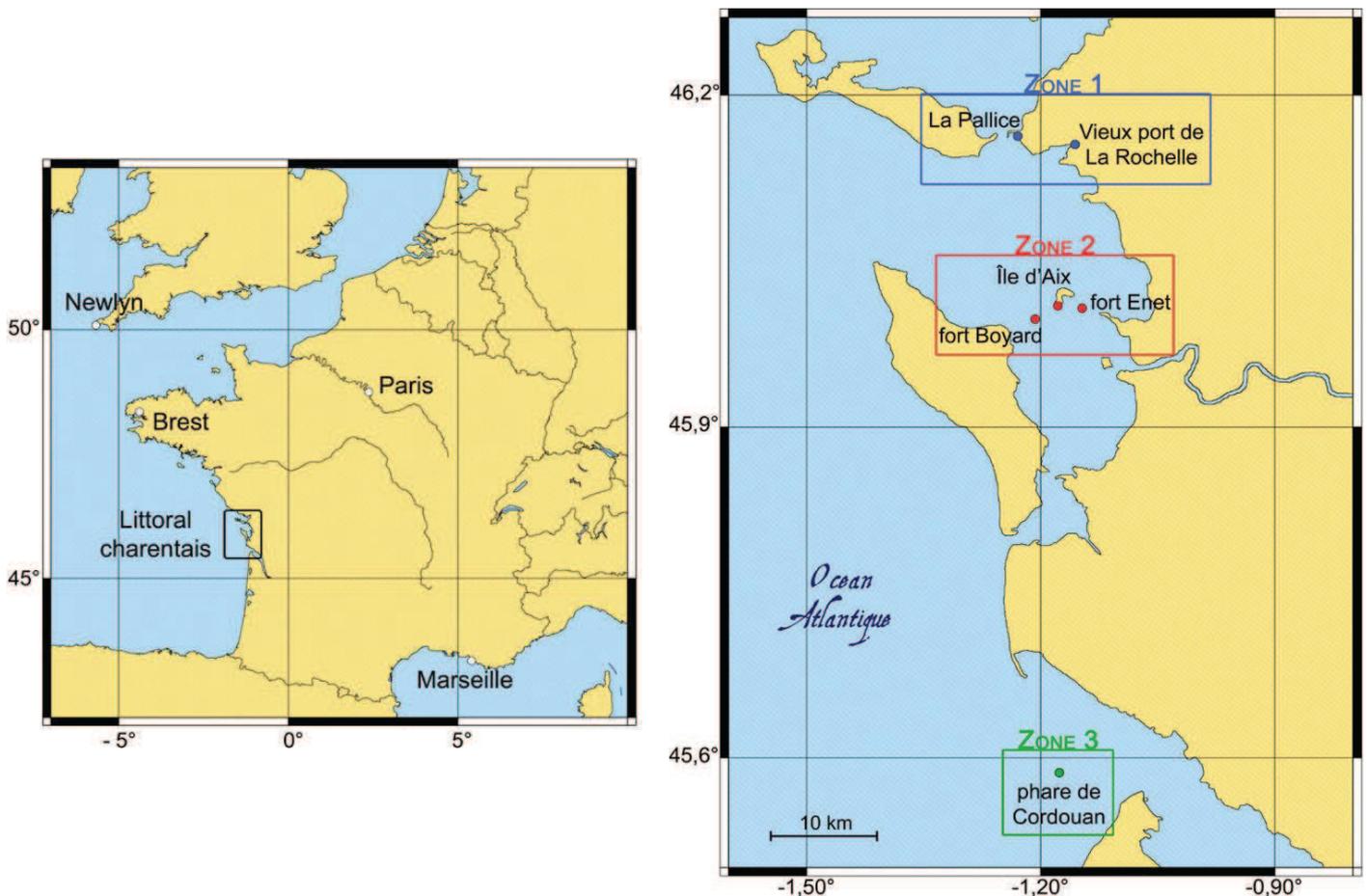


Figure IV-1 : A gauche : carte de France avec localisation du littoral charentais. A droite : carte du littoral charentais avec localisation des trois zones d'étude : la rade de La Rochelle (zone 1), la rade de l'île d'Aix (zone 2) et le phare de Cordouan (zone 3).

IV.1. La rade de La Rochelle

IV.1.1. Historique des observatoires du niveau de la mer

La ville de La Rochelle est située sur la façade atlantique française, dans le département de la Charente-Maritime (17) et compte, à l'heure actuelle, quatre ports maritimes : le port commercial de La Pallice (Grand Port Maritime), le port de pêche de Chef de Baie, le Vieux port, et le port de plaisance des Minimes. Des mesures du niveau de la mer ont d'abord été réalisées au Vieux port puis au port de La Pallice (cf. IV.1.5. *Inventaire et description des mesures enregistrées*). L'objectif, ici, est de retracer l'histoire de ces deux sites, dans la perspective d'une meilleure compréhension de l'environnement dans lequel se sont déroulées ces mesures.

IV.1.1.1. Le Vieux port de La Rochelle

Avant de présenter l'évolution historique du Vieux port, il me semble important d'évoquer les mesures du niveau de la mer qui y ont été réalisées, afin de mieux appréhender le contexte historique de ces lieux. Les premières mesures ont été effectuées au canal Maubec, de mai 1775 à mai 1776, puis en 1824 au bassin à flot intérieur, et enfin, de 1863 à 1874 et de 1887 à 1892 au bassin à flot extérieur (*figure IV-2*). A noter aussi que deux échelles de marée gravées ont été retrouvées au niveau de la porte des Deux-Moulins, sans qu'aucun lot de mesures du niveau de la mer n'ait été mis à jour à l'heure actuelle. Nous reviendrons plus en détail sur ces lots de mesures au paragraphe IV.1.5.

Jusqu'au 12^e siècle, La Rochelle n'était qu'une petite bourgade de pêcheurs, dont le port se situait à l'emplacement de l'actuelle place de Verdun (soit à environ 500 m du Vieux port actuel, à l'intérieur des terres), et n'était alors qu'une possession des barons de Châtel-Aillon. Mais, en 1130, le destin de La Rochelle bascula lorsque Guillaume X, duc d'Aquitaine et comte du Poitou, s'empara de ce village et décida d'en faire la ville principale de l'Aunis. Débute alors, pour La Rochelle, un formidable essor jusqu'à devenir « *une ville noble, célèbre dans le monde entier et puissante par ses antiques richesses* », comme la décrivait, en 1224, Nicolas de Braña, historien des gestes de Louis VIII. Alternativement française et anglaise, La Rochelle appartiendra définitivement au royaume de France en 1372, date à laquelle elle est décrite comme l'une des villes françaises possédant le plus de privilèges accordés par le roi [De Beaucé & Thurninger, 1885].



Figure IV-2 : Photographie aérienne récente du Vieux port de La Rochelle (© 2011 - IGN). La zone bleue correspond au havre d'échouage, la zone jaune au canal Maubec, la zone verte au bassin à flot intérieur, la zone rouge au bassin à flot extérieur, et la zone violette à la porte des Deux-Moulins.

Les différents privilèges acquis au cours du temps et son exceptionnel emplacement naturel sur la façade atlantique lui permettront de connaître une prospérité croissante et de devenir, en Europe, un centre important d'exportation de vin et de sel. Mais cette richesse grandissante va faire de la ville une cible privilégiée des attaques par la mer des anglais. Il devient alors nécessaire de fortifier les défenses de la ville et l'on construira, successivement, la tour Saint-Nicolas (achevée vers 1376) et la tour de la chaîne (construite de 1382 à 1390), protégeant ainsi l'entrée du havre d'échouage. La tour de la lanterne sera elle construite, de 1445 à 1468, sur les ruines d'une ancienne tour (*figure IV-3*) [Couneau, 1904].

Le havre d'échouage de la ville de La Rochelle, situé au fond d'une baie, connaît un régime hydrodynamique calme et est donc sujet à un dépôt lent et constant de vases [Bouquet de la Grye & Hatt, 1876]. Et alors que les rochelais sont déjà confrontés à quelques problèmes d'envasement, un évènement majeur dans l'histoire de La Rochelle va accentuer très fortement ce phénomène. De 1568 à 1627, la ville va progressivement devenir un bastion du protestantisme pour finalement en devenir sa capitale, s'attirant ainsi les foudres du roi de France, catholique, qui va remettre en cause tous ses privilèges. En 1627, le roi Louis XIII charge donc le cardinal de Richelieu de soumettre La Rochelle. Les rochelais ayant déjà résisté à plusieurs sièges au cours de leur histoire, Richelieu décida de faire tomber La Rochelle par la famine plutôt que par la force [Mesnard, 2008]. Pour cela, il assiégea la ville en établissant, côté terre, une ligne de défense composée de treize forts entourant la ville, et côté mer, une digue empêchant toute sortie du port (*figure IV-4*). Cette digue, dont les vestiges portent encore le nom de digue de Richelieu, fut commencée le 28 novembre 1627 et était située à environ 1 600 m de l'entrée du havre d'échouage

(figure IV-5). Composée de maçonneries, large de 18 m à sa base et de 8 m à son sommet, son couronnement était situé à environ 1,95 m au-dessus des hautes mers [De Beaucé & Thurninger, 1885].



Figure IV-3 : Plan de la ville de La Rochelle « ainsi qu'elle a été bâtie par les rebelles depuis les premiers troubles jusqu'à ce qu'elle fut assiégée en 1575 où rien n'a été épargné », [Bouquet de la Grye & Hatt, 1876].

Le 30 octobre 1628, la famine eut raison de la résistance des rochelais et le cardinal de Richelieu entra dans la ville, en vainqueur. Les rochelais eurent la vie sauve mais ils perdirent tous leurs privilèges et leurs fortifications furent démolies, à l'exception de celles situées sur le front de mer. La digue, elle, ne fut pas détruite mais simplement laissée à l'abandon face aux assauts de la mer [Faucherre *et al.*, 1996]. Les problèmes d'envasement, déjà récurrents dans le havre d'échouage, furent très accentués par la présence de cette digue, qui bloquait tout courant. En 1720, la profondeur du chenal d'entrée du port avait significativement diminuée et les problèmes d'envasement devenaient très préoccupants pour la survie du port.

Après la prise de La Rochelle, Richelieu lui-même souhaitait que la ville redevienne un grand port de commerce. Et celui qui était à l'origine de la construction de la digue fit maintenant tout son possible pour contrer l'envasement grandissant. Pendant de nombreuses années, le royaume de France mit tout en œuvre pour entretenir la navigation du chenal d'accès au havre d'échouage et permit ainsi à la ville de retrouver, petit à petit, son rayonnement passé. La Rochelle redevint donc un port de pêche

prospère, mais aussi un important port de commerce avec l'Amérique et les pays du Nord où étaient exportés vins, eau-de-vie et sel [Couneau, 1904].



Figure IV-4 : Plan de la digue de Richelieu établie en 1627 aux abords de La Rochelle. [De Beaucé & Thurninger, 1885].

Malgré tous ces efforts, l'envasement du port progressait encore et une période de travaux fut engagée de 1729 à 1740 : le chenal d'entrée fut creusé et le havre d'échouage dragué. On reconstruisit à la même époque l'éperon des Deux-Moulins, qui avait été démoli en 1628, et dont le rôle était d'arrêter la progression des galets transportés par la houle. Une écluse y fut également ajoutée afin de créer un effet de chasse permettant de limiter l'envasement aux abords du havre d'échouage. Le même principe fut appliqué à l'intérieur du havre et l'on aménagea le canal Maubec à cette fin : le pont Saint-Sauveur fut détruit et remplacé par une écluse de chasse (*figure IV-6*) [Beraud, 1981]. Ces divers travaux, malgré leur importance, restaient insuffisants pour limiter convenablement l'envasement et répondre au développement du commerce de La Rochelle. Vers le milieu du 18^e siècle, le gouvernement prescrivit donc de nombreuses études pour l'amélioration du port.



Figure IV-5 : Représentation du cardinal de Richelieu sur la digue construite lors du siège de la ville de La Rochelle, de 1627 à 1628. Reproduction du tableau « Le siège de La Rochelle », de Henry-Paul Motte, peint en 1881 et aujourd'hui exposé au musée d'Orbigny de La Rochelle.

Lors de ces études, on imagina, en 1748, créer un bassin à flot à l'extérieur du havre, près de la porte des Deux-Moulins. Mais l'idée ne fut pas retenue, et les études, approuvées le 19 septembre 1769, préconisaient plutôt la construction d'un bassin à flot, fermé par une écluse, à l'intérieur du havre

d'échouage. De même, on décida la construction d'une nouvelle écluse de chasse au Pont-Neuf (canal Maubec) et l'agrandissement du havre d'échouage par l'établissement de quais. Une jetée de 660 m fut également construite entre 1772 et 1780, dans le prolongement de la tour Saint-Nicolas en direction du large.

L'écluse de chasse du Pont-Neuf a été commencée en 1785 et terminée l'année suivante. Les travaux du bassin à flot (appelé aujourd'hui bassin à flot intérieur) ont débuté le 1^{er} novembre 1779 et continué jusqu'à la révolution française, en 1789. Ils ont repris en 1807 et l'inauguration du bassin eut lieu le 24 décembre 1808. De 1832 à 1837, l'écluse de ce bassin a subi de grosses réparations. Les quais du havre d'échouage ont, eux, été construits à neuf ou reconstruits totalement entre 1786 et 1856. Le couronnement en granit de ces quais avait alors été établi à 1,30 m au dessus des pleines mers de vives-eaux [De Beaucé & Thurninger, 1885].



Figure IV-6 : Plan du canal Maubec rejoignant le port de La Rochelle en 1685 (copie de Jourdan d'après Claude Masse). Source : Médiathèque Michel Crépeau, La Rochelle, cote 4PL253.

La construction du bassin à flot intérieur donna un peu d'air à La Rochelle mais il devint vite insuffisant pour accueillir les navires de commerce toujours plus nombreux. Et l'arrivée d'un chemin de fer à La Rochelle (première voie ferrée entre La Rochelle et Poitiers en 1857), provoqua la construction d'un deuxième bassin, le bassin à flot extérieur afin de répondre au commerce grandissant de la ville. Les travaux de construction de ce bassin débutèrent le 25 juin 1855 et se terminèrent en 1862. A noter que les travaux de ce bassin comprenaient déjà la construction d'un puits de tranquillisation destiné à accueillir un marégraphe. Il est précédé d'un avant-port, en communication directe avec le chenal d'entrée, et qui est généralement très calme : la plupart des navires peuvent sans inconvénients s'y échouer sur un fond de

vase molle. Ce bassin sera spécialisé, jusqu'en 1891 (date de l'ouverture du port de la Pallice), dans le trafic du charbon et du bois scandinave [De Beaucé & Thurninger, 1885].

Suite à la construction du bassin à flot extérieur, de nouveaux travaux ont été réalisés au niveau du canal Maubec. En effet, ce canal présentait plusieurs goulots d'étranglements qui absorbaient en pure perte une partie de la puissance des chasses ; en outre les murs de soutènement qui le bordent, construits un siècle plus tôt, tombaient en ruines. Le canal fut donc élargi et les murs reconstruits partout où la largeur du canal n'atteignait pas vingt mètres. Le reste du canal fut restauré plus modestement. C'est également à cette époque que le pont Saint-Claude fut détruit et que deux cales de transbordement furent construites [Beraud, 1981].

En 1922, le bassin à flot extérieur fut agrandi et devint alors le bassin des chalutiers. Enfin, en 1970, le port des Minimes fut créé afin d'accueillir la très grande majorité des bateaux de plaisance. En comparant les plans et les indications du 19^e siècle à la structure actuelle du Vieux port, on peut en déduire que certains lieux ont encore subi des aménagements, notamment au niveau du canal Maubec, où les cales de transbordement ont disparu [Faucherre *et al.*, 1996].

En parcourant les différents écrits sur l'histoire de La Rochelle, on peut en extraire une conclusion commune à l'ensemble de ces écrits. Si la ville de La Rochelle a connu une telle prospérité dans le passé, elle le doit principalement à sa position géographique sur la façade atlantique : son port étant accessible par deux voies maritimes différentes et étant protégé naturellement de la houle du large par l'île de Ré, rendant ainsi sa fréquentation aisée.

IV.1.1.2. Le port de La Pallice

De la même façon que précédemment, avant d'aborder le contexte historique, effectuons une brève présentation des mesures du niveau marin qui ont été réalisées au port de La Pallice,. Les premières mesures ont été enregistrées quotidiennement de 1885 à 1892. Puis, une courte campagne de mesures aura ensuite lieu en 1900, avant l'installation d'un premier marégraphe en 1941. Nous reviendrons plus en détail sur ces lots de mesures au paragraphe IV.1.5.2. La création du port de La Pallice est partie d'un simple constat : la profondeur des bassins à flot du port de La Rochelle n'est plus suffisante pour accueillir les navires à fort tonnage, qui se détournent maintenant vers d'autres ports.

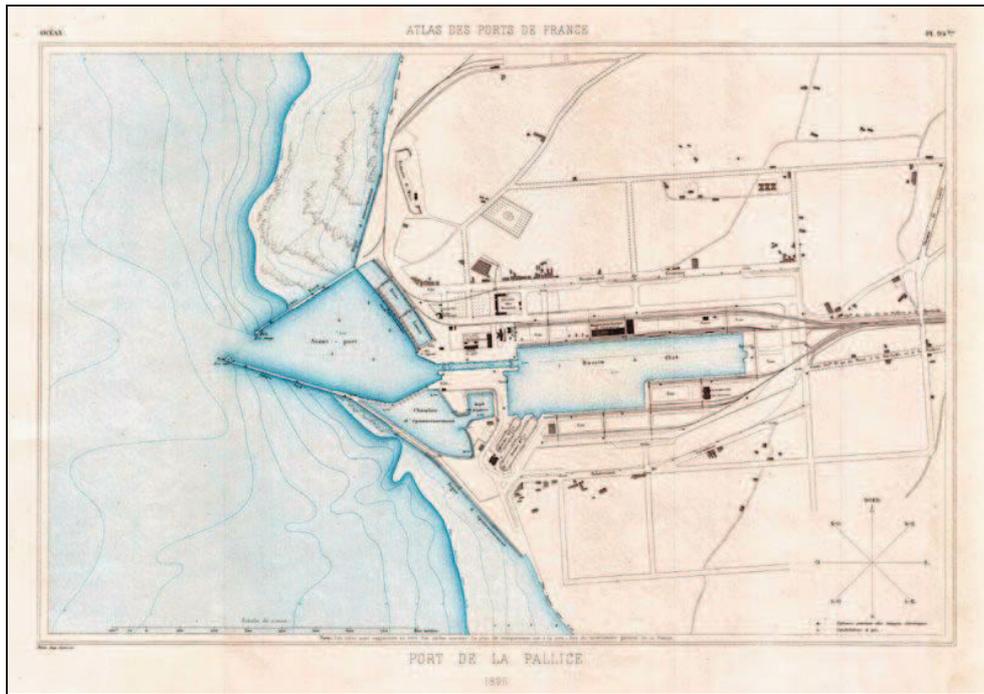


Figure IV-7 : Plan du port de La Pallice en 1895, quatre ans après son ouverture au commerce. Plan extrait de l'atlas des ports de France.

En effet, entre 1870 et 1890, le tonnage des navires augmente en même temps que les navires à vapeur remplacent peu à peu les navires à voile. Et, dans le même temps, les dragages réguliers du chenal d'accès au port de La Rochelle ne suffisent plus à le rendre praticable pour ces nouveaux navires. L'état et les élus rochelais doivent donc trouver une solution rapide s'ils souhaitent que La Rochelle reste un grand port de commerce. C'est ainsi que Bouquet de la Grye, ingénieur hydrographe, est désigné pour réaliser une étude générale et complète de la côte et définir le meilleur emplacement possible pour ce futur port. Bouquet de la Grye, accompagné de Hatt, ingénieur hydrographe également, publiera son étude hydrographique de la baie de La Rochelle en 1876 et désignera l'emplacement de « *la mare de la Besse* », situé à 5 km plus au nord du port de La Rochelle, comme le meilleur emplacement pour la création d'un bassin à grand tirant d'eau, dans la rade profonde de La Pallice [Bouquet de la Grye & Hatt, 1876].

Mais il faudra attendre la loi du 2 avril 1880 pour que les travaux du port de La Pallice soient reconnus d'utilité publique et que la construction soit officiellement autorisée. Finalement, les travaux débiteront un an plus tard, en mai 1881 et l'inauguration du port aura lieu le 19 août 1890. Le 5 juin 1891, un arrêté préfectoral autorise officiellement l'ouverture du port à la navigation et au commerce (*figure IV-7*) [Debesse, 1935]. Comme ses prédécesseurs, le port de La Pallice va rapidement connaître des problèmes de place et dès 1907, la nouvelle génération de paquebots est trop grande, trop imposante pour entrer dans le port et permettre l'embarquement des passagers. Après plusieurs études et la première guerre mondiale, la loi du 21 juillet 1923 autorise l'agrandissement du port. Les travaux seront réalisés de 1931 à 1939, juste avant que n'éclate le conflit de la seconde guerre mondiale. Pendant cette guerre, l'état major allemand transforma le port de La Pallice en une importante base de sous-marins, devenant ainsi

une cible des bombardements alliés, qui lâcheront leurs bombes dix-sept fois sur le port entre 1941 et 1944. Si les bâtiments abritant les sous-marins n'ont que peu souffert car bien protégés, les alentours du port ont eux été complètement détruits [Bertaud & Praud, 2005]. Enfin, de nombreux travaux et aménagements ont été réalisés depuis la seconde guerre mondiale, notamment avec l'agrandissement du môle d'escale débuté en 1966 et terminé en 1969 (*figure IV-8*).



Figure IV-8 : Photographie aérienne récente du port de La Pallice (© 2011 - IGN).

IV.1.2. Suivi historique de la position du zéro hydrographique

IV.1.2.1. Au Vieux port de La Rochelle

Voici un historique complet de l'évolution de la définition du zéro hydrographique du Vieux port de La Rochelle, réalisé à partir de nombreux documents d'archives.

- **Entre 1822 et 1824**, Beautemps-Beaupré, ingénieur hydrographe en chef de la Marine, effectue une étude hydrographique de la baie de La Rochelle. A cette occasion, il va effectuer plusieurs levés et réaliser des observations du niveau de la mer à l'échelle de marée installée au niveau de « *l'écluse du bassin à flot* ». A la suite de ces observations, un nivellement est réalisé dans la rade de La Rochelle le jeudi 23 septembre 1824, qui situe le zéro de réduction des sondes comme étant à 7,00 m en dessous du couronnement du bajoyer de l'écluse (*figure IV-9*) [Beautemps-Beaupré, 1824b].

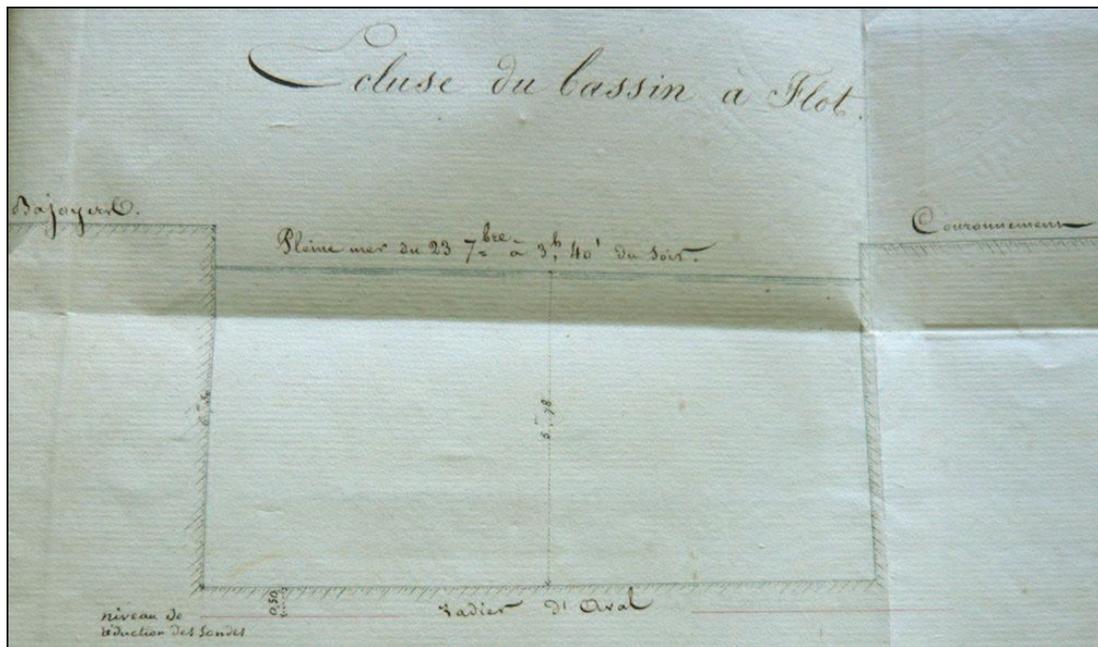


Figure IV-9 : Plan et cotations de l'écluse du bassin à flot intérieur du Vieux port de La Rochelle en 1824. Indication de la position du niveau de réduction des sondes [Beautemps-Beaupré, 1824b].

- En 1861 (le 26 février), un ingénieur ordinaire des Ponts et Chaussées de l'arrondissement de La Rochelle, a réalisé un document intitulé « *Port de La Rochelle - Tableau indiquant les diverses hauteurs de la mer* »²⁶, dans lequel il précise que les « basses mers de Beautemps-Beaupré et le plan de comparaison de l'annuaire des marées de Chazallon » est situé à 7,000 m en dessous du couronnement de l'écluse du bassin intérieur, mais également à 7,699 m en dessous du « repère scellé au socle du petit fanal (fanal d'aval) », le petit fanal étant aujourd'hui appelé le phare rouge. Ces informations confirment la valeur choisie par Beautemps-Beaupré pour la définition du zéro de réduction des sondes. Mais il est surprenant de constater que, dans ce même document, l'ingénieur ordinaire indique également que les « basses mers d'équinoxe » sont situées à 7,909 m en dessous du repère scellé sur le phare rouge, soit 21 cm plus bas que le zéro de Beautemps-Beaupré. Cette différence est probablement à l'origine de la redéfinition du zéro hydrographique en 1894 par Viennot.

- En 1868, Bona-Christave, Capitaine de vaisseau et directeur du port de Rochefort, réalise un travail de synthèse sur les plans de nivellement, les échelles de marée et les repères existants dans la rade de l'île d'Aix et à Rochefort. Dans cette étude, il donne également quelques informations intéressantes au sujet du zéro de réduction des sondes de La Rochelle. Il indique en effet que ce zéro est situé à 7,000 m en dessous de la « surface supérieure du bassin à flot de La Rochelle », elle-même cotée à + 4,203 m NGF-Bourdalouë. Selon Bona-Christave, le zéro est donc situé à la cote - 2,797 m NGF-Bourdalouë [Bona-Christave, 1868].

²⁶ « *Port de La Rochelle et dépendances. Affaires diverses (1853-1870)* », Ponts et Chaussées, 1861. Archives départementales de la Charente-Maritime, cote DDE 3509.

- En 1876, Bouquet de la Grye, ingénieur hydrographe de 1^{ère} classe, publie une étude hydrographique de la baie de La Rochelle, très complète, dans laquelle il indique de nombreuses cotes de nivellement. Parmi celles-ci, dans le réseau NGF-Bourdalouë :

=> « Zéro des sondes du plan de la baie de La Rochelle publié en 1868 » : - 3,120 m

=> « BM d'équinoxe d'après les Ponts et Chaussées » : - 3,003 m

=> « Zéro de réduction des sondes de 1876, de l'annuaire des marées, et des sondes réduites de 1822 » : - 2,80 m

=> « BM de Beautemps d'après les Ponts et Chaussées » : - 2,79 m

=> « Repère scellé au socle du petit fanal » : + 4,906 m

=> « Couronnement du bajoyer du vieux bassin au dessus de l'échelle de marée » : + 5,203 m

Toutes les cotes indiquées semblent cohérentes, sauf celle du couronnement du bajoyer du vieux bassin. En effet, Bouquet de la Grye indique que celui-ci se situe à + 5,203 m NGF-Bourdalouë, mais la cote réelle semble bien être + 4,203 m NGF-Bourdalouë, comme indiqué par Bona-Christave en 1868. En effet, on imagine mal comment le repère du petit fanal peut être situé à une altitude plus basse que le couronnement du bajoyer, étant donné que le petit fanal est lui-même installé sur le quai, à quelques mètres du couronnement du bajoyer (*figure IV-10*). Par conséquent, le zéro de réduction des sondes de 1876 est situé, d'après Bouquet de la Grye, à 7,003 m en dessous du couronnement du bajoyer du vieux bassin et à 7,706 m en dessous du repère scellé au socle du petit fanal (ou phare rouge) [Bouquet de la Grye & Hatt, 1876].

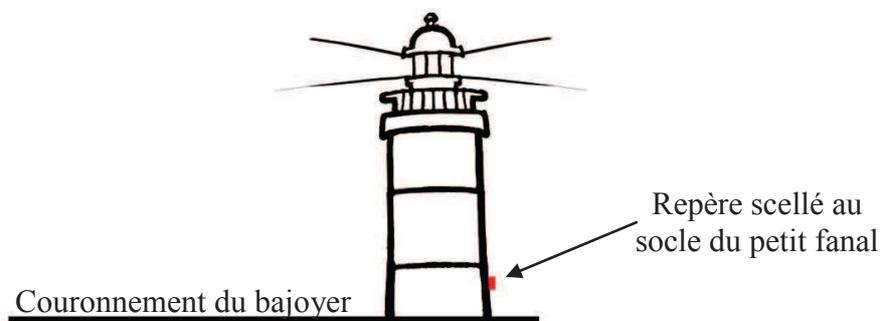


Figure IV-10 : Croquis de situation du couronnement du bajoyer et du repère scellé au socle du petit fanal, en 1876, au Vieux port de La Rochelle.

- En 1894 (le 14 avril), Viennot, ingénieur ordinaire des Ponts et Chaussées de l'arrondissement de La Rochelle, réalise un document de synthèse intitulé « Port de La Rochelle – Nivellement des ouvrages du port et de la rade – Cotes rapportées à différents plans de comparaison » [Viennot & Thurninger, 1894]. Ce document est très complet et donne de précieuses informations sur les cotes des repères et sur les zéros utilisés, à la fois pour la réduction des sondes et les échelles de marée. D'après ce document, le zéro des cartes marines est à la cote - 3,00 m NGF-Bourdalouë. De même, il indique que le « couronnement du bajoyer nord du bassin intérieur » est à la cote + 4,203 m NGF-Bourdalouë et que le « repère socle feu rouge » est à la cote + 4,906 m NGF-Bourdalouë.

Viennot évoque aussi le changement de la définition du zéro hydrographique par une note : « *Il est admis que pour faciliter les calculs on doit adopter la cote + 3,00 pour la cote du zéro des cartes marines à La Rochelle par rapport au plan de comparaison du nivellement général.* ». Modification qu'il adopte après avoir noté un paradoxe dans la définition de ce zéro : « *Dans l'annuaire des marées page 36 il est dit que le zéro des basses mers pour La Rochelle est à 7,00 m au dessous de la surface supérieure du couronnement du bassin à flot intérieur, soit à 2,80 m au dessous du zéro Bourdalouë. Pour la carte de la baie de La Rochelle le zéro est à 3,00 m au dessous du zéro Bourdalouë.* ». Par conséquent, en 1894 et d'après Viennot, le zéro de réduction des sondes est situé à 7,203 m en dessous du couronnement du bajoyer nord du bassin intérieur et à 7,906 m en dessous du repère scellé au socle du phare rouge [Viennot & Thurninger, 1894].

- **En 1960** (du 14 mai au 20 octobre), Mannevy, ingénieur hydrographe en chef de 2^e classe, effectue une mission hydrographique dans les pertuis charentais. Lors de cette mission hydrographique, des opérations de nivellement de précision ont également été effectuées par Plouviez, ingénieur hydrographe principal, et plusieurs repères hydrographiques historiques ont été cotés. Ainsi, la surface supérieure du couronnement du bassin à flot est à + 3,6344 m NGF-Lallemand. En comparaison avec la liste des cotes des repères NGF, Mannevy adoptera finalement la cote de + 3,635 m NGF-Lallemand pour ce repère (équivalent à + 4,264 m NGF- Bourdalouë, cf. paragraphe IV.1.4.). Le couronnement du bassin à flot serait donc plus élevé de 6 cm depuis 1894. En réalité, il semblerait (cf. fiches des repères en annexe et *tableau V-21*) que le couronnement du bassin soit plus élevé d'environ 9 cm probablement suite à des travaux d'aménagement de l'écluse et que dans le même temps, le repère O.HO-5 (repère Bourdalouë scellé au pied de la tour de la chaîne) se soit affaissé d'environ 3 cm. L'équipe de nivellement de Plouviez étant parti du repère O.HO-5 pour vérifier la cote du couronnement, en pensant que celui-ci était stable, cela expliquerait qu'ils aient trouvé une cote du couronnement supérieure de 6 cm à celle de 1894. Le repère du couronnement a donc été déplacé, mais la définition du zéro hydrographique est restée la même. Mannevy précise que le zéro hydrographique de La Rochelle est à la cote - 3,630 m NGF-Lallemand, et donc à 7,265 m en dessous du couronnement du bassin à flot [Mannevy, 1971].

- **En 1966**, le Laboratoire Central Hydraulique de France (LCHF) réalise des mesures du niveau de la mer dans le chenal d'entrée de La Rochelle, à hauteur de la tour Richelieu. Pour ces mesures, le LCHF utilise le zéro hydrographique en vigueur (cote - 3,63 m NGF-Lallemand) et le situe à 2,31 m en dessous de la partie supérieure de l'échelon du bas de l'échelle métallique de la tour Richelieu²⁷.

- **En 2010**, notre équipe de l'UMR 6250 LIENSs a réalisé un nivellement des repères du Vieux port de La Rochelle. Les résultats montrent (cf. *V.4.4.1.2.1. Stabilité des repères de marée*) que le repère

²⁷ « *Fiche descriptive d'observatoire de marée de La Rochelle, n°457* », Laboratoire central hydraulique de France, 15 juin 1966. Archives du SHOM.

scellé au socle du phare blanc (O.HO-2) est resté stable depuis 1861. Nous l'avons donc choisi et à partir de ce repère, coté + 5,150 m NGF-IGN69 (<http://geodesie.ign.fr/fiches/>, consulté le 26 avril 2011), nous avons déterminé la cote du couronnement du bajoyer aval, côté nord, de l'écluse du bassin à flot intérieur : + 3,818 m NGF-IGN69 et la cote du repère O.O.K3-24A (scellé dans le socle du phare rouge) : 4,450 m NGF-IGN69 [Gouriou *et al.*, 2010]. De plus, la différence de hauteur entre les origines des réseaux NGF-Lallemand et NGF-IGN69 étant de 0,186 m au Vieux port de La Rochelle (cf. *IV.1.4. Relation entre les réseaux NGF*), nous pouvons déduire la cote du zéro hydrographique dans le réseau NGF-IGN69 à partir de la cote connue : - 3,630 m NGF-Lallemand. Le zéro hydrographique est donc situé à la cote - 3,444 m NGF-IGN69, mais également à 7,262 m en dessous du couronnement du bajoyer aval du bassin à flot intérieur et à 7,894 m en dessous du repère O.O.K3-24A (scellé dans le socle du phare rouge).

Afin de visualiser l'évolution de la définition et de la détermination du zéro hydrographique, nous avons rapporté sa cote par rapport à deux repères terrestres : le couronnement du quai du bassin à flot intérieur et le repère scellé au socle du phare rouge (*tableau IV-1*). Cette évolution dans le temps n'a de sens que si ces repères ont été stables au cours du temps. Nous verrons que c'est le cas jusqu'en 1960 pour le couronnement et que c'est le cas pour le repère du phare rouge depuis 1861 (cf. *V.4.4.1.2.1. Stabilité des repères de marée*).

Année	Position du zéro hydrographique par rapport au			
	Couronnement	R. du phare rouge	NGF-Bourdalouë	NGF-Lallemand
1824	- 7,00 m	-	-	-
1861	- 7,000 m	- 7,699 m	-	-
1868	- 7,000 m	-	- 2,797 m	-
1876	- 7,003 m	- 7,706 m	- 2,80 m	-
1894	- 7,203 m	- 7,906 m	- 3,00 m	-
1960	- 7,265 m	-	- 3,00 m	- 3,630 m
2010	- 7,262 m	- 7,894 m	-	- 3,630 m

Tableau IV-1 : Récapitulatif de la position du zéro hydrographique au Vieux port de La Rochelle entre 1824 et 2010. Le couronnement, ici, correspond au repère H. Le repère du phare rouge correspond lui au repère O.O.K3-24A. Le double trait rouge correspond à la redéfinition du zéro hydrographique.

A partir des résultats du *tableau IV-1* ci-dessus, nous pouvons en déduire l'évolution de la situation relative du zéro hydrographique au Vieux port de La Rochelle, depuis 1824 (*figure IV-11*).

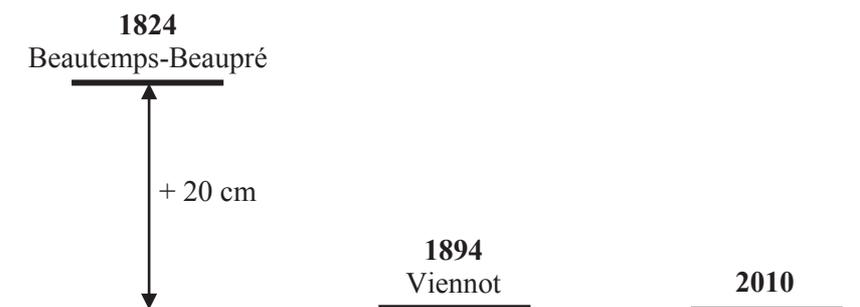


Figure IV-11 : Situation relative des zéros hydrographiques utilisés au Vieux port de La Rochelle de 1824 à 2010.

IV.1.2.2. Au port de La Pallice

Les premières mesures du niveau de la mer au port de La Pallice datant du début du 20^e siècle, on pourrait supposer que la définition du zéro hydrographique ait été moins soumise à des modifications au cours du siècle. Pourtant, les informations retrouvées dans un classeur du SHOM montrent que, comme pour les autres zones d'étude, le zéro hydrographique de La Pallice a été plusieurs fois redéfini.

- **En 1900**, d'après une lettre des Ponts et Chaussées à l'attention de Rollet de l'Isle, ingénieur hydrographe, le zéro hydrographique de La Pallice était défini comme étant situé à - 3,00 m NGF-Bourdalouë, exactement comme au Vieux port de La Rochelle. La cote du bajoyer sud de l'écluse, tête aval, étant de + 5,56 m NGF-Bourdalouë, le zéro de réduction des sondes de 1900 était situé à 8,56 m en dessous de ce bajoyer²⁸.

- **En 1906**, d'après les Ponts et Chaussées, le zéro hydrographique de La Pallice a été redéfini comme étant situé à - 2,80 m NGF-Bourdalouë. Le bajoyer sud de l'écluse étant resté stable entre 1900 et 1906, le nouveau zéro de réduction des sondes était donc situé à 8,36 m en dessous de ce bajoyer²⁹. Cette nouvelle définition n'est en réalité pas si neuve que ça : elle correspond exactement à la définition du zéro hydrographique du Vieux port de La Rochelle de Beutemps-Beaupré en 1824. On peut alors s'interroger : s'agit-il d'une redéfinition du zéro volontaire et consciente, ou au contraire est-ce un acte involontaire en s'appuyant sur des documents d'archive différents de ceux ayant servi à définir le zéro de 1900 ?

- **En 1930**, le Service du Nivellement Général de la France indique que la différence entre les origines des réseaux NGF-Bourdalouë et NGF-Lallemand est de 0,63 m à La Pallice. Ainsi, il faut retirer 63 cm à la cote NGF-Bourdalouë (- 2,80 m) pour obtenir la cote du zéro hydrographique dans le réseau NGF-Lallemand. Celui-ci est donc situé à - 3,43 m NGF-Lallemand et à 8,36 m en dessous du bajoyer sud de l'écluse, tête aval³⁰ (source : archives du SHOM).

- **En 1960**, lors de la mission hydrographique de Mannevy, ingénieur hydrographe en chef de 2^e classe, Plouviez, ingénieur hydrographe principal, effectue des opérations de nivellement de précision au port de La Pallice. D'après lui, la cote du bajoyer sud de l'écluse est à + 4,962 m NGF-Lallemand, ce qui situe le zéro hydrographique à 8,392 m en dessous de ce bajoyer. Mais Mannevy va redéfinir le zéro, comme il l'avait fait au Vieux port de La Rochelle et à l'île d'Aix. Ainsi, par concordance avec le zéro hydrographique du Vieux port, il situe le zéro de La Pallice à la cote - 3,690 m NGF-Lallemand, et donc à

²⁸ Lettre de l'ingénieur des Ponts et Chaussées Guy Mayer à Rollet de l'Isle, 1^{er} avril 1900. Archives départementales de la Charente-Maritime, cote DDE 3965.

²⁹ « Marées - Côtes de France II, de Brest à Saint-Jean de Luz ». Archives du SHOM, cote 689.

³⁰ Classeur « Liste des repères SH et des zéros de l'annuaire et des cartes ». Archives du SHOM.

8,652 m en dessous de la surface supérieure du bajoyer sud de l'écluse. Il va également étendre sa définition à d'autres repères en le situant à 9,107 m en dessous du repère NGF n°6 (O.O.K3-126, cote + 5,417 m NGF-Lallemand) et à 9,119 m en dessous du repère NGF n°7 bis (O.O.K3-127, cote + 5,429 m NGF-Lallemand) [Mannevy, 1971].

- **En 2010**, la fiche de références altimétriques maritimes du SHOM indique que le zéro hydrographique de La Pallice est situé à - 3,504 m NGF-IGN69, soit à 9,107 m en dessous du repère O.O.K3-126 (cote + 5,603 m NGF-IGN69)³¹.

Afin de mieux visualiser l'évolution de la définition du zéro hydrographique, nous avons rapporté sa cote à plusieurs repères du port (*tableau IV-2*).

Année	Position du zéro hydrographique par rapport au			
	Bajoyer sud de l'écluse	O.O.K3-126	NGF-Bourdalouë	NGF-Lallemand
1900	- 8,56 m		- 3,00 m	
1906	- 8,36 m		- 2,80 m	
1930	- 8,36 m		- 2,80 m	- 3,430 m
1960	- 8,39 m	-	-	- 3,430 m
1960	- 8,652 m	- 9,107 m	-	- 3,690 m
2010	-	- 9,107 m	-	-

Tableau IV-2 : Récapitulatif de la position du zéro hydrographique au port de La Pallice entre 1900 et 2010. Le double trait rouge correspond à la redéfinition du zéro hydrographique.

A partir des résultats du *tableau IV-2* ci-dessus, nous pouvons en déduire l'évolution de la situation relative du zéro hydrographique au port de La Pallice, depuis 1900 (*figure IV-12*).

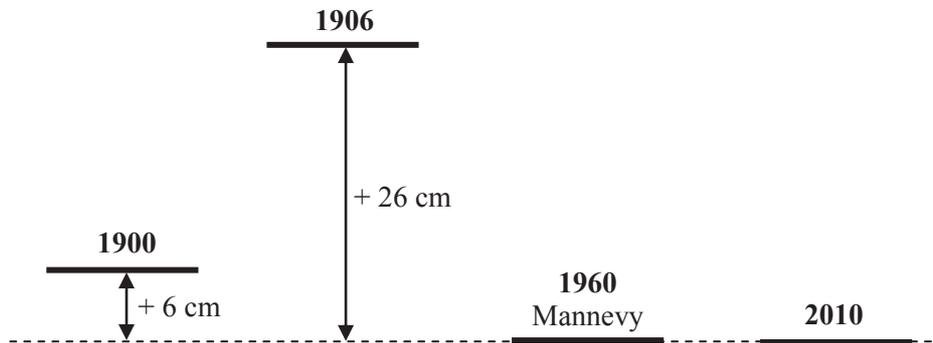


Figure IV-12 : Situation relative des zéros hydrographiques utilisés au port de La Pallice de 1900 à 2010.

³¹ http://www.shom.fr/fr_page/fr_act_oceano/RAM/RAM_NG_2010.pdf, consulté le 1^{er} décembre 2011.

IV.1.3. Aperçu des repères inventoriés

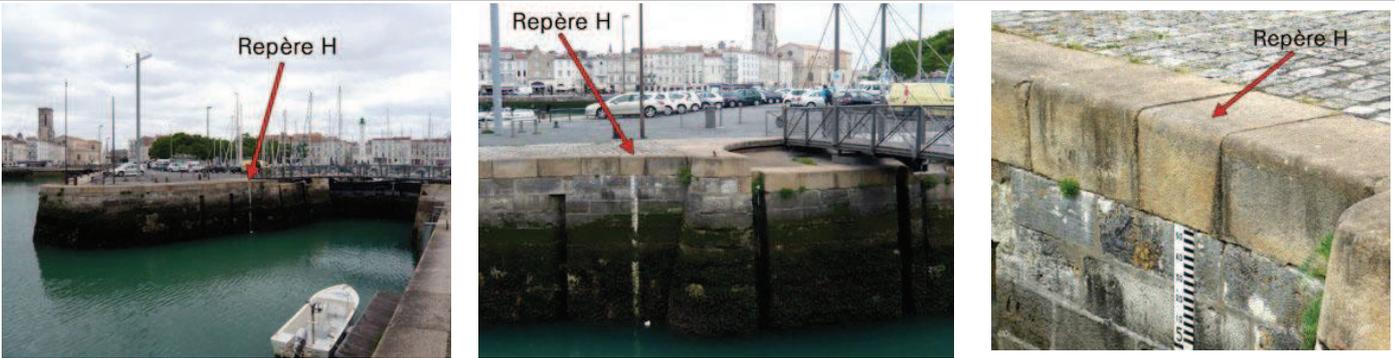
IV.1.3.1. Au Vieux port de La Rochelle

IV.1.3.1.1. Repères de nivellement

Un historique de la cote des principaux repères de nivellement et/ou de marée présents sur le Vieux port de La Rochelle de 1824 à nos jours a été réalisé à partir d'informations retrouvées dans les centres d'archives de l'IGN, du SHOM, des archives départementales de la Charente-Maritime (AD17) et du Service Historique de la Défense - Marine de Rochefort (SHD-Marine Rochefort). Pour chacun de ces repères, une fiche a été produite regroupant le nom du repère, la période d'existence, le type de repère, des photographies, une description ainsi que toutes les informations recueillies sur leurs cotes historiques. L'ensemble de ces fiches est disponible en annexe. Pour une question de clarté, nous ne présentons ici, qu'une vue d'ensemble précisant l'emplacement de chaque repère (*figure IV-13*), ainsi que la fiche du repère principal du Vieux port.



Figure IV-13 : Localisation des différents repères de nivellement et/ou de marée au Vieux port de La Rochelle. Photographie aérienne récente modifiée (© 2011 - IGN).

REPÈRE H (existant)				
Période : 1824 à aujourd'hui			Type : Repère naturel	
				
<p>Description : Couronnement du bajoyer aval, côté nord, de l'écluse du bassin à flot intérieur du Vieux port de La Rochelle. La pierre qui a servi de repère est celle se situant à l'aplomb de l'échelle de marée. Pour les hydrographes, c'est le repère fondamental du Vieux port depuis 1824. Il sera consolidé par l'implantation d'un rivet en 1957 (repère O.O.K3-24-I), afin de le définir plus précisément.</p>				
Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
1824	Couronnement	+ 7,00 m	zéro de réduction des sondes	« Marées - 1824, Côtes de France », Beautemps-Beaupré, archives du SHD-Marine (Rochefort), cote 7JJ 364
1861	Couronnement	+ 7,00 m	Zéro de Beautemps-Beaupré	« Port de La Rochelle et dépendances. Affaires diverses (1853-1870), archives AD17, cote DDE 3509
		+ 4,207 m	NGF-Bourdalouë	
1868	Surface supérieure	+ 4,203 m	NGF-Bourdalouë	« Année 1868, Plans de nivellement, Echelle de marées, Seuils, Repères. Travail de M. Bona-Christave, Capitaine de vaisseau, directeur du port », archives du SHD Rochefort, cote 2D45t
		+ 7,000 m	Zéro de Beautemps-Beaupré	
1876	Couronnement	+ 5,203 m	NGF-Bourdalouë	« Baie de La Rochelle - Etude Hydrographique par MM. Bouquet de la Grye et Hatt - 1876 », archives du SHOM
1894	Couronnement	+ 4,203 m	NGF-Bourdalouë	« Port de La Rochelle, Nivellement des ouvrages du port et de la rade », Viennot, archives AD17, cote DDE 3965
		+ 7,203 m	Zéro des cartes marines	
1913	Couronnement	+ 3,655 m	NGF-Lallemand	Cahier de « Calcul des altitudes des repères, réseau de 3 ^e ordre », opérateur :Guy, archives de l'IGN
2010	H	+ 3,818 m	NGF-IGN69	UMR 6250 LIENSs

IV.1.3.1.2. Echelles de marée

A l'heure actuelle, plusieurs échelles de marée sont installées dans le Vieux port de La Rochelle, mais il n'existe pas encore, à notre connaissance, d'inventaire de ces échelles. Comme pour les repères de nivellement, nous avons listé ces échelles à l'aide de l'ensemble des informations retrouvées. Les échelles sont présentées en annexe, sous la forme de fiches identiques à celles des repères. Parmi ces échelles de marée, quelques-unes sont susceptibles d'être les mêmes que celles dont nous avons retrouvé la trace dans les documents d'archive. Les résultats de nos nivellements nous ont permis de déterminer si les échelles nivelées en 2010, lors d'une campagne de mesures, correspondent bien aux échelles indiquées dans ces documents. Les résultats seront présentés juste après une première vue d'ensemble de l'emplacement de ces échelles (*figure IV-14*), ainsi que la fiche de l'échelle de marée répertoriée comme un repère de nivellement dans la base de données de l'IGN.



Figure IV-14 : Localisation des différentes échelles de marée du Vieux port de La Rochelle. Photographie aérienne récente modifiée (© 2011 - IGN).

REPERE O.O.K3-24A-IV • ECHELLE AMONT, BASSIN EXTERIEUR (existant)				
Période : 1894 à aujourd'hui			Type : Echelle de marée en lave émaillée	
Description : Echelle de marée située en amont de l'écluse du bassin à flot extérieur (ou bassin des grands yachts, anciennement bassin des chalutiers), le long du bajoyer sud, face nord. Cette échelle est un repère de nivellement répertorié dans la base de données de l'IGN. La graduation de l'échelle qui sert de repère est la graduation 7,00 m				
Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
1957	O.O.K3-24 ^a -IV	+ 2,6370 m	NGF-Lallemand	Cahier de « Calcul des altitudes des repères, réseau de 3 ^e ordre », opérateur :Dupuy, archives de l'IGN
1960	-	+ 2,65 m	NGF-Lallemand	Annales hydrographiques 1971, pages 412 à 415 (MHCFAN), Mannevy 1960, archives du SHOM, cote TAP/19
		- 0,72 m	Zéro hydrographique	
1986	O.O.K3-24a-IV	+ 2,8233 m	NGF-IGN69	Cahier de « Calcul des altitudes des repères, réseau de 3 ^e ordre », opérateur :Dupuy, archives de l'IGN http://geodesie.ign.fr/fiches/ (consulté le 26 avril 2011)
		+ 2,823 m	NGF-IGN69	
2010	O.O.K3-24A-IV	+ 2,835 m	NGF-IGN69	Graduation 7,00 m ; UMR 6250 LIENSs
		- 0,718 m	Zéro hydrographique	Graduation 0,00 m ; UMR 6250 LIENSs

• **Les échelles nivelées en 2010 correspondent-elles aux échelles mentionnées dans les archives ou à celles ayant servi aux mesures du niveau de la mer ?**

Un document retrouvé dans les archives départementales [Viennot & Thurninger, 1894] mentionne la cote des zéros des échelles de marée installées dans le port de La Rochelle en 1894. Parmi ces échelles, trois sont susceptibles d’être encore présentes de nos jours et par conséquent, susceptibles de faire partie des échelles nivelées lors de notre campagne de mesures [Gouriou *et al.*, 2010]. Voici la cote du zéro de ces trois échelles (en 1894), rapportée au zéro des cartes marines de l’époque (-3,00 m NGF-Bourdalouë) :

- Echelle de l’écluse du canal Maubec + 3,00 m
- Echelle de l’écluse du bassin à flot extérieur - 0,83 m
- Echelle de l’écluse du bassin à flot intérieur + 0,70 m

Les échelles encore en place qui pourraient correspondre à la description du document de Viennot sont les échelles E6 pour le canal Maubec, E4 pour le bassin à flot intérieur et O.O.K3-24A-IV pour le bassin à flot extérieur. Comme le montre le *tableau IV-3* ci-dessous, aucune des échelles mentionnées dans le document de 1894 ne correspond aux échelles actuelles. Ce qui signifie qu’elles ont été, soit remplacées, soit déplacées, ce qui se traduit, ici, par une modification de la cote du zéro de ces échelles. Par conséquent, les échelles ayant été utilisées pour mesurer le niveau de la mer au Vieux port de La Rochelle ont, aujourd’hui, toutes disparues.

Echelle	Cote du zéro de l’échelle en 1894			Cote du zéro de l’échelle en 2010		Ecart
	Zéro hydro.	NGF-Bourdalouë	NGF-IGN69	Zéro hydro.	NGF-IGN69	
Maubec	+ 3,00 m	0,00 m	- 0,444 m	+ 0,054 m	- 3,393 m	- 295 cm
B. intérieur	+ 0,70 m	- 2,30 m	- 2,744 m	+ 1,215 m	- 2,231 m	+ 52 cm
B. extérieur	- 0,83 m	- 3,83 m	- 4,274 m	- 0,718 m	- 4,165 m	+ 11 cm

Tableau IV-3 : Comparaison des cotes du zéro des échelles de marée de 1894 et de 2010 au Vieux port de La Rochelle

IV.1.3.2. Au port de La Pallice

Comme pour le Vieux port, un historique de la cote des principaux repères de nivellement et/ou de marée du port de La Pallice a été réalisé à partir d’informations retrouvées dans les centres d’archives de l’IGN et du SHOM. Pour chacun de ces repères, une fiche a été produite regroupant le nom du repère, la période d’existence, le type de repère, des photographies, une description ainsi que toutes les informations recueillies sur leurs cotes historiques. L’ensemble de ces fiches est disponible en annexe. Pour une question de clarté, nous ne présentons ici, qu’une vue d’ensemble précisant l’emplacement de chaque repère (*figure IV-15*), ainsi que la fiche du repère principal du port de La Pallice.



Figure IV-15 : Localisation des différents repères de nivellement du port de La Pallice. Photographie aérienne récente modifiée (© 2011 - IGN).

REPÈRE O.O.K3-126 (existant)				
Période : ? à aujourd'hui			Type : Repère à console	
				
Description : Repère scellé au bas du mur du bâtiment de la D.D.T.M. (ancienne gare de La Pallice), 18 rue Sénégal (ancien bâtiment des Ponts et Chaussées). Repère fondamental du SHOM.				
Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
1913	O.ho 6	+ 5,423 m	NGF-Lallemand	Cahier de « Calcul des altitudes des repères, réseau de 3 ^e ordre », opérateur :Guy, archives de l'IGN
1960	NGF n°6	+ 5,417 m	NGF-Lallemand	« Nivellement Cholesky - Rattachements divers, cahier n°2/3 », MHCAN, Plouviez, 1960, archives du SHOM, cote SH2-886
1979	A	+ 5,417 m	NGF-Lallemand	Annales hydrographiques, 5 ^e série, vol. 7, fasc. 1, n°751, archives du SHOM
		+ 9,107 m	Zéro hydrographique	
1999	O.O.K3-126	+ 5,6034 m	NGF-IGN69	Cahier de « Calcul des altitudes des repères, réseau de 3 ^e ordre », opérateur : Mazieres, archives de l'IGN http://geodesie.ign.fr/fiches/ (consulté le 26 avril 2011)
		+ 5,603 m		
2011	O.O.K3-126	+ 5,604 m	NGF-IGN69	IGN - Triplet

IV.1.4. Relation entre les réseaux NGF

Au cours du temps, plusieurs réseaux NGF ont été réalisés, ce qui implique que les repères de nivellement ont été cotés dans un, deux ou trois systèmes différents. Afin de pouvoir évaluer leur stabilité au cours du temps, il est essentiel de connaître la relation permettant de passer d'une réalisation du réseau NGF à une autre. Pour la déterminer, nous allons utiliser une méthode de comparaison simple, en nous appuyant sur les repères ayant été cotés dans au moins deux réseaux différents au cours du temps.

A partir des résultats du paragraphe IV.1.3., nous avons sélectionné d'une part les repères cotés à la fois dans les réseaux NGF-Bourdalouë et NGF-Lallemand, et d'autre part les repères cotés dans les réseaux NGF-Lallemand et NGF-IGN69. Le *tableau IV-4* présente les résultats de la comparaison NGF-Bourdalouë et NGF-Lallemand pour le Vieux port de La Rochelle et le port de La Pallice.

Lieu	Repère	Altitudes NGF		Lallemand - Bourdalouë
		Bourdalouë	Lallemand	
Vieux port de La Rochelle	<i>C</i>	+ 4,573 m	+ 4,114 m	- 0,459 m
	<i>H</i>	+ 4,203 m	+ 3,655 m	- 0,548 m
	O.HO-2	+ 5,599 m	+ 4,968 m	- 0,631 m
	O.HO-3	+ 6,040 m	+ 5,412 m	- 0,628 m
	O.HO-5	+ 5,652 m	+ 5,024 m	- 0,628 m
	O.O.K3-24A	+ 4,906 m	+ 4,275 m	- 0,631 m
La Pallice	O.HO-6-I	+ 5,56 m	+ 4,934 m	- 0,626 m
Moyenne :				- 0,629 m
Ecart-type :				0,002 m

Tableau IV-4 : Différences d'altitude des repères cotés dans les réseaux NGF-Bourdalouë et NGF-Lallemand au port de La Pallice et au Vieux port de La Rochelle. Les repères C et H n'ont pas été pris en compte dans le calcul de la moyenne, car leur stabilité est remise en question.

La moyenne calculée (- 0,629 m) entre les origines des réseaux NGF-Bourdalouë et NGF-Lallemand ne tient pas compte des valeurs des repères C et H. Ces valeurs nous paraissant suspectes au regard des autres, nous allons les examiner plus en détail.

Le repère C (respectivement H) correspond au couronnement du bajoyer de l'écluse du bassin à flot extérieur (respectivement intérieur) du Vieux port de La Rochelle. Ces deux repères sont donc des repères naturels, c'est-à-dire qu'il s'agit ici du sommet du quai des écluses. Contrairement à des repères facilement identifiables (repère cylindrique ou rivet par exemple), ces repères naturels présentent donc deux inconvénients. D'une part, leur localisation peut être assez imprécise, par manque de documentation. D'autre part, en cas de travaux de rénovation par exemple, rien n'indique aux services publics en charge des travaux que ces couronnements sont des repères. Ils vont donc les déplacer et les modifier, sans forcément en avertir l'autorité responsable de ces repères. C'est probablement ce qui s'est passé ici, les écluses ayant subi de nombreuses rénovations au cours du 20^e siècle. La différence entre les origines des réseaux NGF-Bourdalouë et NGF-Lallemand, de $0,629 \pm 0,002$ m, est cohérente avec la valeur

indiquée sur la *figure IV-16*. Il existe probablement des résultats plus précis et détaillé que cette carte dont les résultats sont grossiers à l'échelle du littoral charentais, mais à ce jour, nous ne les avons pas retrouvés.

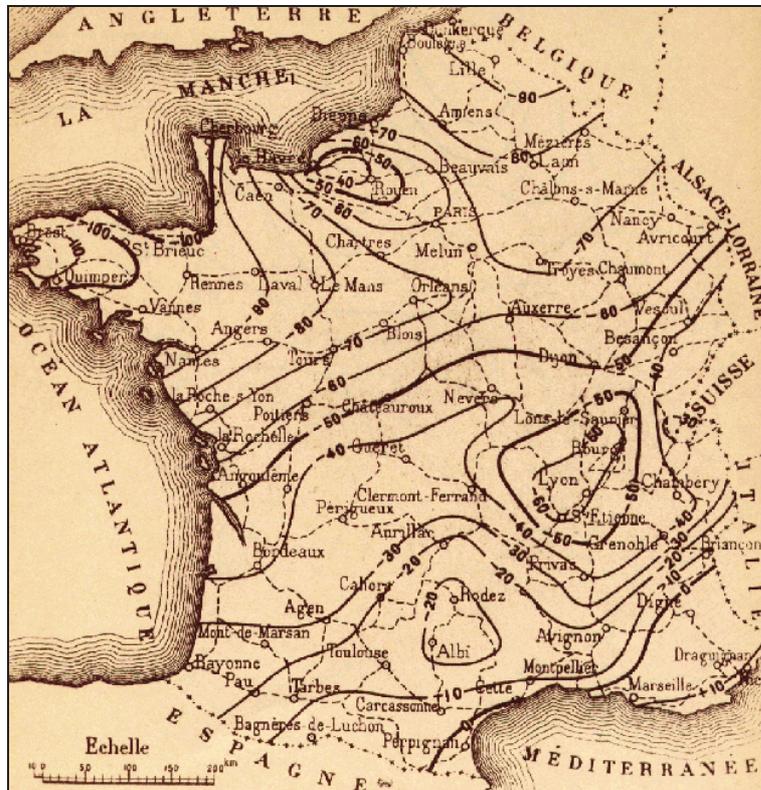


Figure IV-16 : Carte des écarts approximatifs entre les altitudes NGF-Lallemand et les altitudes NGF-Bourdalouë (source : <http://geodesie.ign.fr/>, consulté le 1^{er} décembre 2011).

Le *tableau IV-5* présente les résultats de la comparaison NGF-Lallemand et NGF-IGN69 pour le port de La Pallice et le Vieux port de La Rochelle.

Lieu	Repère	Altitudes NGF		IGN69 - Lallemand
		Lallemand	IGN69	
Vieux port de La Rochelle	C	+ 4,1095 m	+ 4,2958 m	+ 0,1863 m
	O.HO-2	+ 4,9680 m	+ 5,1535 m	+ 0,1855 m
	O.HO-3	+ 5,4120 m	+ 5,5982 m	+ 0,1862 m
	O.HO-5	+ 4,9981 m	+ 5,1849 m	+ 0,1868 m
	O.O.K3-24A	+ 4,2689 m	+ 4,4552 m	+ 0,1863 m
	O.O.K3-24C	+ 10,6907 m	+ 10,8783 m	+ 0,1876 m
	O.O.K3-24-I	+ 3,6359 m	+ 3,8219 m	+ 0,1860 m
La Pallice	O.O.K3-126	+ 5,417 m	+ 5,6034 m	+ 0,1864 m
	O.O.K3-127	+ 5,4293 m	+ 5,6174 m	+ 0,1881 m
	O.O.K3-127-I	+ 5,157 m	+ 5,3419 m	+ 0,1849 m
Moyenne :				+ 0,1864 m
Ecart-type :				0,0009 m

Tableau IV-5 : Différences d'altitude des repères cotés dans les réseaux NGF-Lallemand et NGF-IGN69 au port de La Pallice et au Vieux port de La Rochelle

A partir des résultats des *tableaux IV-4* et *IV-5*, nous pouvons en déduire le schéma de situation des différentes origines des réseaux NGF utilisés au Vieux port de La Rochelle et au port de La Pallice depuis 1861 (*figure IV-17*).

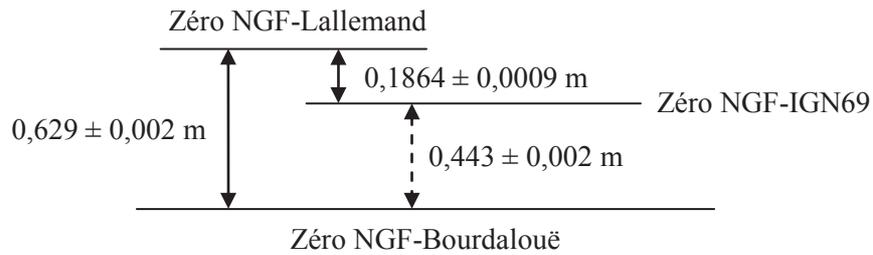


Figure IV-17 : Situation des différentes origines des réseaux NGF utilisés au Vieux port de La Rochelle et à La Pallice entre 1861 et 2011. Le trait pointillé indique que la valeur est déduite ; le trait plein qu'elle est calculée.

La différence entre les origines des réseaux NGF-Lallemand et NGF-IGN69, de $0,1864 \pm 0,0009$ m, est conforme avec la valeur publiée sur le site internet de l'IGN (0,18 m) pour effectuer une conversion entre ces deux réseaux dans la zone de La Rochelle (feuille 1329), d'après la grille Centre Ouest³².

IV.1.5. Inventaire et description des mesures enregistrées

De nombreuses séries du niveau de la mer ont été réalisées dans la rade de La Rochelle, que l'on peut regrouper selon le lieu d'enregistrement des mesures : le Vieux port de La Rochelle et le port de La Pallice (*figure IV-18*). Des mesures ponctuelles sur une période d'un mois ont également été enregistrées à la tour Richelieu, située dans le chenal d'accès au Vieux port. Par commodité, nous considérerons que ce lieu de mesure fait partie de la zone du Vieux port (*figure IV-18*).



Figure IV-18 : Localisation des différents lieux de mesures du niveau de la mer dans la rade de La Rochelle. Le détail de la zone du Vieux port se trouve à la figure IV-19. Image modifiée © 2011 GeoEye.

³² <http://geodesie.ign.fr/index.php?page=grilles>, consulté le 1^{er} décembre 2011.

Les mesures réalisées couvrent une période totale de 237 ans, de 1775 à aujourd'hui, pour une durée effective d'enregistrement de 69 ans. La *figure IV-19* montre cette répartition temporelle pour les deux zones : le Vieux port de La Rochelle (en rouge) et le port de La Pallice (en bleu).

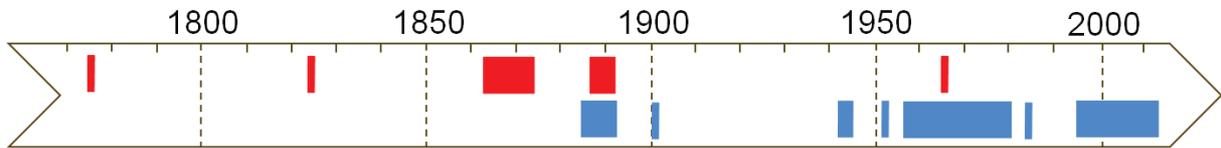


Figure IV-19 : Représentation temporelle des mesures du niveau de la mer enregistrées dans la rade de La Rochelle de 1775 à aujourd'hui. En rouge : Vieux port de La Rochelle ; en bleu : La Pallice.

IV.1.5.1. Le Vieux port de La Rochelle

Après cette vue d'ensemble, nous allons maintenant détailler les lots de mesures réalisées sur chacun des deux sites. Commençons par le site de mesures le plus ancien : le Vieux port de La Rochelle. Plusieurs lots de mesures du niveau de la mer ont été retrouvés dans les centres d'archives. Ces mesures couvrent une période de 118 ans (1775 - 1892), pour une durée effective d'enregistrement de 19 ans, et sont répartis sur trois sites différents du Vieux port : le canal Maubec, le bassin à flot intérieur et le bassin à flot extérieur (*figure IV-20*).



Figure IV-20 : Localisation des différents lieux de mesures du niveau de la mer au Vieux port de La Rochelle entre 1775 et 1892. Photographie aérienne, modifiée, provenant du Géoportail de l'IGN (© 2011).

Ces différents lots de mesures n'ont pas tous été enregistrés de la même manière ni dans un même référentiel de temps et de hauteur. Le *tableau IV-6* dresse donc un récapitulatif détaillé des mesures réalisées au Vieux port. A la suite de ce tableau, nous détaillerons chacun des lots de mesures en indiquant les informations utiles à leur compréhension.

Période	Durée effective	Mesures		Archivage des mesures		Système de hauteur		Système de temps		
		Appareil	Description	Numérique	Papier	Pieds	Mètres	TSV	TSM	TU
VIEUX PORT DE LA ROCHELLE										
1775 - 1776	1 an	Echelle gravée	Hauteurs des PM diurnes	LIENSs	Médiathèque de La Rochelle - MS 783 (pp 147-162)	X		-		
1824	3 mois	Echelle	Hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	LIENSs	SHD Rochefort - 7JJ 364	X		X		
1863 - 1874	12 ans	Marégraphe Chazallon	Hauteurs tous les ¼ d'heure + Pression atm.	LIENSs	Archives du SHOM, Brest		X	X		
1887 - 1892	6 ans	Echelle	Heures et hauteurs des PM et BM diurnes	LIENSs	AD 17 - DDE 5659, La Rochelle		X		X	
1966	1 mois	Marégraphe pression	Marégrammes - Hauteur en continu	Laboratoire Central d'Hydraulique de France ?			X			X

Tableau IV-6 : Récapitulatif et description des lots de mesures du niveau de la mer enregistrés au Vieux port de La Rochelle entre 1775 et 1966.

• **Le canal Maubec (1775 - 1776)**

Les mesures du niveau de la mer réalisées du 15 mai 1775 au 15 mai 1776 au niveau de l'écluse de Maubec font partie d'une campagne de mesures similaires réalisées dans plusieurs ports de France et demandées par l'Académie royale des Sciences. Le document intitulé « *Mémoire sur les observations à faire du flux et du reflux de la mer* » (figure IV-21), et rédigé par de La Lande entre 1773 et 1775³³, indique clairement la marche à suivre pour réaliser ces observations et en explique les raisons. De La Lande explique que « *La Théorie du flux & du reflux de la Mer, est une des parties de la Physique que les Savans ont le moins approfondies, faute de bonnes observations. On fait très-bien, depuis la fin du siècle dernier, que les attractions du Soleil & de la Lune font les véritables causes de ce phénomène ; mais on ignore le rapport exact de ces forces, l'altération que les vents & les circonstances locales y occasionnent, & principalement l'influence que peut avoir l'inertie des eaux sur l'heure & la hauteur des marées.* » Des mesures du niveau de la mer avaient déjà été initiées par l'Académie royale des Sciences (en 1701 : Dunkerque et Le Havre ; en 1716 : Brest et Lorient) mais les registres originaux contenant les détails de ces mesures ont été perdus et les seuls documents restants sont les mémoires publiés par Cassini qui a réalisé une étude de ces mesures. Consciente de la nécessité de se procurer de nouvelles

³³ « *Mémoire sur les observations à faire du Flux et du Reflux de la Mer* », 1777, Imprimerie royale de Paris. Archives de la médiathèque Michel Crépeau, La Rochelle, cote MS 783.

observations, l'Académie a donc demandé des ordres du Roi pour la réalisation de mesures dans les ports de La Rochelle, Lorient, Brest, Le Havre, Saint-Malo, Dunkerque, et Toulon [De La Lande, 1777]. Dans chacun de ces ports, il était demandé d'observer, pendant une année entière, la hauteur et l'heure des pleines et basses mers, avec beaucoup de soin et de précautions, comme le montrent les consignes laissées par de La Lande (disponibles en annexe). Ces mesures devaient être complétées, dans la mesure du possible, avec des observations de la force et de la direction des vents ainsi que des « hauteurs du baromètre & du thermomètre, pour connaître l'état de l'Atmosphère aux époques des observations ». Ainsi, dès le 18^e siècle, les savants soupçonnaient toute l'importance des mesures météorologiques dans la compréhension des variations du niveau marin.



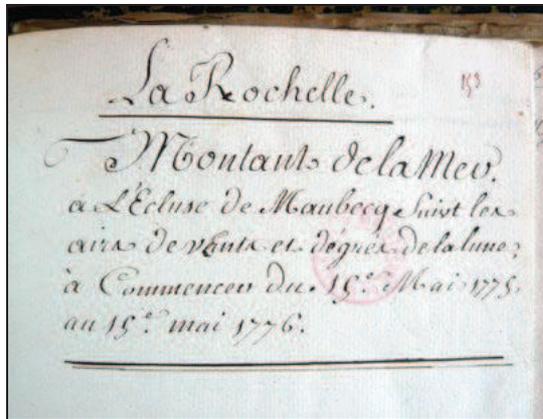
Figure IV-21 : Extrait du « Mémoire sur les observations à faire du Flux et du Reflux de la Mer » publié en 1777 à l'imprimerie royale de Paris. Archives de la médiathèque Michel Crépeau, La Rochelle, cote MS 783.

Il était clairement demandé aux observateurs d'utiliser une échelle graduée en pieds et en pouces, qui soit à l'abri du clapot et de la houle, afin de réaliser dans les meilleures conditions possibles leurs mesures. Mais il est intéressant de noter que, bien avant la réalisation du premier marégraphe français (entre 1840 et 1844), les savants de l'Académie royale avaient déjà une idée bien précise de l'appareil le plus adapté à ce type d'observations : « Les personnes qui auront assez de zèle pour s'occuper de ces observations, imagineront sans doute des moyens pour les faire avec beaucoup de précision. Parmi ceux qui sont venus à la connaissance de l'Académie, elle feroit portée à adopter celui qu'on trouve dans le Journal des Savans, année 1685 ; il consiste à placer dans un lieu qui n'affèche pas de baffe mer, un tuyau dans lequel un corps flottant s'élève & s'abaisse avec la mer : ce corps flottant est suspendu par une corde qui passe sur une poulie, & qui porte à son extrémité un poids dont la hauteur indique celle de la mer. On pourroit encore, sur ce corps flottant qui feroit d'une certaine étendue, faire porter une règle de bois léger, & graduée, dont l'extrémité supérieure passeroit dans une boucle fixe, & qui indiqueroit l'état de la marée par sa graduation. »

Les observations du port de La Rochelle furent réalisées du 15 mai 1775 au 15 mai 1776 par de Vialis, chevalier de l'ordre royal et membre de l'Académie des belles lettres, sciences et arts de La Rochelle³⁴ (figure IV-22). Cependant, l'environnement local ne permettait pas de réaliser des observations de basse mer, car comme l'expliquait Seignette dans une lettre destinée à l'Académie royale des Sciences : « Notre Côte est extrêmement plate et pour trouver un lieu qui n'assèche pas de basse mer, il faudroit s'en éloigner considérablement. ». Seignette précise donc que les observations qu'il envoie à

³⁴ « Montant de la Mer à l'Ecluse de Maubecq suivant les airs de vent et degrés de la lune, à commercer du 15^e mai 1775 au 15^e mai 1776 ». Archives de la médiathèque Michel Crépeau, La Rochelle, cote MS 783.

l'Académie royale le 20 janvier 1778 sont « la plus grande élévation des marées observée une fois le jour, on y a joint la direction des vents et les phases de la Lune, il seroit à désirer que l'on eut marqué les heures mais ce n'étoit pas l'objet de M. de Vialis. »³⁵.



Vents	Lunes	Jours	Pieds	Pouces
	1 ^{er}	1 ^{er}	4	
	2 ^e	2 ^e	8	7
	3 ^e	3 ^e	8	7
	4 ^e	4 ^e	7	11
Plein Lune	5 ^e	5 ^e	7	2
	6 ^e	6 ^e	7	2
	7 ^e	7 ^e	11	2
	8 ^e	8 ^e	10	2
	9 ^e	9 ^e	7	8
	10 ^e	10 ^e	7	3
	11 ^e	11 ^e	8	6
	12 ^e	12 ^e	8	10
	13 ^e	13 ^e	8	2
Dernier quartier	14 ^e	14 ^e	7	10
	15 ^e	15 ^e	7	8
	16 ^e	16 ^e	7	6

Figure IV-22 : Extraits du document « Montant de la Mer à l'Écluse de Maubecq suivant les airs de vent et degrés de la lune, à commencer du 15^e mai 1775 au 15^e mai 1776 ». Archives de la médiathèque Michel Crépeau, La Rochelle, cote MS 783.

Malheureusement, le travail de l'Académie de La Rochelle, aussi consciencieux fut-il, ne fut pas exploité par l'Académie royale, comme en atteste cette lettre de De La Lande à Seignette, du 18 mars 1778 : « Nous voyons bien que la mer se retire trop de votre port pour qu'on puisse y faire des observations de la baffe mer ; mais il viendra un temps on l'on connoitra les rapports entre les marées totales, et les différences des hautes eaux, et pour lors vos observations ne feront point inutiles, en attendant nous les garderons avec soin ; elles enrichiront notre dépôt ; elles seront une preuve intéressante du zèle de votre académie »³⁶.

Un peu plus de deux siècles plus tard, nous avons ressorti ces observations des archives avec l'intention de pouvoir les exploiter scientifiquement. La question principale que nous nous sommes posée est : par rapport à quelle référence de hauteur les mesures de pleine mer ont-elles été observées ? Les documents d'archives retrouvés ne mentionnent pas la relation entre le zéro de l'échelle de marée utilisée par le chevalier de Vialis et un repère terrestre avoisinant. Et malheureusement, l'échelle (probablement gravée dans le quai ?) ayant servi au chevalier est restée introuvable malgré nos recherches, probablement détruite lors de travaux du canal. Toutefois, plusieurs indices nous permettent d'avoir une estimation de la position du zéro des observations. A l'époque, il n'était pas rare que l'échelle de marée en pieds et en pouces soit gravée directement dans le mur d'un quai. De la même façon, le zéro de ces échelles correspondait parfois à la base du radier du canal ou du port dans lequel était gravée l'échelle, comme ce

³⁵ Lettre du second secrétaire perpétuel de l'Académie de La Rochelle, Seignette, à De Condorcet, 20 janvier 1778. Archives de la médiathèque Michel Crépeau, La Rochelle, cote MS 783.

³⁶ Lettre de De La Lande à Seignette, 18 mars 1778. Archives de la médiathèque Michel Crépeau, La Rochelle, cote MS 783.

fut le cas pour l'échelle de marée de la porte des Deux-Moulins (voir ci-dessous) à La Rochelle, ou encore à Brest [Pouvreau, 2008], mais pas à Stockholm, où le zéro de l'échelle était situé à 1 Pied au dessus de la base du radier [Ekman, 2003]. Nous pouvons donc émettre l'hypothèse que le zéro de l'échelle utilisée par de Vialis correspond à la base du radier du canal Maubec. Reste maintenant à relier le radier du canal à un repère terrestre existant encore aujourd'hui ou à la définition du zéro hydrographique. Cependant, nous savons que le canal Maubec a subi de très nombreux travaux et aménagements depuis 1775 (cf. IV.1.1.1. *Le Vieux port de La Rochelle*) et la cote du radier a très probablement été modifiée, et ce peut-être dès 1785, date du début de la construction de la nouvelle écluse de chasse du canal (*figure IV-23*). De plus, parmi les documents d'archives retrouvés, le premier nous donnant la cote du radier par rapport à un repère terrestre date de 1894, soit près de 120 ans après les mesures... Il est donc peu probable que cette piste nous apporte notre réponse, d'autant plus que nous n'avons pas la certitude que le zéro de l'échelle corresponde bien à la base du radier.



Figure IV-23 : Plan de situation de différents éléments du canal Maubec : l'écluse de chasse, qui relie le canal Maubec au havre d'échouage ; l'écluse Maubec, en amont du canal ; et l'Académie des belles lettres, sciences et arts de La Rochelle située à l'époque au bord du canal. Photographie aérienne modifiée, (IGN © 2011).

La deuxième piste étudiée est celle de la relation entre le radier du canal et la définition du zéro hydrographique. En effet, dans sa lettre du 20 janvier 1778 adressée à l'Académie royale, Seignette indique que « le radier de Maubec est élevé de 8 Pieds 10 Pouces 3 Lignes au dessus de la plus basse mer. »³⁷. En considérant que la plus basse mer en question se rapporte à la définition du zéro hydrographique, on peut estimer que le radier de Maubec, et donc le zéro de l'échelle utilisée par de Vialis, est situé à 2,876 m au dessus du zéro hydrographique, à condition que le zéro de l'échelle se situe bien à la base du radier. Nous avons vu au chapitre IV.1.2.1. qu'il existait vingt centimètres de différence entre les deux définitions de ce zéro au Vieux port : celle de Beautemps-Beaupré en 1824 et celle de Viennot en 1894. Il semblerait plus logique de s'accorder sur le fait que le zéro de Beautemps-Beaupré étant le plus ancien, il est donc celui qui correspondrait à la définition du zéro hydrographique que pouvait avoir l'Académie royale en 1775, soit à peu près cinquante ans plus tôt.

³⁷ 1 Pied = 0,324839 m = 12 pouces

Et la porte des Deux-Moulins ?

Aucune mesure retrouvée, mais deux échelles de marée gravées dans le quai, qui ont résisté au temps afin de nous offrir, aujourd'hui, un témoignage visuel de la fin du 18^e siècle. Tel est le paradoxe de la porte des Deux-Moulins ; contrairement au canal Maubec, pour lequel nous avons retrouvé des mesures mais pas d'échelle, ici c'est le contraire qui s'est produit. A environ 500 m à l'extérieur du havre d'échouage se trouve la porte des Deux-Moulins (*figure IV-2*). On peut y voir, aujourd'hui, deux échelles de marée en pieds et en pouces gravées directement dans le quai (*figure IV-24*). Un nivellement de vérification nous a permis de constater que le zéro de ces échelles correspondait à la base du radier, confirmant un peu plus les pratiques de l'époque [Gouriou *et al.*, 2010].



Figure IV-24 : A gauche : porte des Deux-Moulins (La Rochelle, 2010). A droite : Echelle de marée en pieds et en pouces gravée dans le mur du quai (la photo est centrée sur la graduation 10 Pieds).

Le fait que nous n'ayons pas connaissance d'observations du niveau marin à cet endroit peut s'expliquer de trois façons : soit ces mesures ont été perdues ou détruites, soit elles dorment encore dans un centre d'archives, soit ces échelles avaient un autre but. La première hypothèse, quoiqu'envisageable, est la moins probable des trois car plusieurs lots de mesures du 18^e siècle du niveau marin ont été conservés avec un grand soin jusqu'à aujourd'hui. Pourquoi celui-ci ne l'aurait-il pas été ? La deuxième hypothèse est tout à fait possible compte tenu du travail de fourmi consistant à trouver de telles observations dans les centres d'archives. Enfin, la troisième hypothèse est peut-être la plus plausible, si l'on considère le contexte historique. Comme nous l'avons vu au paragraphe IV.1.1.1., le port de La Rochelle connut de graves problèmes d'envasement au 18^e siècle. L'éperon des Deux-Moulins (dans lequel sont gravées les deux échelles), démoli en 1628 par Richelieu, fut reconstruit vers 1740, alors même que des études étaient en cours pour améliorer le port et lutter contre l'envasement. Lors de ces études, on imagina créer un bassin à flot à l'extérieur du havre, précisément à proximité de la porte des Deux-Moulins. Même si le projet ne fut pas retenu, il est probable que les échelles soient contemporaines de ces études.

• **Le bassin à flot intérieur (1824)**

Les mesures du niveau marin enregistrées en 1824 font partie d'un vaste projet entrepris par Beautemps-Beaupré, de 1816 à 1838 : la réalisation d'un document intitulé « *le Pilote français* », rassemblant l'ensemble des connaissances hydrographiques des côtes de France. Lors de la campagne hydrographique de 1824, des observations diurnes du niveau marin furent réalisées du 26 juin au 3 octobre à l'échelle de marée en pieds et en pouces placée en aval de l'écluse du bassin à flot intérieur. Si cette échelle a aujourd'hui disparu, Beautemps-Beaupré avait pris le soin d'indiquer que le zéro utilisé était situé à 50 cm en dessous du radier, soit à 7,00 m en dessous du sommet du bajoyer de l'écluse [Beautemps-Beaupré, 1824b].

• **Le bassin à flot extérieur (1863-1874 et 1887-1892)**

L'écluse du bassin à flot extérieur a été par deux fois le théâtre d'observations du niveau marin. Le premier acte s'est déroulé du 1^{er} février 1863 au 31 décembre 1874, lorsqu'un marégraphe fut installé par le Service Hydrographique, dans un bâtiment spécialement conçu pour l'occasion (*figure IV-25*), faisant de La Rochelle l'un des huit observatoires du niveau de la mer mis en place par Chazallon.

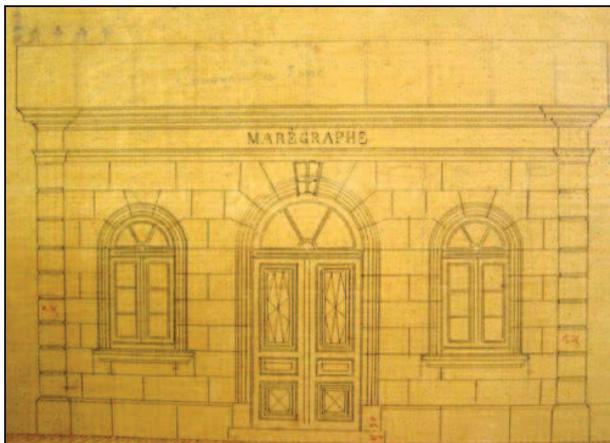


Figure IV-25 : A gauche : plan du bâtiment abritant le tambour enregistreur du marégraphe de 1863 à 1874 (La Rochelle). Archives AD17, série S, cote DDE 344. A droite : Bâtiment du marégraphe transformé aujourd'hui en bureau du port (photographie de 2011).

Chose remarquable, l'installation de ce marégraphe avait été prise en compte dans les plans de construction du bassin à flot extérieur, entre 1855 et 1862. Ainsi, le bâtiment abritant le marégraphe et le puits de tranquillisation sont parfaitement intégrés aux quais de l'écluse (*figure IV-26*). Au début de l'année 1875, le marégraphe de La Rochelle fut démonté et transféré à Socoa (Saint-Jean-de-Luz) où il fonctionnera jusqu'en 1920³⁸. La raison de ce transfert est simple : les mesures étaient perturbées par l'ouverture régulière des portes de l'écluse du bassin à flot, située à quelques mètres du marégraphe. Le

³⁸ Source : Information issue des registres de marée de La Rochelle et Socoa, archives du SHOM.

deuxième acte des observations du niveau marin à cette écluse se déroula du 1^{er} janvier 1887 au 31 décembre 1892. Contrairement aux mesures précédentes, c'est le service des Ponts et Chaussées qui réalisa ces mesures diurnes. Chaque jour, un observateur relevait l'heure et la hauteur des pleines et basses mers à l'échelle aval de l'écluse du bassin à flot extérieur. Le même type de mesures a été enregistré au port de La Pallice de 1885 à 1892. On peut donc penser que l'objectif de ces relevés simultanés était de comparer le régime des marées sur les deux sites, dans le contexte du déplacement du port de commerce de La Rochelle, du Vieux port au port de La Pallice.

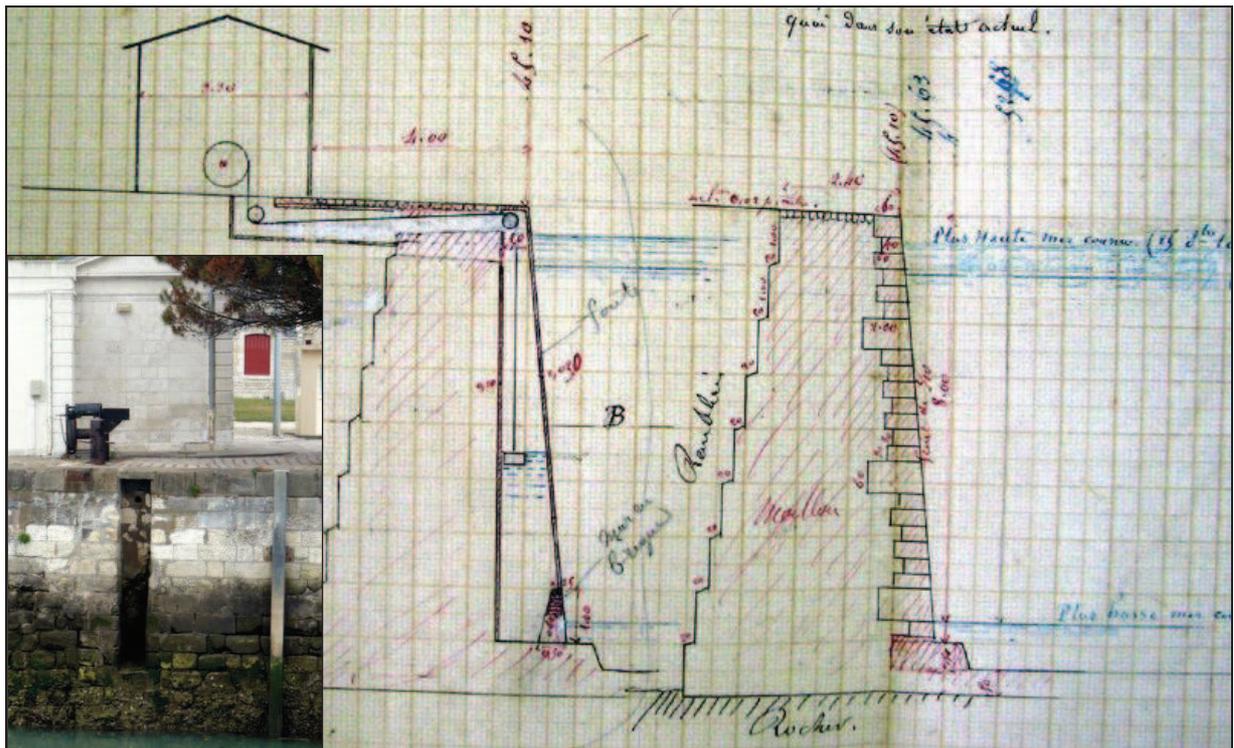


Figure IV-26 : En arrière plan : Plan de l'installation du marégraphe de La Rochelle (1863-1874), vu de profil. Le puits de tranquillisation a été construit et intégré en même temps que les quais de l'écluse du bassin à flot extérieur, entre 1855 et 1862. Archives AD17, série S, cote DDE 344. En bas, à gauche : Vue de face de l'ancien puits de tranquillisation (2011).

• La tour Richelieu (1966)

Des mesures ont été enregistrées du 9 mars au 13 avril 1966 par le Laboratoire Central d'Hydraulique de France à la tour Richelieu. Ces mesures ont été réalisées dans le cadre d'une mission ponctuelle, à l'aide d'un marégraphe à capteur de pression en deux parties : le capteur de pression immergé dans le chenal et l'enregistreur à l'abri de la tour Richelieu (Instrument : TELIMNIP NEYRPIE pneumatique). Le zéro du marégraphe était calé sur le zéro hydrographique en vigueur à l'époque (-3,63 m NGF-Lallemand) et le LCHF a également coté la partie supérieure de l'échelon du bas de l'échelle métallique de la tour Richelieu à + 2,31 m par rapport au zéro du marégraphe.

IV.1.5.2. Le port de La Pallice

Les lots de mesures du niveau marin enregistrées au port de La Pallice sont nombreux. Ils couvrent une période de 127 ans (1885 à aujourd'hui), pour une durée effective d'enregistrement de 50 ans. Comme pour le Vieux port, le *tableau IV-7* dresse un récapitulatif détaillé des mesures réalisées au port de La Pallice. A la suite de ce tableau, nous donnerons les quelques informations que nous possédons sur ces lots de mesures.

Période	Durée effective	Mesures		Archivage des mesures		Système de hauteur		Système de temps		
		Appareil	Description	Numérique	Papier	Pieds	Mètres	TSV	TSM	TU
LA PALLICE										
1885 - 1892	7 ans	Echelle	Heures et hauteurs des PM diurnes (1885-sept.1890), PM et BM diurnes (oct.1890-1892)	LIENSs (1890-1892)	AD 17 - DDE 5659, La Rochelle		X		X	
1900	2 mois	Echelle	Heures et hauteurs des PM et BM diurnes		DO/MIP/PEP, SHOM, Brest		X		X	
1941 - 1944	3 ans	Marégraphe flotteur	Hauteurs horaires	REFMAR			X			X
1951	1 mois	?	Hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure		Archives du SHOM - SH2 242		X			X
1956 - 1964	?	Marégraphe flotteur	?		IGN - Caisse SGN 1347 (en partie)		X			X
1960	5 mois	?	Hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure		Archives du SHOM - SH2 884		X			X
1963	2 mois	?	Hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure		Archives du SHOM - SH2 777		X			X
1965	5 mois	?	Hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure		Archives du SHOM - SH2 845		X			X
1965 - 1966	?	Marégraphe flotteur	?		IGN ?		X			X
1967 - 1980	10 ans	Marégraphe flotteur	Hauteurs horaires	REFMAR			X			X
1983 - 1984	2 ans	Marégraphe flotteur	Marégrammes - Hauteur en continu		SPC-LA 369 et 376, La Rochelle		X			X
1994	1 an	Marégraphe flotteur	Marégrammes - Hauteur en continu		SPC-LA 381, La Rochelle		X			X
1995 - 2011	17 ans	Marégraphe numérique	Hauteurs toutes les 10 minutes	REFMAR	-		X			X

Tableau IV-7 : Récapitulatif et description des lots de mesures du niveau de la mer enregistrés au port de La Pallice entre 1885 et aujourd'hui.

Le premier lot de mesures du niveau marin au port de La Pallice a été enregistré du 1^{er} janvier 1885 au 31 décembre 1892. De la même façon que pour les mesures contemporaines du Vieux port, c'est

le service des Ponts et Chaussées qui se chargea d'observer l'heure et la hauteur des pleines et basses mers à une échelle placée sur la jetée sud, dans l'avant port. Le zéro de l'échelle utilisée était situé à 5,00 m au dessus du radier de la grande écluse.

A partir de 1941, plusieurs marégraphes se sont succédé au port de La Pallice. Toutes les informations concernant le marégraphe actuel (*figure IV-27*), installé depuis 1995, sont disponibles en ligne sur le site internet de REFMAR³⁹. Les seules autres informations que nous avons pu recueillir concernent le marégraphe installé en 1983. Il s'agissait d'un marégraphe à flotteur (de marque OTT R16), géré par la Direction Départementale de l'Équipement, et dont le marégramme enregistrait de 7 à 32 jours de mesures⁴⁰.



Figure IV-27 : Téli-mètre radar et puits de tranquillisation du marégraphe actuel du port de La Pallice.

IV.2. La rade de l'île d'Aix : île d'Aix - fort Enet - fort Boyard

IV.2.1. Historique des observatoires du niveau de la mer

Notre deuxième et principale zone d'étude est la rade de l'île d'Aix, comprenant trois sites distants de moins de cinq kilomètres entre eux : l'île d'Aix, le fort Enet et le fort Boyard (*figure IV-28*). Des mesures du niveau de la mer ont été réalisées sur ces trois sites (cf. *IV.2.5. Inventaire et description des mesures enregistrées*). Comme pour la rade de La Rochelle, l'objectif est de retracer l'histoire de ces sites, dans la perspective d'une meilleure compréhension de l'environnement dans lequel se sont déroulées ces mesures.

³⁹ http://refmar.shom.fr/fr/la_rochelle_la_pallice, consulté le 1^{er} décembre 2011.

⁴⁰ Au-delà de 14 jours d'enregistrement, il est très difficile de discerner les différentes courbes du marégramme.

Depuis à peu près 3 000 ans et l'Âge du fer, les côtes charentaises sont fréquentées par des navires venus chercher l'or blanc produit en Saintonge : le sel [Réault-Mille, 2003]. Cette activité commerciale se poursuivra et s'amplifiera au fil des siècles, pourtant, avant le 16^e siècle, aucune carte marine ne mentionne l'existence de bancs de sable dans les pertuis charentais, malgré le risque important de naufrages [Sauzeau, 2009]. Alors que l'activité salicole se concentre sur le continent, les écrits mentionnent que l'histoire de l'île d'Aix débuta au 9^e siècle par la fondation d'un monastère pour les moines de Cluny, décidée par les seigneurs de ces terres : les barons de Châtel-Aillon. Témoin du changement de la morphologie des lieux au cours des siècles, ces écrits indiquent aussi que l'on pouvait rejoindre l'île à pied à marée basse au début du 15^e siècle, ce qui paraît impensable aujourd'hui [Crahay de Franchimont, 1885].



Figure IV-28 : Vue d'ensemble de la zone d'étude principale : la rade de l'île d'Aix, comprenant l'île d'Aix, le fort Enet et le fort Boyard. Photographie aérienne provenant du Géoportail de l'IGN (© 2011).

Au 16^e siècle, les échanges commerciaux maritimes s'intensifiaient, les cartes marines des pertuis charentais étaient de plus en plus détaillées. Les navigateurs hollandais, nouveaux-venus sur nos côtes et excellents cartographes, produisirent à cette époque les premières cartes réalistes et détaillées de la rade de l'île d'Aix. En 1585, Lucas Janszoon Waghenaer publie une carte des côtes et des îles du Poitou à la rivière de Bordeaux (figure IV-29), dans lequel apparaît pour la première fois la longe de Boyard sous le nom de « *Ban Iaert* » [Chagneau, 1996]. Signe de l'avance cartographique des hollandais, en 1645 Joan Blaeu publie une carte mentionnant la longe sous le nom de « *Banjaert hollandis* » (banc des hollandais, qui plus tard deviendra banc de Boyard) comme un obstacle majeur à éviter pour se rendre à Brouage, l'un des plus importants ports de commerce du sel d'Europe, alors que la carte du français Nicolas Tassin, publiée en 1634, ne le mentionne pas [Sauzeau, 2009].

L'importance de la rade de l'île d'Aix grandit en même temps que celle de Rochefort. Au 17^e siècle, la marine française créée par Richelieu est presque anéantie. Le roi-Soleil, Louis XIV, ordonne donc la création d'un arsenal sur la façade atlantique, capable de construire rapidement une flotte de guerre et d'offrir un lieu de refuge, à l'abri des attaques maritimes ennemies. C'est Colbert qui est chargé de trouver le lieu idéal et il choisira Rochefort en 1665. En effet, le lieu n'est pas attaquable par la mer, car situé à l'intérieur des terres, et la rade de l'île d'Aix, ouvrant le chemin vers Rochefort via l'estuaire de la Charente, est protégée naturellement par les îles d'Aix et Oléron et par de nombreux bancs de sable rendant la navigation dangereuse pour des navires de guerre étrangers. La construction de l'arsenal débutera l'année suivante et dès cet instant, le contrôle de la rade de l'île d'Aix devient d'une grande importance stratégique, car les vaisseaux construits à Rochefort ne sont armés que dans la rade en raison du trop faible tirant d'eau de la Charente.



Figure IV-29 : Extrait de la carte publié en 1585 par Lucas Janszoon Waghenaer, mentionnant pour la première fois la longe de Boyard, sous le nom de « Ban Jaert » [Sauzeau, 2009].

A la fin du 17^e siècle, alors que l'arsenal est pleinement fonctionnel, les cartes marines se sont, elles, considérablement développées et sont maintenant suffisamment précises pour que les bancs de sables, défenses naturelles de la rade, puissent être contournés par les navires ennemis. A l'époque où la lutte pour le contrôle du royaume des mers faisait rage, les hollandais puis les anglais se sont procurés ces cartes, faisant peser une menace de plus en plus grande sur la rade. Il devient donc urgent de fortifier l'accès à la rade et Louis XIV demande à ses ingénieurs d'y réfléchir rapidement. Colbert entend donc fortifier l'île d'Aix et le premier fort de la rade est construit sur l'île entre 1692 et 1704 (*figure IV-30*). Une batterie sera également installée à la pointe des Saumonards, sur l'île d'Oléron, en face du fort de la rade. Mais la distance séparant ces deux systèmes défensifs est d'environ 5 900 m, alors que la portée des canons n'est, elle, que de 1 500 m, ce qui laisse un couloir de 2 900 m, non protégé, dans lequel peut s'engouffrer une flotte ennemie. Or, il se trouve qu'au milieu de ce couloir se situe la longe de Boyard, banc de sable suffisamment important pour que les ingénieurs du roi proposent d'y construire un fort en pleine mer, qui pourrait interdire l'accès à la rade en croisant ses tirs avec les deux systèmes défensifs de l'île d'Aix et des Saumonards. Malgré la réussite de la construction du phare de Cordouan, monument

érigé en pleine mer depuis 1611 (cf. *IV.3.1. Historique de l'observatoire du niveau de la mer*), Vauban déconseillera au roi de construire un tel fort sur la longe. Le premier projet du fort Boyard est donc mis en sommeil.

Les craintes d'une attaque maritime se révélèrent fondées lorsque le 23 septembre 1757, une flotte anglaise de vingt frégates et dix mille hommes entre dans la rade des basques et envahit l'île d'Aix. Ils détruiront entièrement le fort de la rade, raseront toutes les fortifications et pilleront entièrement l'île [Guillemet, 2004]. Cette sanglante incursion anglaise relance le débat de la défense de la rade et en 1763, l'ingénieur militaire Filley soumet aux autorités un projet pour la construction d'un fort sur le banc de Boyard et ordonne de sonder les fonds autour du rocher d'Enet, avec l'idée de pouvoir également y implanter un système défensif. Mais le projet du fort Boyard, qui devait être un fort rectangulaire à un seul niveau, sera abandonné devant les difficultés techniques et le coût trop important de sa réalisation [Filley, 1763]. En 1773, l'ingénieur Bourgneuf réfléchit à la construction d'une digue reliant l'île d'Aix au continent, via le rocher d'Enet, mais le projet est vite abandonné car irréaliste [Sauzeau, 2009].

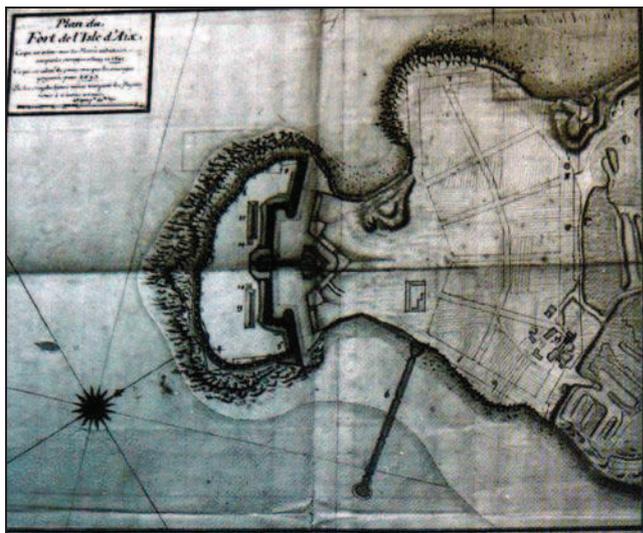


Figure IV-30 : Plan du fort de la rade de l'île d'Aix, par Ferry (1692). Archives du Génie, article 8, section 1 (SHD Terre, Vincennes).

Il faudra attendre le règne de Napoléon Bonaparte pour que de nouveaux programmes de fortification soient mis en place. Suite à un regain de tension avec l'ennemi anglais et à la réorganisation de l'arsenal de Rochefort, Napoléon reprend le projet de Filley et souhaite la construction de deux forts : Boyard et Enet. Le 9 mai 1801, il ordonne la création d'une commission mixte, dirigée par l'inspecteur de la Marine Ferregeau, chargée d'étudier la sécurisation de la rade de l'île d'Aix. En juin, la commission rend ses conclusions (*figure IV-31*) et propose la construction d'un fort elliptique, sur deux niveaux, sur un enrochement situé à mi-chemin des deux îles (Aix et Oléron) plutôt que sur le sommet du banc de Boyard, légèrement excentré. Elle propose également l'établissement d'un fort circulaire de trente-cinq mètres de diamètre sur le rocher d'Enet [Ferregeau, 1801]. Napoléon est convaincu, mais demande que le

chantier prioritaire soit celui du fort Boyard, les autres forts (dont le fort Enet) devront attendre⁴¹. Après de nombreux débats et plusieurs modifications, les projets de Ferregeau sont adoptés en 1803 et il est désigné pour diriger les travaux, secondé par l'ingénieur en chef des Ponts et Chaussées de La Rochelle, Leclerc. L'année 1803 sera donc consacrée à la préparation du chantier en lui-même. Boyarville, situé à proximité de la pointe des Saumonards, va sortir de terre afin de devenir le camp de base nécessaire pour assurer la logistique du chantier et accueillir à la fois les ouvriers et les matériaux.

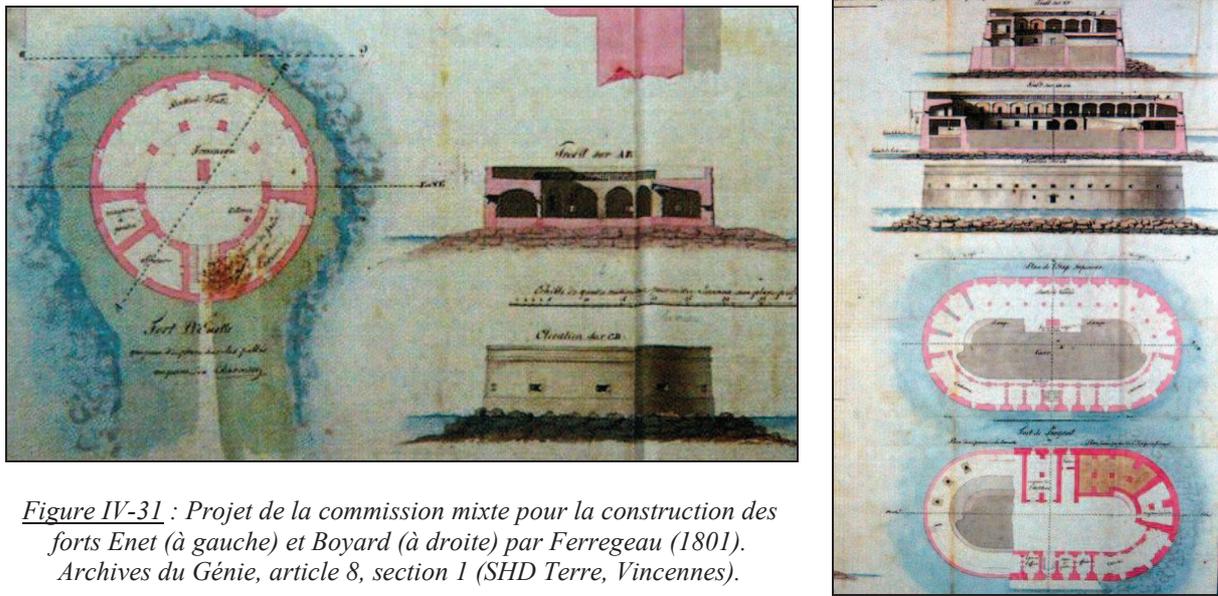


Figure IV-31 : Projet de la commission mixte pour la construction des forts Enet (à gauche) et Boyard (à droite) par Ferregeau (1801). Archives du Génie, article 8, section 1 (SHD Terre, Vincennes).

Le 13 mai 1804 marque le début des travaux de construction du fort Boyard, avec l'immersion d'un bloc de pierre de sept mètres cubes au centre de l'emplacement du futur fort. Ce bloc doit servir de point de départ à l'établissement d'un enrochement, qui servira lui-même de socle à la construction du fort. A la fin de l'année, environ dix mille mètres cubes de pierre auront été immergés, pour un résultat encore très fragile⁴². Les travaux se poursuivirent avec leurs lots de déboires (assauts de la houle, tempêtes, apparitions anglaises, etc.) et en 1806, l'enrochement fut terminé. On pouvait donc commencer la construction du fort et de sa première assise. Parallèlement à ce chantier, Napoléon ordonna de remettre l'île d'Aix en état de défense, et en 1807, le génie militaire construisit le petit port de l'île, toujours existant aujourd'hui. A la fin de l'année 1807, la première assise n'avait que peu avancé et les ingénieurs se rendirent compte que l'enrochement s'était enfoncé de 1,20 m à 1,50 m dans le substrat meuble de la longe de Boyard. Au début du mois d'août 1808, Napoléon, revenant d'Espagne, visita le chantier de Boyard. Devant l'ampleur du retard des travaux, il décida de réduire les dimensions du fort et son système défensif de soixante à douze canons, afin d'obtenir un fort en état de défense le plus rapidement possible. En effet, depuis plusieurs mois, des bruits inquiétants revenaient aux oreilles de l'Empereur au sujet d'une possible coalition entre l'Angleterre et l'Autriche contre la France.

⁴¹ « Bonaparte à Decrès, 23 juin 1801 », Delloye (1837), Correspondance de Napoléon avec le ministre de la Marine, Paris.

⁴² « Le fort Boyard », Van Tenac H. (1836-1838). Revue littéraire de l'ouest.

La coalition ne se fit pas attendre et en 1809, la Royal Navy anglaise, redoutant une manœuvre d'envergure de Bonaparte, impose un blocus maritime sur l'ensemble de la façade française. Inquiets de la construction du fort Boyard, les anglais envoient, le 1^{er} avril, une frégate sur le chantier avec un double objectif : savoir si le fort est assez avancé pour être en état de défense et lui infliger le maximum de dégâts. Constatant, avec joie, que celui-ci est encore inoffensif, les anglais attaquent les ouvriers occupés à travailler sur l'enrochement et font de nombreux dégâts avant de s'enfuir⁴³. Quelques jours plus tard, une imposante flotte anglaise fait son apparition au large de la rade de l'île d'Aix, composée de vingt-six bâtiments de guerre et de cinquante brûlots. L'escadre française, composée de seulement quinze bâtiments de guerre, se réfugie au fond de la rade de l'île d'Aix, adossée à la côte. Les travaux sont suspendus et tout le monde se prépare désormais à défendre. Le 11 avril au soir, préférant éviter le combat frontal malgré leur supériorité numérique, les anglais lancent des navires sans équipages chargés de matières incendiaires ou explosives (brûlots). Les vents et les courants, favorables aux anglais, se chargent de mener ces brûlots droit sur les vaisseaux français, qui ont tout le temps de voir venir sur eux ces engins de la mort. La panique qui gagne les équipages français est indescriptible. Pris au piège au fond de la rade, incapables de manœuvrer dans un si petit périmètre, cinq d'entre eux s'échoueront en essayant de regagner la Charente afin de se mettre à l'abri (*figure IV-32*). Après une nuit à lutter contre les incendies, les survivants vont devoir maintenant affronter les assauts anglais qui détruiront, méthodiquement, les navires échoués et incapables de se défendre. Et pour cela, les anglais disposent d'un point de mouillage très pratique : la longe de Boyard et son nouvel enrochement⁴⁴. Cette cinglante défaite de la marine française scelle le blocus anglais et après la défaite de la bataille navale de Trafalgar en 1805, confirme la nouvelle suprématie anglaise sur les mers [Silvestre, 1912].



Figure IV-32 : « L'attaque des brûlots contre le Regulus », île d'Aix, 11 avril 1809. Dessin de Louis-Philippe Crépin exposé au musée de l'île d'Aix.

Après cette débâcle, Napoléon ordonne la suspension des travaux du fort Boyard et demande maintenant que l'on se concentre sur le fort de la rade de l'île d'Aix et sur le fort Enet. De 1810 à 1814, le génie militaire de Napoléon va donc s'efforcer de reconstruire le fort de la rade et de fortifier le bourg de

⁴³ Dépêches du préfet maritime au ministre de la marine (1803-1870), Série 2A³, Archives du SHD Marine, Rochefort.

⁴⁴ « *The Naval history of great britain* », James William, Londres, Macmillan, tome V.

l'île d'Aix. Ironie de l'histoire, c'est dans ce bourg que vivra Napoléon du 12 au 15 juillet 1815, avant d'embarquer en exil pour l'île de Sainte Hélène. Les travaux du fort Enet débiteront, eux, en septembre 1810, alors que l'Empereur ordonne la modification du projet initial pour des raisons de coût et de délai d'exécution. Le fort est réduit à un demi-cercle tourné vers l'île d'Aix, adoptant ainsi la forme qu'on lui connaît encore aujourd'hui. C'est à cette époque que sera construit le magasin à poudre, encore existant en 2011. Les travaux se termineront en décembre 1811 et le fort est apte à la défense de la rade dès 1812. Mais en 1813, Bonaparte juge que la défense du fort est trop faible et ordonne la construction d'une tour fortifiée à l'intérieur même du fort. Ces travaux ne verront jamais le jour, suite à la chute de Napoléon, marquée par la défaite de Waterloo en juin 1815.

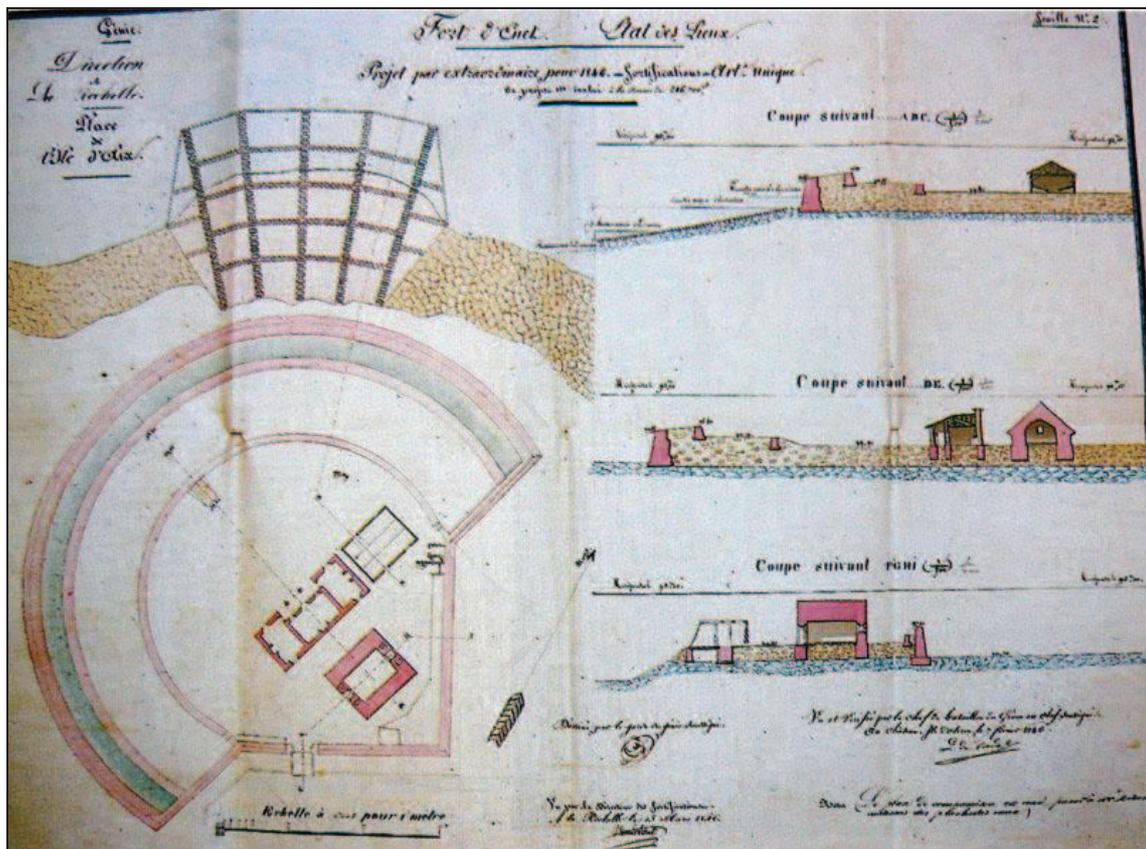


Figure IV-33 : « Fort d'Enet - Etat des Lieux », projet de création d'un deuxième niveau de casemates par De Verdal (1846). Archives du Génie, article 8, section 1 (SHD Terre, Vincennes).

La période post-napoléonienne est plus calme en terme de fortifications du littoral charentais et jusqu'en 1825, on se contentera d'un simple entretien du fort Enet. Mais les assauts répétés de la mer ont provoqué des brèches dans les murs d'enceinte qui menacent maintenant de s'effondrer. Pour limiter l'impact de la houle, un glacis en pierre sèche sera construit tout autour du fort jusqu'en 1834. En 1837, l'amiral Rosamel, ministre de la Marine, charge une commission d'étudier la possibilité de reprendre le chantier du fort Boyard, abandonné depuis presque trente ans. En se rendant sur le site, les ingénieurs de la commission constatent alors que l'enrochement s'est enfoncé d'un mètre depuis 1815. Cependant, ils estiment que le tassement est désormais terminé et concluent à la stabilité et à la solidité actuelle de l'enrochement. Les travaux vont donc pouvoir être relancés en août 1842, sous la direction de l'ingénieur

Garnier. Les plans du fort sont revus et modifiés, mais chose surprenante, malgré la révolution industrielle naissante, les progrès de l'artillerie ne seront pas pris en compte [Taratte, 1866]. Et tandis que le chantier du fort Boyard suit son cours, le ministre de la Guerre ordonne, en 1845, la création d'un deuxième étage au fort Enet, afin de l'armer d'une vingtaine de canons (*figure IV-33*).

En février 1848, Louis-Philippe 1^{er}, roi de France depuis dix-huit ans, est renversé par la troisième révolution française. La République mise en place souhaite alors faire des économies budgétaires et décide que seuls les travaux réellement urgents seront terminés. Les travaux au fort Boyard ralentiront un peu, mais le 14 octobre 1848 marque une transition importante dans la construction du fort. Les travaux d'enrochement et de construction de l'assise du fort sont maintenant achevés, et celle-ci, stable, s'élève désormais à deux mètres au dessus des plus hautes mers. Le chantier passe donc des mains du ministère de la Marine au génie militaire, qui va s'employer à construire le fort en lui-même. Le 10 décembre 1848, Louis-Napoléon Bonaparte (neveu de Napoléon 1^{er}) est élu président de la République française, poste qu'il n'occupera que trois ans avant de réaliser un coup d'état en décembre 1851 afin de devenir Napoléon III, nouvel empereur. En tant qu'empereur, Napoléon III décide que le fort Boyard sera achevé.

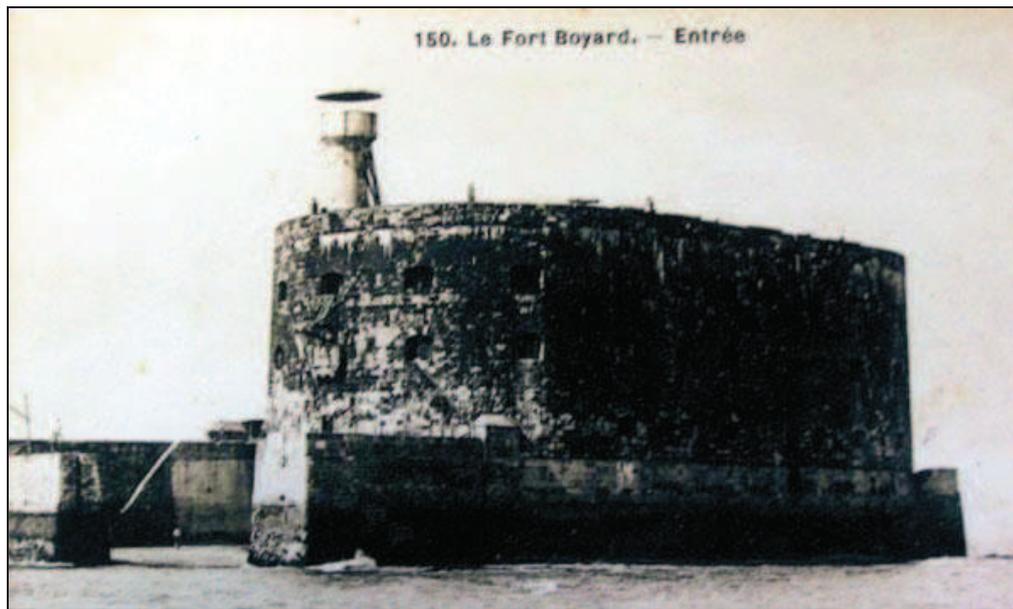


Figure IV-34 : Carte postale du fort Boyard du début du 20^e siècle, lorsque le barachois était encore présent et en état de fonctionner (source : AD17).

Les travaux se poursuivent donc et à la fin de l'année 1852, le rez-de-chaussée est achevé. Puis, en 1857, les deux étages et la terrasse du fort sont à leur tour terminés. Cela marque la fin des travaux, mais pour autant, le procès-verbal d'achèvement du fort n'est pas encore signé. Les premiers canons seront installés dans le fort au cours de l'été 1859, mais de façon symbolique, car plusieurs événements sont venus mettre à mal l'utilité du fort avant même son achèvement. En effet, depuis 1854, les anglais et les français sont devenus des alliés, diminuant ainsi considérablement le risque d'une attaque maritime

dans la rade de l'île d'Aix. Enfin, en mars 1858, la France a adopté une artillerie rayée, dont les canons ont maintenant une portée de 3 000 m. Par conséquent, les forts de la rade (île d'Aix) et des Saumonards (île d'Oléron) sont capables, à eux seuls, de défendre l'accès à la rade de l'île d'Aix en croisant leurs tirs, rendant de ce fait, le fort Boyard inutile. Conséquence de cette révolution de l'artillerie, des expériences de tir seront réalisées sur le fort Enet en 1863 et 1864 afin de vérifier sa résistance aux nouveaux canons. Les essais se révéleront non-concluants et le fort ressortira fortement dégradé de ces essais de tir français. Pendant ce temps, au fort Boyard, les travaux ont repris afin de construire un brise-lame à l'avant du fort (côté océan) et un havre de débarquement à l'arrière (côté continent). Le chantier, débuté en 1860, se poursuivra jusqu'en 1866, date à laquelle le barachois⁴⁵ (figure IV-34) et l'éperon rocheux seront terminés. Et le 6 février 1866, Courbebaisse, directeur des travaux hydrauliques du port de Rochefort, peut enfin signer le procès-verbal d'achèvement du fort Boyard, quarante-trois ans après l'immersion de la première pierre de l'encrochement [Chagneau, 1996].



Figure IV-35 : A gauche : photographie aérienne actuelle du fort Enet (Francis Leroy). A droite : photographie actuelle du fort Boyard.

Toujours en 1866, plusieurs travaux et modifications seront entrepris au port de l'île d'Aix. Si celui-ci n'a jamais eu vocation à accueillir des navires de commerce, il n'en reste pas moins que l'accostage y est difficile et dangereux pour les quelques pêcheurs qui y vivent. De 1869 à 1875, une jetée est donc construite à l'emplacement de l'actuelle jetée Sainte-Catherine, afin d'assurer un accostage plus abrité de la houle. Le fort Boyard n'ayant plus d'utilité militaire, il faut désormais lui trouver d'autres utilités et les ingénieurs hydrographes en ont peut-être une. Le fort Enet accueille un marégraphe depuis 1859, mais celui-ci connaît des problèmes d'envasement régulier, ce qui pousse Bouquet de la Grye, ingénieur hydrographe, à rechercher un autre emplacement pour réaliser ces mesures du niveau de la mer. Le fort Boyard apparaît alors comme une solution idéale, car suffisamment au large pour ne pas être soumis à cet envasement. Des travaux sont donc réalisés au fort Boyard, en 1869, afin d'aménager un puits marégraphe dans la jetée nord du barachois [Bouquet de la Grye, 1869]. Mais les hydrographes ne sont pas les seuls à s'intéresser au fort Boyard et, tout comme le fort Enet, il sera transformé en prison politique de 1871 à 1872 afin de détenir 200 à 300 communards, dont Henri Rochefort [Chagneau, 1996].

⁴⁵ Le barachois désigne un port d'accès difficile, bordé de rochers et découvrant à marée basse.

Le 3 juin 1873, le marégraphe du fort Enet est arrêté et démonté afin d'être transféré sur le fort Boyard (*figure IV-35*), sous la direction de Bouquet de la Grye. L'installation et les réglages du marégraphe prendront un peu plus de deux mois, et le 11 août 1873, les premières mesures du niveau de la mer sont réalisées.

En 1880, la tour de vigie du fort Boyard se transforme en phare afin de guider les bateaux entrant en rade de l'île d'Aix. En 1887, suite à un regain de tension avec l'Angleterre, on ordonne de réaménager entièrement le fort Enet, afin qu'il puisse résister aux tirs de l'artillerie rayée. De nombreuses casemates seront détruites à cette occasion, et d'autres seront comblées de terre. Heureusement, le fort n'aura pas à subir d'attaques. En 1905, une dernière modernisation des plates-formes du fort Enet sera réalisée par le génie militaire, avant que la maintenance des forts Enet et Boyard soit arrêtée en 1913. Cette même année, les forts seront déclassés et laissés à l'abandon [Faucherre, 1995].

Pendant la seconde guerre mondiale, le fort Boyard sert de cible d'exercice aux troupes allemandes, qui, heureusement, n'utilisèrent pas d'artillerie lourde et ne firent que peu de dégâts. Le 1^{er} février 1950, il est inscrit à l'inventaire supplémentaire des monuments historiques (le fort Enet attendra le 19 décembre 1994 pour y être inscrit). Au début des années soixante, les fort Enet et Boyard sont mis en vente aux enchères. Ce sont des particuliers qui se portent acquéreurs, mais contrairement au fort Enet, le fort Boyard ne sera pas protégé des pilliers et du vandalisme. Le fort Boyard reste donc à l'abandon et accessible à tous par la mer. En 1966, le film de Robert Enrico, « Les aventuriers », sort le fort Boyard de l'ombre et les acteurs Lino Ventura et Alain Delon contribuent grandement à sa renommée renaissante. Les projets, des plus simples aux plus insolites, se bousculent alors pour redonner une utilité au fort. Mais aucun d'eux ne réussira à convaincre le propriétaire de vendre son fort, jusqu'en 1988, date à laquelle le fort est racheté par la société de production télévisée JAC (Jacques Antoine et Cie), qui le revend immédiatement au conseil général de la Charente-Maritime pour la somme symbolique d'un franc. En devenant le nouveau propriétaire du fort, le conseil général s'engageait à financer les travaux de restauration, à entretenir le fort et à accorder un bail de location exclusif à la société JAC. Cet accord marque le début d'une nouvelle vie pour le fort, une vie entièrement médiatisée. Le fort Boyard accueillera désormais un jeu d'aventures télévisé. Mais avant cela, de nombreux travaux sont nécessaires pour remettre le fort en état. Les années 1989 et 1990 seront donc notamment consacrées au grand nettoyage du fort, à la construction de la passerelle en bois du premier étage et à la mise en place de la plate-forme extérieure de débarquement, le barachois ayant complètement été détruit. C'est ainsi que le 30 juin 1990 eut lieu l'enregistrement de la première émission « Les clés de fort Boyard ».

En 1991, une plate-forme destinée aux hélicoptères est mise en place sur la terrasse du fort. Puis, de février à avril 1996 a lieu la première grande restauration du fort. L'objectif principal est d'étanchéifier la partie nord de la terrasse, comprenant cinq plates-formes d'artillerie. Les plates-formes sont donc entièrement démontées afin de faciliter la pose d'une couche étanche, puis remontées à l'identique avec

les pierres d'origine (*figure IV-36*). On profitera également des travaux pour reconstruire entièrement le glacis (muret en brique rose) entourant la terrasse du fort. L'ancien glacis est entièrement démoli et les briques roses seront presque toutes remplacées ; seule une infime partie du glacis est reconstruite avec les briques d'origine, comme « témoin ». Le petit escalier, interrompant le glacis, et menant à un repère géodésique de l'IGN fut détruit pendant ces travaux.



Figure IV-36 : Recomposition des plates-formes de la terrasse du fort Boyard après avoir posé une couche d'étanchéité en dessous. Les pierres reposées sont les pierres d'origine et la marge de tolérance est d'un centimètre par rapport aux cotes initiales [Cettour, 1999].

En septembre 1998 s'ouvrit la plus grande période de restauration du fort Boyard. Les travaux, qui se termineront en avril 1999 pour les besoins des tournages, ont pour objectif de renforcer l'étanchéité de l'ensemble du fort et de restaurer sa terrasse, ainsi que tous les parements extérieurs. Pour réaliser ces travaux d'une grande ampleur, une plate-forme de travail fut installée dans la cour du fort, à hauteur de la terrasse (*figure IV-37*). L'ensemble des pierres et des pavés composant la terrasse fut démonté et remonté, avec une marge de tolérance d'un centimètre par rapport aux cotes de départ. Le but étant de restaurer le fort tout en gardant les plans et les dimensions historiques, ainsi que les matériaux d'origine. Par exemple, sur la terrasse, seuls trois à cinq mètres carrés de pavés sont remplacés, car trop dégradés [Cettour, 1999].

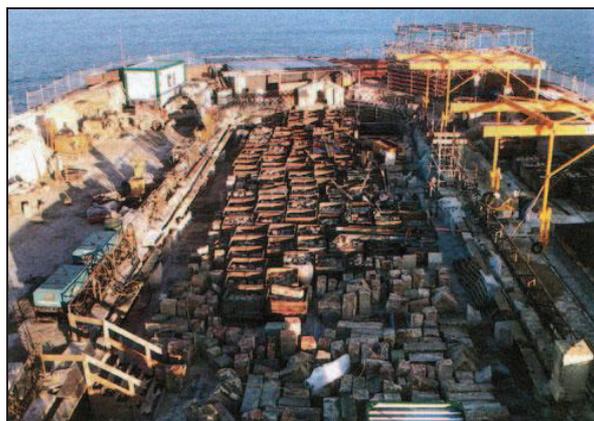
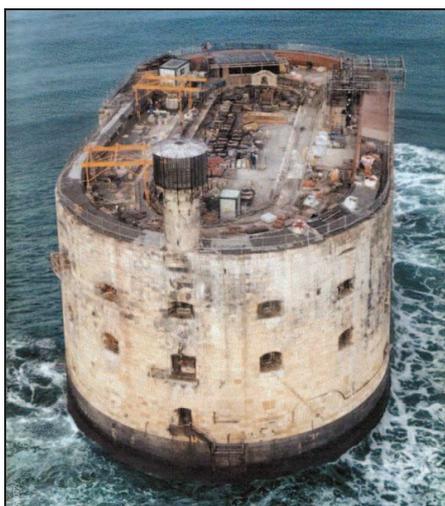


Figure IV-37 : Vue d'ensemble (à gauche) et vue de la terrasse (à droite) du fort Boyard lors du chantier de restauration de 1998-1999 [Cettour, 1999]

Dans le même temps, à l'île d'Aix, le développement du tourisme et des navettes de transport de passagers a rendu la jetée trop petite. Celle-ci est donc entièrement réaménagée et agrandie entre 1998 et 1999. Aujourd'hui elle porte le nom de jetée Sainte-Catherine (*figure IV-38*). Quant au fort Enet, des

travaux de restauration sont régulièrement réalisés par les propriétaires actuels, notamment suite à la tempête de 1999 où un pan du mur d'enceinte s'est effondré, et très récemment, au cours de l'été 2008 où les pilastres d'entrée du fort (sur lesquels étaient gravés des repères de marée) ont été en partie démolis et reconstruits.



Figure IV-38 :
Photographie aérienne
actuelle du fort de la
rade, du port de l'île
d'Aix et de la jetée
Sainte-Catherine
(Philippe Dufour).

IV.2.2. Suivi historique de la position du zéro hydrographique

Au cours des 19^e et 20^e siècles, plusieurs campagnes hydrographiques ont été menées dans la rade de l'île d'Aix, au cours desquelles des sondages hydrographiques étaient effectués (figure IV-39). Or, dès 1829, Beautemps-Beaupré indique que « la première chose dont on doit s'occuper, au début d'une campagne, sur une côte où les eaux de la mer changent continuellement de niveau par l'effet de la marée, c'est de placer un certain nombre d'échelles divisées par pieds et pouces, sur lesquelles on observe ces changements; attendus que c'est au moyen d'observations de ce genre que l'on peut, lors de la rédaction définitive des travaux, réduire au niveau des plus basses mers les sondes faites à toutes les heures du jour et de la marée. » [Beautemps-Beaupré & Daussy, 1829]. Ce zéro de réduction des sondes deviendra ensuite le zéro des cartes marines, ou zéro hydrographique. En principe, une fois déterminé, le zéro hydrographique adopté a une vocation de pérennité. Mais il se trouve que la définition de ce zéro a évolué au cours du temps et des missions hydrographiques. Voici donc l'historique complet de la description du zéro hydrographique de la rade de l'île d'Aix, utilisé aussi bien à l'île d'Aix qu'aux forts Enet et Boyard.

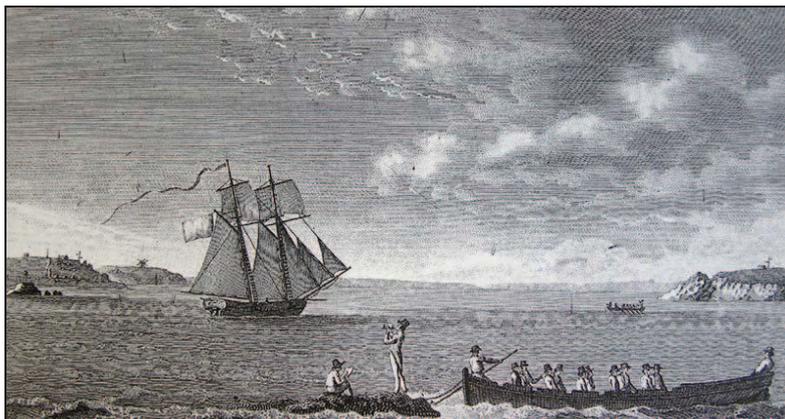


Figure IV-39 : Gravure
réalisée par Schroeder, que
l'on retrouve dans la
première partie du « Pilote
français » de Beautemps-
Beaupré publié en octobre
1823. Elle représente les
ingénieurs hydrographes
au travail lors d'une
campagne hydrographique
menée dans la rade de
Brest. Archives du SHOM.

- **En 1809-1810**, lors de la campagne hydrographique entreprise par Raoul, Capitaine de Frégate, le zéro de réduction des sondes est situé au niveau de la graduation 6 Pieds 0 pouce de l'échelle de marée installée dans le port de l'île d'Aix, comme en témoigne les écrits retrouvés dans un document d'archive : « *le point le plus bas est à 6 Pieds 0 pouces, le bord du palier de l'escalier du quai répond à 22 Pieds 0 pouces de cette échelle* » (figure IV-40). Nous pouvons donc en déduire que le zéro de réduction des sondes utilisé en 1809-1810 est situé à 16 Pieds, soit 5,197 m⁴⁶, en dessous du bord du palier de l'escalier du quai de l'île d'Aix [Beautemps-Beaupré, 1824a].

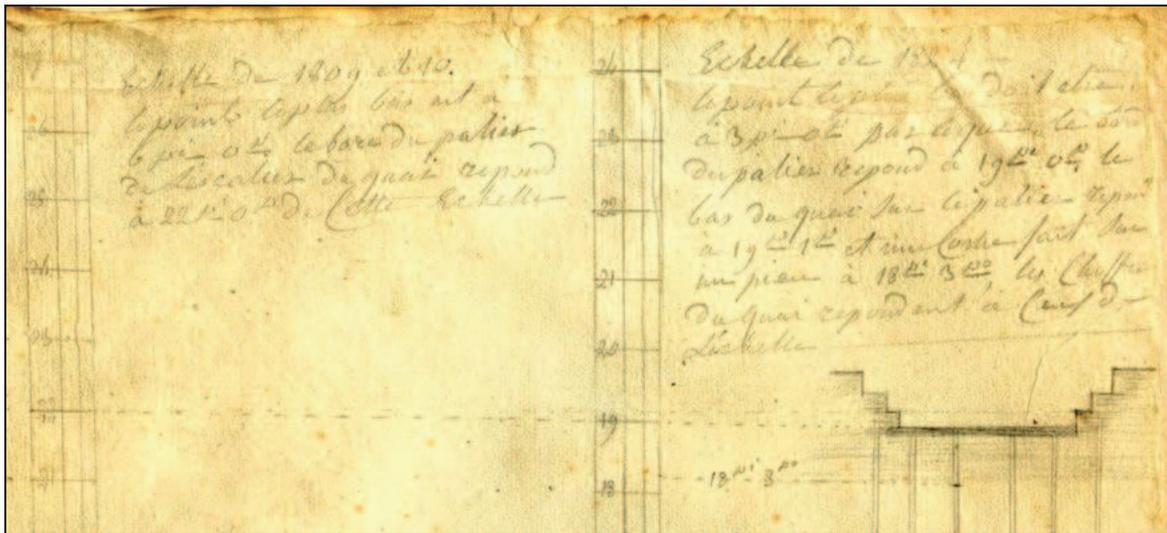


Figure IV-40 : Annotations et dessins extraits du cahier de marées de l'île d'Aix de 1824 [Beautemps-Beaupré, 1824a]. Les zéros de réduction des sondes utilisés en 1809 et 1824 y sont définis.

- **En 1824**, lors d'une campagne de sondage hydrographique comptant pour la réalisation du Pilote français n°23, Beautemps-Beaupré, ingénieur hydrographe en chef de la Marine, va redéfinir ce zéro. Pour Beautemps-Beaupré, le zéro de réduction des sondes doit correspondre « *au niveau des plus basses mers observées* ». Cependant, les annotations retrouvées dans le registre des observations des hauteurs d'eau de 1824 sont contradictoires au sujet du zéro utilisé [Beautemps-Beaupré, 1824a].

Par exemple, sur une des pages de ce registre, on peut lire que « *le point de réduction est à 3 Pieds 0 pouces au dessus de zéro, c'est-à-dire qu'il faudra ôter 3 Pieds des quantités observées pour réduire les sondes* » (figure IV-41). L'information est précise, mais sur la même page, on peut retrouver deux autres informations qui insinuent un doute sur le véritable zéro utilisé : « *le 26 août, la mer est descendue au point de 2 Pieds 8 pouces de l'échelle* » et « *la réduction adoptée définitivement est 2 Pieds 6 pouces à ôter de l'échelle de l'île d'Aix* ». Dans le même registre, mais sur une autre page, on peut lire : « *Le point de réduction de cette échelle est la division 3 Pieds 0 pouces, c'est-à-dire que dans les plus grandes marées l'eau descendrait à cette division* ». De même, Beautemps-Beaupré indique la conversion à utiliser entre les échelles de l'île d'Aix et du port de La Rochelle : « *Il résulte des observations faites à la balise de la digue de Richelieu que le point de réduction de l'échelle de l'île*

⁴⁶ Rappel : 1 Pied = 32,484 cm ; 1 pouce = 2,707 cm ; 1 ligne = 0,2256 cm

d'Aix, c'est-à-dire la division 3 Pieds 0 pouces de cette échelle, correspond à la division 2 Pieds 0 pouces de l'échelle du bassin du port de La Rochelle, ainsi donc il faudra ajouter 2 Pieds aux hauteurs observées sur l'échelle de La Rochelle pour réduire nos sondes. »

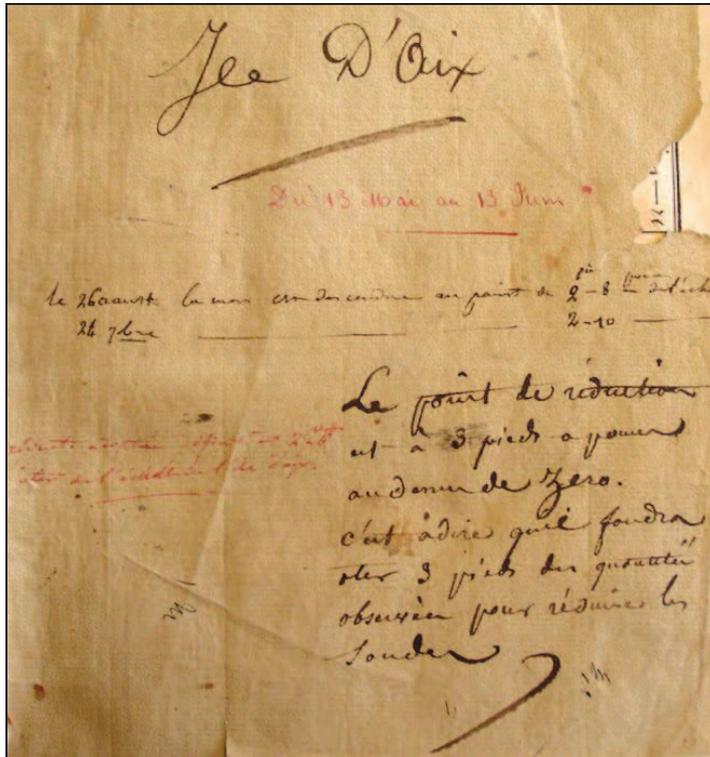


Figure IV-41 : Annotations extraites du cahier de marées de l'île d'Aix de 1824 [Beautemps-Beaupré, 1824a]. Les informations sur le zéro de réduction des sondes utilisé sont contradictoires.

Pour savoir quelle est la bonne définition du zéro de Beautemps-Beaupré, il faut se reporter au *Pilote Français*⁴⁷. Il y est en effet indiqué que « *Les élévations des eaux sont exprimées en Pieds de France, et rapportées au niveau de la plus basse mer qui a été observée à l'île d'Aix en 1824.* ». Or, la plus basse mer observée lors de cette campagne est celle du 26 août 1824, à 10h30 (temps solaire vrai). La valeur indiquée dans le *Pilote Français*, pour cette basse mer, est 0 Pieds 0 pouces, alors que la valeur mesurée à l'échelle, d'après le registre, est 2 Pieds 8 pouces. Nous pouvons en conclure que le zéro de réduction des sondes utilisé par Beautemps-Beaupré est à la graduation 2 Pieds 8 pouces de l'échelle de marée de 1824. En fait, les informations retrouvées suivent une certaine logique temporelle. Avant le début de la campagne hydrographique de 1824, Beautemps-Beaupré a simplement repris le zéro hydrographique défini en 1809 par Raoul et l'a reporté sur son échelle de marée, nouvellement installée dans le port de l'île d'Aix. Suivant ce report, il en a déduit que le zéro devrait être à la graduation 3 Pieds de son échelle, c'est-à-dire que la plus basse mer observée ne descendrait pas en dessous de cette graduation. Or, lors des observations effectuées en 1824, il se trouve que la mer est descendue plus bas, à 2 Pieds 8 pouces de son échelle. Il a donc décidé de redéfinir le zéro hydrographique, conformément à cette observation.

⁴⁷ « *Pilote Français - Marées depuis la cote de Belgique jusqu'à la baie de Saint-Jean de Luz (1816-1838). Cotes Septentrionales et Occidentales, 72 ports* ». Beautemps-Beaupré. Archives du SHOM, cote D255.

Afin de rapporter ce zéro à un repère terrestre, Beautemps-Beaupré a pris le soin d'indiquer que, sur l'échelle de marée de 1824, « *le point le plus bas doit être à 3 Pieds 0 pouce parce que le bord du palier répond à 19 Pieds 0 pouce, le bas du quai sur ce palier répond à 19 Pieds 1 pouce, les chiffres du quai répondent à ceux de l'échelle.* » (figure IV-42). D'après les dessins annotés par Beautemps-Beaupré, et par cohérence avec l'échelle de 1809, nous retiendrons que le bord du palier correspond à la graduation 19 Pieds 0 pouce de l'échelle, c'est-à-dire que le zéro de réduction des sondes adopté par Beautemps-Beaupré en 1824 est situé à 16 Pieds 4 pouces, soit 5,306 m, en dessous du bord du palier du port de l'île d'Aix [Beautemps-Beaupré, 1824a].

- **En 1858**, Delbalat, ingénieur hydrographe de 2^e classe de la Marine, a souhaité reprendre la même définition du zéro que Beautemps-Beaupré. Mais il est surprenant de constater que, selon Delbalat, le zéro de 1824 est situé à 16 Pieds 7 pouces, soit 5,386 m, en dessous du bord du palier du port de l'île d'Aix [Delbalat *et al.*, 1860]. Cette définition diffère de 3 pouces (environ 8 cm) de celle de Beautemps-Beaupré. En effet, pour Delbalat, le bord du palier correspond à la graduation 19 Pieds 1 pouce de l'échelle de 1824, et le zéro hydrographique correspond à la graduation 2 Pieds 6 pouces (figure IV-42). Il est possible que Delbalat ait commis une erreur dans la retranscription de la définition du zéro de Beautemps-Beaupré, ce qui peut se comprendre aisément au vu de la confusion possible autour de sa définition (voir paragraphe ci-dessus).

Malgré lui, Delbalat a donc redéfini le zéro hydrographique de la rade de l'île d'Aix en le situant à 5,386 m en dessous du palier du port de l'île d'Aix. Mais Delbalat a également étendu géographiquement sa réalisation matérielle et son accès, par rapport à deux autres repères terrestres : il le situe aussi à 7,728 m en dessous du seuil de la porte d'entrée du fort d'Enet et à 3,61 m en contrebas de l'arête supérieure du mur du quai de Port des Barques.

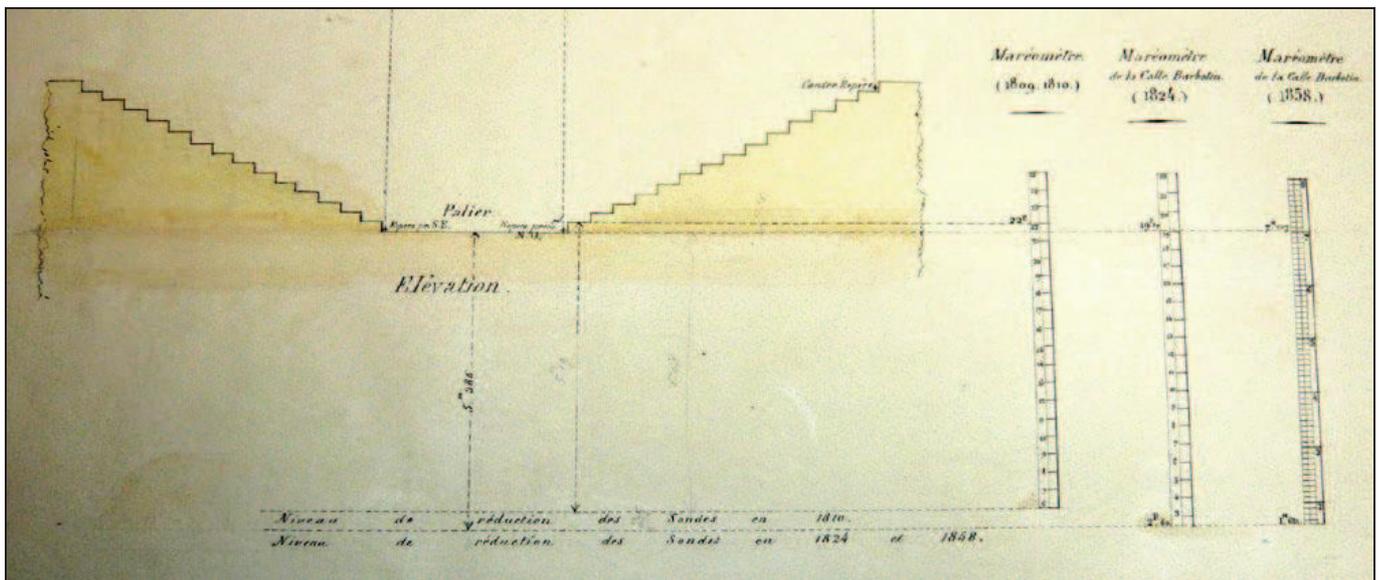


Figure IV-42 : Dessin représentant la relation existante entre le palier du port de l'île d'Aix et les échelles de marée de 1809, 1824 et 1858 [Delbalat *et al.*, 1860].

- **En 1868**, Bona-Christave, Capitaine de vaisseau et directeur du port de Rochefort, réalise un travail de synthèse sur les plans de nivellement, les échelles de marée et les repères existants dans la rade de l'île d'Aix et à Rochefort. Pour cela, il se base sur les résultats des missions précédentes, et notamment celle de Delbalat. Ainsi, il n'est pas surprenant de retrouver la même erreur quant à la définition du zéro de Beautemps-Beaupré : « *La surface de niveau choisie par Mr Beautemps-Beaupré en 1824 a été placée par lui à 16 Pieds 7 pouces, ou 5,386 m en contrebas du palier de l'escalier qui est dans le fond du port de l'île d'Aix. Cette surface a été adoptée en 1858 par Mr Delbalat, pour la rade de l'île d'Aix.* ». De plus, il ajoute : « *Une série d'observations comparatives aux échelles de l'île d'Aix et d'Enet du 9 au 21 septembre 1858 fait passer cette surface de niveau à 2,278 m du niveau Delbalat. Une deuxième série d'observations directes faites à l'île d'Aix, et un nivellement entre l'île d'Aix et Enet, ont donné en 1860 2,272 m. Les observations de Mr Bouquet de la Grye en septembre 1864 ont donné 2,265 m. La cote Delbalat du niveau Beautemps-Beaupré serait donc de 2,273 m (en moyenne)* ». Le niveau Delbalat étant défini comme le plan passant à dix mètres en contrebas du seuil de la porte d'entrée du fort d'Enet [Delbalat *et al.*, 1860], on peut en déduire que le zéro de réduction des sondes de Delbalat est situé à 7,727 m en dessous du seuil de la porte d'entrée du fort d'Enet, selon Bona-Christave.

Bona-Christave précise aussi que la cote Bourdalouë du palier de la porte d'entrée du fort Enet est de + 4,442 m NGF-Bourdalouë. Le zéro de réduction des sondes de Delbalat est donc estimé à - 3,285 m NGF- Bourdalouë. Il est également indiqué que « *en août 1867, Mr Bouquet de la Grye a mesuré la distance du palier de l'escalier de l'île d'Aix* » au repère Bourdalouë « *scellé au mur de soutènement du quai entre les mêmes escaliers et il a trouvé cette distance égale à 1,011 m.* » Nous pouvons en déduire que le zéro de réduction des sondes de Delbalat est situé à 6,397 m en dessous de ce repère Bourdalouë [Bona-Christave, 1868].

- **En avril 1876**, Alquier, directeur de l'Observatoire de la Marine, publie une note sur les marées dans le port de Rochefort, et reprend, mot pour mot, l'étude de Bona-Christave concernant les cotes du zéro hydrographique de la rade de l'île d'Aix [Alquier, 1876].

- **En 1876**, Bouquet de la Grye, ingénieur hydrographe de 1^{ère} classe, publie une étude hydrographique de la baie de La Rochelle, très complète, dans laquelle il indique de nombreuses cotes de nivellement, dont la cote du « *zéro adopté pour l'île d'Aix et pour les sondes faites en 1824 dans le Pertuis* : - 3,256 m NGF-Bourdalouë. » [Bouquet de la Grye & Hatt, 1876].

- **En 1877**, Bouquet de la Grye, indique : « *Il résulte de nombreuses constatations que le zéro pris par Mr Beautemps-Beaupré à l'île d'Aix est à la cote - 3,26 m du nivellement Bourdalouë, le zéro de l'échelle placée en 1824 à l'île d'Aix est à la cote - 4,069 m.* »⁴⁸.

- **En 1880**, Lefebvre, ingénieur en chef des ponts et chaussées et ancien directeur des travaux hydrauliques à Rochefort, publie une note sur les variations de la marée à Rochefort, à Enet et au fort Boyard et précise que le zéro de réduction des sondes de la rade est à la cote - 3,260 m NGF-Bourdalouë [Lefebvre, 1880].

- **En 1950**, d'après un carnet (sans cote) retrouvé dans les archives du SHOM, le zéro hydrographique est situé à 7,73 m en dessous du palier de la jetée du fort d'Enet et à la cote - 3,88 m NGF-Lallemand.

- **En 1960**, Mannevy, ingénieur hydrographe en chef de 2^e classe, change de nouveau la définition du zéro hydrographique de la rade de l'île d'Aix. Par concordance avec le zéro hydrographique du Vieux port de La Rochelle, il estime que la bonne définition du zéro de la rade de l'île d'Aix est 18 cm plus haute que la précédente. Il indique, dans la fiche de marée de 1960 : « *Jusqu'en 1960, le zéro de réduction de l'île d'Aix était - 3,88 m NGF-Lallemand. Après la mission de 1960, un nouveau zéro de réduction a été choisi qui est à - 3,70 m NGF-Lallemand.* » [Mannevy, 1971]. Il est intéressant de noter que la définition choisie par Mannevy correspond assez bien à la définition originale du zéro de la rade de l'île d'Aix donnée par Raoul en 1809. Lors de cette mission hydrographique, des opérations de nivellement de précision ont également été effectuées par Plouviez, ingénieur hydrographe principal, et plusieurs repères hydrographiques historiques ont été cotés. Ainsi, le repère de nivellement scellé dans le mur du palier du port de l'île d'Aix est à + 2,5595 m NGF-Lallemand, et au fort Enet, le repère NGF-42, scellé sur le pilier ouest de l'entrée du fort, est indiqué à + 4,3952 m NGF-Lallemand (à noter que ce repère a servi de point de référence, et n'a pas été coté) [Plouviez, 1960].

- **En 1964**, Ortais, ingénieur hydrographe en chef de 2^e classe, réalise une nouvelle campagne hydrographique aux abords du littoral charentais et indique que, pour la rade de l'île d'Aix, « *le zéro des sondes fut pris, comme en 1960, à la cote - 3,70 m NGF.* »⁴⁹.

- **En 1983**, Guyon, ingénieur principal de l'armement du SHOM, réalise une mission hydrographique et change, lui aussi, la définition du zéro hydrographique de la rade de l'île d'Aix. Il le situe à 6,370 m en dessous du repère fondamental scellé au dessus du palier du port de l'île d'Aix (cote : + 2,560 m NGF-Lallemand et + 2,720 m NGF-IGN69) et à 7,760 m en dessous d'un nouveau repère

⁴⁸ Annotation dans l'ouvrage : « *Côtes de France - Marées, 1824 (25)* », Beautemps-Beaupré, Archives du SHD Marine, Rochefort. Cote 7JJ 362.

⁴⁹ Annales hydrographiques n°738, 4^e série, tome 17, page 279. Ortais, MHF, 1964. Archives du SHOM.

scellé par le SHOM dans la partie verticale de la digue Sainte Catherine (cote : + 3,950 m NGF-Lallemand et + 4,110 m NGF-IGN69). Par conséquent, ce nouveau zéro est situé à la cote - 3,810 m NGF-Lallemand et - 3,650 m NGF-IGN69⁵⁰. Encore une fois, on s'aperçoit que cette définition n'est pas nouvelle : elle correspond en fait à la définition de Beautemps-Beaupré de 1824. Cependant, Guyon ne s'est pas appuyée sur la définition de Beautemps-Beaupré : sa définition de 1983 repose sur la concordance des marégrammes de La Pallice et de l'île d'Aix sur 70 jours.

La définition du zéro hydrographique est conventionnelle (cf. *I.3.1.5. Notion de zéro hydrographique*) et en principe, une fois déterminé, il a une vocation de pérennité. Il est donc surprenant de constater que ce zéro ait été re-déterminé plusieurs fois dans la rade de l'île d'Aix, et notamment au cours du 20e siècle. Nous avons signalé ces constatations à nos partenaires du SHOM en 2009, et suite à ces observations, la fiche des références altimétriques maritimes de la zone Nord Gascogne a été modifiée.

- **En 2010**, le SHOM a modifié la fiche des références altimétriques maritimes afin de reprendre la définition du zéro hydrographique adopté par Mannevy en 1960, et correspondant à celle de Raoul de 1809. Ce zéro est donc situé à - 3,540 m NGF-IGN69. Parallèlement, notre équipe de l'UMR 6250 LIENSs a réalisé un nivellement de plusieurs repères de l'île d'Aix. En prenant comme point de départ, le repère O.O.K3-196, dont l'altitude est indiquée à + 7,374 m NGF-IGN69⁵¹, le repère fondamental scellé au-dessus du palier du port de l'île d'Aix est à la cote + 2,719 m NGF-IGN69 et le repère scellé par le SHOM dans la partie verticale de la digue Sainte Catherine est à la cote + 4,082 m NGF-IGN69. Le zéro hydrographique actuel de la rade de l'île d'Aix est donc situé à 6,259 m en dessous du repère fondamental scellé au dessus du palier du port de l'île d'Aix et à 7,622 m en dessous du repère scellé par le SHOM dans la partie verticale de la digue Sainte Catherine. De même, nous pouvons relier ce zéro hydrographique aux repères du fort Enet, suite au nivellement réalisé par notre équipe en 2009 [Gouriou & Tiphaneau, 2010b]. Le repère O.O.K3-42 est à la cote + 4,542 m NGF-IGN69 et le seuil de la porte d'entrée du fort, repère principal de Delbalat, est à la cote + 4,007 m NGF-IGN69. Le zéro hydrographique actuel de la rade de l'île d'Aix est donc situé à 8,082 m en dessous du repère O.O.K3-42 et à 7,547 m en dessous du seuil de la porte d'entrée du fort Enet.

Afin de visualiser l'évolution de la détermination du zéro hydrographique, nous avons rapporté sa cote à plusieurs repères terrestres (*tableau IV-8*). Cette observation de l'évolution dans le temps du zéro hydrographique n'a de sens que si les repères choisis ont été stables au cours du temps, ce qui est le cas ici, comme nous le verrons au paragraphe V.3.2.2.1.1.a.

⁵⁰ « Fiche d'observatoire de marée de l'île d'Aix, n°351 », MHA, Guyon, 28 avril 1983. Archives du SHOM.

⁵¹ <http://geodesie.ign.fr/fiches/>, consulté le 1^{er} décembre 2011.

Année	Position du zéro hydrographique par rapport au				
	Seuil de la porte d'entrée du fort Enet	Palier du port de l'île d'Aix	Repère Bourdalouë du port de l'île d'Aix	Repère O.O.K3-42 (fort Enet)	NGF-Lallemand
1809	-	- 5,197 m	-	-	-
1824	-	- 5,306 m	-	-	-
1858	- 7,728 m	- 5,386 m	-	-	-
1868	- 7,727 m	- 5,386 m	- 6,397 m	-	-
1950	- 7,73 m	-	-	-	- 3,88 m
1960	-	-	- 6,259 m	- 8,095 m	- 3,70 m
1983	-	-	- 6,370 m	-	- 3,81 m
2010	- 7,547 m	- 5,204 m	- 6,259 m	déplacé	- 3,70 m

Tableau IV-8 : Récapitulatif des différentes cotes adoptées pour le zéro hydrographique de l'île d'Aix, de 1809 à 2010. Le double trait rouge correspond à la redéfinition du zéro hydrographique.

A partir des résultats du *tableau IV-8* ci-dessus, nous pouvons en déduire l'évolution de la situation relative du zéro hydrographique de la rade de l'île d'Aix, depuis 1809 (*figure IV-43*). Pour rappel, le zéro hydrographique utilisé au fort Boyard est celui de l'île d'Aix (cf. V.4.4.3.3. Corrections verticales).

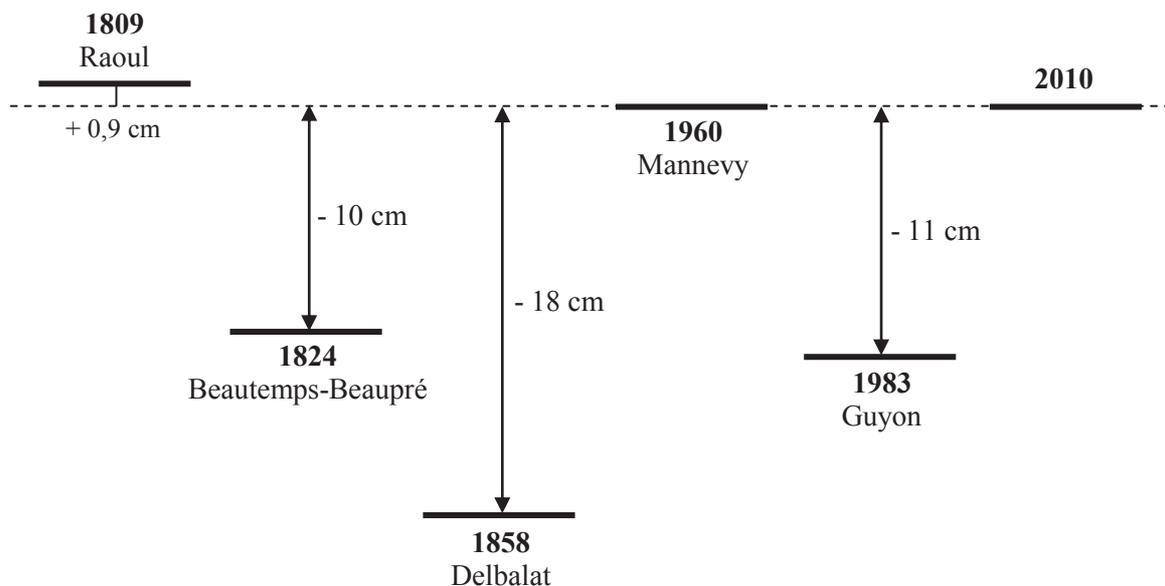


Figure IV-43 : Situation relative des différents zéros hydrographiques utilisés dans la rade de l'île d'Aix de 1809 à 2010

IV.2.3. Repères inventoriés : aperçu

IV.2.3.1. A l'île d'Aix

Un historique de la cote des principaux repères de nivellement et/ou de marée présents sur l'île d'Aix a été réalisé. Pour chacun de ces repères, une fiche a été produite regroupant le nom du repère, la période d'existence, le type de repère, des photographies, une description ainsi que toutes les informations recueillies sur leurs cotes historiques. L'ensemble de ces fiches est disponible en annexe. Pour une question de clarté, nous ne présentons ici, qu'une vue d'ensemble précisant l'emplacement de chaque repère (*figure IV-44*), ainsi que la fiche du repère principal de l'île d'Aix.



Figure IV-44 : Localisation des différents repères de nivellement et/ou de marée à l'île d'Aix. Photographies aériennes récentes de l'île d'Aix (à gauche) et de son fort de la rade (à droite), modifiées (© 2011 - IGN).

REPERE O.O.K3-195B (existant)				
Période : 1867 à aujourd'hui			Type : Repère Bourdalouë	
				
Description : Repère fondamental du SHOM pour la détermination du zéro hydrographique actuel. Repère scellé au dessus du palier de l'escalier situé au fond du vieux port de l'île d'Aix.				
Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
1867	Repère du nivellement général	+ 3,119 m	NGF-Bourdalouë	« Année 1868, Plans de nivellement, Echelle de marées, Seuils, Repères. Travail de M. Bona-Christave, Capitaine de vaisseau, directeur du port », archives du SHD Rochefort, cote 2D45t
1868	-	+ 3,15 m	NGF-Bourdalouë	« Cote Leclère », Annales hydrographiques 1971, pages 412 à 415 (MHCFA), Mannevy 1960, archives du SHOM, cote TAP/19
		+ 2,55 m	NGF-Lallemand	
1960	-	+ 2,56 m	NGF-Lallemand	Annales hydrographiques 1971, pages 412 à 415 (MHCFA), Mannevy 1960, archives du SHOM, cote TAP/19
	SH5	+ 2,5595 m	NGF-Lallemand	« Nivellement Cholesky - Rattachements divers, cahier n°2/3 », MHCFA, Plouviez, 1960, archives du SHOM, cote SH2-886
	C1	+ 2,560 m	NGF-Lallemand	« Fiche d'observation de la marée de l'île d'Aix n°352 », MHCFA, Mannevy, 1960, archives du SHOM
1983	A	+ 6,37 m	Zéro hydrographique	« Fiche d'Observatoire de Marée de l'île d'Aix, n°351 », MHA, Guyon, 28 avril 1983, archives du SHOM
		+ 2,56 m	NGF-Lallemand	
		+ 2,72 m	NGF-IGN69	
2010	A	+ 2,719 m	NGF-IGN69	UMR 6250 LIENSs
2011	O.O.K3-195b	+ 2,7197 m	NGF-IGN69	IGN - Triplet

IV.2.3.2. Au fort Enet

IV.2.3.2.1. Repères de nivellement

Comme pour l'île d'Aix, un historique de la cote des principaux repères de nivellement et/ou de marée présents au fort Enet de 1860 à nos jours a été réalisé. L'ensemble des fiches produites est disponible en annexe. Nous ne présentons ici, qu'une vue d'ensemble précisant l'emplacement de chaque repère (*figure IV-45*), ainsi que la fiche du repère principal du fort Enet.

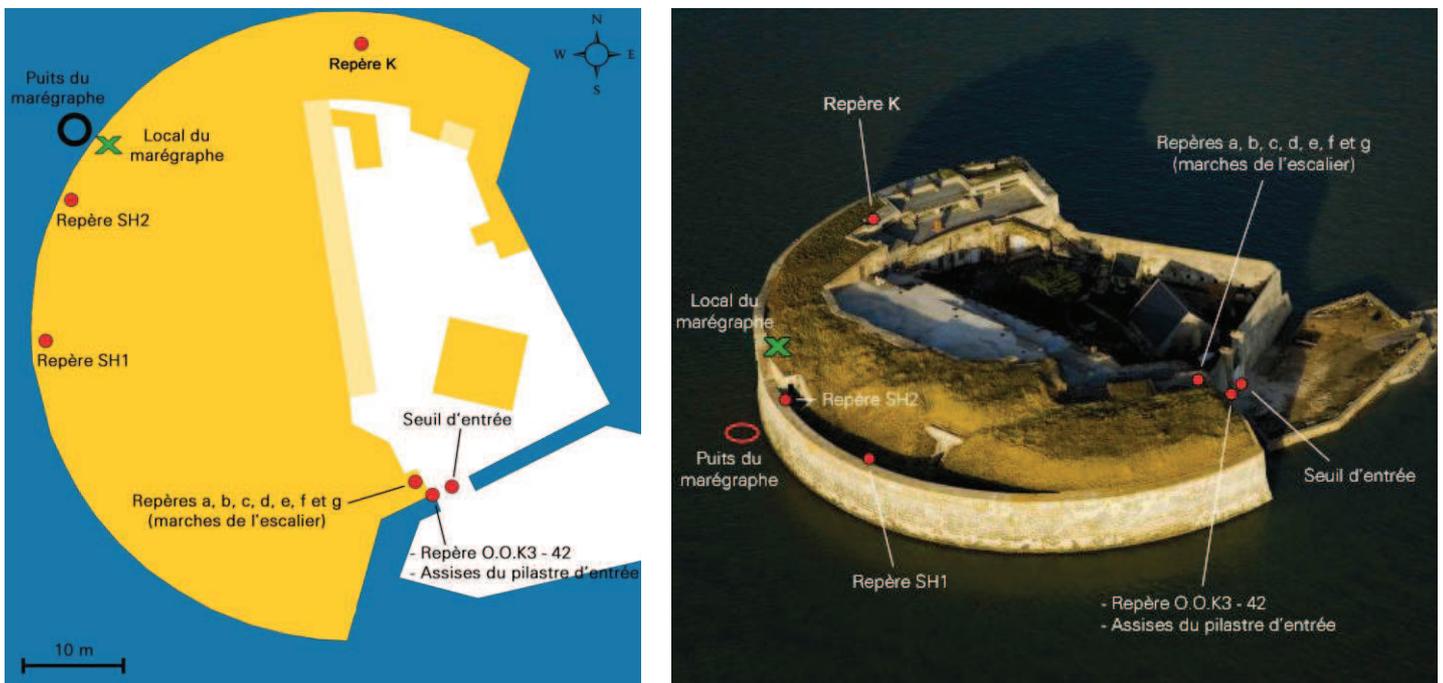
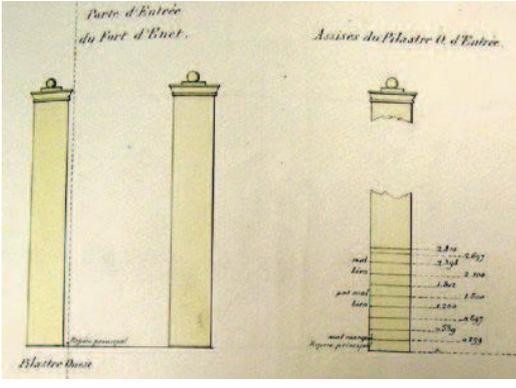
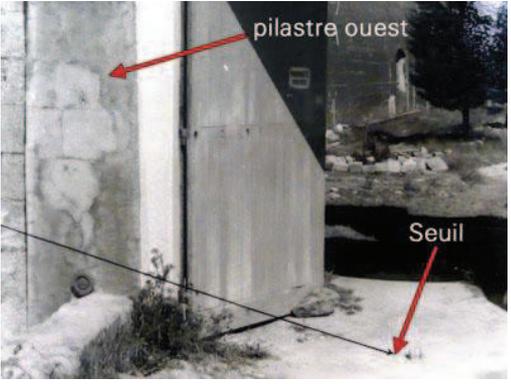
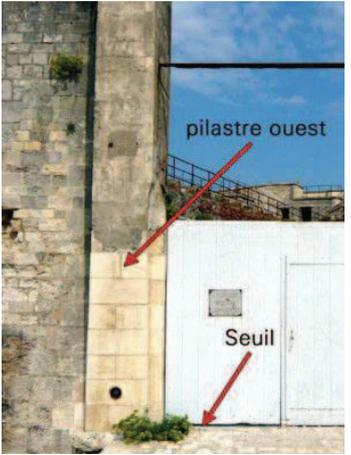


Figure IV-45 : Localisation des différents repères répertoriés au fort Enet. À gauche : fond de carte provenant du site internet du plan cadastral français (<http://cadastre.gouv.fr>). À droite : photo de Francis Leroy, 2006.

REPERE SEUIL (existant) ET ASSISES DU PILASTRE OUEST (détruits)				
Période : 1850 à aujourd'hui			Type : Repère naturel	
En 1860 :		En 1960 :		En 2009 :
				
<p>Description : Le seuil d'entrée est le repère principal utilisé par Delbalat en 1860. Il s'agit du sol de la porte d'entrée, au pied du pilastre ouest. Plusieurs marques gravées sur le pilastre ouest (assises) ont servi de repères en 1860. Ces marques ont aujourd'hui disparues à la suite de la rénovation des deux pilastres en juillet 2008. A noter que le SHOM, en 1960, a nivelé le centre du seuil de la porte d'entrée, alors que le repère est situé au pied du pilastre ouest, soit quelques dizaines de centimètres plus à gauche sur la photo.</p>				
Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
1860	Seuil	+ 7,728 m	Zéro hydrographique	« Nivellement longitudinal de la Charente », Delbalat, 1860, archives du SHOM, portefeuille 12-7-22
1868	Seuil	+ 4,442 m	NGF-Bourdalouë	« Année 1868, Plans de nivellement, Echelle de marées, Seuils, Repères. Travail de M. Bona-Christave, Capitaine de vaisseau, directeur du port », archives du SHD Rochefort, cote 2D45t
1960	Palier	+ 3,8689 m	NGF-Lallemand	« Nivellement Cholesky - Rattachements divers », MHCAN, Plouviez, 1960, archives du SHOM, cote SH2-886
2009	Seuil	+ 4,007 m	NGF-IGN69	UMR 6250 LIENSs
		+ 7,547 m	Zéro hydrographique	

IV.2.3.2.2. Echelles de marée

En 1868, Bona-Christave, alors capitaine de vaisseau et directeur du port de Rochefort, réalise une étude récapitulative des différents plans de nivellement, échelles de marée, seuils et repères utilisés par le passé, depuis Rochefort jusqu'à l'île d'Aix [Bona-Christave, 1868]. Parmi les résultats publiés se trouve un récapitulatif de la position du zéro de l'échelle du marégraphe du fort Enet. Ces résultats sont présentés dans le *tableau IV-9* ci-dessous.

Position du zéro de l'échelle du marégraphe du fort Enet			
Date	Cote rapportée au seuil de la porte d'entrée	Cote rapportée au zéro NGF-Bourdalouë	D'après l'étude de :
1858	- 7,912 ± 0,001 m	- 3,469 ± 0,001 m	Delbalat
1859	- 8,301 ± 0,002 m	- 3,858 ± 0,002 m	Delbalat
1863	- 8,499 ± 0,001 m	- 4,056 ± 0,001 m	Bouquet de la Grye
mars 1868	- 7,728 ± 0,001 m	- 3,285 ± 0,001 m	Bona-Christave

Tableau IV-9 : Cote des positions du zéro de l'échelle du marégraphe du fort Enet, de 1858 à 1868 [Bona-Christave, 1868].

Bona-Christave précise également que « *le zéro de l'échelle du marégraphe doit être placé, pour coïncider avec le zéro Beautemps-Beaupré, à 10.978 m de la tablette supérieure du puits du marégraphe* ». A noter que le zéro Beautemps-Beaupré évoqué ici par Bona-Christave se trouve en fait être le zéro hydrographique redéfini accidentellement par Delbalat en 1858 (cf. IV.2.2. *Suivi historique de la position du zéro hydrographique*).

IV.2.3.3. Au fort Boyard

De même, un historique de la cote des principaux repères de nivellement et/ou de marée du fort Boyard a été réalisé. L'ensemble des fiches produites est disponible en annexe. Nous ne présentons ici, qu'une vue d'ensemble précisant l'emplacement de chaque repère (*figure IV-46 et 47*), ainsi que la fiche du repère principal du fort Boyard.

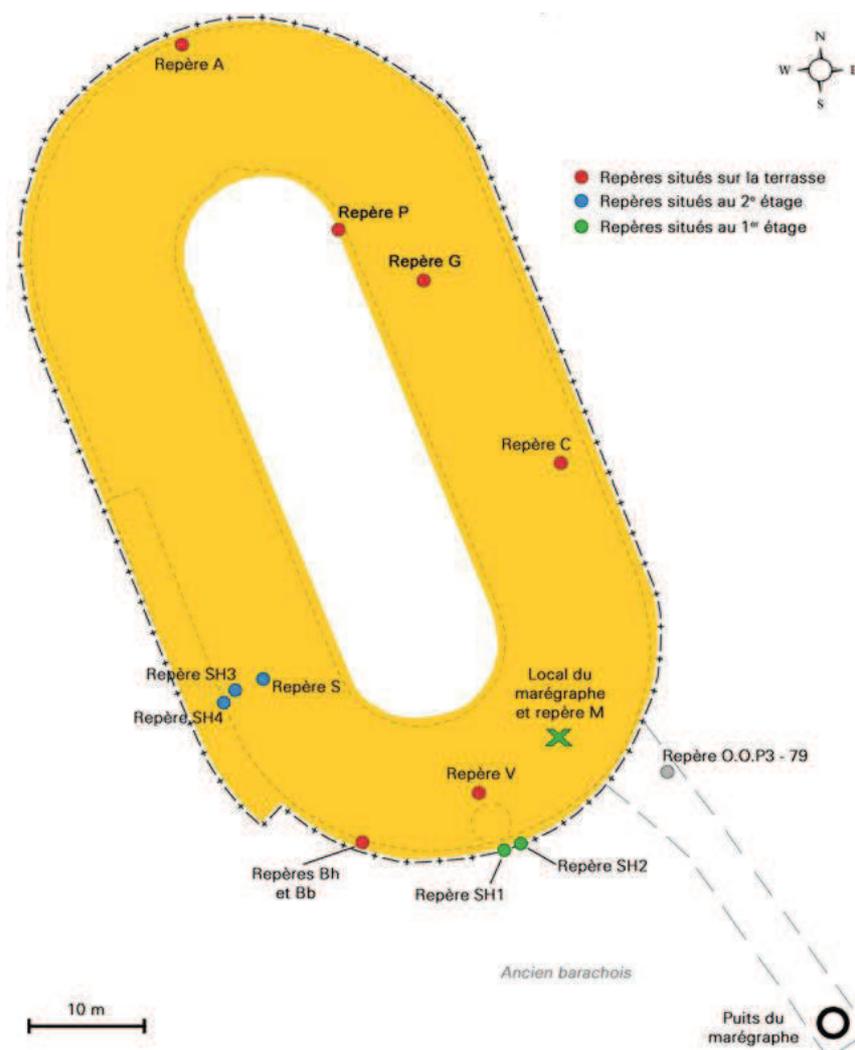


Figure IV-46 : Localisation des différents repères répertoriés au fort Boyard : fond de carte modifié, provenant du site internet du plan cadastral français (<http://cadastre.gouv.fr>).

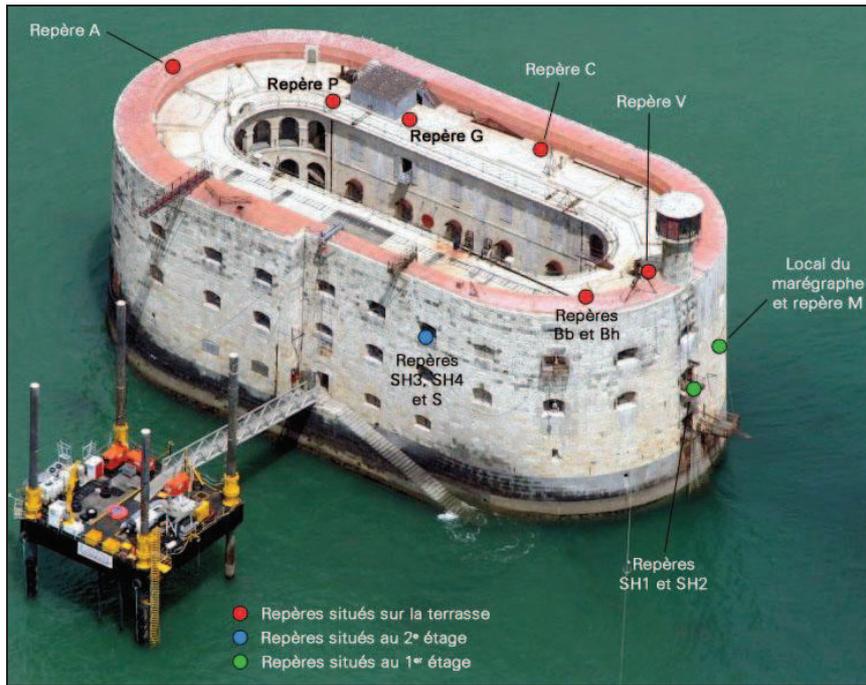
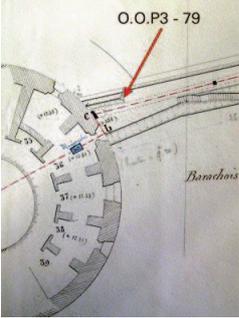
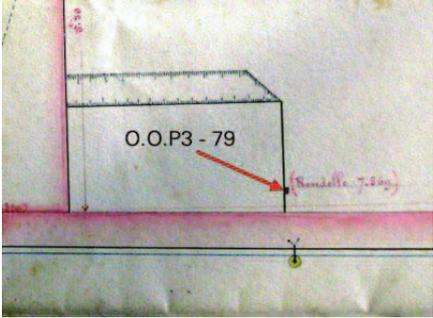
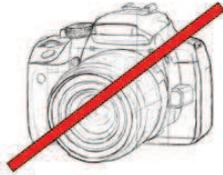


Figure IV-47 : Localisation des différents repères répertoriés au fort Boyard. Photographie aérienne de Philippe Dufour, 2008.

REPÈRE O.O.P3-79 (détruit)				
Période : 1868 à 1955		Type : Repère Bourdalouë		
En 1882 :		En 2011 :		
		 <p style="text-align: center;">Repère détruit</p>		
<p>Description : Repère de type « Bourdalouë, Charente inférieure » scellé sur le mur de cale de la jetée sud-est de l'ancien barachois. Il existe un doute sur la continuité du repère. En effet, l'ancien repère correspondant à cette description se nommait « Ile d'Oléron, n°51 », et même s'il se situait exactement au même endroit que le repère O.O.P3-79, leurs altitudes dans le réseau NGF-Lallemand diffèrent de 5 cm. Peut-être a-t-il été déplacé ?</p>				
Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
1868	Ile d'Oléron, n°51	+ 7,569 m	NGF-Bourdalouë	« Île d'Oléron, traverses de 4 ^e ordre », archives de l'IGN, cote 90-422 SGN/IGN
1929	Ile d'Oléron, n°51	+ 6,99 m	NGF-Lallemand	« Île d'Oléron, traverses de 4 ^e ordre », archives de l'IGN, cote 90-422 SGN/IGN
1957	O.O.P3-79	+ 6,939 m	NGF-Lallemand	Cahier de « Calcul des altitudes des repères, réseau de 4 ^e ordre », opérateur :Dupuy, archives de l'IGN
1971	O.O.P3-79	+ 7,108 m	NGF-IGN69	Cahier de « Calcul des altitudes des repères, réseau de 4 ^e ordre », opérateur :Dupuy, archives de l'IGN

IV.2.4. Relation entre les réseaux NGF

De la même façon que pour La Rochelle, les repères de nivellement de la rade de l'île d'Aix ont été cotés dans un, deux ou trois réseaux NGF différents. Afin de pouvoir évaluer leur stabilité au cours du temps, il est essentiel de connaître la relation permettant de passer d'une réalisation du réseau NGF à une autre. A partir des résultats du paragraphe IV.2.3., nous avons donc sélectionné d'une part les repères cotés à la fois dans les réseaux NGF-Bourdalouë et NGF-IGN69, et d'autre part les repères cotés dans les réseaux NGF-Lallemand et NGF-IGN69. Le *tableau IV-10* présente les résultats de la comparaison NGF-Bourdalouë et NGF-IGN69 pour la rade de l'île d'Aix.

Lieu	Repère	Altitudes NGF		IGN69 - Bourdalouë
		Bourdalouë	IGN69	
île d'Aix	A	+ 3,15 m	+ 2,719 m	- 0,431 m
	Palier	+ 2,108 m	+ 1,664 m	- 0,444 m
fort Enet	Seuil	+ 4,442 m	+ 4,007 m	- 0,435 m
Moyenne :				- 0,437 m
Ecart-type :				0,005 m

Tableau IV-10 : Différences d'altitude des repères cotés dans les réseaux NGF-Bourdalouë et NGF-IGN69 dans la rade de l'île d'Aix.

Nous avons procédé à une comparaison directe entre le réseau NGF-Bourdalouë et le réseau NGF-IGN69, tout simplement car nous ne disposons pas assez de repères cotés à la fois en NGF-Bourdalouë et en NGF-Lallemand. Cependant, comme le montre le *tableau IV-10*, la moyenne a été calculée à partir de trois valeurs seulement et il est légitime de se poser des questions sur le résultat obtenu. Cette moyenne est-elle fiable ? Pour le savoir, nous allons la comparer à deux autres moyennes : $0,443 \pm 0,002$ m est la moyenne déduite pour la rade de La Rochelle (située à environ 17,3 km au nord de la rade de l'île d'Aix) et $0,433 \pm 0,009$ m est la moyenne calculée pour la ville de Rochefort (située à environ 16,7 km à l'Est de la rade ; calculs disponibles en annexe). Au regard de ces deux autres valeurs, nous pouvons en conclure que la moyenne calculée pour la rade de l'île d'Aix ($0,437 \pm 0,005$ m) est statistiquement cohérente et précise. Le *tableau IV-11* présente les résultats de la comparaison NGF-Lallemand et NGF-IGN69 pour la rade de l'île d'Aix.

Lieu	Repère	Altitudes NGF		IGN69 - Lallemand
		Lallemand	IGN69	
île d'Aix	A	+ 2,5595 m	+ 2,719 m	+ 0,1595 m
fort Enet	SH1	+ 8,3824 m	+ 8,537 m	+ 0,1546 m
	SH2	+ 8,4032 m	+ 8,559 m	+ 0,1558 m
	O.O.K3-42	+ 4,3952 m	+ 4,5504 m	+ 0,1552 m
fort Boyard	O.O.P3-79	+ 6,939 m	+ 7,108 m	+ 0,169 m
Fouras	O.O.K3-35	+ 17,4927 m	+ 17,6479 m	+ 0,1552 m
	O.O.K3-36	+ 15,8602 m	+ 16,0154 m	+ 0,1552 m
	O.O.K3-37	+ 8,604 m	+ 8,7592 m	+ 0,1552 m
Pointe de la Fumée	O.O.K3-38	+ 4,9135 m	+ 5,0687 m	+ 0,1552 m
	O.O.K3-39	+ 4,6787 m	+ 4,8339 m	+ 0,1552 m
	O.O.K3-40	+ 5,6363 m	+ 5,7915 m	+ 0,1552 m
	O.O.K3-41	+ 4,472 m	+ 4,6272 m	+ 0,1552 m
île Madame	O.O.K3-94	+ 12,9683 m	+ 13,1276 m	+ 0,1593 m
	O.O.K3-94-G	+ 17,5827 m	+ 17,742 m	+ 0,1593 m
Boyardville	O.O.P3-75	+ 3,947 m	+ 4,116 m	+ 0,169 m
	O.O.P3-76	+ 6,516 m	+ 6,685 m	+ 0,169 m
	O.O.P3-77	+ 6,623 m	+ 6,792 m	+ 0,169 m
Les Saumonards	O.O.P3-78	+ 8,874 m	+ 9,043 m	+ 0,169 m
Moyenne :				+ 0,160 m
Ecart-type :				0,006 m

Tableau IV-11 : Différences d'altitude des repères cotés dans les réseaux NGF-Lallemand et NGF-IGN69 dans la rade de l'île d'Aix. Cotes provenant des registres des archives de l'IGN.

A partir des résultats des *tableaux IV-10* et *IV-11*, nous pouvons en déduire le schéma de situation des différentes origines des réseaux NGF utilisés dans la rade de l'île d'Aix depuis 1858 (*figure IV-48*).

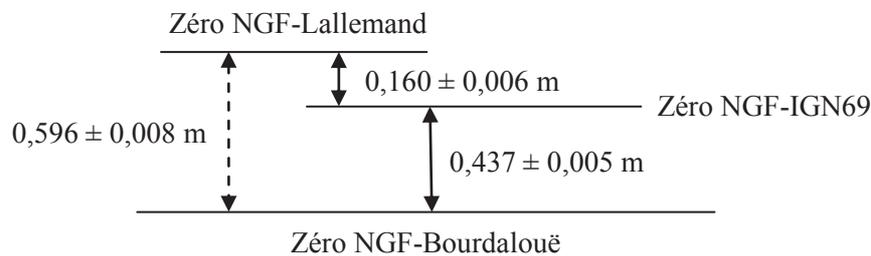


Figure IV-48 : Situation des différentes origines des réseaux NGF utilisés dans la rade de l'île d'Aix entre 1858 et 2011. Le trait pointillé indique que la valeur est déduite ; le trait plein qu'elle est calculée.

La différence entre les origines des réseaux NGF-Lallemand et NGF-IGN69, de $0,160 \pm 0,006$ m, est conforme avec la valeur publiée sur le site internet de l'IGN (0,15 m) pour effectuer une conversion entre ces deux réseaux dans la zone de l'île d'Oléron (feuille 1330), d'après la grille Centre Ouest⁵². A noter qu'elle est légèrement plus faible (environ 2 cm) qu'à La Rochelle ($0,1864 \pm 0,0009$ m).

⁵² <http://geodesie.ign.fr/index.php?page=grilles>, consulté le 1^{er} décembre 2011.

IV.2.5. Inventaire et description des mesures enregistrées

Plusieurs lots de mesures du niveau de la mer, enregistrées en rade de l'île d'Aix, ont été retrouvés dans les centres d'archives. Ils sont répartis sur trois sites différents : l'île d'Aix, le fort Enet et le fort Boyard. Comme le montre la *figure IV-49* ci-dessous, cette zone d'étude possède une caractéristique particulièrement intéressante : il est situé sur le passage d'une trace des satellites altimétriques Jason (et anciennement Topex/Poseidon).



Figure IV-49 : Localisation des différents lieux de mesures du niveau de la mer enregistrées dans la rade de l'île d'Aix. Image modifiée © 2011 GeoEye.

Les mesures réalisées couvrent une période totale de 188 ans (de 1824 à aujourd'hui) pour une durée effective d'enregistrement de 55 ans. La *figure IV-50* montre cette répartition temporelle pour les trois sites : l'île d'Aix (en rouge), le fort Enet (en vert) et le fort Boyard (en bleu).

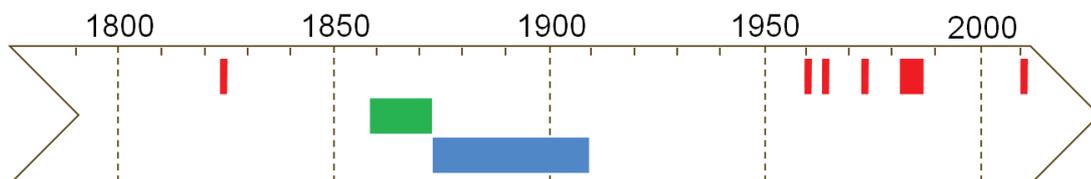


Figure IV-50 : Représentation temporelle des mesures du niveau de la mer enregistrées dans la rade de l'île d'Aix de 1824 à aujourd'hui. En rouge : l'île d'Aix ; en vert : fort Enet ; en bleu : fort Boyard.

Ces différents lots de mesures n'ont pas tous été enregistrés de la même manière ni dans un même référentiel de temps et de hauteur. Le *tableau IV-12* dresse donc un récapitulatif détaillé des mesures réalisées en rade de l'île d'Aix. A la suite de ce tableau, nous détaillerons plusieurs de ces lots de mesures en indiquant les informations utiles à leur compréhension.

Période	Durée effective	Mesures		Archivage des mesures		Système de hauteur		Système de temps		
		Appareil	Description	Numérique	Papier	Pieds	Mètres	TSV	TSM	TU
ILE D'AIX										
1824	4,5 mois	Echelle	Hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	LIENSs	SHD Rochefort - 7JJ 362	X		X		
1960	2 mois	Echelle	Hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure		Archives du SHOM - 7JJ 884		X			X
1963	1 mois	Echelle	Hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure		Archives du SHOM - 7JJ 777		X			X
1964	0,5 mois	Echelle	Hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure		Archives du SHOM - 7JJ 840		X			X
1971 - 1987	8 ans	Marégraphe flotteur	Marégrammes - Hauteur en continu	SHOM (1973-1974)	SPC-LA 368, 369, 374, 376 et 377, La Rochelle		X			X
2011 - ...	...	Marégraphe numérique	Hauteurs toutes les 10 minutes	REFMAR	-		X			X
FORT ENET										
1859 - mai 1860	14 ans	Marégraphe Chazallon	Hauteurs tous les ¼ d'heure + Pression atm.	LIENSs	Archives du SHOM		X		X	
juin 1860 - 1873							X	X		
FORT BOYARD										
1873 - 1893	32 ans	Marégraphe Chazallon	Hauteurs tous les ¼ d'heure + Pression atm.	LIENSs	Archives du SHOM		X	X		
1894 - 1909							X		X	

Tableau IV-12 : Récapitulatif et description des lots de mesures du niveau de la mer enregistrés en rade de l'île d'Aix entre 1824 et aujourd'hui.

IV.2.5.1. L'île d'Aix

• La campagne de Beautemps-Beaupré (1824)

Comme pour les mesures du niveau marin réalisées au Vieux port de La Rochelle en 1824, celles enregistrées la même année au port de l'île d'Aix font partie du grand projet de Beautemps-Beaupré : la réalisation d'un document intitulé « *le Pilote français* », recueil de l'ensemble des connaissances hydrographiques des côtes de France. A l'île d'Aix, les observations diurnes du niveau marin furent réalisées du 13 mai au 1^{er} octobre, tous les quarts d'heure, à l'aide de deux échelles de marée en pieds et en pouces. La première, appelée « *grande échelle* », était l'échelle principale, placée à quelques mètres du quai du port de l'île d'Aix, mais celle-ci asséchant lors des basses mers de vives-eaux, Beautemps-Beaupré fit installer une deuxième échelle (appelée « *petite échelle* »), un peu plus loin, assez pour que celle-ci n'assèche jamais et puisse servir à lire les hauteurs des basses mers de vives-eaux (*figure IV-51*).

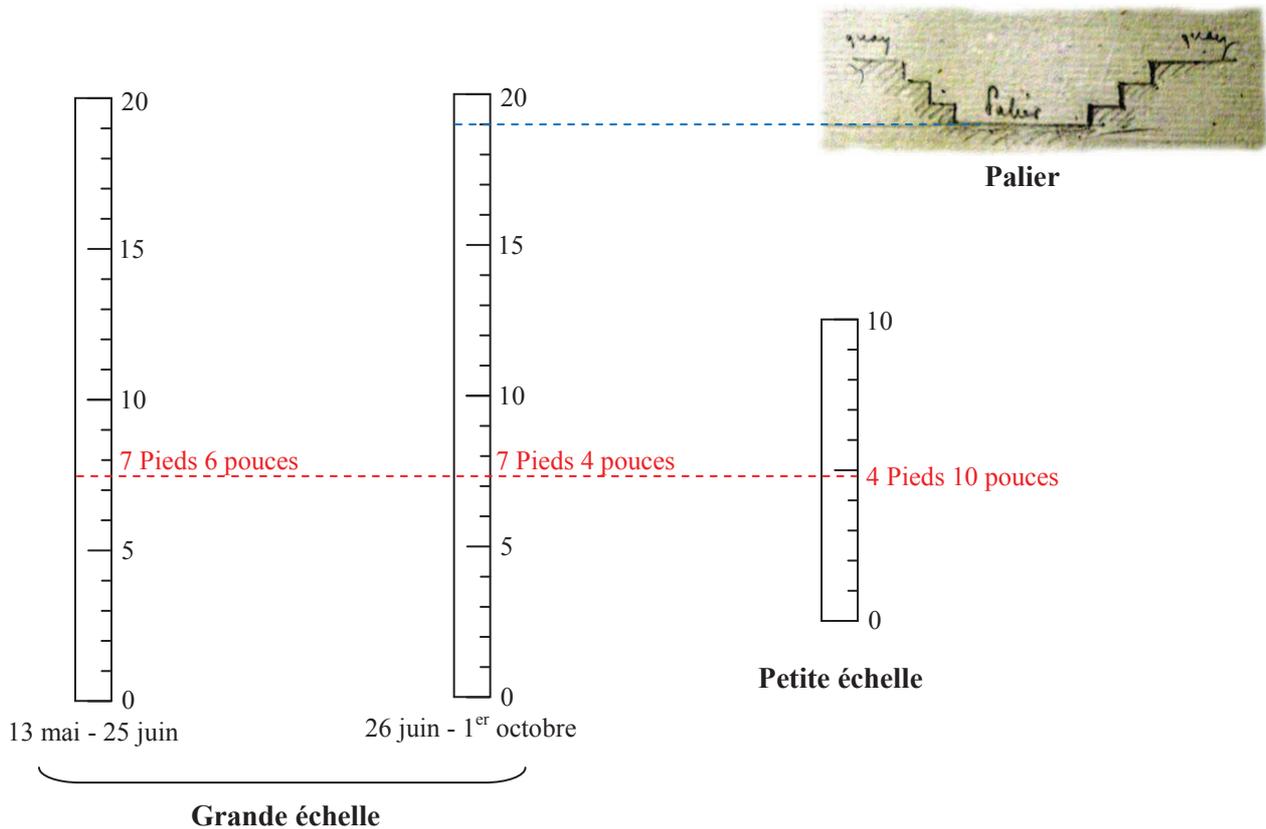


Figure IV-51 : Représentation des échelles de marée utilisées en 1824 à l'île d'Aix, par rapport au palier du quai du port. Les graduations sont en pieds. La grande échelle était l'échelle principale, la petite n'étant utilisée que pour lire les basses mers de vives-eaux. La grande échelle fut surélevée de 2 pouces à partir du 26 juin.

Beautemps-Beaupré laissa dans ses carnets d'observations, de précieuses annotations permettant de relier les mesures faites aux deux échelles avec un repère terrestre : le palier de l'escalier de débarquement du port de l'île d'Aix. D'après ces notes, le palier correspondait à la graduation 19 Pieds de la grande échelle et le zéro de réduction des sondes adopté est situé à 16 Pieds 4 pouces, soit 5,306 m, en dessous de ce palier. De plus, il ajoute que « *Pour rapporter les observations faites sur la petite échelle aux divisions de la grande échelle, il faut ajouter 2 Pieds 6 pouces aux hauteurs de l'eau observées sur cette petite échelle quand on ne pouvait plus observer sur la grande. BB* » [Beautemps-Beaupré, 1824a]. En parcourant le carnet d'observations, on apprend aussi que la grande échelle a été déplacée au cours de la campagne : « *Il paraît que la grande échelle a été soulevée de 2 pouces depuis les derniers mauvais temps. Ainsi donc, il ne faudrait plus ajouter que 2 Pieds 6 pouces pour la rapporter à la grande et auparavant, il fallait ajouter 2 Pieds 8pouces.* ».

Il est à noter que des observations météorologiques étaient également effectuées : estimation de la vitesse et mesure de la direction du vent, observation de l'état de la mer, conditions atmosphériques. L'observateur étant seul pour réaliser son travail, il n'est pas rare que des mesures soient manquantes à l'heure du déjeuner. Enfin, lorsque le soleil brillait dans le ciel, l'observateur en profitait pour régler sa montre à midi, en temps solaire vrai et corriger ainsi les dérives instrumentales de l'ordre de plusieurs minutes.

• **Les campagnes hydrographiques du SHOM (1960, 1963 et 1964)**

En 1960, l'ingénieur hydrographe Mannevy (SHOM) entreprit une campagne hydrographique dans l'ensemble des pertuis charentais et redéfinira ensuite les zéros hydrographiques de La Pallice, du Vieux port de La Rochelle et de l'île d'Aix, comme nous l'avons vu précédemment. Les mesures diurnes réalisées à l'île d'Aix se sont déroulées du 17 août au 22 octobre à partir de deux échelles implantées à proximité de la jetée Sainte Catherine : l'échelle de pleine mer, fixée sur un pieu en bois de l'ancien appontement, avait son zéro à la cote - 2,41 m NGF-Lallemand soit 1,29 m au dessus du zéro hydrographique (- 3,70 m NGF-Lallemand) et l'échelle de basse mer, amarrée sur le fond dans le sud de l'extrémité de la jetée, avait son zéro à la cote - 4,81 m NGF-Lallemand, soit 1,11 m en dessous du zéro hydrographique. A noter également que Mannevy signale « *les retards successifs de la construction d'un puits de marégraphe à l'île d'Aix.* ».

Les observations de 1963 ont été dirigées par l'ingénieur hydrographe Le Fur (SHOM). Elles ont eu lieu du 17 au 29 mai, le 26 septembre, puis du 3 au 11 octobre à l'aide de deux échelles de marée implantées à proximité de la jetée Sainte-Catherine (*figure IV-52*). Le zéro de l'échelle de pleine mer était à la cote - 2,344 m NGF-Lallemand (1,36 m au dessus du zéro hydrographique) et le zéro de l'échelle de basse mer était à la cote - 4,176 m NGF-Lallemand (0,48 m en dessous du zéro hydrographique).

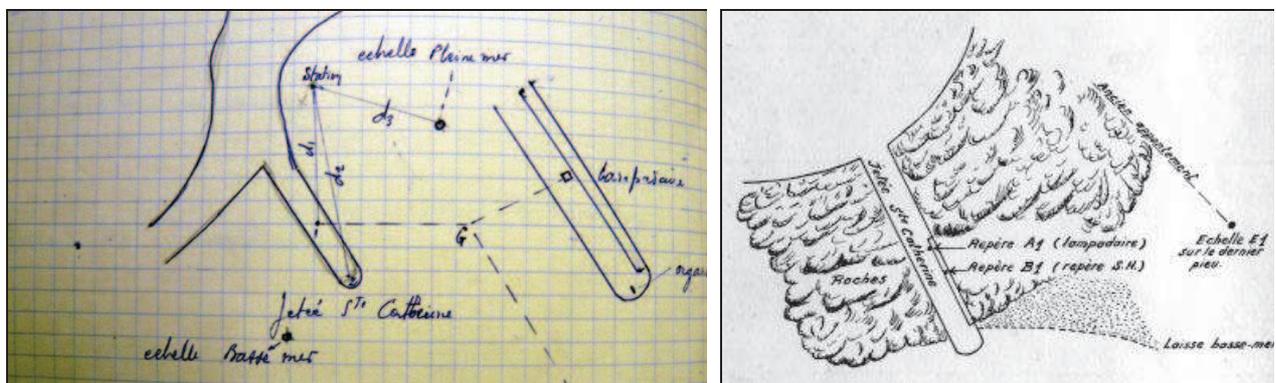


Figure IV-52 : Schéma de l'emplacement des échelles de marée utilisées par le SHOM lors des observations du niveau marin à l'île d'Aix. A gauche : en 1963. A droite : en 1964.

Les observations de 1964 ont, elles, été dirigées par l'ingénieur hydrographe Ortais (SHOM) et ont été beaucoup plus courtes, à peine dix jours, du 13 au 22 octobre. Les mesures diurnes ont été enregistrées à l'aide d'une seule échelle de marée qui découvrait à marée basse. Le zéro de l'échelle, fixée sur le pieu sud de l'ancien appontement à l'Est de la jetée Sainte-Catherine (*figure IV-52*), était à la cote - 4,98 m NGF-Lallemand, soit 1,28 m en dessous du zéro hydrographique.

• **Le premier marégraphe (1971-1987)**

Le premier marégraphe installé à l'île d'Aix et dont nous ayons retrouvé la trace a fonctionné de septembre 1971 au 15 août 1987 et était géré par l'ancienne Direction Départementale de l'Équipement de Charente-Maritime (subdivision de Rochefort). De marque OTT R16, ce marégraphe à flotteur était installé à l'abri dans une boîte étanche située sur la jetée Barbotin (actuellement jetée Sainte-Catherine, *figure IV-53*). Le but de son installation était d'étudier la propagation de la marée dans le bassin Marennes-Oléron, ainsi que dans la Charente. Les marégrammes produits sont aujourd'hui archivés au Service de Prévision des Crues du Littoral Atlantique (Direction Départementale des Territoires et de la Mer de Charente-Maritime). Cependant, lorsque l'inventaire de ces marégrammes présents dans ces archives a été réalisé, tous n'ont pas été retrouvés. Au total, nous n'avons pu inventorier que 8 années effectives de mesures, dont une partie a été numérisée par le SHOM (1973-1974).

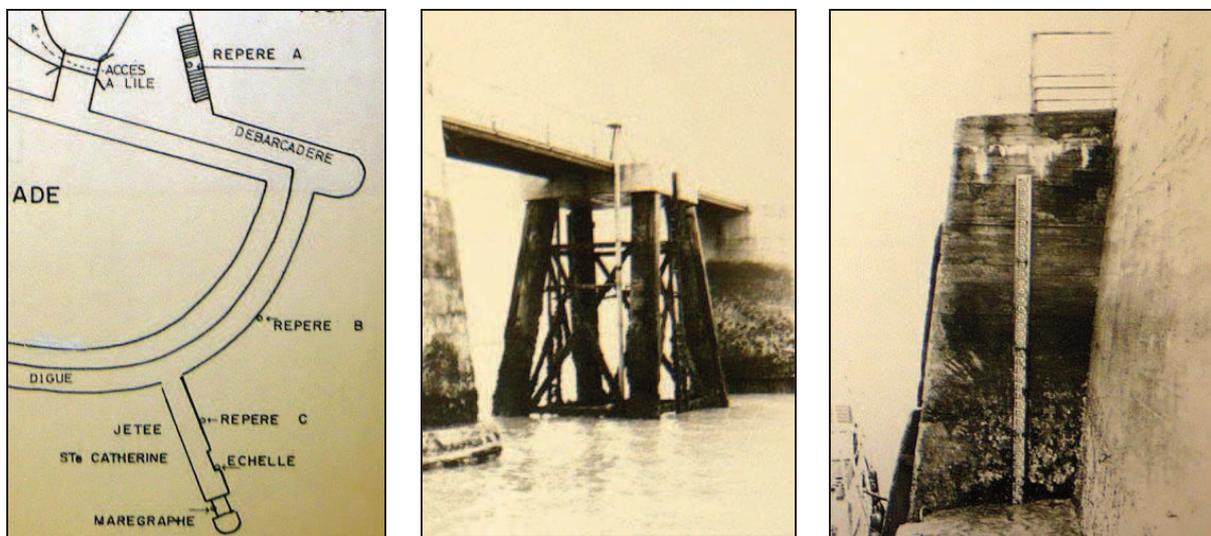


Figure IV-53 : A gauche : emplacement du marégraphe et de l'échelle de marée sur la jetée Sainte-Catherine de l'île d'Aix. Au centre : photographie du marégraphe. A droite : photographie de l'échelle de marée.

• **Le puits du marégraphe ?**

Lors d'une réunion avec des élus de la mairie de l'île d'Aix, le 2 juillet 2009, ceux-ci nous ont signalé la présence, au milieu du fort de la rade, d'un puits de forme ovale, connu localement sous le nom de « *puits du marégraphe* » (*figure IV-54*). Cette information nous a interpellés car ce puits est situé à environ soixante-dix mètres de la côte, à l'intérieur des terres. De l'avis des élus locaux, il n'était pas destiné à être utilisé pour l'alimentation en eau potable. Cependant, à ce jour, aucune information écrite ne nous permet d'affirmer que ce puits a servi à mesurer le niveau marin. De même, aucun lot de mesures en relation avec ce puits n'a été retrouvé.



Figure IV-54 : Puits situé à l'intérieur du fort de la rade de l'île d'Aix et connu localement sous le nom de « puits du marégraphe ».

IV.2.5.2. Le fort Enet

L'installation d'un marégraphe au fort Enet marque la fin de la mise en place du premier réseau d'observatoires du niveau de la mer, par Chazallon, entre 1844 et 1859 [Pouvreau, 2008]. S'il fut le dernier à être installé, c'est en grande partie dû au coût et aux nombreuses difficultés rencontrées par les ouvriers lors des travaux préparatoires à l'arrivée du marégraphe. Dès 1846, le service des travaux hydrauliques du port de Rochefort était demandeur d'études hydrographiques dans le but d'aménager la Charente et d'y améliorer la navigation, « *en vue de rendre possible la remontée jusqu'à l'arsenal des bâtiments de la Marine de plus en plus importants* ». Ces études ne seront réalisées par l'ingénieur hydrographe Delbalat qu'à partir de 1858, mais c'est dès 1857 que Delbalat proposera l'installation de deux marégraphes permanents, au fort Enet et à Rochefort, dans le but de « *connaître avec précision les lois de propagation de l'onde de marée dans la rivière* ». [Rollet de l'Isle, 1950]. Le devis fourni prévoit un coût de 8 000 francs pour le marégraphe du fort Enet et de 2 700 francs pour le marégraphe de Rochefort⁵³ (valeurs en franc germinal, en vigueur à l'époque).

L'installation au fort Enet est autorisée par le Ministre de la Marine le 14 septembre 1857, avec toutefois une condition : « *tous les ouvrages qui pourraient nuire à la défense devraient disparaître à la première réquisition du service militaire* » [Chevallier, 1857]. Le message était donc clair. Observer la marée et contribuer aux avancées hydrographiques, oui, mais le Ministre ne perd pas de vue l'objectif premier du fort : protéger la rade de l'île d'Aix et l'arsenal de Rochefort. C'est l'ingénieur hydrographe Chazallon lui-même qui sera chargé de présider à l'installation du marégraphe et d'organiser le service des observations du niveau de la mer [Dupuy, 1858].

Le projet (*figure IV-55*) est donc adopté mais la particularité du site oblige à réaliser d'importants travaux. En effet, le fort est construit sur un rocher (le rocher d'Enette), et lors des marées basses de vives-eaux, l'eau se retire à une centaine de mètres de celui-ci. Le projet prévoit donc de creuser une

⁵³ « *Rapport à l'appui des états estimatifs des ouvrages à exécuter pour installer deux Marégraphes, l'un au fort d'Enet, l'autre dans le port de Rochefort, à l'extrémité de l'appontement du 15^e amarrage* », de l'ingénieur des travaux hydrauliques de Rochefort, 22 septembre 1857. Archives du SHD Marine, Vincennes. Cote DD² 2053.

rigole de 220 m de long depuis la base du fort vers le large, afin que le puits de tranquillisation, situé au pied du fort, soit toujours alimenté en eau, même lors des plus basses mers théoriques. Plusieurs imprévus cumulés à des retards dans les travaux augmentèrent le coût réel de l'installation pour finalement le porter à près de 27 000 francs⁵⁴. Et les travaux, débutés en 1857 ne seront achevés qu'au cours du premier semestre 1859.

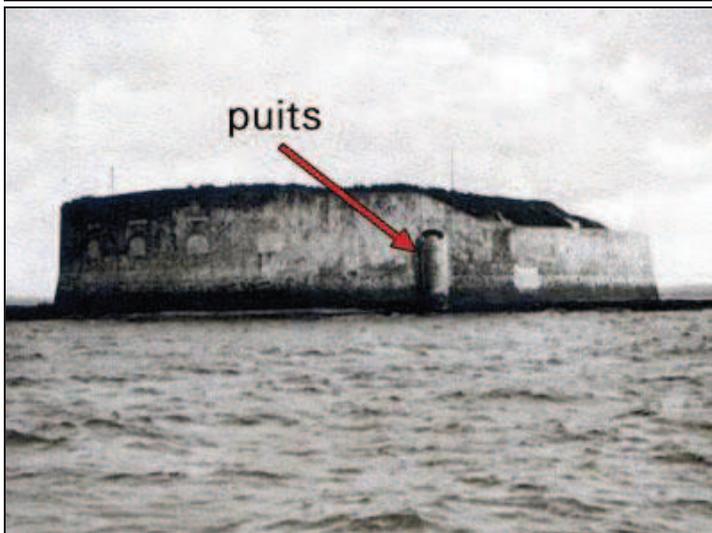
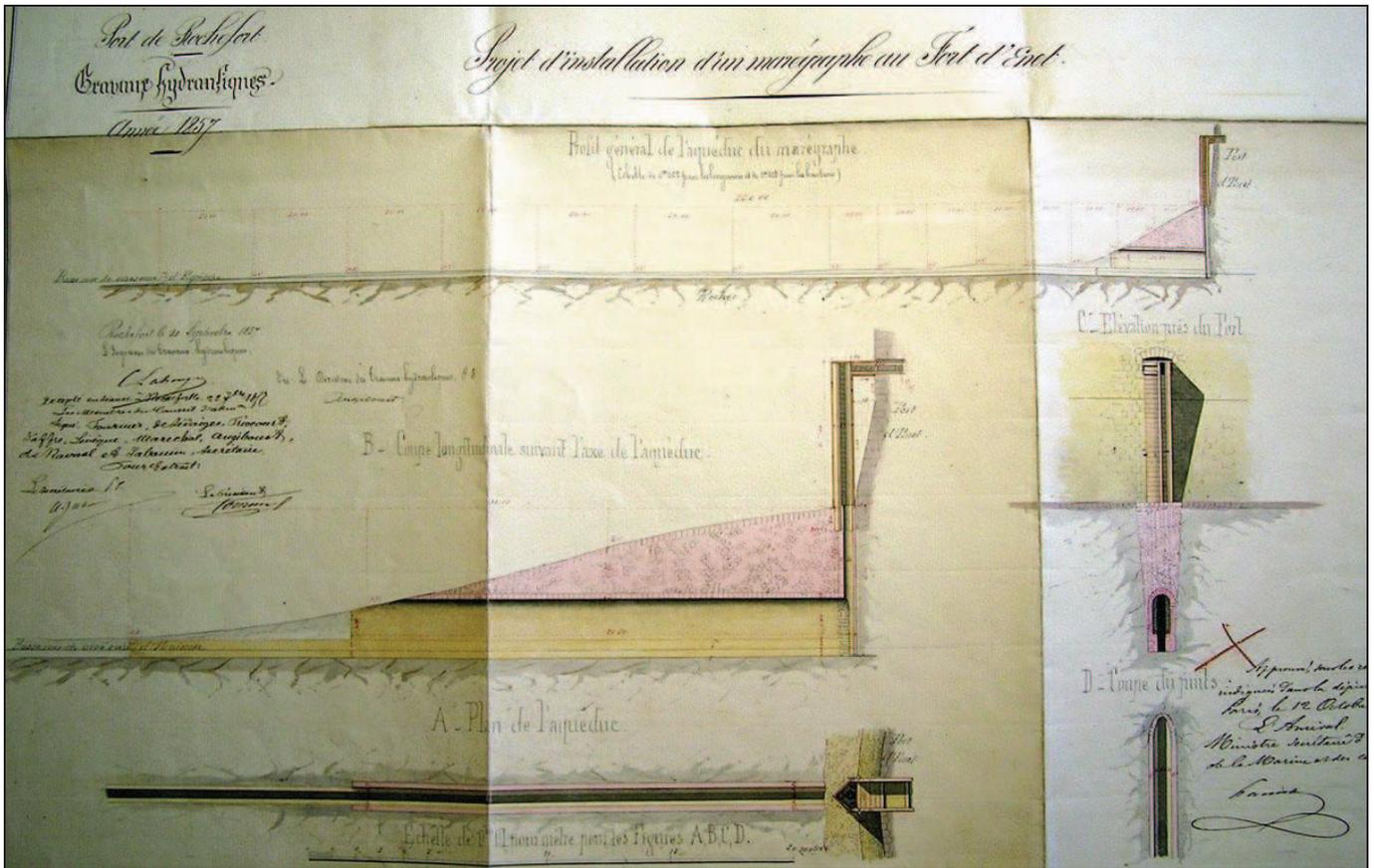


Figure IV-55 : En haut : plan du projet d'installation d'un marégraphe au fort Enet (1857). Archives du SHD Marine, Vincennes. Cote DD² 2053. A gauche : Photographie du fort Enet (1920-1930), montrant le puits de tranquillisation de l'ancien marégraphe (source : AD17).

⁵⁴ Lettre du directeur des travaux hydrauliques du port de Rochefort, Garnier, au préfet maritime, le 29 mars 1859. Archives du SHD Marine, Vincennes. Cote DD² 2053.

L'installation finale (*figure IV-56*) se compose d'un canal d'environ 150 m de long reliant le puits de tranquillisation à la mer et permettant ainsi de mesurer la hauteur du niveau d'eau en continu, même lors des basses mers de vives-eaux. La partie du canal à ciel ouvert est appelée cunette. Elle est creusée directement dans le sol, sans être maçonnée, et est bordée de deux lignes d'enrochement de cinquante à soixante centimètres de hauteur, afin de limiter son comblement par du sable ou de la vase. Une échelle de marée y a été installée. Au niveau de la jonction entre la cunette et la partie du canal qui est voûtée, la profondeur de celui-ci atteint deux mètres. Une porte en fer zinguée sépare le canal du puits de tranquillisation, et l'eau communique entre les deux par un petit orifice dont la section est d'environ dix centimètres. Le puits de tranquillisation mesure un mètre de diamètre et on y installa à la fois une deuxième échelle de marée mais aussi une échelle de sauvetage en bronze pour pouvoir y descendre. Le puits, accolé au mur d'enceinte du fort Enet (*figure IV-55*), s'élève jusqu'au niveau de l'embrasure de la casemate et est coiffé par une cabane maçonnée destinée à accueillir le tambour enregistreur [Bouquet de la Grye, 1869]. Cette configuration permettait d'une part d'accéder facilement au puits et d'autre part, de limiter les transmissions de mouvement entre le flotteur et le tambour enregistreur du marégraphe.

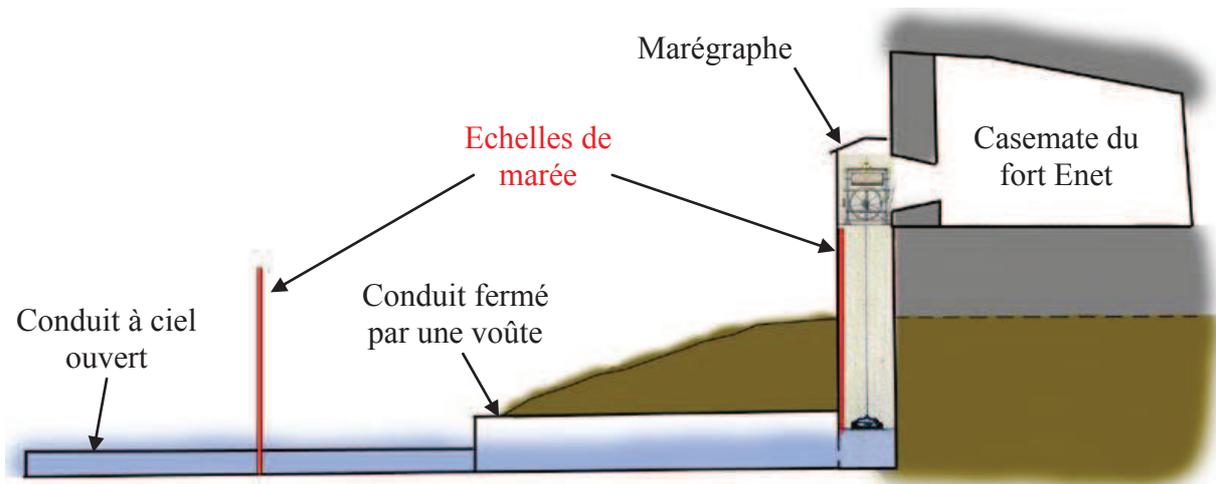


Figure IV-56 : Schéma de l'installation du marégraphe du fort Enet (1859-1873). Le tambour enregistreur du marégraphe était placé directement sur le puits de tranquillisation, à l'abri dans une cabane en maçonnerie.

Le niveau de la mer a donc été enregistré au fort Enet du 4 juillet 1859 jusqu'au 3 juin 1873. La période de mesures couverte est de 15 ans pour une durée effective d'enregistrement de 14 ans. Les marégrammes enregistraient quinze jours ou un mois de mesures consécutives avant d'être « *dépouillés* » par l'observateur des marées, en charge permanente de la bonne marche du marégraphe. Cet observateur reportait dans un registre, un grand nombre d'informations. Un premier registre contenait les hauteurs du niveau de la mer, de quart d'heure en quart d'heure, relevées à partir des marégrammes. Le second contenait les heures et les hauteurs des pleines et basses mers, ainsi que des mesures météorologiques (pression et température atmosphériques, force et direction du vent), l'état de la mer et toutes les informations ou anecdotes que l'observateur jugeait utiles de consigner. Ces registres sont aujourd'hui conservés dans les archives du SHOM.

Le marégraphe fut arrêté le 3 juin 1873 afin d'être déplacé au fort Boyard. En effet, le canal reliant le puits de tranquillisation à la mer était constamment obstrué par du sédiment et le puits lui-même s'ensasait régulièrement. Ainsi, tous les deux mois, une équipe d'ouvriers de Rochefort était envoyée au fort Enet afin de nettoyer et désensasir le canal et le puits. Le coût de cet entretien était d'environ 1 800 francs par an, soit 600 francs de plus que le salaire annuel de l'observateur. Après plusieurs études, deux solutions sont proposées par Bouquet de la Grye en 1869 : déplacer le marégraphe au fort Boyard, ou installer un système de chasse permettant de désensasir plus facilement le canal du fort Enet [Bouquet de la Grye, 1869]. La première solution ayant la préférence du service des marées de la Marine, elle sera retenue.

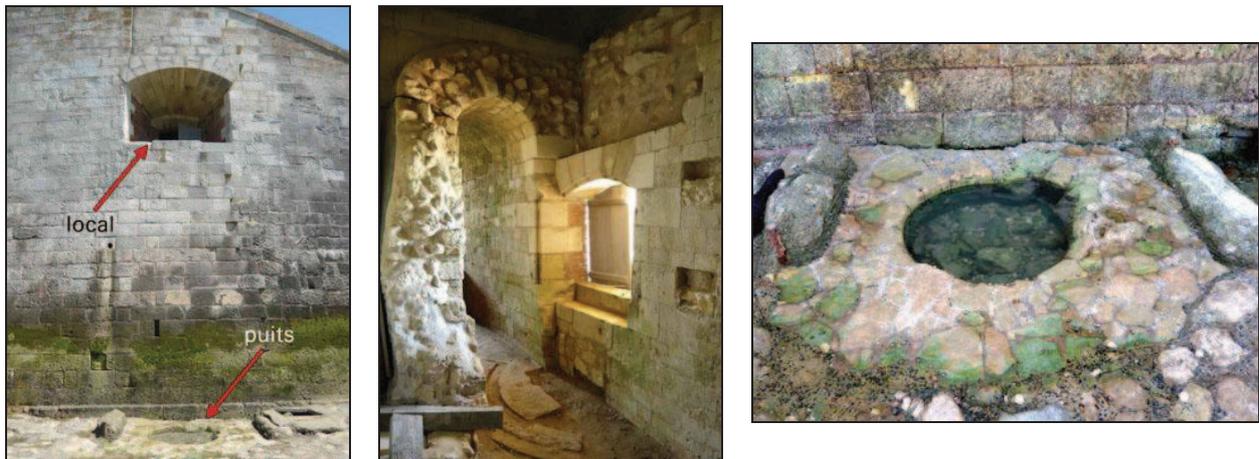


Figure IV-57 : Photographies actuelles du fort Enet. A gauche : vue du mur d'enceinte sur lequel était accolé le puits de tranquillisation. Au centre : casemate ayant accueilli l'observatoire. A droite : base du puits de tranquillisation, quasiment obstrué.

Aujourd'hui, il ne reste pratiquement plus rien de toute cette installation au fort Enet. Le puits de tranquillisation s'est écroulé lors d'un tremblement de terre, le 7 septembre 1972 (communication personnelle d'André Bellanné, copropriétaire du fort) et la casemate ayant accueilli l'observatoire a été entièrement modifiée (figure IV-57). Seul témoin de cette époque, le puits de tranquillisation, ou du moins, ce qu'il en reste. La base du puits est en effet visible à l'aplomb de la casemate de l'observatoire, le long du mur d'enceinte. Le puits est quasiment obstrué, mais on peut encore voir un échelon de l'échelle de sauvetage installée pour descendre dans le puits.

IV.2.5.3. Le fort Boyard

Nous venons de voir que l'observatoire des marées souhaité par Chazallon dans la rade de l'île d'Aix ne pouvait plus être maintenu au fort Enet, compte tenu de l'ensablement récurrent du puits de tranquillisation et des frais découlant de son nettoyage. Désireux de maintenir l'observatoire dans la rade, le service des marées de la Marine proposa de placer le marégraphe en un lieu hors d'atteinte des particules de vases charriées par la Charente. Et le fort Boyard, situé entre deux passes où les courants se

concentrent est idéalement situé pour cela ! De plus, lors de la construction du barachois du fort, des dispositions ont déjà été prises pour faciliter l'installation du marégraphe [Bouquet de la Grye, 1869]. Un puits a été aménagé à l'extrémité de la jetée nord du barachois et un conduit à grande section a été réservé dans la jetée, afin d'y placer le câble reliant le flotteur au tambour enregistreur du marégraphe (*figure IV-58*). Le seul inconvénient relevé à l'époque était la longue distance séparant ces deux parties du marégraphe.

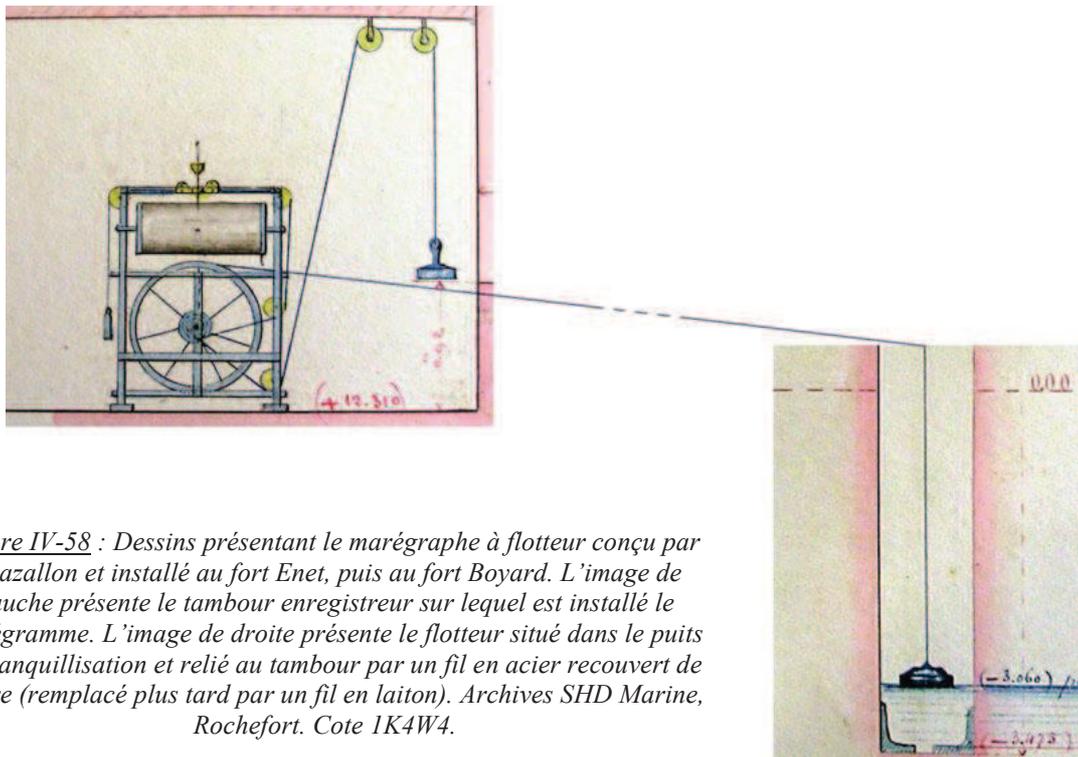


Figure IV-58 : Dessins présentant le marégraphe à flotteur conçu par Chazallon et installé au fort Enet, puis au fort Boyard. L'image de gauche présente le tambour enregistreur sur lequel est installé le marégraphe. L'image de droite présente le flotteur situé dans le puits de tranquillisation et relié au tambour par un fil en acier recouvert de cuivre (remplacé plus tard par un fil en laiton). Archives SHD Marine, Rochefort. Cote 1K4W4.

Cet inconvénient fut étudié par Bouquet de la Grye, du point de vue de la dilatation possible du câble : « Mais où on songe que la température du fil de transmission ne peut guère varier qu'une dizaine de degrés à cause de sa position dans une maçonnerie toujours léchée par la mer, une longueur de 25 m en fil d'acier ne pourra donc avoir qu'un allongement maximum de 0,25 cm. Cette longueur étant, en outre, réduite au cinquième sur la feuille enroulée ne représente plus que l'épaisseur même d'un crayon (1/2 millimètre), valeur insignifiante vis-à-vis de celle occasionnée par les mouvements irréguliers de la mer. ». L'erreur liée à l'effet saisonnier de la dilatation du câble est donc trop faible, ici, pour pouvoir influencer sur les enregistrements du niveau de la mer [Bouquet de la Grye, 1869].

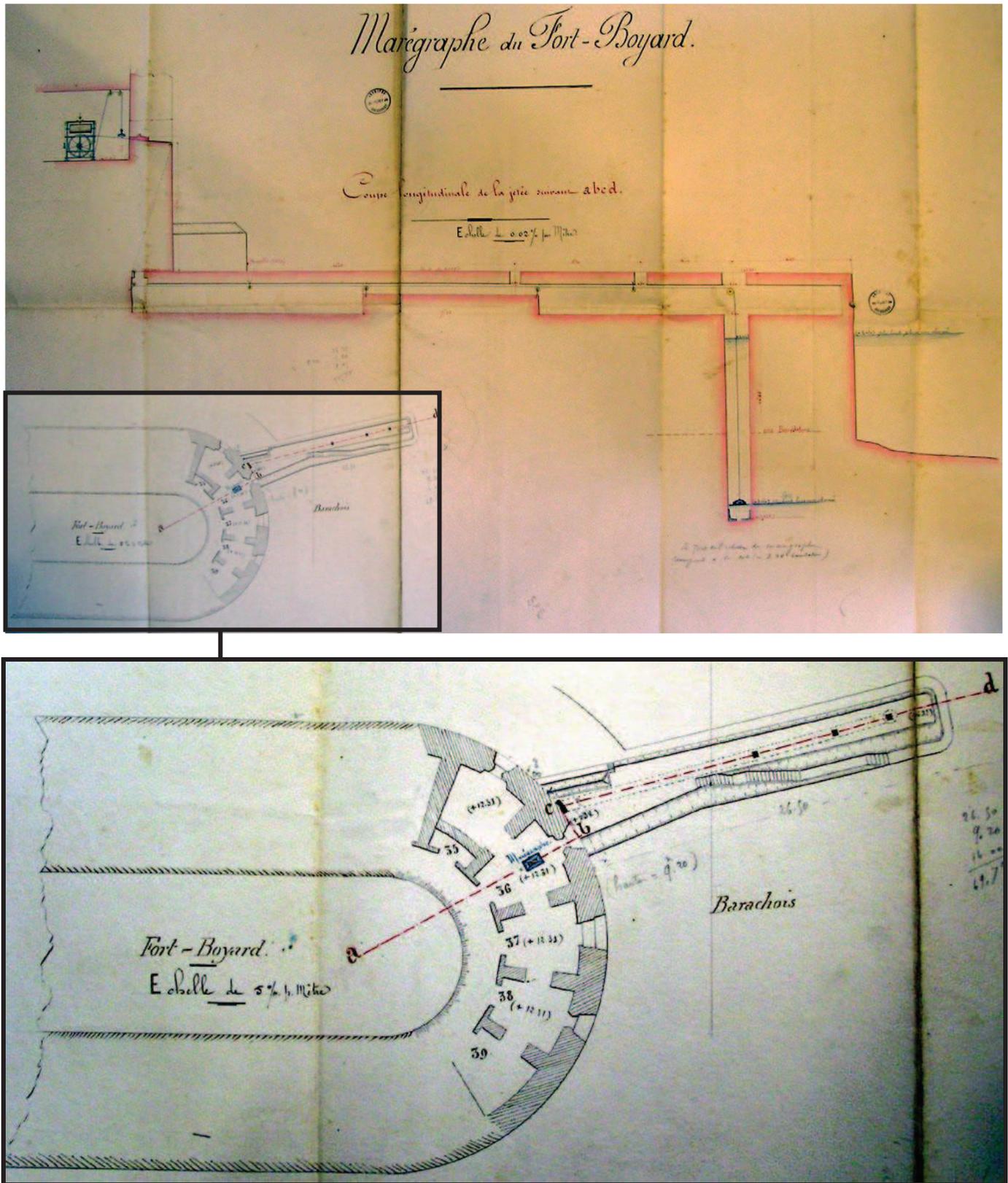


Figure IV-59 : En haut : plan de 1882, vue de dessus, de l'installation du marégraphe au fort Boyard. En bas : plan en coupe, vue de profil, de cette installation. De la droite vers la gauche, on observe le puits de tranquillisation dans lequel se trouve le flotteur, relié au tambour enregistreur par un fil qui passe dans un conduit de la jetée. Archives SHD Marine, Rochefort. Cote 1K4W4.

Lors de la construction du barachois, l'ensemble de l'installation du marégraphe avait été prévu, et outre la construction d'un puits de tranquillisation, un abri en maçonnerie avait également été aménagé

sur la jetée nord, contre le mur d'enceinte du fort. Cet abri devait pouvoir accueillir le tambour enregistreur du marégraphe (en le fermant avec de la tôle et en l'éclairant avec la pose d'un hublot) si le Génie militaire, propriétaire du fort Boyard, s'opposait à ce que celui-ci fut installé à l'intérieur du fort. Mais l'unité militaire donna son autorisation et une casemate du premier étage fut réservée à l'observateur pour y installer, non seulement le tambour enregistreur du marégraphe et son système de poulies, mais également tous les autres instruments nécessaires à ses observations ainsi que le strict nécessaire pour vivre sur place en permanence (*figure IV-59*). Un système de poulies fut mis en place et les modifications de la hauteur d'eau se transmettaient du flotteur au tambour par un câble en acier, recouvert d'une mince couche de cuivre. Comme au fort Enet, une échelle de sauvetage en bronze fut installée dans le puits, afin de pouvoir y descendre à tout moment et une échelle de marée fut placée à l'intérieur du barchois, contre la jetée sud, pour contrôler les mesures du marégraphe, bien que le barchois soit soumis à une agitation de la mer importante.

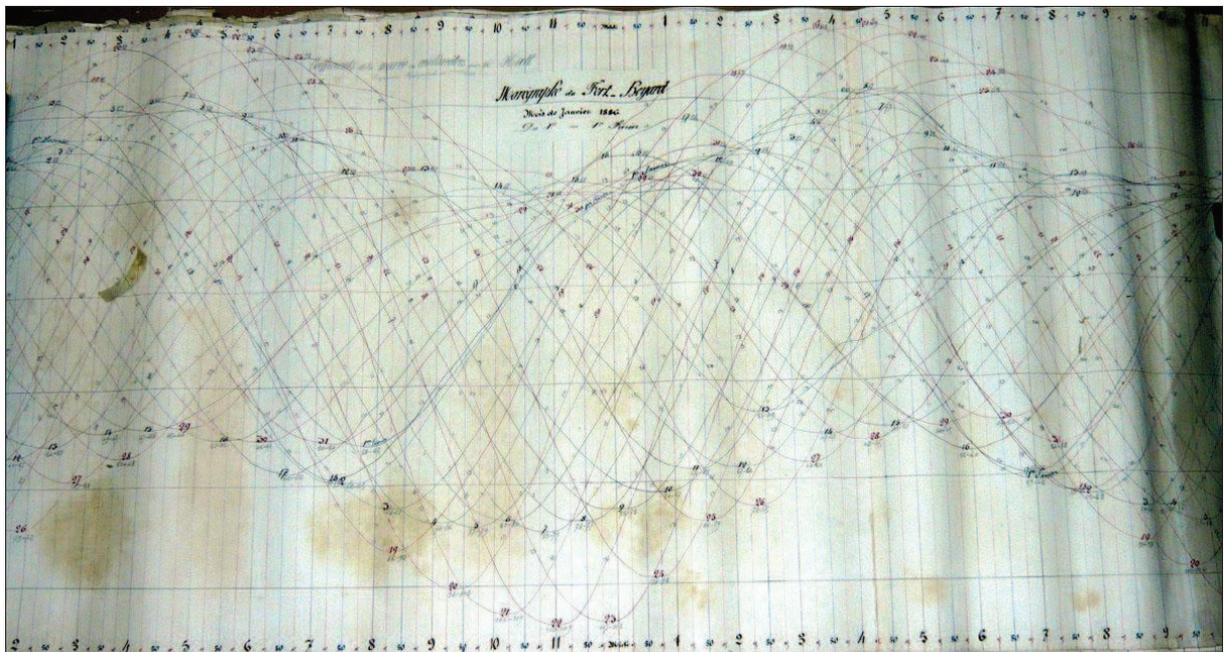


Figure IV-60 : Marégramme du fort Boyard, 1er au 31 janvier 1886. Longueur : 1 m, largeur : 60 cm. Archives du SHOM.

Le niveau de la mer a donc été enregistré au fort Boyard du 11 août 1873 jusqu'au 15 mai 1909. La période de mesures couverte est de 36 ans pour une durée effective d'enregistrement de 32 ans. Les marégrammes (1 m de long sur 60 cm de large) enregistraient quinze jours ou un mois de mesures consécutives (*figure IV-60*) avant d'être « dépouillés » par l'observateur des marées, en charge permanente de la bonne marche du marégraphe. Cet observateur reportait dans un registre, un grand nombre d'informations, comme au fort Enet. Un premier registre contenait les hauteurs du niveau de la mer, de quart d'heure en quart d'heure, relevées à partir des marégrammes. Le second contenait les heures et les hauteurs des pleines et basses mers, ainsi que des mesures météorologiques (pression et température atmosphériques, force et direction du vent), l'état de la mer et toutes les informations ou anecdotes que

l'observateur jugeait utiles de consigner. Ces registres et les marégrammes correspondants sont aujourd'hui conservés dans les archives du SHOM.

Aujourd'hui, il ne reste rien de l'installation d'un marégraphe au fort Boyard. La jetée nord a été entièrement détruite, et la base du puits de tranquillisation n'a pas été retrouvée. Dernier signe de la présence d'un marégraphe, la tranchée (ou rainure) creusée dans le mur extérieur du fort, partant de la fenêtre de la casemate 118 et se dirigeant de biais vers l'ancienne jetée nord, utilisée pour le passage du fil du flotteur au tambour (*figure IV-61*). Nous avons également retrouvé des crochets en laiton de part et d'autre de la rainure, laissant supposer un système d'accroche d'un support pour protéger le fil du marégraphe.

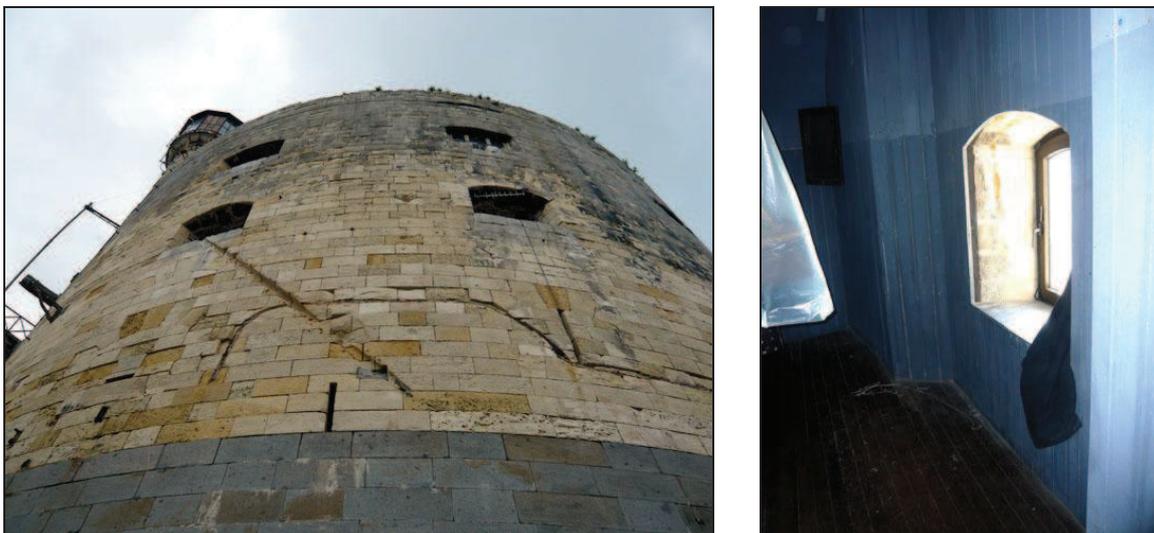


Figure IV-61 : Photographies actuelles du fort Boyard. A gauche : vue du mur d'enceinte sur lequel était accolée la jetée nord du barachois. On aperçoit, dans le mur, la tranchée par laquelle passait le câble de transmission entre le flotteur et le tambour enregistreur. A droite : casemate du marégraphe (n°118).

IV.2.6. Installation d'un observatoire moderne à l'île d'Aix (en 2011)

Nous l'avons vu, la rade de l'île d'Aix a longtemps été un observatoire important du niveau de la mer sur la façade atlantique, notamment en raison de la présence de l'arsenal de Rochefort. Les premières mesures remontent à 1824, soit à un peu plus de 180 ans ! Le chapitre 2 nous l'a montré, les longues séries temporelles du niveau marin sont rares et précieuses dans le contexte actuel de changement climatique. Et justement, les travaux de recherche menés au cours de ce doctorat permettent d'exploiter toutes les séries de mesures du niveau de la mer réalisées depuis 1824 en rade de l'île d'Aix. Il a donc été proposé de reprendre l'observation du niveau marin de nos jours, afin de poursuivre cette longue série, qui couvrira, d'ici une dizaine d'années, près de deux siècles ! De plus, une trace des satellites altimétriques Jason (et anciennement Topex/Poseidon) passe exactement sur le fort Boyard, faisant de la rade de l'île d'Aix un laboratoire naturel intéressant pour tester du matériel, inter-comparer, étudier et

comprendre les différences observées entre les mesures du niveau marin réalisées par altimétrie et marégraphie.



Figure IV-62 : Emplacement des différents instruments composant le nouvel observatoire scientifique de surveillance du niveau de la mer à l'île d'Aix. Les points rouges représentent des emplacements définitifs. Les points jaunes représentent des emplacements possibles. Photographies aériennes modifiées (© 2011 - IGN).

C'est pourquoi notre équipe a monté un projet d'installation d'un observatoire scientifique de surveillance du niveau de la mer à l'île d'Aix. Ce projet étant intimement lié à mes travaux de recherche, j'ai donc démarré et porté ce projet, dès juin 2009, pendant un semestre, en collaboration avec Guy Wöppelmann et Pascal Tiphaneau. Nous avons mis en place une collaboration avec les élus de l'île d'Aix, le Conseil Général de la Charente-Maritime, le SHOM et l'IGN, pour installer et gérer les cinq instruments de mesures composant l'observatoire. En effet, l'objectif était d'installer un observatoire complet, comprenant un marégraphe, une échelle de marée, une station GNSS, une station météorologique et un gravimètre (*figure IV-62*).



Figure IV-63 : A gauche : emplacement du marégraphe et de l'échelle de marée sur la jetée Sainte-Catherine de l'île d'Aix. A droite : marégraphe déporté de la jetée de 1,5 m (2011).

Deux ans plus tard, le projet a pris du retard, et seuls le marégraphe et l'échelle de marée sont installés (au 30 juin 2011). L'emplacement des stations GNSS et météorologiques est défini mais celles-ci ne sont pas encore en place. Quant au gravimètre, son emplacement idéal n'a toujours pas été trouvé. La *figure IV-62* présente les emplacements définis et possibles des différents instruments composant l'observatoire. A terme, la station météorologique fournira des mesures de pression et température atmosphérique, ainsi que des mesures d'humidité ; la station GNSS, elle, sera intégrée au Réseau national GNSS Permanent (RGP) géré par l'IGN⁵⁵.



Figure IV-64 : A gauche : télémètre radar alimenté par un panneau solaire sur la jetée Sainte-Catherine de l'île d'Aix. Présence ponctuelle d'un GNSS. A droite : télémètre radar Optiwave, avec capteur à air libre (2011).

Le marégraphe et l'échelle de marée sont, quant à eux, déjà en place depuis le 22 mars 2011 (*figure IV-63*). Le marégraphe installé fait partie de la toute nouvelle génération des télémètres radar Optiwave, dont le capteur se trouve à l'air libre, et s'affranchit ainsi d'un puits de tranquillisation, source de nombreuses erreurs (*figure IV-64*). Le capteur est déporté de la jetée Sainte-Catherine d'environ 1,5 m, est alimenté par un panneau solaire et transmet ses mesures par ondes radios au boîtier enregistreur situé dans un local du fort de la rade, à une distance d'environ 300 m (*figure IV-65*).



Figure IV-65 : A gauche : emplacement de l'antenne radio recevant les mesures du marégraphe. Au centre : bâtiment du fort de la rade destiné à accueillir les stations GNSS et météorologiques, en plus de l'antenne radio et des boîtiers enregistreurs. A droite : boîtiers enregistreurs des mesures du marégraphe. (2011).

⁵⁵ <http://rgp.ign.fr/>, consulté le 1^{er} décembre 2011.

Comme pour les stations marégraphiques de l'UNESCO (COI) du réseau d'alerte aux tsunamis, ce marégraphe principal de référence est accompagné par un second marégraphe, à capteur de pression, installé à quelques mètres du premier, afin de prendre le relais en cas de panne ou de destruction. Il permet également, ici, de mesurer les basses mers des plus grandes marées que ne peut enregistrer le marégraphe principal. Cet observatoire du niveau de la mer est intégré au réseau RONIM du SHOM et les mesures du marégraphe, débutées le 12 avril 2011, sont disponibles en différé sur le site internet REFMAR⁵⁶.

IV.3. Le phare de Cordouan

IV.3.1. Historique de l'observatoire du niveau de la mer

Les premières origines du phare de Cordouan sont assez mal connues et plusieurs hypothèses sont proposées : la construction d'un édifice en brique sur pilotis lors du règne de Jules César, une tour construite par le fils de Charlemagne ou encore un phare édifié par les arabes de Cordoue sur le modèle de celui d'Alexandrie. Quoi qu'il en soit, il est fort probable que plusieurs tours se soient succédé à cet endroit, car il marque l'entrée de l'estuaire de la Gironde conduisant à la « *noble et puissante ville de Bourdeaux* ». Il était donc essentiel de signaler l'entrée de l'estuaire le plus loin possible et de guider les bateaux dans les passages dangereux. A partir du 11^e siècle, un ermitage bénédictin est installé sur l'îlot de Cordouan. Puis, vers 1360, Edouard, le prince de Galles (aussi appelé le Prince Noir) décide de la construction d'une tour de seize mètres de hauteur, de forme octogonale et qui alertera les navires à l'aide d'un feu de bois entretenu en permanence au sommet de la tour par les ermites vivant sur l'îlot [Binot, 2005b]. En 1545 une carte de l'embouchure de la Gironde fait mention de l'îlot de Cordouan et de sa tour, sous le nom de « *Ricordame* », au sommet duquel on brûle un brasier (*figure IV-66*).

Sous l'action prolongée de la houle et du vent, la tour va se détériorer petit à petit, si bien qu'en 1580, Biron, alors gouverneur de Guyenne, signale au roi Henri III que les ermites ne veulent plus entretenir le feu en haut de la tour, car celle-ci menace de s'effondrer à tout instant. Conséquence, les naufrages se font de plus en plus nombreux et la colère monte chez les marins fréquentant la zone. A la fin de l'année 1581, le roi nomme donc une commission d'experts ayant pour mission de faire un état des lieux du phare. Louis de Foix, alors ingénieur et architecte, et qui fait partie de la commission, déclare au roi qu'il faut reconstruire la tour. Le roi accepte le projet et le 2 mars 1584, Louis de Foix signe le contrat qui l'engage à construire l'ouvrage [Strappini *et al.*, 2008].

⁵⁶ http://refmar.shom.fr/fr/ile_d_aix, consulté le 1^{er} décembre 2011.

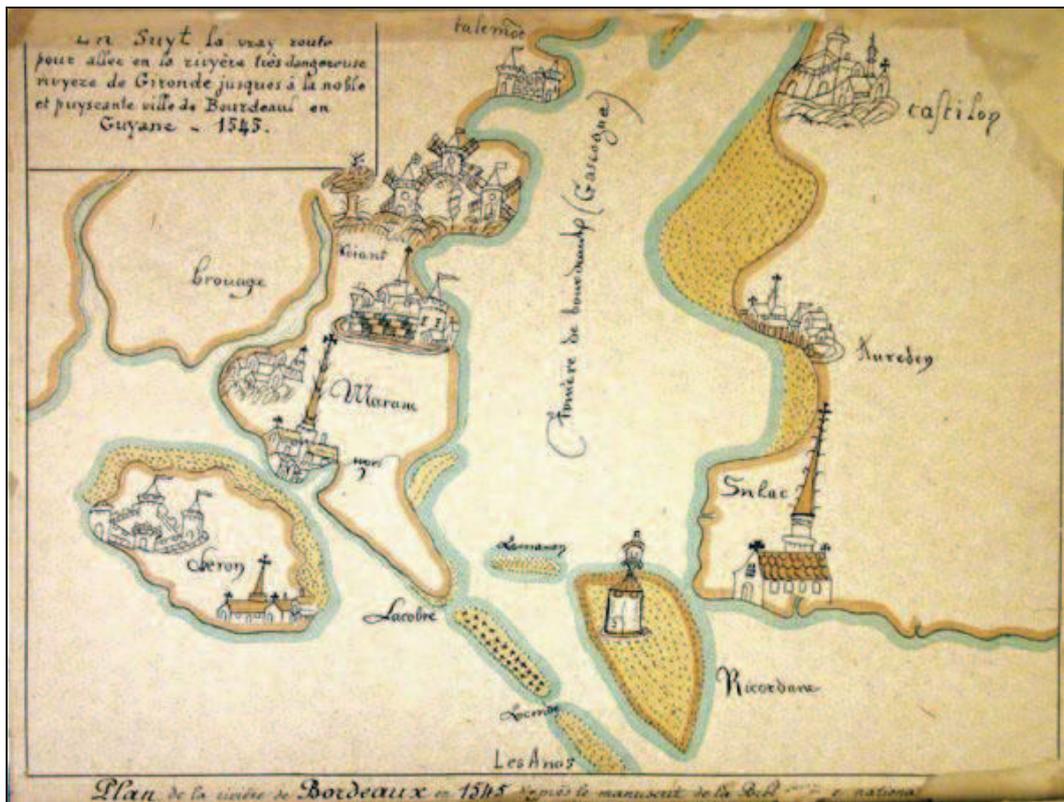


Figure IV-66 : Plan de la rivière de Bordeaux en 1545, dessiné par Gustave Labat en 1893 d'après un manuscrit conservé à la Bibliothèque nationale de France, pour illustrer son ouvrage « Royan et la tour de Cordouan ». Archives départementales de la Gironde, cote BIB I/J 59.

En 1585, Louis de Foix achève la réalisation du premier talus avec beaucoup de difficultés, mais va connaître des problèmes d'argent car le royaume vient à nouveau de rentrer dans une guerre de religions, qui verra l'assassinat du roi Henri III en 1589. En 1591, le phare commence à prendre forme mais encore une fois, l'argent fait défaut et Louis de Foix est obligé de puiser dans ses ressources personnelles pour continuer le chantier. Heureusement, le 28 juin 1594, un nouveau contrat est signé par le roi Henri IV, successeur d'Henri III, apportant de nouvelles garanties financières à Louis de Foix et prévoyant même quelques extensions par rapport au projet initial. Malheureusement, Louis de Foix n'aura pas la chance de contempler son œuvre puisqu'il décède en 1602 avant la fin des travaux, qui seront repris, d'abord par son fils, puis par François Beuscher, son contremaître, à partir de 1606. En 1611, les travaux sont finis et il aura fallu près de vingt-cinq ans pour construire l'un des plus beaux phares du monde de l'époque (figure IV-67), qualifié par certains comme étant « la huitième merveille du monde ». Le phare fonctionne alors pleinement par un feu situé à trente-sept mètres au dessus des plus hautes mers, et entretenu continuellement par des gardiens présents sur place [Binot, 2005a].

En 1645, l'histoire a comme un goût de déjà vu. Les gardiens du phare refusent désormais d'entretenir le feu au sommet de la tour par crainte d'un accident, la tour étant en très mauvais état. Mais rien ne sera entrepris avant 1661 et l'arrivée de Colbert. Il ordonne des travaux de restauration et d'embellissement du phare. Jusqu'en 1664, le premier étage sera donc aménagé en appartement du roi et le système d'éclairage de la lanterne sera remplacé. Mais ces travaux ne suffiront pas à résister au temps

et en 1786, le phare menace à nouveau de s'effondrer. Une décision est donc prise de détruire toutes les parties du phare situées au dessus de la chapelle, c'est-à-dire au dessus du deuxième étage. Un nouveau projet de surélévation du phare voit le jour, dans le but d'augmenter la portée de signalement du phare et de construire une tour beaucoup plus résistante aux assauts de la mer. Les travaux débutent sous la direction de Joseph Teulère et prendront fin en 1790. Le feu est désormais situé à soixante mètres au dessus des plus hautes mers et le phare a la forme que nous connaissons aujourd'hui [Strappini *et al.*, 2008]. En 1823, il sera même le premier phare à être équipé du tout nouvel appareil lenticulaire à système tournant de Fresnel, augmentant encore ainsi sa portée d'éclairément (*figure IV-67*).

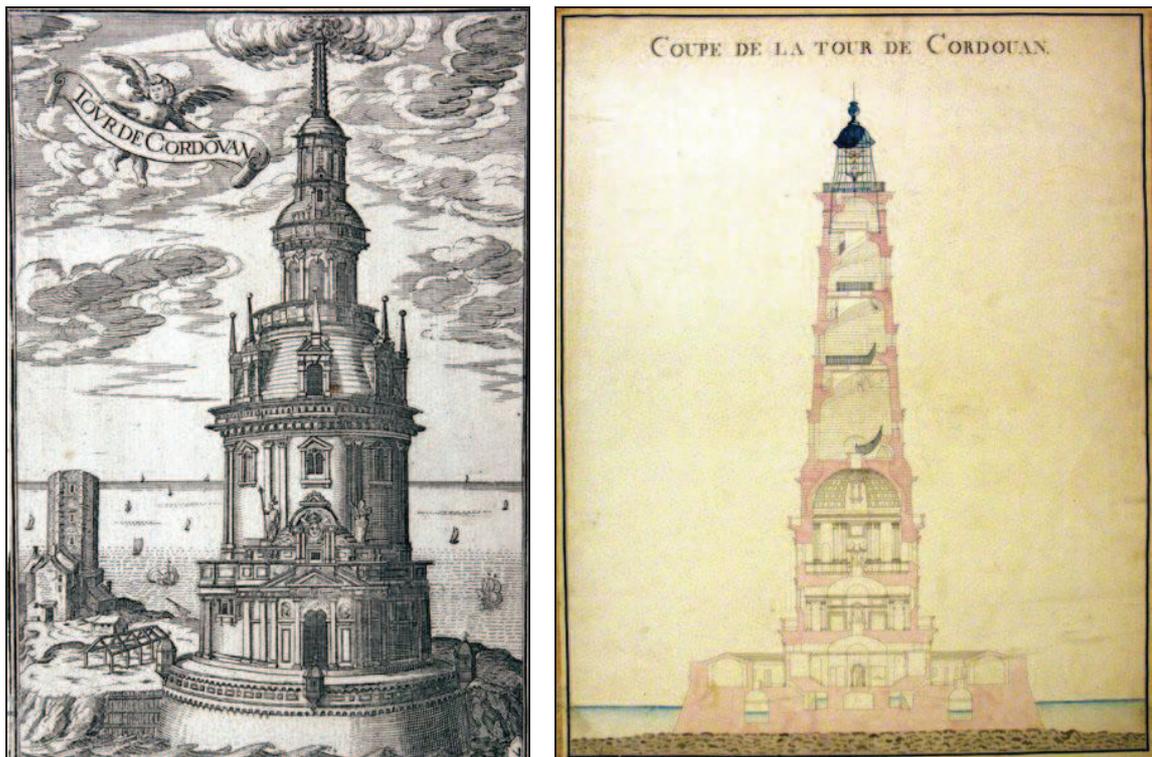


Figure IV-67 : A gauche : la tour de Cordouan de Louis de Foix et, en arrière-plan, les ruines de la tour dite du Prince Noir. Planche gravée par Tassin d'après Claude Châtillon, 1636. Archives départementales de la Gironde, cote BIB L 271. A droite : Elévation de la tour de Cordouan. Dessin à l'encre et à l'aquarelle avec l'appareil lenticulaire de Fresnel, 1823. Archives départementales de la Gironde, cote 2 Fi 2030.

En 1862, le phare de Cordouan est classé au titre de Monument historique, en même temps que la cathédrale Notre-Dame de Paris. En 1926, le phare, constamment soumis à l'action de la houle, commence à montrer des signes de fatigue, c'est pourquoi une carapace en béton armé est construite tout autour du socle du phare. Plusieurs campagnes de restauration ont eu lieu à la fin du 20^e siècle, notamment de 1982 à 1990 et en 2005 [Calbet, 2005]. Pour l'anecdote, l'électrification du phare n'interviendra qu'en 1948 et il est, aujourd'hui, le dernier phare de France surveillé et habité par des gardiens (*figure IV-68*). Haut d'environ soixante-sept mètres, le feu est toujours situé à soixante mètres au

dessus des plus hautes mers, avec une portée d'environ quarante kilomètres. En 2011, le phare a fêté ses 400 ans d'existence⁵⁷.



Figure IV-68 : Photographie actuelle du phare de Cordouan (2008).

IV.3.2. Suivi historique de la position du zéro hydrographique

Au cours des 19^e et 20^e siècles, plusieurs campagnes hydrographiques ont été menées à l'embouchure de l'estuaire de la Gironde, au cours desquelles des sondages hydrographiques étaient effectués. De la même façon que pour les zones d'étude précédentes, un zéro de réduction des sondes était déterminé. A partir d'informations retrouvées dans des classeurs des archives du SHOM, voici l'historique de la description du zéro hydrographique au phare de Cordouan depuis 1812.

- **En 1812**, des observations du niveau de la mer ont été réalisées simultanément au phare de Cordouan et à Royan et consignées dans des cahiers de marées⁵⁸. Le zéro de réduction des sondes utilisé à Cordouan n'a pas été défini par rapport à un repère matériel sur le phare, mais uniquement par rapport au zéro des échelles de marée alors en place (*figure IV-69*).



Figure IV-69 : Annotations extraites du cahier de marées de Cordouan de 1812. Le zéro hydrographique est ici défini comme le point le plus bas des échelles. Archives du SHD Marine, Rochefort. Cote 7JJ 113.

⁵⁷ <http://www.cordouan-400ans.com/>, consulté le 1^{er} décembre 2011.

⁵⁸ « Cahier de marées A Cordouan. N°1 ». Archives du SHD Marine, Rochefort. Cote 7JJ 113.

La première échelle de marée a été utilisée du 4 au 18 août, avant que celle-ci ne soit emportée par la mer (vers 08h40). Une deuxième échelle a alors été mise en place le 1^{er} septembre et utilisée jusqu'au 5 novembre. D'après les informations retrouvées dans ce cahier, le zéro de réduction des sondes a été défini comme étant situé à 1 Pieds (0,325 m⁵⁹) en dessous du zéro de la première échelle et à 4 Pieds 7 pouces (1,489 m) du zéro de la seconde échelle (*figure IV-70*). Les informations retrouvées laissent penser que ce zéro a été déterminé en concordance avec les observations réalisées à Royan.

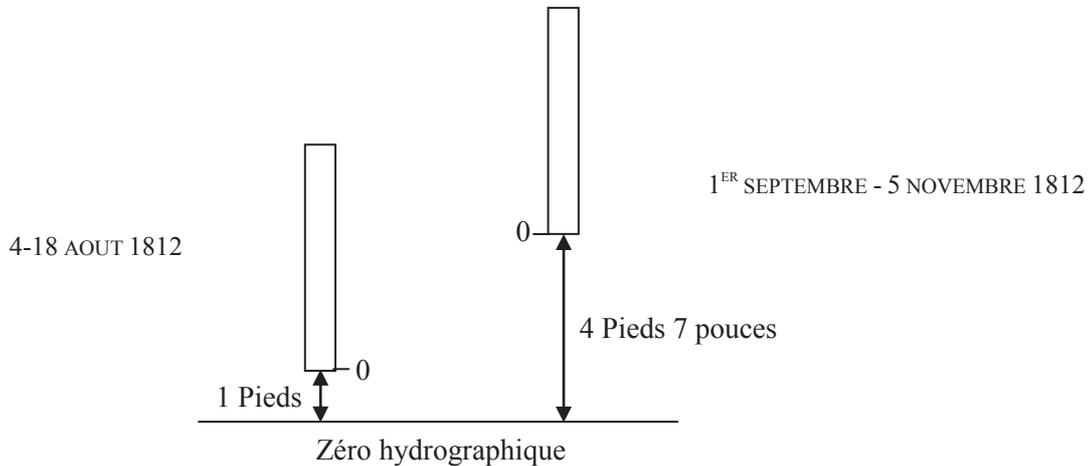


Figure IV-70 : Définition du zéro hydrographique du phare de Cordouan lors des observations du niveau de la mer réalisées en 1812, à l'aide de deux échelles de marée.

Mais les informations retrouvées dans ce cahier ne nous donnent aucune indication quant à la définition du zéro par rapport à un repère du phare. L'indication manquante se trouve en fait dans un ouvrage des archives du SHOM, écrit par Beautemps-Beaupré en 1813, qui stipule que « 4 Pieds 4 pouces de l'échelle correspondent au pied de la tour. ». Le zéro hydrographique serait donc situé à 8 Pieds 11 pouces, soit 2,896 m, en dessous du pied de la tour, qui correspondrait *a priori* au seuil du Perrat.

- **En 1825**, lors d'une campagne de sondage hydrographique comptant pour la réalisation du Pilote français, Beautemps-Beaupré, ingénieur hydrographe en chef de la Marine, va redéfinir ce zéro de manière plus détaillée. Il indique notamment que « *Le plus bas de l'eau sur l'échelle de Cordouan est à - 3 Pieds 0 pouces, c'est-à-dire qu'il faudra ajouter 3 Pieds aux hauteurs de l'eau observées sur l'échelle pour réduire les sondes. Signé B.B.* »⁶⁰, il précise aussi que « *ceci est seulement pour la réduction des sondes, car l'eau n'est descendue que de 1 Pieds 8 pouces au dessous du point zéro de l'échelle.* » (*figure IV-71*). Après vérification, la plus basse mer observée en 1825 a eu lieu le 16 août à 10h45 et le niveau d'eau est bien descendu à 1 Pieds 8 pouces en dessous du zéro de l'échelle de marée.

⁵⁹ **Rappel** : 1 Pied = 32,4839 cm ; 1 pouce = 2,7069 cm ; 1 ligne = 0,2256 cm

⁶⁰ « *Observation des marées. Echelle de Cordouan, Marc Fouénant 1825* ». Archives du SHD Marine, Rochefort. Cote 7JJ 407.

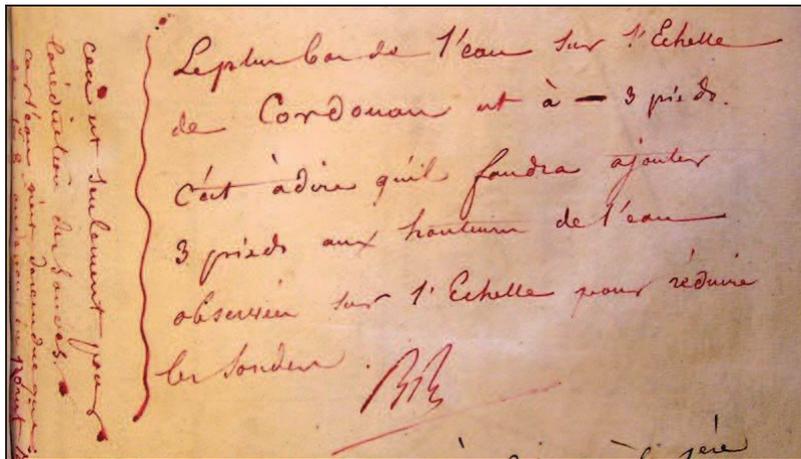


Figure IV-71 : Annotations extraites du cahier de marées de Cordouan de 1825 et rédigé par Beautemps-Beaupré. Le zéro hydrographique est ici défini comme le « plus bas de l'eau sur l'échelle ». Archives du SHD Marine, Rochefort. Cote 7JJ 407.

Beautemps-Beaupré a également pris le soin de relier l'échelle de marée à des repères matériels sur le phare. C'est ainsi qu'il indique que « l'eau étant au niveau de la première marche de l'escalier qui monte à la porte de la tour correspond à 6 Pieds d'eau à l'échelle. ». De même, « le sommet de la première assise de la partie supérieure du Perrat correspond à 5 Pieds de l'échelle. » (figure IV-72). Un document accompagnant le cahier de marées de 1825 donne une dernière information importante quant à la définition du zéro hydrographique. Ce document indique en effet la « hauteur de la marque \triangle tracée par M. Brousseau dans l'escalier qui monte à la tour de Cordouan ». D'après les mesures effectuées, cette marque correspondait à la graduation 22 Pieds 3 pouces 5 lignes de l'échelle de marée.

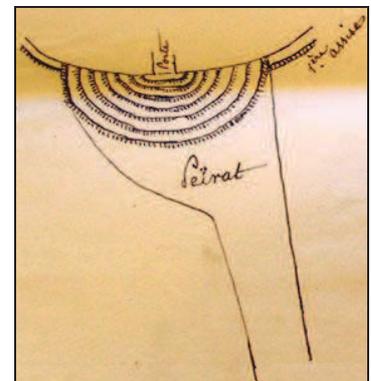
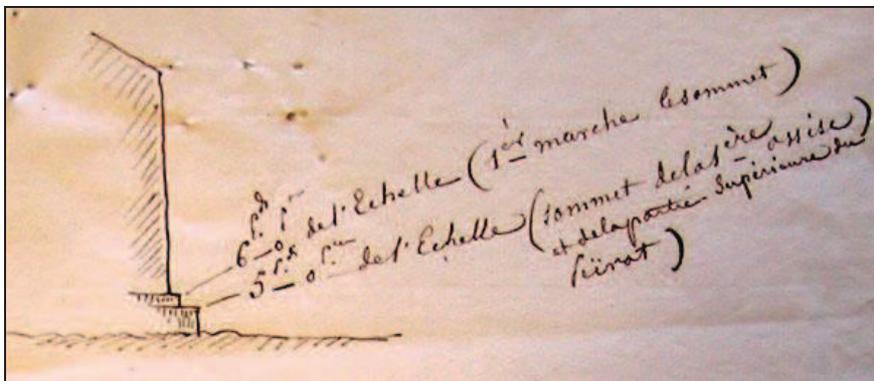


Figure IV-72 : Dessins de Beautemps-Beaupré permettant de relier l'échelle de marée de Cordouan de 1825 à des repères matériels du phare. Dessin de gauche : vue de profil ; dessin de droite : vue de dessus. Archives du SHD Marine, Rochefort. Cote 7JJ 407.

Nous pouvons en déduire que le zéro hydrographique de 1825 a été défini par Beautemps-Beaupré à 9 Pieds, soit 2,924 m, en dessous du sommet de la première marche de l'escalier qui mène au phare, à 8 Pieds, soit 2,599 m, en dessous de la surface du Perrat au pied des marches et à 25 Pieds 3 pouces 5 lignes, soit 8,213 m, en dessous de la marque de Brousseau.

- En 1853, Chazallon, ingénieur hydrographe de 1^{ère} classe, écrit une lettre (annexée au cahier des marées de la même année), dans laquelle il indique utiliser le même zéro hydrographique qu'en 1825 et donne la cote des repères suivants⁶¹ :

- Zéro de Beautemps-Beaupré : 0,00 m
- Surface supérieure du Perrat, ou socle : 2,60 m
- Surface supérieure de la première marche : 2,92 m
- Repère des géographes \triangle : 8,20 m

- En 1874, Manen réalise une mission hydrographique dans l'estuaire de la Gironde et à son embouchure à la suite de laquelle il publie un rapport complet sur la détermination du zéro et la cote des repères⁶². Il indique notamment les résultats d'un nivellement effectué par les Ponts et Chaussées à la même époque (*figure IV-73*) :

- Zéro de l'échelle observée : 0,00 m
- A : Surface du Perrat au pied de la première marche : 2,65 m (+ 0,253 m NGF-Bourdalouë)
- Surface du Perrat au pied de la tour : 2,60 m
- B : Surface supérieure de la première marche de l'escalier : 2,97 m
- C : Seuil de la porte de la poterne : 4,12 m
- D : Seuil de la cour : 7,55 m
- E : Marque des géographes \triangle : 8,08 m

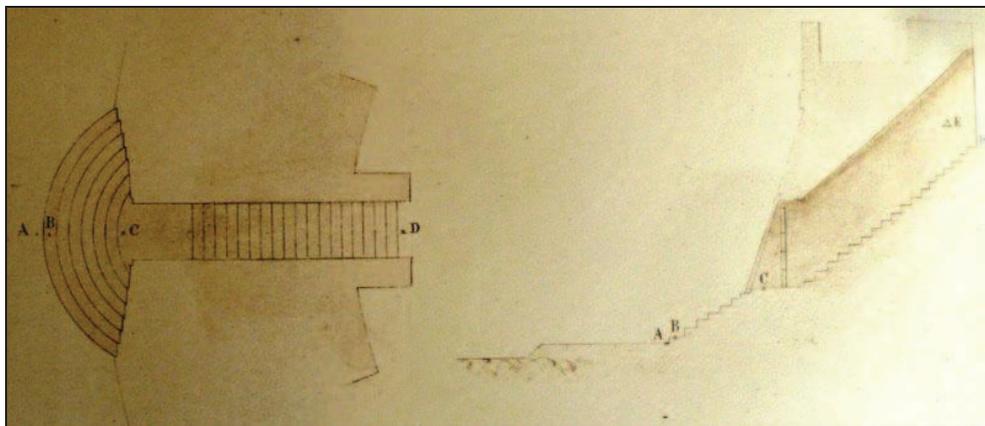


Figure IV-73 :
Illustrations
définissant
l'emplacement des
repères nivelés par
les Ponts et
Chaussées en 1874.
Archives du SHD
Marine, Rochefort.
Cote 7JJ 1336.

Au vu de ces résultats, Manen conclut « *il en résulte donc que le zéro de 1874 serait de 0,05 m en contre bas de celui de Beautemps-Beaupré.* ». Quant à la différence entre les deux cotes de la marque des géographes, qui est de 17 cm, Manen estime que l'erreur a probablement été commise en 1825, le nivellement effectué en 1874 lui semblant plus précis. Cependant, le point exact de la marque des

⁶¹ « *Marées - Côtes de France II, de Brest à Saint-Jean de Luz* ». Archives du SHOM, cote 689.

⁶² « *Côte du Médoc. Observatoires de la Négade et Cordouan - Côtes de France 1874, Marées, volume n°4.* ». Archives du SHD Marine, Rochefort. Cote 7JJ 1336.

géographes qui a été coté n'est pas indiqué, et cela peut prêter à confusion, comme le montre la *figure IV-74*. Est-ce le trait inférieur de la base de la gravure, le trait supérieur, ou encore le sommet du triangle ?

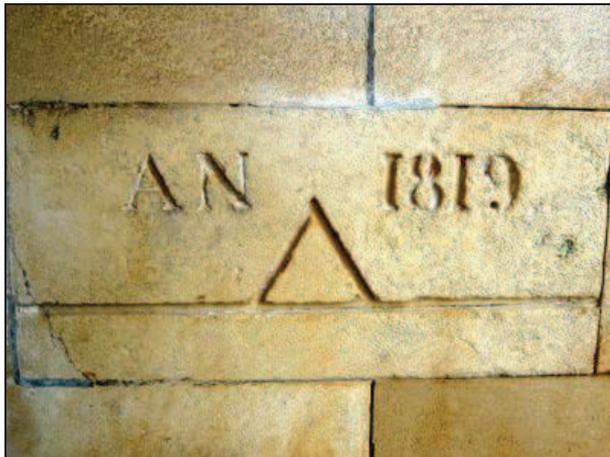


Figure IV-74 : Photographie de la marque des géographes du phare de Cordouan (2008).

- **En 1892**, Heraud, ingénieur hydrographe, utilise le même zéro hydrographique qu'en 1874 lors de sa mission à l'embouchure de l'estuaire de la Gironde⁶³.

- **En 1912**, Fichot, ingénieur hydrographe principal, effectue un travail de reconnaissance de l'estuaire de la Gironde, pour lequel il indique utiliser le même zéro hydrographique qu'en 1874 et 1892. Il précise que ce zéro est situé à 4,12 m en dessous du seuil en bronze de la porte extérieure de la poterne du phare⁶⁴.

- **En 1970**, le Port Autonome de Bordeaux (actuellement GPMB) a indiqué dans une lettre au SHOM que le zéro hydrographique était situé à 4,12 m en dessous du seuil en bronze de la porte extérieure de la poterne du phare, et que ce zéro avait été adopté par toutes les missions hydrographiques depuis 1874⁶⁵.

- **En 2005**, le Port Autonome de Bordeaux, effectue un nivellement des principaux repères du phare de Cordouan, lors des travaux de rénovation du socle. Il indique que le zéro de l'échelle de lave placée le long du socle est calé sur le zéro hydrographique de 1874. C'est d'ailleurs cette échelle qui va lui servir de point de départ pour coter les repères du phare. Voici les cotes mesurées, par rapport au zéro hydrographique⁶⁶ :

- A : Seuil du Perrat, au pied de la première marche : $2,647 \pm 0,003$ m
- B : Surface supérieure de la première marche : $2,855 \pm 0,002$ m
- C : Seuil de la porte d'entrée de la poterne : $4,127 \pm 0,003$ m

⁶³ « *Marées - Côtes de France II, de Brest à Saint-Jean de Luz* ». Archives du SHOM, cote 689.

⁶⁴ « *Recherches hydrographiques. Volume 19.* », Page 21. Archives du SHOM.

⁶⁵ Archives de la cellule hydrodynamique côtière du SHOM.

⁶⁶ « *Nivellement de contrôle des différents repères connus au phare de Cordouan* », Fichou (Port Autonome de Bordeaux), vendredi 30 septembre 2005. Archives de la cellule hydrodynamique côtière du SHOM.

- C bis : Surface supérieure de la dernière marche : $3,990 \pm 0,002$ m

Fichou, observateur ayant réalisé ce nivellement, remarque que l'escalier du Perrat a été modifié depuis les dernières mesures car le repère B se trouve environ 12 cm plus bas qu'auparavant. En effet, le nombre de marches de l'escalier était de 7 auparavant, contre 6 de nos jours.

- **En 2008**, notre équipe de l'UMR 6250 LIENSs a réalisé un nivellement des repères du phare de Cordouan. En prenant comme point de départ la graduation 3,00 m de l'échelle de lave, dont le zéro concorde avec le zéro hydrographique de 1874, voici les cotes obtenues (par rapport au zéro hydrographique) :

- A : Seuil du Perrat, au pied de la première marche : $2,630 \pm 0,004$ m

- B : Surface supérieure de la première marche : $2,848 \pm 0,004$ m

- C : Seuil de la porte d'entrée de la poterne : $4,119 \pm 0,004$ m

- D : Surface supérieure de la dernière marche : $3,867 \pm 0,004$ m

- E : Marque des géographes  : $8,121 \pm 0,005$ m

Afin de mieux visualiser l'évolution de la définition du zéro hydrographique, nous avons rapporté sa cote à plusieurs repères du phare (*tableau IV-13*).

Année	Position du zéro hydrographique par rapport au			
	Seuil du Perrat, au pied des marches	Sommet de la première marche	Repère des géographes 	Seuil de la porte de la poterne
1812	- 2,896 m	-	-	-
1825	- 2,599 m	- 2,924 m	- 8,213 m	-
1853	- 2,60 m	- 2,92 m	- 8,20 m	-
1874	- 2,65 m	- 2,97 m	- 8,08 m	- 4,12 m
1912	-	-	-	- 4,12 m
1970	-	-	-	- 4,12 m
2005	- 2,647 m	- 2,855 m	-	- 4,127 m
2008	- 2,630 m	- 2,848 m	- 8,121 m	- 4,119 m

Tableau IV-13 : Récapitulatif des différentes cotes adoptées pour le zéro hydrographique du phare de Cordouan, de 1812 à 2008. Le double trait rouge correspond à la redéfinition du zéro hydrographique.

Cette observation de l'évolution dans le temps du zéro hydrographique n'a de sens que si les repères choisis ont été stables au cours du temps. On constate ici que le sommet de la première marche a été modifié lors de travaux de rénovation des marches en septembre 1988 (communication personnelle de Serge Andron, gardien du phare), ce repère peut donc être considéré comme détruit après 1874. Le seuil du Perrat, au pied des marches, ne présente pas de particularités permettant de définir un emplacement précis pour la mesure de ce repère, pouvant expliquer quelques légères différences significatives. De même, le nivellement du repère des géographes est assez difficile car celui-ci est gravé dans l'escalier étroit d'accès au phare, ce qui peut expliquer la différence de 4 cm entre la cote de 1874 et celle de 2008. Enfin, le seuil de la porte de la poterne présente une remarquable stabilité au cours du temps. L'analyse de l'ensemble de ces repères permet donc d'étudier l'évolution de la définition du zéro hydrographique de

manière fiable. La *figure IV-75* présente un récapitulatif de la situation relative des différentes définitions de ce zéro au phare de Cordouan.

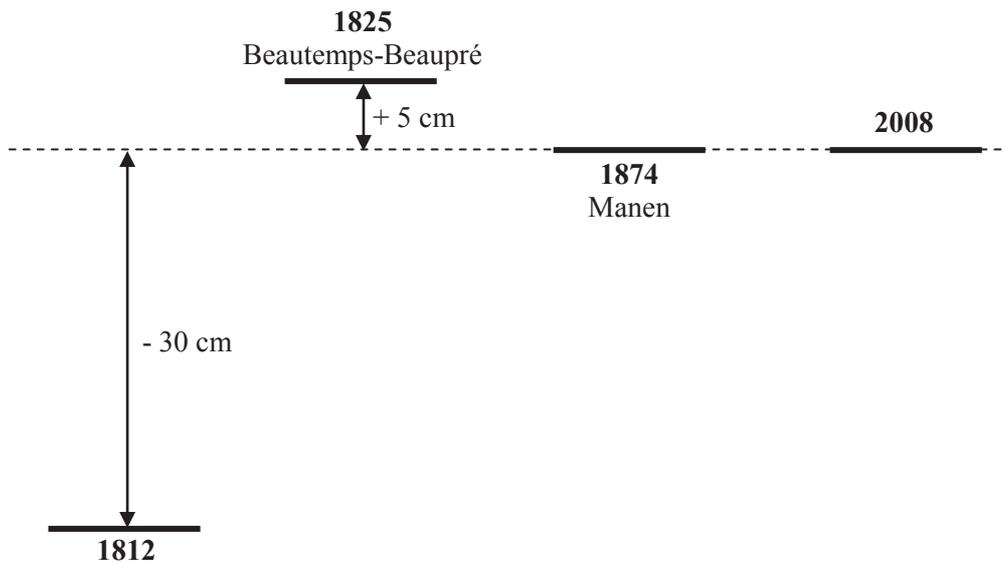


Figure IV-75 : Situation relative des différents zéros hydrographiques utilisés à Cordouan de 1812 à 2008.

IV.3.3. Aperçu des repères de marée inventoriés

Un historique de la cote des principaux repères de nivellement et/ou de marée présents au phare de Cordouan de 1812 à nos jours a été réalisé à partir d'informations retrouvées dans les centres d'archives du SHOM et du SHD-Marine Rochefort. L'ensemble des fiches produites pour chacun des repères est disponible en annexe. Nous ne présentons ici, qu'une vue d'ensemble précisant l'emplacement de chaque repère (*figure IV-76*), ainsi que la fiche du repère principal de Cordouan.

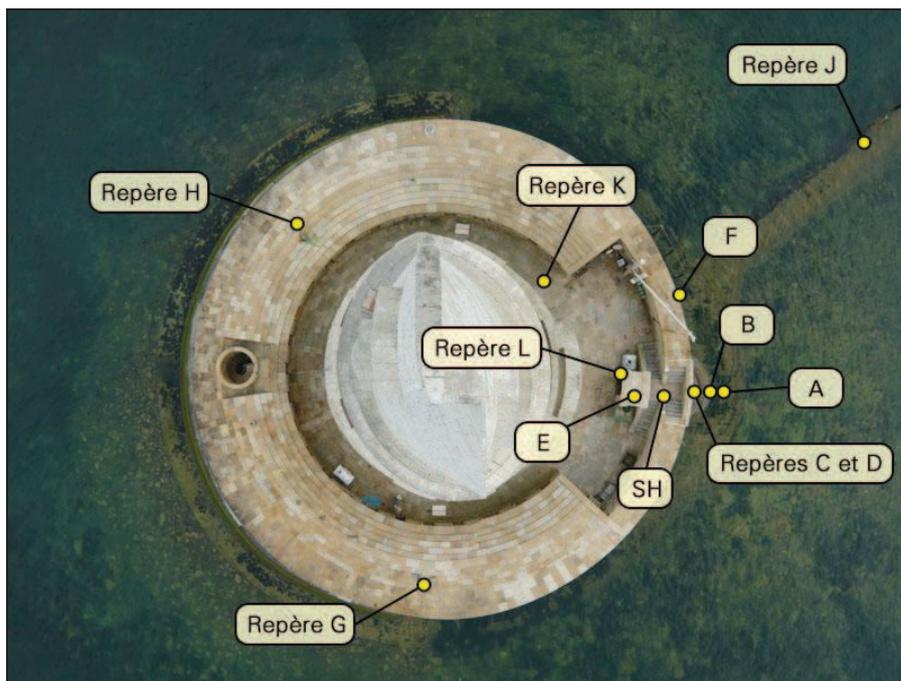
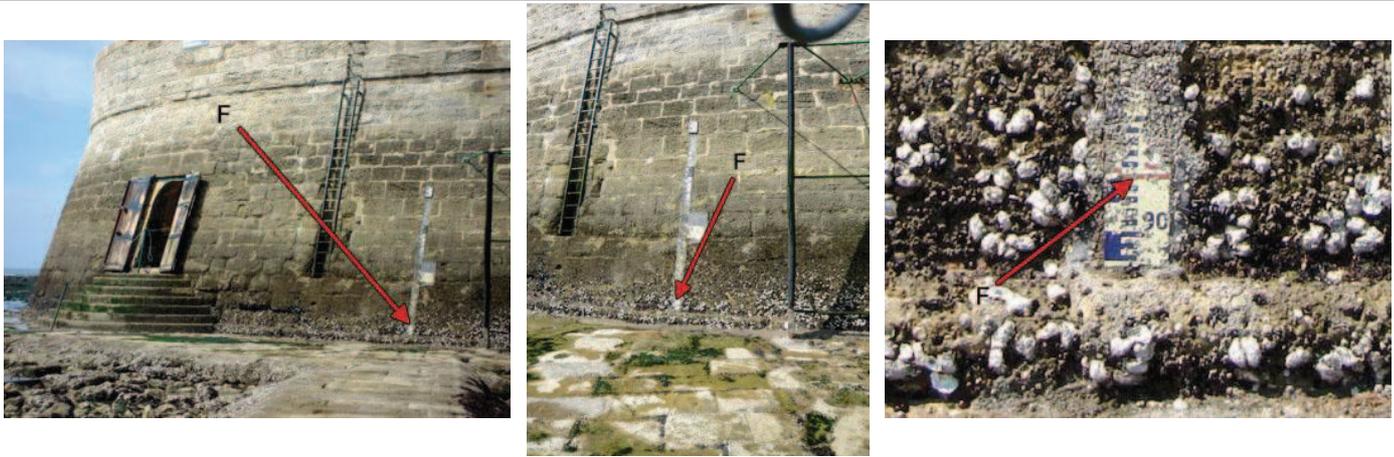


Figure IV-76 : Localisation des différents repères de nivellement et/ou de marée du phare de Cordouan. Montage photo réalisé à partir de photographies prises au sommet du phare.

REPERE F (existant)				
Période : 1874 à aujourd'hui		Type : Echelle en lave émaillée		
				
<p>Description : Echelle en lave émaillée installée en 1874 par la mission hydrographique dirigée par Manen et fabriquée par une usine de Saint-Martin-près-Riom. Elle est située contre le bouclier de protection du phare, côté Est. Le zéro de cette échelle correspond au zéro hydrographique encore en vigueur à Cordouan. Graduation ayant servi de repère en 2008 : 3,00 m. Repère fondamental du SHOM.</p>				
Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
2005	F	+ 3,00 m	Zéro hydrographique	« Fiche d'Observatoire de Marée de Cordouan, n°1670 », MHA, Deniel, 10 janvier 2006, archives du SHOM
2008	F	+ 3,00 m	Zéro hydrographique	Graduation 3,00 m

IV.3.4. Relation entre les réseaux NGF

Pour notre troisième zone d'étude, nous ne disposons pas d'informations suffisantes permettant de calculer par nous-mêmes la relation existante entre les trois réseaux NGF utilisés au phare de Cordouan. Nous ferons donc confiance aux informations retrouvées dans un classeur archivé dans les locaux de la cellule Hydrodynamique Côtière du SHOM, dans lequel les valeurs de conversion sont indiquées (ce classeur répertorie principalement les cotes des zéros hydrographiques des ports français). La *figure IV-77* représente la situation des différentes origines des réseaux NGF utilisés au phare de Cordouan.

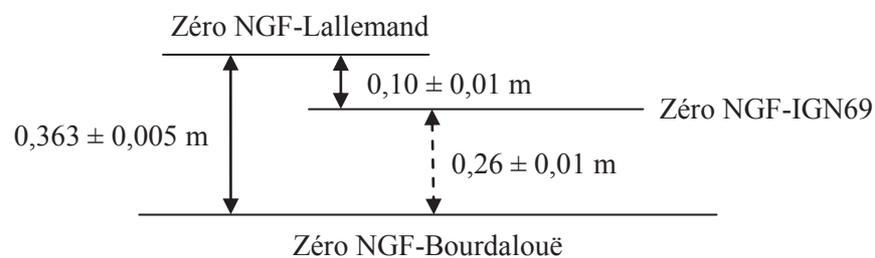


Figure IV-77 : Situation relative des différentes origines des réseaux NGF utilisés au phare de Cordouan. Le trait pointillé indique que la valeur est déduite des deux autres.

La différence entre les origines des réseaux NGF-Lallemand et NGF-IGN69, de $0,10 \pm 0,01$ m, est conforme avec la valeur publiée sur le site internet de l'IGN (0,10 m) pour effectuer une conversion entre ces deux réseaux dans la zone de Soulac-sur-Mer (feuille 1333), d'après la grille Centre Ouest⁶⁷.

IV.3.5. Inventaire et description des mesures enregistrées

De nombreux lots de mesures du niveau de la mer enregistrées au phare de Cordouan ont été retrouvés dans les centres d'archives. Les mesures réalisées couvrent une période totale de 200 ans (de 1812 à aujourd'hui) pour une durée effective d'enregistrement de 66 ans. La *figure IV-78* montre cette répartition temporelle, en séparant les lots de mesures réalisées lors de campagnes hydrographiques ponctuelles (en rouge) et le lot de mesures réalisées à l'aide d'un marégraphe permanent (en bleu).

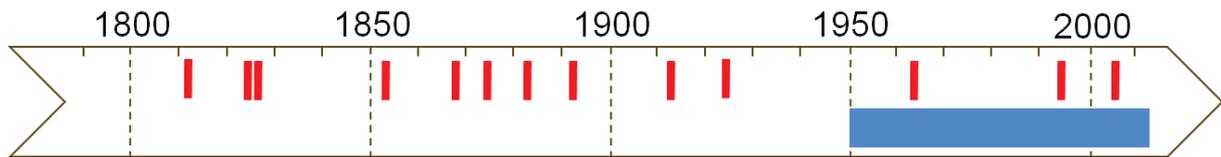


Figure IV-78 : Représentation temporelle des mesures du niveau de la mer enregistrées au phare de Cordouan de 1812 à aujourd'hui. En rouge : campagnes de mesures ponctuelles ; en bleu : marégraphe permanent.

Ces différents lots de mesures n'ont pas tous été enregistrés de la même manière ni dans un même référentiel de temps et de hauteur. Le *tableau IV-14* dresse donc un récapitulatif détaillé des mesures réalisées au phare de Cordouan. A la suite de ce tableau, nous donnerons des informations concernant le marégraphe permanent du phare de Cordouan.

⁶⁷ <http://geodesie.ign.fr/index.php?page=grilles>, consulté le 1^{er} décembre 2011.

Période	Durée effective	Mesures		Archivage des mesures		Système de hauteur		Système de temps		
		Appareil	Description	Numérique	Papier	Pieds	Mètres	TSV	TSM	TU
1812	3 mois	Echelle	Hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	LIENSs	SHD Rochefort - 7JJ 113	X		X		
1825	4 mois	Echelle	Hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	LIENSs	SHD Rochefort - 7JJ 407	X		X		
1826	4 mois	Echelle	PM et BM diurnes	LIENSs	SHOM, Brest		X	X		
1853	2 mois	Echelle	Hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	LIENSs	SHOM, Brest		X	X		
1868	4,5 mois	Echelle	Hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	LIENSs	SHD Rochefort - 7JJ 1253		X	X		
1874	5 mois	Echelle	Hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	LIENSs	SHD Rochefort - 7JJ 1336		X	X		
1882	2 mois	Echelle	Hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	LIENSs	SHD Rochefort - 7JJ 1563		X		X	
1892	5,5 mois	Echelle	Hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	LIENSs	SHD Rochefort - 7JJ 1914		X		X	
1912	5 mois	Echelle	Hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	LIENSs	SHD Rochefort - 7JJ 2585		X	X		
1924	5 mois	Echelle	Hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	LIENSs	SHD Rochefort - 7JJ 2919		X			X
1963	1,5 mois	?	Hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure		Archives du SHOM - SH2 777		X			X
1994	3 mois	Marégraphe plongeur	Hauteurs toutes les 10 minutes	SHOM			X			X
2005	2 mois	Marégraphe plongeur	Hauteurs horaires	SHOM			X			X
1950 - 2011	62 ans ?	Marégraphe pression	Marégrammes - Hauteur en continu		GPMB et AD33, Bordeaux		X			X

Tableau IV-14 : Récapitulatif et description des lots de mesures du niveau de la mer enregistrés au phare de Cordouan entre 1812 et aujourd'hui.

En plus des nombreuses campagnes de mesures ponctuelles effectuées, un marégraphe permanent est installé au phare de Cordouan depuis 1950 au moins. Il existe un doute quant à la date précise d'installation, que le service hydrographique du Grand Port Maritime de Bordeaux (GPMB, propriétaire du marégraphe) estime entre 1940 et 1950. Le marégraphe installé est assez rare sur les côtes françaises, il s'agit d'un marégraphe à capteur de pression, de marque Brillié. Le capteur de pression est une chambre à air composée d'un mélange « eau distillée + air » et installé à une dizaine de mètres à l'extérieur du phare. Il est installé dans un caisson métallique d'un mètre carré (profondeur : 60 cm) fixé dans la roche, qui communique avec l'eau par un conduit de vingt centimètres de long et de cinq centimètres de diamètre (*figure IV-79*). Le capteur étant situé à proximité du phare, il découvre à marée basse, et

l'enregistrement du niveau marin s'arrête donc à 2,20 m. C'est à la fois un inconvénient car les épisodes de basses mers ne sont pas enregistrés mais c'est aussi un avantage car c'est un excellent moyen de contrôler la bonne marche du marégraphe. En effet, si le marégraphe « décroche » à 2,20 m, il fonctionne bien, tandis que toute autre valeur indiquerait un problème. Par exemple, un ensablement important du caisson du capteur provoquerait un décrochage du marégraphe à 2,30 m ou plus. A noter que la précision des mesures est de l'ordre de 2 à 3 cm, selon le service hydrographique du GPMB.



Figure IV-79 : A gauche : emplacement du capteur de pression du marégraphe, situé à une dizaine de mètres à l'extérieur du phare de Cordouan. Au centre : capteur de pression, recouvert d'une plaque métallique en temps normal. A droite : échelle de marée du phare, installée le long du Perrat.

Le capteur de pression ne mesure pas la densité de l'eau, mais la pression de la colonne d'eau située au dessus de lui ainsi que la pression atmosphérique, qu'il transmet au tambour enregistreur par un manomètre à mercure, via un tube en cuivre qui les relie. Le tambour enregistreur est lui situé dans la cuisine du phare, et couplé à une pendule numérique de marque Gorgy Timing (modèle RT600). Les marégrammes (72 x 43 cm) enregistrent une semaine complète de mesures avant d'être retirés du tambour. Depuis 1969, ils sont stockés dans les archives du GPMB. Le zéro du marégraphe est calé sur le zéro hydrographique actuel du phare de Cordouan, c'est-à-dire le zéro défini par Manen en 1874 (4,12 m en dessous du seuil de la porte de la poterne). Des mesures de pression atmosphérique sont également réalisées à l'aide d'un baromètre de marque Jules Richard (*figure IV-80*).

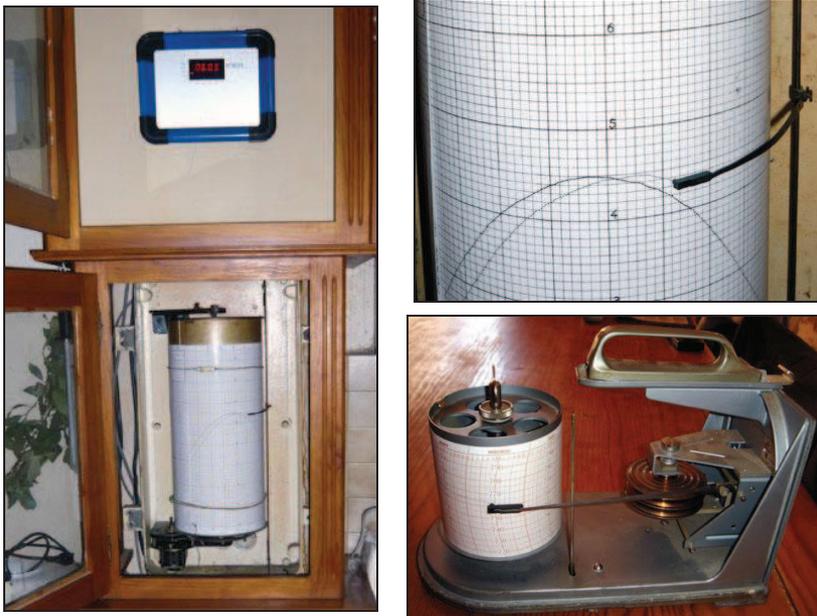


Figure IV-80 : A gauche : photographie actuelle du tambour enregistreur du marégraphe et de sa pendule numérique, situés dans la cuisine du phare de Cordouan. En haut à droite : Le stylet trace la courbe des hauteurs d'eau sur le marégramme et marque un point toutes les deux minutes. En bas à droite : baromètre.

A l'origine, le marégraphe a été installé dans le but de réaliser des prédictions de marée plus précises et de réduire les sondages bathymétriques à l'embouchure de la Gironde. Dans les faits, les données de ce marégraphe sont peu utilisées et leur qualité n'est pas garantie, l'ensablement du caisson du capteur de pression étant fréquent. Actuellement entretenu par les deux gardiens permanents du phare, le marégraphe actuel est voué à être remplacé prochainement au profit d'un marégraphe côtier numérique, moderne et autonome, en prévision d'une possible suppression de la présence de gardiens au phare de Cordouan.

IV.4. Inventaire des données du niveau de la mer répertoriées sur l'ensemble du littoral charentais

Pouvreau [2008] a réalisé le premier inventaire des mesures historiques françaises du niveau de la mer conservées dans les centres d'archive. Bien que riche en données, cet inventaire n'est pas exhaustif compte tenu du caractère très difficile d'inventorier de telles mesures, souvent oubliées de tous, et des nombreux centres susceptibles d'archiver ces données. Nous avons tenu, ici, à reprendre l'inventaire de Pouvreau pour le littoral charentais et à le compléter avec de nouvelles mesures découvertes. De plus, quelques petites erreurs ont été détectées et corrigées dans l'inventaire initial. L'inventaire détaillé des données du niveau de la mer répertoriées sur l'ensemble du littoral charentais est disponible en annexe. Le *tableau IV-15* propose une synthèse de cet inventaire, tandis que la *figure IV-81* présente une carte géographique de l'emplacement des observatoires pour lesquels des mesures ont été répertoriées.

Nom de l'observatoire	Identifiant SHOM / PSMSL / GLOSS	Latitude	Longitude	Période couverte	Nombre d'années couvertes	Série complète à	Nombre d'années effectives
Les Islattes	-	46,23	-1,39	<i>installation en cours</i>			
Saint Martin de Ré	643 / - / -	46,21	-1,36	1996 - 1997	0,08	100%	0,08
"île de Ré"	-	-	-	1963	-	-	-
La Pallice	34 / 466 / -	46,158	-1,219	1885 - auj.	127	39,37%	50
La Rochelle (Vieux Port)	753 / - / -	46,154	-1,153	1775 - 1966	192	9,90%	19
Île d'Aix	189 / - / -	46,007	-1,174	1824 - auj.	188	4,79%	9
fort Enet	751 / - / -	46,004	-1,144	1859 - 1873	15	93,33%	14
fort Boyard	569 / - / -	45,999	-1,213	1873 - 1909	37	86,49%	32
Vergeroux	-	45,96	-0,99	1824	-	-	-
Rochefort	118 / - / -	45,946	-0,953	1824 - auj.	188	45,21%	85
Le Chapus	155 / - / -	45,853	-1,176	1878 - auj.	134	17,91%	24
La Cayenne	187 / - / -	45,789	-1,125	1878 - 1973	96	0,43%	0,42
"Charente"	-	-	-	1978 - 1993	-	-	-
Saint Denis d'Oléron	737 / - / -	46,03	-1,37	1882	0,17	100%	0,17
La Perrotine	-	45,96	-1,24	1882	0,04	100%	0,04
La Cotinière	736 / - / -	45,914	-1,328	2008 - auj.	3,25	100%	3,25
La Perroche	-	45,89	-1,3	1882	0,17	100%	0,17
Le château d'Oléron	-	45,88	-1,19	1878 - 1882	5	6,67%	0,33
Coureaux d'Oléron	154 / - / -	45,82	-1,22	1813 - 1971	159	0,47%	0,75
"île d'Oléron"	-	-	-	1960 - 1964	-	-	-
La Coubre	-	45,69	-1,22	1874 - 1924	51	1,96%	1
Royan	308 / - / -	45,620	-1,028	1812 - auj.	200	8,50%	17
Talmont	-	45,53	-0,91	1878 - 1892	15	3,89%	0,58
Mortagne	-	45,47	-0,84	1868 - 1892	25	3,33%	0,83
Phare de Cordouan	193 / - / -	45,586	-1,172	1812 - auj.	200	33 %	66

Tableau IV-15 : Synthèse des mesures du niveau de la mer inventoriées sur le littoral charentais jusqu'au 31 décembre 2011.



Figure IV-81 : Localisation des observatoires historiques, actuels et futurs du niveau de la mer en Charente-Maritime. Le nombre d'années effectives de mesures du niveau de la mer est indiqué par un pictogramme et pris en compte jusqu'au mois d'avril 2011.

En observant la *figure IV-81*, on s'aperçoit assez vite du potentiel important de mesures existant dans la zone de La Rochelle et dans la rade de l'île d'Aix. La *figure IV-82* est une frise chronologique représentant la répartition temporelle des mesures de la rade de La Rochelle, de la rade de l'île d'Aix et du phare de Cordouan. On y voit également que la période couverte sur ces deux zones (La Rochelle et Aix) ainsi qu'à Cordouan est grande. Afin de valoriser au maximum ces différents jeux de données, l'objectif, dont les résultats sont présentés dans le prochain chapitre, est de construire, d'abord trois séries temporelles composites (La Rochelle, rade de l'île d'Aix et phare de Cordouan), puis de tenter de

construire une série composite du pertuis d'Antioche, comprenant à la fois la série de La Rochelle et celle de la rade de l'île d'Aix.

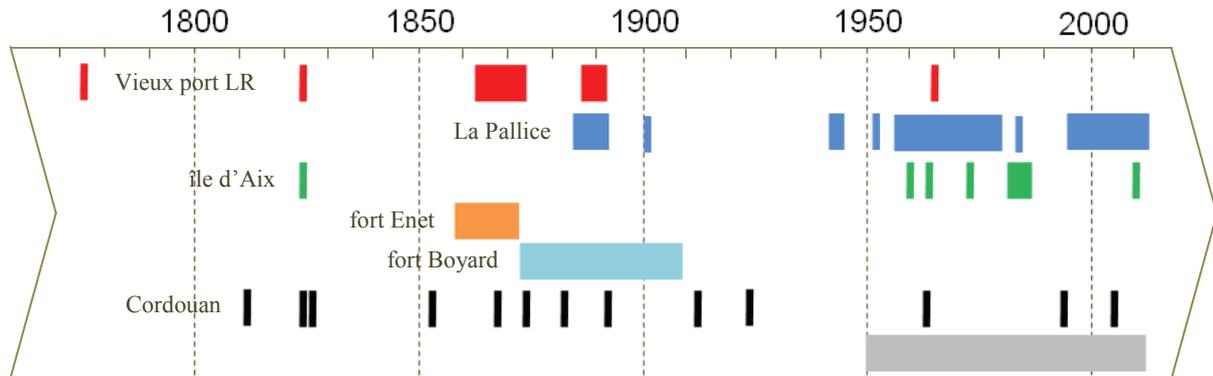


Figure IV-82 : Représentation temporelle des mesures du niveau de la mer enregistrées au Vieux port de La Rochelle (rouge), au port de La Pallice (bleu), à l'île d'Aix (vert), au fort Enet (orange), au fort Boyard (bleu ciel) et au phare de Cordouan (noir et gris).

CHAPITRE V - CONSTRUCTION DE SERIES TEMPORELLES

V.1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter comment, à partir de données historiques (hauteurs d'eau et pression atmosphérique) retrouvées dans les centres d'archives, on peut construire une série temporelle cohérente de qualité, utilisable aujourd'hui à des fins scientifiques. Après avoir défini la notion de série temporelle cohérente, nous présenterons les outils et les méthodes utilisés pour la construction de séries du niveau de la mer, et de pression atmosphérique, avant d'exposer les résultats obtenus sur le littoral charentais.

V.1.1. Définition d'une série temporelle cohérente

Qu'est-ce qu'une série temporelle cohérente ? Comme son nom l'indique, c'est une série de mesures d'une grandeur physique qui doit être cohérente sur une période de temps donnée. Appliquée à notre contexte, que devient cette définition ?

Tout d'abord, commençons par définir les deux grandeurs physiques étudiées ici. La première, qui est aussi notre sujet d'étude principal, est le **niveau marin**, dont les variations ont été mesurées à l'aide d'une échelle de marée ou d'un marégraphe. Ces mesures contiennent d'autres paramètres physiques, tels que la salinité, la pression et la température atmosphérique, etc. (cf. *I.1.3. Signaux contenus dans l'enregistrement marégraphe*). Afin de pouvoir étudier l'influence de ces paramètres physiques sur les variations du niveau marin, il devient donc intéressant de posséder une série temporelle cohérente de l'une de ces grandeurs. Or, les données retrouvées dans les centres d'archives nous offriraient cette possibilité : c'est pourquoi nous avons choisi d'étudier une deuxième grandeur physique, la **pression atmosphérique** rapportée au niveau de la mer.

Deuxièmement, de quelle période de temps parlons-nous ? Les mesures du niveau de la mer étudiées sont réparties sur quatre siècles, du 18^e au 21^e siècle. Quant aux données de pression atmosphérique, la période étudiée est moins grande puisqu'elle s'étend de 1860 à 1909 (50 ans). Mais d'ores et déjà, la notion de cohérence des séries commence à se dessiner, car on imagine bien que les conditions de mesures du 18^e siècle ne sont pas les mêmes qu'aujourd'hui. Alors, comment faire pour que ces mesures, *a priori* si différentes, puissent être intégrées en une seule et même série ?

C'est là qu'intervient la notion de cohérence d'une série. Une série est cohérente dans le temps si la grandeur est mesurée avec rigueur et si ses références de mesures sont les mêmes. Prenons l'exemple de deux lots de mesures du niveau de la mer, l'un réalisé au début du 19^e siècle, l'autre au début du 21^e siècle. Notre objectif est d'une part de comprendre dans quelles conditions et quel environnement ont été réalisés ces deux lots de mesure, et ensuite de tout mettre en œuvre scientifiquement pour unifier les référentiels utilisés au cours du temps. Il faut que ces mesures soient comparables entre elles afin qu'elles forment une seule et même série temporelle. Ainsi, si l'on détecte une variation ténue du niveau marin sur notre série finale (de l'ordre du millimètre par an), notre degré de confiance sur la qualité du résultat sera élevé et nous aurons écarté les sources d'erreurs éventuelles liées aux conditions de mesure.

En résumé, il faut s'assurer que les différences d'ordre environnementales et instrumentales entre deux lots de mesures soient aussi peu nombreuses que possible. Et si différences il y a, nous devons les examiner avec soin afin de les comprendre et de les corriger. Ainsi nous obtiendrons une série temporelle cohérente, prête à être analysée.

V.1.2. Problèmes généraux liés à une telle réalisation

Les problèmes rencontrés lors de la réalisation d'une série temporelle cohérente sont multiples et peuvent être classés en trois grandes catégories : les conditions environnementales, les conditions instrumentales et les notions de référence.

• Les conditions environnementales

La première question que nous pouvons nous poser est : les mesures ont-elles toujours été réalisées au même endroit ou l'observatoire a-t-il été déplacé ? Dans le premier cas, les conditions environnementales seront très probablement les mêmes, selon l'échelle de temps considérée, à moins qu'une modification anthropique importante soit survenue. Par exemple, si une digue suffisamment grande est construite à proximité d'un observatoire du niveau de la mer, modifiant ainsi le régime des courants ou la propagation de la marée. Dans le deuxième cas, si l'observatoire a été déplacé, toute la question est de savoir si les conditions environnementales du nouveau lieu de mesure sont identiques à l'ancien. Par exemple, si l'on mesure le niveau marin, est-ce que les conditions hydrodynamiques, pouvant influencer sur cette mesure, sont les mêmes sur les deux sites ? Si non, est-ce que ces différences sont négligeables pour notre étude ou trop importantes pour envisager la construction d'une série temporelle cohérente ? C'est à ces questions qu'il faudra s'efforcer de répondre, d'autant que les paramètres pouvant influencer sur les variations du niveau de la mer sont nombreux : courants, température, salinité, pression atmosphérique, ondes de marée...

De plus, dans le cas de mesures du niveau de la mer réalisées à partir d'un appareil fixé sur un support terrestre, une autre question vient s'ajouter : ce support terrestre est-il stable ou subit-il des mouvements verticaux (affaissement de l'observatoire ou du quai sur lequel repose l'appareil d'enregistrement, subsidence ou soulèvement, conséquences d'un tremblement de terre, etc.) ? Quelles conséquences de tels mouvements peuvent avoir sur l'enregistrement du niveau marin ?

• **Les conditions instrumentales**

Après avoir réglé les problèmes liés aux conditions environnementales, d'autres problèmes, d'ordres instrumentaux peuvent apparaître. La première question à se poser est la suivante : le matériel utilisé pour l'enregistrement des mesures est-il resté le même ou a-t-il évolué au cours du temps ? Bien souvent, c'est la deuxième proposition qui est la bonne et il est donc important de connaître quel matériel a été utilisé pour chaque lot de mesure, afin de déterminer si un biais lié uniquement à un tel changement de matériel peut être introduit dans la série. Nous verrons que les outils utilisés pour mesurer nos deux grandeurs n'ont pas toujours été les mêmes : échelles de marée, marégraphes à flotteur et marégraphes côtiers numériques pour la mesure du niveau marin ; baromètre à mercure et baromètre anéroïde pour la mesure de la pression atmosphérique.

La deuxième question à se poser est : le protocole de mesure a-t-il toujours été le même ? Si non, en quoi cela peut-il influencer les mesures ? Et indirectement, la question de l'observateur se pose aussi, car si le protocole de mesure est identique, il n'est pas certain que les différents observateurs l'aient interprétés ou appliqués de la même façon, et surtout, avec le même soin et la même rigueur. L'observateur a donc un rôle très important quant à la qualité des mesures enregistrées.

• **Les notions de référence**

Les différentes notions de référence sont très importantes dans la construction d'une série temporelle cohérente, car elles peuvent entraîner de nombreuses erreurs non négligeables si elles ne sont pas prises en compte.

Tout d'abord, lorsque l'on souhaite construire une série cohérente sur plusieurs siècles, il est très important de se poser la question : dans quel système de temps les mesures ont-elles été enregistrées ? Le temps solaire vrai, le temps solaire moyen ou le temps universel (cf. *III.1.2.2. Du Temps Solaire Vrai au Temps Universel Coordonné*) ? L'objectif sera donc de transformer toutes les mesures pour les replacer dans le système de temps en vigueur actuellement : le Temps Universel Coordonné (UTC).

La suite logique est de se demander si l'unité de mesure de nos grandeurs physiques a toujours été identique ? La réponse est non, dans les deux cas. En effet, la hauteur du niveau de la mer a d'abord été

enregistrée en Pied du Roi (cf. III.1.2.1. *Unités de mesure de la longueur*) avant de l'être dans le système métrique. De même, la pression atmosphérique a d'abord été enregistrée en millimètre de mercure avant de l'être en hectopascal.

Enfin, la notion de référence de l'observatoire et de sa continuité est primordiale (cf. I.3.1. *Par rapport à quoi est mesuré le niveau de la mer ?*). En effet, il est très important de pouvoir replacer tous les lots de mesure par rapport à la même origine, autrement dit que le zéro utilisé soit identique pour l'ensemble des mesures. Pour commencer, il faut s'intéresser à la façon dont ce zéro a été défini. Prenons l'exemple d'enregistrements de hauteurs d'eau mesurées par un marégraphe. Le marégraphe est un appareil de mesure dont le zéro est réglé par l'observateur. Ce réglage est calé sur le zéro de l'échelle de marée installée à proximité. La cote du zéro de cette échelle étant elle-même définie par rapport au zéro hydrographique en vigueur dans la zone de l'observatoire (par commodité, ces deux zéros sont parfois identiques). Enfin, le zéro hydrographique est défini par rapport à un repère terrestre, appelé repère fondamental, qui est lui-même rattaché à d'autres repères situés à proximité, appelés repères de marée, et choisis les plus nombreux possibles (au minimum : trois), afin de garantir une continuité dans le temps de l'accès à la référence si l'un d'eux venait à être détruit. Parfois, nous disposons aussi d'informations reliant le zéro de l'échelle de marée à un repère terrestre.

Nous le voyons, cette chaîne est grande et chacun des maillons peut entraîner une erreur de décalage des mesures. Souvent, trois zéros différents sont définis (zéro de l'appareil du marégraphe, de l'échelle de marée et zéro hydrographique) et plusieurs repères terrestres sont choisis. Si l'un de ces éléments change au cours du temps, il est nécessaire de savoir lequel et de connaître son déplacement afin de le prendre en compte dans l'élaboration d'une série cohérente de ce point de vue. En théorie, cela a l'air simple, mais en pratique cela l'est beaucoup moins, car au fil des siècles, tous ces éléments, ou presque, ont été modifiés, déplacés, ou détruits.

Pour pouvoir corriger tous ces déplacements et construire une série temporelle cohérente, il est donc très important de posséder de nombreuses informations auxiliaires, appelés également métadonnées. Ces métadonnées contiennent par exemple des notes relatives au déplacement, au remplacement, ou à la destruction de repères de marée. On y trouve aussi, parfois, les résultats de comparaisons ponctuelles des mesures réalisées à l'échelle de marée et au marégraphe, afin de déterminer si le zéro du marégraphe est toujours calé sur celui de l'échelle. Toutes ces informations sont essentielles, et c'est pourquoi il ne faut pas se contenter de rechercher uniquement les mesures historiques dans les centres d'archives, mais également les métadonnées correspondantes. A condition, bien entendu, que celles-ci n'aient pas été perdues ou détruites au cours du temps.

V.2. Outils de traitement des données

V.2.1. Analyse harmonique de la marée

Un logiciel ou programme réalisant une analyse harmonique de la marée est indispensable à toute personne souhaitant réaliser une étude approfondie des variations des composantes du niveau de la mer. De tels logiciels, il en existe de nombreux à travers le monde, mais presque tous se basent sur une décomposition du potentiel de la force de marée mise au point par Doodson [1921]. Les différences existantes entre ces logiciels se situent principalement dans les définitions des composantes harmoniques et dans le nombre d'ondes élémentaires prises en compte dans l'analyse. Parmi ces logiciels, nous avons répertorié « *mas* », « *t_tide* » et « *r_t_tide* », présentés ci-dessous, mais également « *TASK-2000* », logiciel conçu et utilisé par le PSMSL [Bell *et al.*, 1999], « *Sea level processing software* »⁶⁸, l'un des logiciels les plus utilisés au monde d'après le PSMSL et conçu par le Centre du niveau de la mer de l'université d'Hawaï (UHSLC), « *IOS Tidal Package* » mis au point par Foreman en 1977 (Institut des sciences de la mer, Canada) et actualisé récemment [Foreman *et al.*, 2009], et « *POLIFEMO* » un logiciel écrit par Tomasin [2005] de l'Istituto di Scienze Marine (Venise, Italie).

V.2.1.1. *mas* [Simon, 2007b]

Mas est le programme officiel du SHOM pour réaliser des analyses harmoniques et calculer les prédictions de la marée en France. C'est d'ailleurs à partir de ce programme que sont calculées les prédictions de l'annuaire des marées français publié chaque année par le SHOM. *Mas* a été conçu par Bernard Simon et son utilisation est restreinte aux utilisateurs du SHOM et à leurs partenaires (après convention). Ce programme ne peut donc pas être utilisé librement par la communauté scientifique internationale et seules quelques études, de l'université de La Rochelle, en ont fait usage [Pouvreau *et al.*, 2006; Wöppelmann *et al.*, 2006; Pouvreau, 2008].

Les possibilités d'utilisation de *mas* sont multiples : analyse harmonique, analyse spectrale, prédictions de hauteurs de la marée à cadence régulière (hauteurs horaires, tous les $\frac{1}{4}$ d'heure, etc.), prédictions des pleines et basses mers et divers outils statistiques. Le programme a été conçu pour traiter les hauteurs horaires d'observations du niveau de la mer. Le fichier d'entrée doit être un fichier ascii au format fortran (27i4), qui contient : l'année, le numéro d'identification de l'observatoire, le jour de l'année, puis les vingt-quatre hauteurs horaires (en centimètres) de 0 à 23 heures. Lorsqu'une hauteur d'eau est manquante, elle est remplacée par « 9999 », et si plusieurs jours de mesures sont manquants, on

⁶⁸<http://ilikai.soest.hawaii.edu/UHSLC/jassoft.html>, consulté le 1^{er} décembre 2011.

peut alors les omettre dans le fichier d'entrée. Par contre, si une journée contient au moins une valeur « 9999 », elle est considérée entièrement comme manquante ; en d'autre terme, seules les journées complètes sont traitées. Par exemple, si le fichier d'entrée ne comporte que des mesures diurnes, l'ensemble des mesures est considéré comme manquant et le traitement du fichier ne peut se faire. Outre cet inconvénient, *mas* possède un grand avantage, il est conçu pour effectuer des analyses harmoniques à partir de fichiers contenant de 15 jours jusqu'à plus de 150 années de mesures, avec ou sans lacunes.

Mas est constitué de nombreux sous-programmes indépendants, numérotés de 1 à 30. Chacun de ces sous-programmes effectue une tâche bien particulière. Par exemple : tâche n°5 « *Calcul des vecteurs réduits pour les analyses spectrale et harmonique* », tâche n°18 « *Calcul de 128 hauteurs prédites par jour* ». C'est en réalisant une combinaison de ces différentes tâches que *mas* effectue une action. Par exemple : action 1 3 5 13 « *Analyse harmonique avec la liste donnée (listea)* ». *Mas* possède une interface en lignes de commandes MS/DOS, par laquelle l'utilisateur peut donc effectuer des actions en entrant des combinaisons de tâches. Les combinaisons les plus utilisées pour notre étude sont décrites ci-dessous.

• 1 3 5 13 - Analyse harmonique

Cette combinaison effectue une analyse harmonique de la marée à l'aide d'une liste préétablie de 559 composantes harmoniques désignées par leur numéro de Doodson littéral étendu (fichier intitulé *listea*), et affectées d'un coefficient qui est, soit le coefficient correspondant dans le développement du potentiel, soit un coefficient relatif rapporté à un maximum égal à 1000 pour les composantes d'interaction. Cette méthode d'analyse harmonique est préférée à d'autres (comme par exemple, la combinaison 1 2 5 11), car elle permet le calcul des hauteurs réduites et des vecteurs réduits par jour lunaire (pour 1 2 5 11, le calcul se fait par jour solaire). Un maximum de 90 composantes peut être calculé pour chaque espèce (longue période, diurne, semi-diurne, etc.).

Fichier en entrée *nom_obs.hhs* : hauteurs horaires du niveau de la mer, au format 27i4

Fichiers en sortie *nom_obs.har* : contient les constantes harmoniques (amplitude et phase) des composantes harmoniques de *listea* dont l'amplitude dépasse 0,5 mm (exemple en annexe).

harnom_obs : contient les constantes harmoniques (amplitude et phase) des 143 composantes harmoniques principales de la liste standard du SHOM, utilisées à l'heure actuelle pour les prédictions de l'annuaire des marées officiel.

• 14 18 8 - Prédiction de hauteurs d'eau

Cette combinaison effectue une prédiction de la marée à cadence régulière, à partir du fichier de constantes harmoniques calculé précédemment avec l'action 1 3 5 13. Les prédictions peuvent être calculées à une cadence minimale de 10 minutes, le format classique étant une prédiction horaire.

L'action effectuée d'abord le calcul des vecteurs réduits à l'aide des constantes harmoniques par l'algorithme de calcul FFT (Fast Fourier Transform, transformée de Fourier rapide), puis le calcul des hauteurs réduites d'après les vecteurs réduits.

Fichier en entrée *nom_obs.har* : fichier de constantes harmoniques

Fichiers en sortie *nom_obs.pre* : hauteurs prédites du niveau de la mer

• **1 3 5 13 14 18 16 3 5 10** - Analyse spectrale

Cette combinaison effectue une analyse spectrale de la marée pour l'observatoire étudié. Cette action est utile pour détecter de nouvelles composantes harmoniques afin de compléter le fichier *listea*. Pour une meilleure efficacité, les observations doivent porter sur de nombreuses années (le plus possible). Les nouvelles composantes sont identifiées par leur nombre de Doodson le plus probable inscrit en couleur verte. Les composantes de *listea* sont inscrites en rouge. La combinaison 1 3 5 13 14 18 16 4 17 3 5 10 peut également être utilisée pour réaliser cette action.

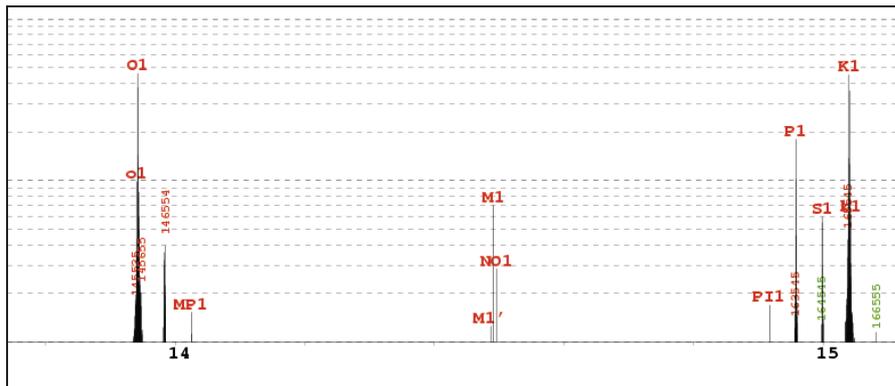


Figure V-1 : Tracé du spectre des composantes diurnes à Brest après avoir réalisé une analyse spectrale à l'aide du programme mas.

Fichier en entrée *nom_obs.hhs* : hauteurs horaires du niveau de la mer, au format 27i4

Fichiers en sortie spectre.ps : Tracé des spectres des différentes espèces des composantes harmoniques (longue période, diurne, semi-diurne, etc.) au format PostScript.

• **14 7** - Prédiction des pleines et basses mers

Cette combinaison effectue une prédiction des heures et hauteurs des pleines mers et des basses mers, à partir du fichier de constantes harmoniques calculé avec l'action 1 3 5 13.

Fichier en entrée *nom_obs.har* : fichier de constantes harmoniques

Fichiers en sortie *nom_obs.ext* : pleines et basses mers prédites

V.2.1.2. *t_tide* [Pawlowicz *et al.*, 2002]

T_tide est une boîte à outils (ou toolbox en anglais) contenant plusieurs programmes écrits au format MATLAB et permettant de réaliser une analyse harmonique et des prédictions de marée. La première version de *t_tide* est apparue en décembre 2001, écrite par Pawlowicz *et al.* [2002]. Deux mises à jour, contenant des améliorations de programmes, ont ensuite été publiées en janvier 2003 et en mars 2011. *T_tide* est une boîte à outils développée par des chercheurs, à destination de la communauté scientifique internationale, et pour la recherche. Il est disponible gratuitement en ligne⁶⁹, et son code est libre d'accès, tout un chacun pouvant améliorer les scripts. Toutefois, pour exécuter ces scripts, il est nécessaire de posséder une version de MATLAB (logiciel payant), ainsi qu'une boîte à outils optionnelle, payante elle-aussi : « Signal Processing Toolbox ». Malgré cela, *T_tide* est largement utilisé par les chercheurs du monde entier puisqu'à ce jour, au moins 313 articles sont issus de travaux de recherche effectués avec *t_tide*⁷⁰.

T_tide n'est pas une création originale, mais une adaptation au format MATLAB du programme FORTRAN de Foreman⁷¹. En effet, le code originel était ancien et assez difficile à comprendre et à modifier, c'est pourquoi Pawlowicz l'a adapté au format MATLAB, tout en y ajoutant des fonctions très utiles, notamment le calcul de barres d'erreur sur la détermination de l'amplitude et de la phase des constituants harmoniques. Parmi les fonctionnalités de *t_tide*, on retrouve l'analyse harmonique de la marée (estimation de l'amplitude et de la phase des constituants harmoniques, accompagnées de leurs incertitudes) et la prédiction de la marée.

Les corrections nodales appliquées dans *t_tide* sont conçues de telle façon qu'elles ne peuvent pas être utilisées précisément pour des lots de mesures de plus d'un an. Les auteurs recommandent donc d'effectuer une analyse harmonique sur des fichiers ne contenant qu'une année de mesures maximum. Par exemple, si le fichier original contient cinq années de mesure, les auteurs conseillent de le fragmenter en cinq fichiers d'un an. Seule exception, si le lot de mesure contient 18.6 années de mesure ou plus, alors les corrections nodales ne sont plus nécessaires. Mais dans ce cas, les auteurs précisent que le code du programme doit être modifié, de telle sorte que l'analyse harmonique se fasse sans les corrections nodales.

Le fichier d'entrée (au format texte *.txt*) ne doit contenir qu'une seule colonne contenant les hauteurs d'eau. Ensuite, l'utilisateur doit renseigner plusieurs paramètres permettant de mener à bien l'analyse harmonique, réalisé à partir d'une liste de 146 composantes (45 composantes astronomiques et

⁶⁹ http://www.eos.ubc.ca/~rich/#T_Tide, consulté le 1^{er} décembre 2011.

⁷⁰ L'article de Pawlowicz *et al.*, présentant *t_tide*, a été cité 313 fois par des articles scientifiques parus dans Scopus, d'octobre 2002 à juin 2011.

⁷¹ <http://www.pac.dfo-mpo.gc.ca/science/oceans/tidal-marees/index-fra.htm>, consulté le 1^{er} décembre 2011.

101 composantes d'interaction). Parmi ces paramètres : l'intervalle de temps en heure(s) séparant deux mesures (par exemple : 1/6 pour des mesures toutes les 10 minutes), la date et l'heure de la première mesure (au format MATLAB) et la latitude de l'observatoire en degrés décimaux (par exemple, pour l'île d'Aix : 46.007°). Lorsqu'une hauteur d'eau est manquante, elle doit être remplacée par « NaN ». Cependant, si le lot de mesures a de nombreuses mesures manquantes en début et/ou en fin de série, les auteurs recommandent de supprimer les lignes de « NaN », afin d'optimiser certains calculs statistiques.

En sortie de programme, l'utilisateur obtient une matrice contenant la liste des constantes harmoniques définis pour l'observatoire : nom de l'onde, sa fréquence, son amplitude et son incertitude ainsi que sa phase et son incertitude (exemple en annexe). A l'aide de cette matrice, *t_tide* va ensuite calculer les prédictions de hauteurs d'eau.

V.2.1.3. *r_t_tide* [Leffler & Jay, 2009]

R_t_tide n'est pas un nouveau programme en soi, mais une mise à jour de *t_tide*, réalisée en février 2007 par Leffler et Jay, de l'université de Portland. Mais comme les auteurs de cette mise à jour ne sont pas les mêmes que ceux de *t_tide*, ils ont préféré, pour le moment, renommer le programme en *r_t_tide* (abréviation de *robust t_tide*). L'amélioration apportée concerne la méthode de calcul utilisée pour l'analyse harmonique. *T_tide* utilise, pour cela, la méthode des moindres carrés, alors que *r_t_tide* utilise une méthode d'ajustement plus robuste : la technique des moindres carrés repondérés⁷², plus adaptée au filtrage du bruit spectral. Ainsi, les barres d'erreurs calculées sur les constantes harmoniques sont plus petites (de 30 à 85 % par rapport à *t_tide*) et le nombre de composantes harmoniques résolues est plus grand (de 20 à 75 %).

R_t_tide étant une amélioration de *t_tide*, il fonctionne exactement de la même façon. Néanmoins, le changement de méthode de calcul entraîne la nécessité de posséder une seconde boîte à outils optionnelle de MATLAB, toujours payante : « Statistics Toolbox ». *R_t_tide* est disponible gratuitement en ligne⁷³, et tout comme *t_tide*, son code est libre d'accès. Cependant, *r_t_tide* connaît un succès moins grand, car jusqu'à ce jour, seulement 4 articles sont issus de travaux de recherche utilisant ce programme⁷⁴.

⁷² Procédure itérative qui cherche à effectuer des moindres carrés pondérés avec des poids estimés.

⁷³ <http://web.cecs.pdx.edu/~jaylab/group/leffler/>, consulté le 1^{er} décembre 2011.

⁷⁴ L'article de Leffler & Jay, présentant *r_t_tide*, a été cité 4 fois par des articles scientifiques parus dans Scopus, de janvier 2009 à juin 2011.

V.2.1.4. Comparaisons et discussion

Mas, *t_tide* et *r_t_tide* sont les trois programmes utilisés au cours de ces travaux de recherche. Nous avons choisi de travailler principalement avec *mas* et lorsque ce n'était pas possible, nous avons choisi en second choix de travailler avec *t_tide* (plutôt que *r_t_tide*). Nous allons donner ici quelques explications quant aux raisons de ces choix.

Tout d'abord, le tableau suivant dresse un récapitulatif des avantages et des inconvénients des deux programmes : *mas* et *t_tide* (tableau V-1). *R_t_tide* fonctionnant sur le même principe que *t_tide*, les avantages et inconvénients indiqués pour celui-ci s'appliquent aussi pour *r_t_tide*.

	<i>mas</i>	<i>t_tide</i>
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> * s'utilise à partir de 15 jours jusqu'à 150 ans de mesures * utilisation d'une liste contenant 559 composantes harmoniques * corrections nodales appliquées correctement quelque soit la durée de la série * prise en main rapide, aide et conseils faciles à obtenir : collaboration active avec le SHOM * programme de qualité, utilisé pour calculer les prédictions officielles de la marée en France 	<ul style="list-style-type: none"> * calcule des barres d'erreur sur les constantes harmoniques * fonctionne avec des lots de mesures diurnes (journées incomplètes) * programme libre et gratuit, possibilité de modifier le code * reconnaissance scientifique internationale
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> * analyse harmonique impossible avec des lots de mesures diurnes * ne calcule pas de barres d'erreur sur les constantes harmoniques * utilisation à des fins scientifiques peu reconnue par la communauté internationale * programme privé, d'utilisation restreinte, pas de possibilité de modifier le code 	<ul style="list-style-type: none"> * conçu et optimisé pour des lots de mesures d'un an maximum * obligation de modifier le code si les mesures sont supérieures à 18.6 ans * utilisation d'une liste contenant 146 composantes harmoniques * saturation de la mémoire interne du PC si le fichier traité est trop « grand » * obligation de posséder des boîtes à outils optionnelles payantes de MATLAB * prise en main peu évidente

Tableau V-1 : Récapitulatif des avantages et inconvénients des programmes d'analyse harmonique *mas* et *t_tide*.

Les avantages et inconvénients dressés dans le tableau V-1 donnent les premières justifications de notre choix d'utiliser *mas* comme programme d'analyse harmonique. Nous l'avons donc utilisé pour traiter l'ensemble de nos lots de mesure, à l'exception des lots ne contenant que des mesures diurnes (La Rochelle Vieux port et l'île d'Aix en 1824, par exemple, ou encore les lots de mesure du phare de

Cordouan). Mais l'utilisation de deux programmes différents pour travailler sur des lots de mesure d'une même série temporelle cohérente impose que les constantes harmoniques calculées soient identiques, quelque soit le programme utilisé. Nous avons donc réalisé deux tests, afin de vérifier si cela était bien le cas.

Le premier test est réalisé à l'aide de 13 lots annuels de mesures du niveau de la mer, enregistrés au fort Enet, de 1860 à 1872. Tout d'abord, nous avons calculé les constantes harmoniques, pour chacun des lots de mesures, à l'aide des programmes *mas*, *t_tide* et *r_t_tide*. Après avoir obtenu 39 fichiers de constantes harmoniques (3 x 13 lots de mesures), nous avons extrait de ces fichiers, les constantes (amplitude et phase) des 10 ondes les plus importantes (en amplitude) : M2, S2, N2, M4, K2, MN4, MS4, O1, NU2 et K1. L'amplitude cumulée de ces 10 ondes représente 73 % de l'amplitude totale de la marée au fort Enet, elles sont donc représentatives du signal de marée enregistré. Ensuite, pour chacune de ces ondes, nous avons calculé sa moyenne et son écart-type sur les 13 années, à la fois pour son amplitude et sa phase. Les résultats sont présentés dans le *tableau V-2* ci-dessous.

	Amplitude (cm)			Phase (°)		
	<i>mas</i>	<i>t_tide</i>	<i>r_t_tide</i>	<i>mas</i>	<i>t_tide</i>	<i>r_t_tide</i>
M2	179,4 ± 0,5	179,5 ± 0,5	182 ± 3	93 ± 1	93 ± 1	93 ± 1
S2	65,2 ± 0,6	65,2 ± 0,6	64,9 ± 0,6	125 ± 1	125 ± 1	125 ± 1
N2	37,3 ± 0,5	37,3 ± 0,5	38 ± 1	74 ± 2	74 ± 2	74 ± 2
M4	26,8 ± 0,4	26,9 ± 0,4	28 ± 1	0 ± 3	0 ± 3	- 1 ± 3
K2	19 ± 1	17,7 ± 0,2	17,7 ± 0,2	121 ± 2	148 ± 1	148 ± 1
MN4	11,8 ± 0,3	11,9 ± 0,4	12,3 ± 0,5	312 ± 3	313 ± 3	312 ± 4
MS4	11,4 ± 0,2	11,3 ± 0,2	11,4 ± 0,2	88 ± 3	88 ± 3	88 ± 3
O1	7,5 ± 0,2	7,5 ± 0,2	7,0 ± 0,8	323 ± 2	323 ± 2	323 ± 9
NU2	7,1 ± 0,8	7,1 ± 0,6	7 ± 1	76 ± 7	76 ± 7	76 ± 7
K1	6,4 ± 0,3	6,4 ± 0,3	6,2 ± 0,4	70 ± 2	70 ± 2	69 ± 7

Tableau V-2 : Moyennes et écarts-types de l'amplitude et de la phase des 10 ondes les plus importantes (par leur amplitude) au fort Enet, calculées à partir de *mas*, *t_tide* et *r_t_tide*. Les valeurs calculées pour K2 à l'aide de *t_tide* et *r_t_tide* sont en rouge car suspectes. Elles ne seront donc pas prises en compte pour la suite du test.

Le tableau montre clairement des valeurs moyennes d'amplitude et de phase statistiquement identiques pour les ondes de marée calculées avec *mas* et *t_tide* (excepté pour K2, dont la valeur calculée avec *t_tide* est suspecte). Les valeurs d'amplitude calculées avec *r_t_tide* sont légèrement différentes mais restent dans le même intervalle que pour *mas* et *t_tide* si l'on prend en compte les écarts-types. Globalement, les écarts-types calculés pour *r_t_tide* sont plus élevés, ce qui signifie que les valeurs sont plus dispersées autour de la moyenne.

Pour information, Pouvreau *et al.* [2006] ont effectué une comparaison de l'amplitude M2 calculée avec *mas* et avec *t_tide*, à Brest. Les auteurs indiquent avoir obtenu un écart-type de l'ordre de 9 mm sur l'amplitude de M2, soit 0,4 % de l'amplitude totale de l'onde. Ici, nous trouvons un écart-type de 5 mm sur l'amplitude de M2 pour *mas* et *t_tide* (soit 0,3 % de l'amplitude totale de l'onde) et un écart-type de 30 mm pour *r_t_tide* (soit 1,7 %). Nos chiffres sont donc cohérents avec ceux de l'étude de 2006.

Les résultats du *tableau V-2* montrent qu'il existe une dispersion des valeurs plus importantes avec *r_t_tide*, et des valeurs quasi-identiques entre *mas* et *t_tide*. Toutefois, nous avons souhaité en savoir plus et pouvoir quantifier ces différences. En prenant les constantes harmoniques calculées avec *mas* comme référence, nous avons calculé, pour chaque année et pour les 9 ondes (K2 exclus), la différence existante entre les constantes harmoniques de *mas* et *t_tide* ((1) = *mas* - *t_tide*), puis de *mas* et *r_t_tide* ((2) = *mas* - *r_t_tide*). Enfin, pour chacune des ondes, nous avons calculé la moyenne et l'écart-type des différences d'amplitudes et des différences de phases. Les résultats sont présentés dans le *tableau V-3* ci-dessous.

	Amplitude (mm)				Phase (°)			
	Moyenne		Ecart-type		Moyenne		Ecart-type	
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
M2	-0,9	-26,7	3,7	33,2	-0,01	0,15	0,09	1,60
S2	0,0	2,4	1,2	2,3	-0,01	-0,02	0,19	0,23
N2	0,1	-6,8	1,6	7,6	-0,04	0,07	0,40	1,58
M4	-0,6	-9,4	1,4	10,6	0,13	0,59	0,34	3,29
MN4	-1,0	-4,8	3,1	6,2	-0,04	0,57	1,50	3,76
MS4	0,9	0,3	0,9	2,3	0,06	0,40	0,53	1,99
O1	-0,3	5,1	0,7	8,2	0,03	-0,44	0,76	8,84
NU2	-0,5	-0,6	3,8	3,6	0,31	0,35	2,79	2,68
K1	-0,3	2,0	0,6	4,3	-0,15	0,74	0,60	7,21
Moyenne	0,8 mm	-3 mm	3 mm	9 mm	-2,7°	-2,5°	0,8°	3,3°

Tableau V-3 : Moyennes et écart-type des différences d'amplitude et de phase des 9 ondes les plus importantes au fort Enet (excepté K2). (1) = différence entre mas et t_tide. (2) = différence entre mas et r_t_tide. Les couleurs rouges et jaunes indiquent la meilleure valeur pour chaque onde.

Ces résultats confirment que les constantes harmoniques calculées avec *mas* et *t_tide*, sur des lots annuels de mesures, sont quasiment identiques, suffisamment pour pouvoir utiliser ces deux programmes pour nos recherches. En effet, les moyennes des différences d'amplitude entre *mas* et *t_tide* sont très proches de zéro et leurs écarts-types sont faibles, ce qui signifie qu'il n'existe que très peu de différences entre les constantes harmoniques calculées avec *mas* et celles calculées avec *t_tide*. En moyenne, sur ces 9 ondes, la différence d'amplitude est de $0,8 \pm 3$ mm et la différence de phase est de $-2,7 \pm 0,8$ °. Pour information, lors de leur comparaison *Pouvreau et al.* [2006] ont trouvé une différence de $0,1 \pm 3$ mm entre les amplitudes de M2 calculées avec *mas* et *t_tide*. Nos résultats sont donc en accord avec eux.

Ces résultats nous montrent aussi que les différences entre *mas* et *r_t_tide* sont importantes, et non négligeables. En moyenne, sur ces 9 ondes, la différence d'amplitude est de -3 ± 9 mm et la différence de phase est de $-2,5 \pm 3,3$ °.

Afin de mieux comprendre ces différences, nous avons tracé les graphiques de l'évolution de l'amplitude (*figure V-2*) et de la phase (*figure V-3*) de l'onde M2 au fort Enet, calculées avec *mas*, *t_tide* et *r_t_tide*.

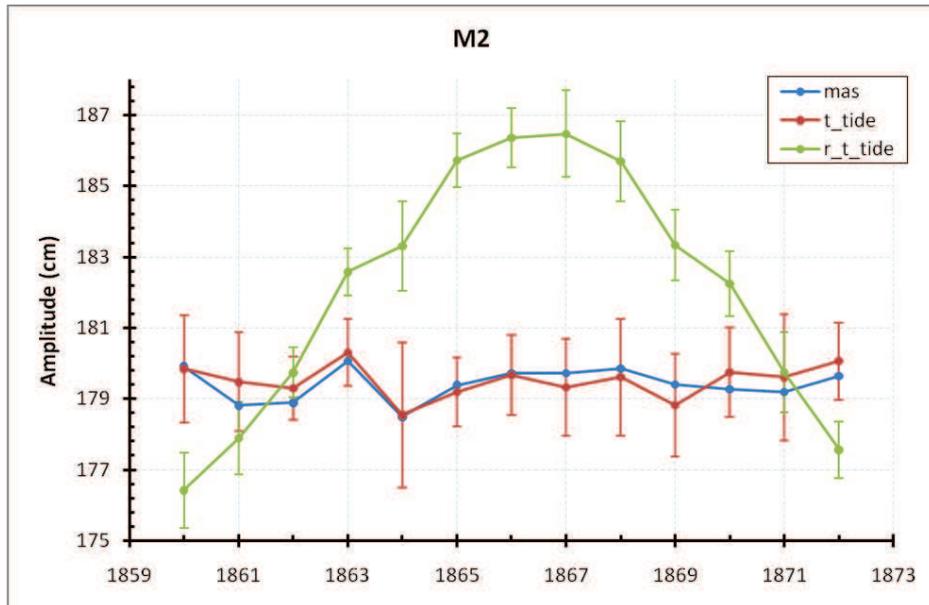


Figure V-2 : Evolution de l'amplitude de l'onde M2 au fort Enet, calculé à l'aide de *mas* (en bleu), *t_tide* (en rouge) et *r_t_tide* (en vert).

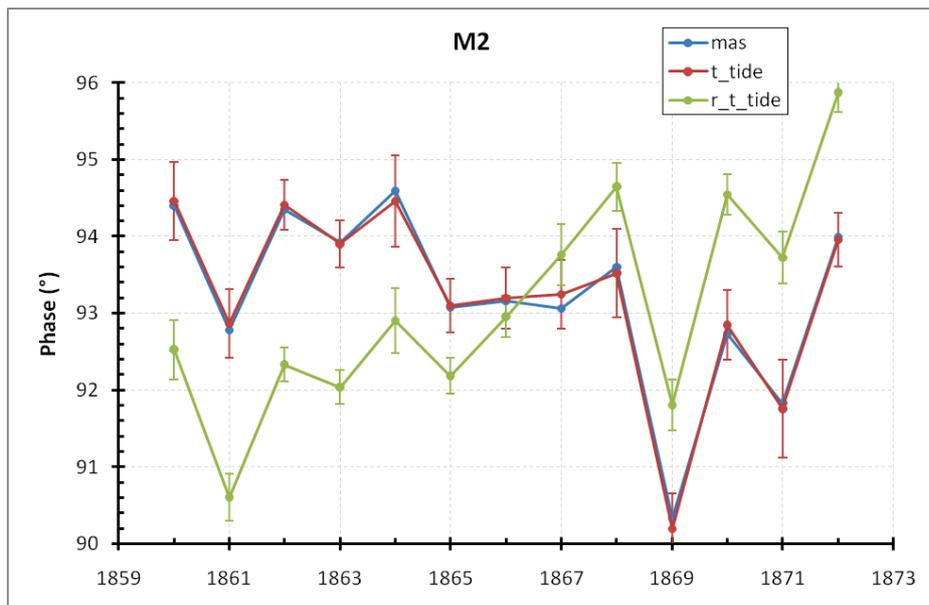


Figure V-3 : Evolution de la phase de l'onde M2 au fort Enet, calculé à l'aide de *mas* (en bleu), *t_tide* (en rouge) et *r_t_tide* (en vert).

Les deux figures (V-2 et V-3) confirment clairement les résultats précédents. Les constantes harmoniques calculées avec *mas* et *t_tide* sont quasiment identiques, tandis qu'il subsiste des erreurs sur les constantes calculées avec *r_t_tide*. D'après la forme des graphiques, il est possible que l'erreur provienne d'une mauvaise correction du cycle nodal lors de l'analyse harmonique. Malgré plusieurs tests et essais, nous n'avons pas réussi à corriger cette erreur. C'est pourquoi nous avons écarté *r_t_tide* pour préférer travailler avec *mas* et *t_tide*. C'est dommage car nous avons constaté, sur ce test, une amélioration de 35 % en moyenne (variant de 4 à 80 %) des incertitudes sur les constantes harmoniques (amplitude et phase). Ces chiffres correspondent à peu près à ceux données par Leffler et Jay (pour rappel : 30 à 85 %).

Le premier test utilisait uniquement des lots annuels de mesures et avait pour objectif de valider l'utilisation de *mas*, par comparaison des résultats avec ceux de *t_tide*, mais également de s'assurer que l'on pourrait par la suite utiliser l'un ou l'autre selon les besoins et mélanger leurs résultats. C'est chose faite, nous allons maintenant réaliser un deuxième test en comparant les résultats obtenus avec un lot de mesures de 15 années. Nous avons utilisé, pour ce test, les mesures enregistrées au fort Enet, de 1859 à 1873. Contrairement au premier test, l'ensemble des quinze années de mesures est compris dans un seul et même fichier. Comme pour le premier test, nous ne nous sommes intéressés qu'aux 10 ondes les plus importantes. Les résultats des analyses harmoniques effectuées avec *mas*, *t_tide* et *r_t_tide* sont dans le tableau V-4 ci-dessous.

	Amplitude (cm)			Phase (°)		
	<i>mas</i>	<i>t_tide</i>	<i>r_t_tide</i>	<i>mas</i>	<i>t_tide</i>	<i>r_t_tide</i>
M2	179,8	174,8 ± 0,5	181,8 ± 0,4	93,3	93,4 ± 0,2	93,3 ± 0,1
S2	65,1	65,1 ± 0,4	64,9 ± 0,4	125,8	125,7 ± 0,4	125,7 ± 0,4
N2	37,2	36,3 ± 0,5	37,6 ± 0,3	74,2	74,7 ± 0,7	74,4 ± 0,6
M4	26,7	25,4 ± 0,3	27,6 ± 0,3	359,9	0,2 ± 0,7	359,9 ± 0,6
K2	18,3	22,8 ± 0,7	16,7 ± 0,4	121,1	122 ± 2	121 ± 1
MN4	11,7	11,3 ± 0,4	12,2 ± 0,3	312,9	313 ± 2	313 ± 1
MS4	11,4	11,0 ± 0,4	11,4 ± 0,2	89	89 ± 2	89 ± 1
O1	7,5	8,8 ± 0,2	7,0 ± 0,1	322,7	322 ± 1	322,7 ± 0,9
NU2	7,0	6,8 ± 0,5	7,1 ± 0,4	75,6	76 ± 4	76 ± 3
K1	6,4	7,0 ± 0,2	6,2 ± 0,1	69,8	71 ± 2	70 ± 1

*Tableau V-4 : Amplitudes et phases des 10 ondes les plus importantes au fort Enet, calculées à partir de *mas*, *t_tide* et *r_t_tide*, pour un lot de mesures de quinze années. Les valeurs significativement différentes (à 99%) de celles calculées avec *mas* sont en rouge.*

Les résultats montrent que les phases calculées par les trois programmes sont cohérentes entre elles, les différences ne sont pas significatives. Par contre, la différence se situe au niveau des amplitudes. Sept des dix ondes étudiées présentent des différences d'amplitude significatives. C'est un résultat attendu, et il est confirmé ici. Les auteurs de *t_tide* expliquent en effet que le programme (ainsi que *r_t_tide* donc) n'est pas optimisé pour effectuer des analyses harmoniques sur des lots de mesure de plus d'une année (cf. V.2.1.2. *t_tide*). Les corrections nodales ne s'effectuant plus correctement. En revanche, les résultats affichés par *mas* (tableau V-4) sont cohérents avec ceux du premier test (tableau V-2). Cela confirme une fois de plus toute la robustesse et la qualité de *mas*.

V.2.2. Numérisation des marégrammes

La grande majorité des mesures du niveau marin étudiées étaient archivées sous la forme de registre de marée papier, mais de nombreuses mesures sont aussi disponibles sous la forme de marégrammes. C'est le cas, notamment, des mesures du phare de Cordouan depuis 1950 (cf. IV.3.5. *Inventaire et description des mesures enregistrées*). Ne disposant pas de table de numérisation, nous avons utilisé le logiciel NUNIEAU pour la numérisation de quelques-uns de ces marégrammes.

Malheureusement, nous n'avons pas pu établir de convention de travail avec le Grand Port Maritime de Bordeaux, propriétaire de ces marégrammes. Par conséquent, nous n'avons pas eu l'autorisation de numériser l'ensemble des marégrammes et l'expertise développée sur NUNIEAU ne nous a finalement pas été utile pour les mesures de Cordouan. Cependant, ce logiciel possède des qualités qu'il nous paraît important de mentionner ici.

NUNIEAU, pour « *NUMérisation des Niveaux d'EAU* », est un logiciel développé en novembre 2005 par le Centre d'Etude Technique de l'Equipement (CETE) Méditerranée⁷⁵ [Ullmann *et al.*, 2005] et régulièrement mis à jour (version 3.01 publiée le 6 juillet 2010). Conçu initialement pour numériser dix-sept années de marégrammes de Port-Vendres, il a par la suite été amélioré pour étendre la numérisation aux limnigrammes (enregistrements de hauteurs d'eau en étangs ou rivières). Développé sous MATLAB, NUNIEAU est un exécutable, fonctionnant avec l'installation de *Matlab Component Runtime*, disponible en téléchargement gratuit avec NUNIEAU sur internet⁷⁶. NUNIEAU a été téléchargé 132 fois depuis 2005 et est utilisé en très grande majorité par des pays francophones (France, Algérie, Tunisie, Maroc, etc.) aussi bien par des universités, que des collectivités territoriales ou des bureaux d'étude. Sa qualité est aujourd'hui reconnue et le PSMSL le recommande pour la numérisation des marégrammes du niveau marin⁷⁷.

Le principe de fonctionnement de NUNIEAU part d'un constat simple : les courbes de hauteurs d'eau sont souvent tracées sur une feuille quadrillée blanche (ou du papier millimétré de couleur orangée) avec un crayon d'une couleur différente de la feuille. Par exemple, une courbe bleue sur un papier blanc, ou une courbe rouge sur un papier millimétré orangé. Par conséquent, en se basant sur un algorithme de reconnaissance des couleurs, on peut extraire le signal de la courbe du reste de la feuille. Une fois ce signal extrait, il ne reste plus qu'à définir les origines ainsi que les échelles de temps et de hauteur pour convertir ce signal papier en une donnée numérique. NUNIEAU propose alors de numériser les hauteurs d'eau selon un pas de temps défini par l'utilisateur (à partir de 1 minute).

Ce principe simple est relativement rapide à utiliser, cependant il nécessite certaines conditions :

- le marégramme ne doit contenir qu'une seule courbe de niveau d'eau
- la courbe de niveau d'eau doit être d'une couleur différente du quadrillage
- il faut trouver un scanner assez grand pour des marégrammes
- le marégramme doit être scanné en mode « couleur RVB »

⁷⁵ Bureau public d'études et d'ingénierie, sous la direction du ministère de l'Ecologie, du Développement durable, des Transports et des Logements.

⁷⁶ http://www.cete-mediterranee.fr/fr/rubrique.php?id_rubrique=113, consulté le 1^{er} décembre 2011.

⁷⁷ http://www.psmsl.org/train_and_info/software/, consulté le 1^{er} décembre 2011.

Or, ces conditions sont rarement respectées pour des marégrammes du niveau marin. En effet, un marégramme contient généralement au moins sept jours de mesures, voire plus, et donc autant de courbes. Les couleurs utilisées pour tracer les courbes sont généralement le bleu, le rouge mais aussi le noir, tandis que le quadrillage est quasiment systématiquement en noir. De plus, les marégrammes historiques conservés dans les archives du SHOM ont tous une dimension supérieure au format A3, ce qui oblige à trouver un scanner assez grand et couteux. Enfin, comme ce fut le cas avec les marégrammes de Cordouan, il n'est pas toujours possible de scanner les marégrammes en mode couleur RVB. Ce mode de codage attribue une valeur comprise entre 0 et 255 à chacune des composantes (Rouge, Vert, Bleu) permettant ainsi de définir une couleur par la combinaison de ces trois composantes (par exemple, le bleu est codé { R : 0, V : 0, B : 255 }). Ainsi, il est facile d'indiquer à NUNIEAU dans quelle bande de couleur se situe le signal du niveau marin. Dans le cas de Cordouan, les marégrammes étaient numérisés en mode couleurs indexées, c'est-à-dire que chaque pixel de l'image est défini, non pas par une combinaison de valeurs RVB, mais par une valeur 1 pour un pixel noir et une valeur 0 pour un pixel blanc. Par conséquent, le fond blanc du marégramme était codé 0 et tout le reste (courbes du niveau marin, quadrillage, annotations, etc.) était coté 1. Après transformation en mode RVB, le problème restait le même et le principe de base de NUNIEAU ne pouvait s'appliquer ici. Heureusement, le logiciel laisse la possibilité à l'utilisateur de sélectionner lui-même le signal qui l'intéresse en cliquant successivement sur l'ensemble de la courbe, comme on pourrait le faire avec une table à numériser. Le gain de temps est donc moindre que dans le cas d'une reconnaissance du signal par la couleur, mais le principal intérêt de NUNIEAU réside dans la traçabilité des opérations réalisées ainsi que dans le choix du pas de temps des données numérisées.

Les dernières mises à jour de NUNIEAU incluent de nombreux outils statistiques ainsi que des comparaisons possibles avec d'autres signaux, tels que la marée prédite ou le niveau marin d'une station voisine. Pour plus d'informations sur le mode de fonctionnement de NUNIEAU, vous pouvez consulter le document complet de Pons [2005].

V.2.3. Eléments de traitements statistiques pour le niveau de la mer

• Moyennes du niveau de la mer, médiane et mode

Dans le cas d'une série de N mesures de hauteurs horaires h du niveau de la mer, et à condition que le nombre de mesures N soit suffisamment grand pour que le résultat ne soit plus influencé par la marée océanique (un mois de mesures est suffisant), on peut calculer la **moyenne** du niveau de la mer :

$$\bar{h} = \frac{h_1 + h_2 + \dots + h_N}{N} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_i \quad (5.1)$$

Il est parfois utile et intéressant de calculer la **moyenne mobile** du niveau de la mer, afin d'avoir une lecture plus fine de ses variations (équivalent à un filtre dont l'objectif est d'atténuer les signaux de période inférieure à T). Prenons l'exemple de la série des moyennes annuelles du niveau de la mer à Brest, disponible sur le site internet du PSMSL. La courbe bleue de la *figure V-4* représente l'évolution des moyennes annuelles du niveau de la mer de 1807 à 2006. La lecture brute de son évolution à long-terme est rendue difficile par les variations interannuelles présentes. Pour faciliter la tendance de l'évolution à long-terme, il est donc plus simple de calculer des moyennes mobiles sur 20 ans avec un décalage annuel, par exemple. Concrètement, on calcule la moyenne de 1807 à 1827, puis la moyenne de 1808 à 1828 et ainsi de suite.

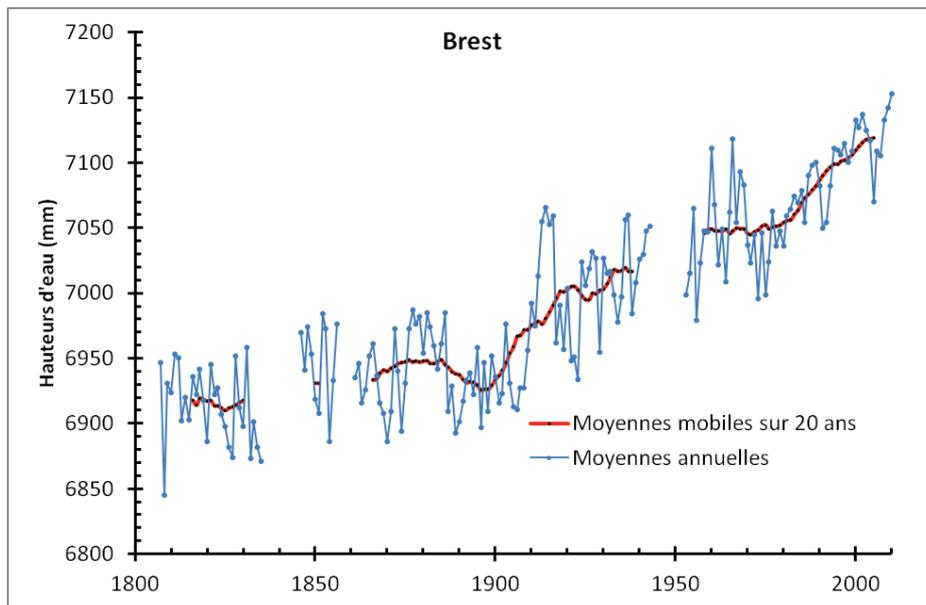


Figure V-4 : En bleu : moyennes annuelles du niveau de la mer à Brest. En rouge : Moyennes mobiles sur 20 ans (avec un décalage annuel), calculées à partir des moyennes annuelles. Données issues de la base du PSMSL.

La moyenne étant influencée par les valeurs extrêmes, il peut être intéressant de quantifier une série de données par deux autres paramètres :

- la **médiane** représente le nombre intermédiaire d'une série, c'est-à-dire que la moitié des données de la série ont des valeurs supérieures à la médiane et l'autre moitié des valeurs inférieures.
- le **mode** représente le nombre présentant la plus grande occurrence dans une série de données. Autrement dit, il s'agit de la valeur la plus fréquente.

• **Écart-type, écart quadratique moyen et variance**

On peut également caractériser une série de N mesures de hauteurs horaires h du niveau de la mer par son écart-type et sa variance. L'**écart-type** (*standard deviation* en anglais) associé aux mesures h_1, h_2, \dots, h_N fournit une incertitude moyenne sur ces mesures, ce qui équivaut à estimer la variabilité autour de la moyenne \bar{h} . Si les différences $h_i - \bar{h}$ sont toutes très petites, alors toutes les mesures sont

proches de la même valeur. A l'inverse, des écarts importants révèlent une plus grande dispersion des valeurs. L'écart-type σ_h correspond ainsi à la racine carrée de la moyenne des écarts au carré sur les mesures h_1, \dots, h_N et caractérise leur fiabilité :

$$\sigma_h = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (h_i - \bar{h})^2} \quad (5.2)$$

L'écart quadratique moyen (*root mean square*, ou *rms* en anglais) se définit par :

$$\delta_h = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (h_i - \bar{h})^2} \quad (5.3)$$

La sommation sur les $(h_i - \bar{h})^2$ fournit la **variance** δ_h^2 associée aux mesures :

$$\delta_h^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (h_i - \bar{h})^2 \quad (5.4)$$

• Régression linéaire et quadratique

Effectuer une régression linéaire et quadratique sur une série de données, par exemple la série de Brest (*figure V-5*), est une autre façon de caractériser l'évolution du niveau marin en fournissant une valeur de tendance linéaire et une accélération du niveau de la mer. Pour l'exemple choisi (Brest, *figure V-5*), la tendance du niveau de la mer est estimée à $+1,05 \pm 0,05$ mm/an entre 1807 et 2010 et son accélération à $+0,004$ mm/an².

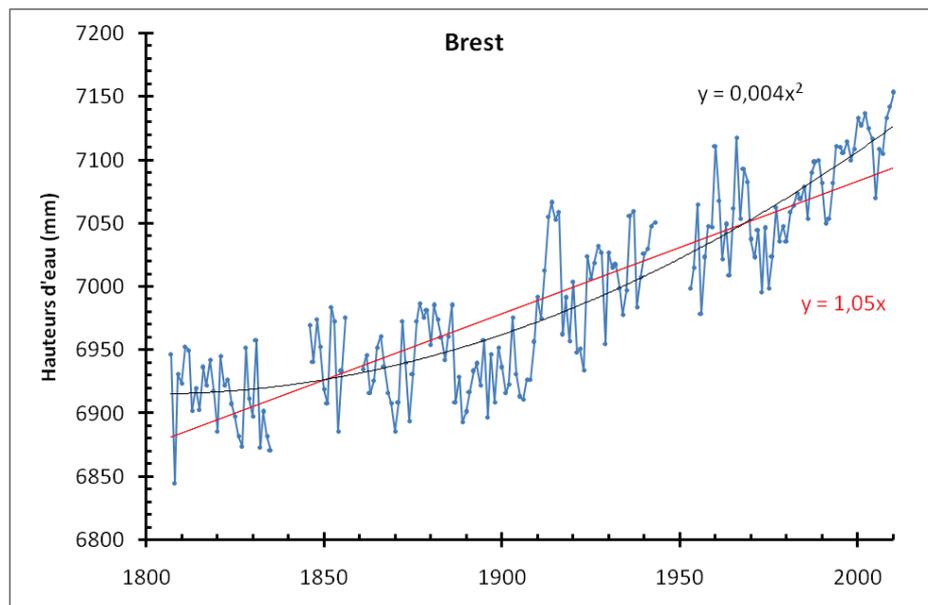


Figure V-5 : En bleu : moyennes annuelles du niveau de la mer à Brest. En rouge : Courbe de régression linéaire. En noir : courbe de régression quadratique. Données issues de la base du PSMSL.

La régression linéaire s'effectue par la méthode des moindres carrés, c'est-à-dire que, pour y_1, \dots, y_N mesures réalisées aux moments x_1, \dots, x_N , une droite est ajustée à travers ces points, de telle sorte que la somme des distances au carré entre ces points et cette droite soit minimale. Pugh et Maul [1999] décrivent cette méthode et ses applications pour l'étude des variations du niveau marin. Quant à la régression quadratique, elle est décrite par la relation $y = a + b.x + c.x^2$, où c est le terme de la régression quadratique, représentant l'accélération du niveau marin [van Onselen, 2000].

• Coefficient de corrélation de Bravais-Pearson

Lorsque l'on fait l'exercice de contrôler la qualité d'une série temporelle, il est souvent utile de comparer cette série à d'autres stations proches, de bonne qualité, notamment par la méthode du « *Buddy checking* ». Cette méthode consiste à comparer deux séries proches géographiquement et à analyser leurs différences afin de détecter d'éventuelles données de mauvaise qualité dans la série à analyser [Woodworth, 2003]. Un des moyens de quantifier la corrélation entre deux séries est de calculer le **coefficient de corrélation** de Bravais-Pearson :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5.5)$$

Les valeurs r proches de 1 ou -1 révèlent une forte corrélation tandis que les valeurs proches de 0 dénotent une très faible corrélation.

• Interpolation par spline cubique

Très souvent, les séries de hauteurs horaires du niveau de la mer présentent des lacunes, plus ou moins importantes (d'une heure à plusieurs semaines). Lorsqu'une seule valeur est absente dans une journée, le calcul de la moyenne journalière à l'aide d'un filtre (cf. *I.2.1.1. Niveau moyen journalier*) devient impossible, ce qui est dommageable. C'est pourquoi il est intéressant de pouvoir interpoler la valeur manquante à l'aide d'une fonction spline cubique. Pourquoi ce type de fonction ? Et bien, l'interpolation la plus simple existante est l'interpolation exacte par polynômes, mais cette fonction entraîne de nombreuses oscillations, ne permettant pas d'obtenir de résultats satisfaisants. L'idée d'utiliser une interpolation par spline cubique est donc d'utiliser une interpolation polynomiale par morceaux. C'est-à-dire que la courbe du niveau marin est fractionnée en une multitude de petits morceaux, et que l'interpolation se fait localement, sur un seul morceau, avec un polynôme de degré 3, ce qui permet de limiter les oscillations (faible degré). Au minimum quatre points sont nécessaires pour réaliser l'opération.

V.3. Séries de pression atmosphérique

V.3.1. Introduction

L'objectif de cette étude est, d'une part de réaliser un premier inventaire des mesures de pression atmosphérique inédites contenues dans les archives du SHOM, d'autre part de construire trois séries de pression atmosphérique rapportée au niveau de la mer (P_{mer} en français, ou *SLP* pour *sea level pressure* en anglais) : Enet-Boyard (1860-1909), La Rochelle (1863-1872) et Brest (1876-1884).

L'intérêt, pour nos travaux de recherche, est double. La relation reliant niveau de la mer et pression atmosphérique, appelée relation du baromètre inverse, est bien connue de manière générale mais s'applique-t-elle sur le littoral charentais ? Une analyse couplée nous permettra de répondre à cette question. Puis, une fois cette relation établie pour notre zone d'étude, nous nous en servirons pour vérifier la qualité de nos séries du niveau de la mer (cf. V.4.5.2.3. *Etude couplée « niveau marin - pression atmosphérique »*). Enfin, ces mesures nous permettront de fournir un contexte météorologique aux submersions marines répertoriées.

En plus d'être utiles pour nos travaux de recherche, ces séries inédites viennent compléter la base de données française, plutôt pauvre en séries du 19^e siècle [Auffray *et al.*, 2009], permettant ainsi une meilleure précision dans la reconstruction des champs de pression sur la France. D'autres séries, non numérisées mais disponibles dans les archives du SHOM, pourraient étoffer substantiellement cette base de données.

V.3.2. Séries de pression atmosphérique en France au 19^e siècle : état des lieux

Avant de s'attacher à décrire les observations réalisées au 19^e siècle, intéressons-nous d'abord au contexte de ces mesures météorologiques. Plusieurs études pointent un manque de données disponibles (sous format numérique) avant 1881 en Europe [Jones *et al.*, 1999; Ansell *et al.*, 2006; Auffray *et al.*, 2009], les institutions météorologiques s'implantant ou se consolidant entre 1872 et 1886 [Fierro, 1991]. D'après Auffray *et al.* [2009], le premier réseau national français d'observations régulières de température et de pression a été mis en place en 1859, sous la direction de Le Verrier, directeur de l'Observatoire de Paris. Ce réseau était constitué de douze stations télégraphiques réparties sur l'ensemble du territoire : Avignon, Bayonne, Besançon, Brest, Dunkerque, Le Havre, Limoges, Lyon, Mézières, Montauban, Napoléon-Vendée et Strasbourg.

Aujourd'hui, les données numérisées et disponibles sont peu nombreuses avant 1878, date de la création du Bureau Central Météorologique et plutôt rares avant 1864, date de création du réseau d'observations des écoles normales primaires françaises [Auffray *et al.*, 2009]. Afin d'établir un état des lieux le plus exhaustif possible, nous avons répertorié les séries de pression françaises utilisées par Jones *et al.* [1999], ainsi que pour les projets EMSLP [Ansell *et al.*, 2006] et HadSLP2 [Allan & Ansell, 2006]. Nous avons complété cet état des lieux avec les séries répertoriées dans la base de données climatologiques françaises de Météo-France : BDCLIM⁷⁸.

Jones et ses collègues [1999] ont construit une grille de moyennes mensuelles de pression atmosphérique sur l'Europe (5°x5°), pour la période 1780-1995. Pour cela, ils ont utilisé 51 séries européennes, dont 3 séries françaises : Paris (première année de mesures : 1764), Marseille (1851) et Nantes (1851).

Nom de l'observatoire	Première année de mesures	Dernière année de mesures	Source
Paris	1764	?	Jones <i>et al.</i>
	1850	1995	HadSLP2
	1851	1880	EMSLP
Lyon	1850	2003	HadSLP2
	1869	1881	EMSLP
Brest	1851	2004	HadSLP2
	1861	1881	EMSLP
Marseille	1851	2004	HadSLP2
	1851	?	Jones <i>et al.</i>
Nantes	1851	2004	HadSLP2
	1851	?	Jones <i>et al.</i>
Perpignan	1851	2004	HadSLP2
Toulouse	1851	2004	HadSLP2
Lille	1852	2004	HadSLP2
Biarritz	1860	1880	EMSLP
	1861	1917	HadSLP2
Rochefort	1862	1881	EMSLP
	1863	1881	HadSLP2
Toulon	1868	1881	EMSLP
	1869	2003	HadSLP2
Clermont	1876	2004	HadSLP2
Socoa	1876	1900	HadSLP2
Ajaccio	1878	2004	HadSLP2
Besançon	1878	2000	HadSLP2
Bourges	1878	2004	HadSLP2
La Roche-sur-Yon	1878	1917	HadSLP2
Nice	1878	2004	HadSLP2
Bordeaux	1880	2004	HadSLP2
Strasbourg	1891	2004	HadSLP2

Tableau V-5 : Récapitulatif des séries françaises de pression atmosphérique du 19^e siècle utilisées lors des projets européens EMSLP et HadSLP2, ainsi que lors de l'étude de Jones et al. Les premières et dernières années de mesures sont indiquées, mais aucune information ne permet de connaître la durée effective des séries.

⁷⁸<http://publitheque.meteo.fr/okapi/accueil/okapiWebPubli/index.jsp>, consulté le 01/12/11.

Dans le cadre d'un projet global, nommé EMULATE (European and North Atlantic daily to MULTidecadal climATE variability), visant à étendre la disponibilité des données historiques de pressions quotidiennes sur l'Atlantique Nord et l'Europe de 1850 à 2003, Ansell et ses collègues [2006] ont reconstruit une grille (5°x5°) de moyennes journalières de pression sur l'Europe, pour la période 1850-2003. Cette base de données, appelée EMSLP, a été réalisée, entre autres, à l'aide de 6 stations françaises : Paris (1851-1880), Biarritz (1860-1880), Brest (1861-1881), Rochefort (1862-1881), Toulon (1868-1881) et Lyon (1869-1881).

Le dernier projet inventorié, HadSLP2, a été réalisé par Allan et Ansell [2006]. Ce jeu de données est une combinaison de moyennes mensuelles de pression atmosphérique de 1850 à 2004, réparties sur une grille de 5° par 5° recouvrant l'Europe. Les séries françaises utilisées sont plus nombreuses que lors des deux précédentes études, puisqu'elles sont au nombre de 20. Le tableau V-5 répertorie l'ensemble des séries de pression atmosphérique du 19^e siècle utilisées au cours de ces trois études.

En France, l'organisme chargé de l'inventaire et de la collecte des mesures passées et actuelles de pression atmosphérique est Météo-France. Comme nous le verrons ci-après, les études scientifiques étrangères utilisent parfois des données françaises qui ne sont pas répertoriées dans BDCLIM, la base de données regroupant l'ensemble des mesures météorologiques françaises. La liste des stations françaises ayant effectué des mesures est consultable gratuitement en ligne⁷⁹. On y trouve également le détail des mesures réalisées. Afin de réaliser un état des lieux précis des séries de pression du 19^e siècle, nous avons répertorié l'ensemble des stations françaises de BDCLIM ayant effectué des mesures de pression entre 1800 et 1909, dernière année de mesures de la série Enet-Boyard (*tableau V-6*).

⁷⁹<http://publitheque.meteo.fr/okapi/accueil/okapiWebPubli/index.jsp>, consulté le 1^{er} décembre 2011.

Nom de l'observatoire	Période couverte	Nombre d'années couvertes	Série complète à	Nombre d'années effectives
Rochefort	1815 - 1895	81	100%	81
Paris	1816 - 1880	65	68%	44
Toulouse	1847 - 1909	63	57%	36
Bordeaux - Floirac	1847 - 1909	63	33%	21
Privas	1849 - 1909	61	43%	26,2
Lyon - St Genis Laval	1851 - 1909	59	92%	54
Dunkerque	1854 - 1909	56	57%	32
Brest - Plougouvelin	1855 - 1909	55	92%	50,7
Bourg-en-Bresse	1859 - 1909	51	31%	15,9
Metz	1841 - 1886	46	98%	44,9
Caen	1866 - 1909	44	77%	33,9
Valence	1866 - 1909	44	47%	20,6
Saint-Maur-des-Fosses	1872 - 1909	38	98%	37,1
Sainte-Honorine-du-Fay	1873 - 1909	37	99%	36,7
Marseille	1873 - 1909	37	96%	35,4
Clermont-Ferrand	1874 - 1909	36	95%	34,1
Versailles	1846 - 1881	36	95%	34,2
Rouen	1845 - 1880	36	44%	15,9
Nantes	1881 - 1909	29	100%	29
Greasque	1881 - 1909	29	97%	28,1
Arles	1881 - 1909	29	97%	28,1
Besançon	1884 - 1909	26	96%	25,1
Perpignan	1885 - 1909	25	100%	25
Bagnères-de-Bigorre	1888 - 1909	22	99%	21,8
Langres	1888 - 1909	22	97%	21,3
Vendôme	1856 - 1876	21	94%	19,7
Strasbourg	1890 - 1909	20	100%	20
Mulhouse	1892 - 1909	18	100%	18
Saint-Martin-de-Hinx	1874 - 1889	16	90%	14,3
Commercy	1874 - 1885	12	76%	9,1
Avignon	1874 - 1884	11	91%	10
Dijon	1845 - 1854	10	100%	10
Orthez	1895 - 1904	10	97%	9,7
Cluny	1872 - 1881	10	28%	2,8
Rodez	1845 - 1852	8	80%	6,4
Pierrelatte	1896 - 1902	7	88%	6,2
Bourges	1872 - 1876	5	100%	5
Nîmes	1872 - 1876	5	100%	5
Saint-Malo	1872 - 1876	5	98%	4,9
Tarbes	1872 - 1876	5	90%	4,5
Le Mans	1872 - 1876	5	85%	4,2
Grenoble	1872 - 1876	5	82%	4,1
Montauban	1857 - 1860	4	58%	2,3
Limoges	1857 - 1860	4	58%	2,3
Blois	1859 - 1861	3	67%	2
Arras	1873 - 1875	3	67%	2
Cherbourg	1850 - 1851	2	100%	2
Calais	1872 - 1873	2	100%	2
Dohem	1874 - 1875	2	96%	1,9
La Chapelle-du-Bourgay	1847 - 1847	1	100%	1
Nancy	1882 - 1882	1	100%	1
Montpellier	1872 - 1873	1	99%	1
Nogent-sur-Vernisson	1873 - 1873	0,9	100%	0,9
Barcelonnette	1872 - 1872	0,7	100%	0,7
La Roche sur Yon	1876 - 1876	0,2	82%	0,2

Tableau V-6 : Liste des stations météorologiques françaises ayant réalisées des mesures de pression atmosphérique entre 1800 et 1909. Les années en rouge indiquent que la série se poursuit après 1909. Tableau réalisé à partir de la base de données BDCLIM de Météo France.



Figure V-6 : Localisation des stations météorologiques françaises ayant réalisées des mesures de pression atmosphérique entre 1800 et 1909 (Carte réalisée à partir de BDCLIM).

Ces 55 séries de pression sont globalement bien réparties sur l'ensemble du territoire français (figure V-6). Cependant, on peut remarquer qu'il n'existe qu'une seule série en Charente-Maritime : Rochefort (1815-1895). Les séries les plus proches sont ensuite La Roche-sur-Yon et Bordeaux, mais la durée effective de la série de La Roche-sur-Yon (2 mois) ne permet pas de la retenir lors d'études scientifiques. Il en est de même pour Limoges (4 mois) et Montauban (4 mois). Les séries proches les plus complètes sont donc Nantes (durée effective : 29 ans), Bordeaux (21 ans) et Saint-Martin-de-Hinx (14 ans).

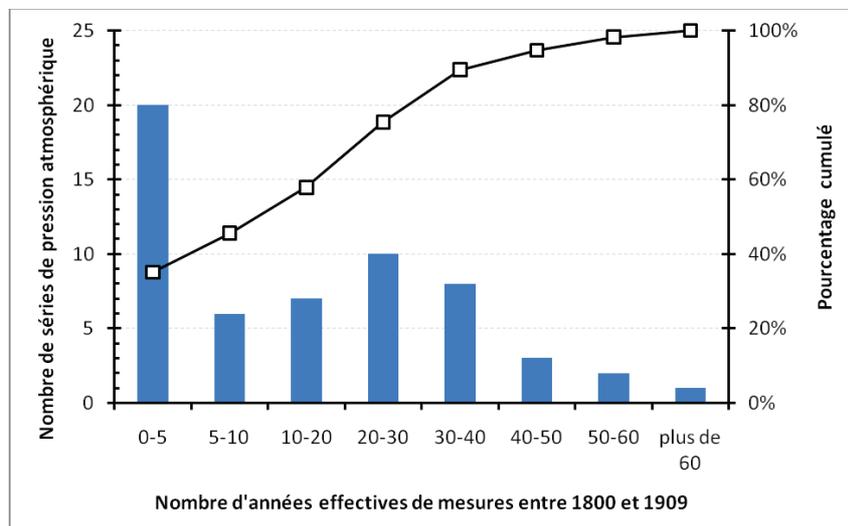


Figure V-7 : Histogramme du nombre d'années effectives de mesures de pression atmosphérique. Réalisé à partir des 55 stations répertoriées dans BDCLIM, ayant des mesures comprises entre 1800 et 1909.

Globalement, moins de 5 % des séries de pression de BDCLIM a une durée effective de mesures supérieure à 50 ans (*figure V-7*). Pour comparaison, la série inédite Enet-Boyard a une durée effective d'environ 47 ans. De même, environ 46 % des séries ont moins de dix années de mesures effectives, un grand nombre de séries (20) ne dépassant même pas les cinq années.

Dans le contexte français, la série Enet-Boyard est donc intéressante en termes de durée effective de mesures (47 ans) puisque seulement trois séries font mieux au 19^e siècle : Rochefort (81 ans), Lyon (54 ans) et Brest (51 ans). Deux autres séries sont proches, quoique moins longues : Metz (45 ans) et Paris (44 ans). En ce qui concerne la période de mesures, la figure V- montre clairement que la série Enet-Boyard est un apport non négligeable aux séries françaises, notamment dans la période 1860-1870. En effet, pendant cette décennie, seulement dix stations françaises ont réalisées des mesures de pression. On remarque, sur la figure V-8, un pic d'enregistrements de pression pour la décennie 1870-1880, qui correspond à une augmentation de mesures très ponctuelles. En effet, un tiers des stations ayant fonctionné lors de cette décennie a une durée effective de mesures inférieure à cinq ans.

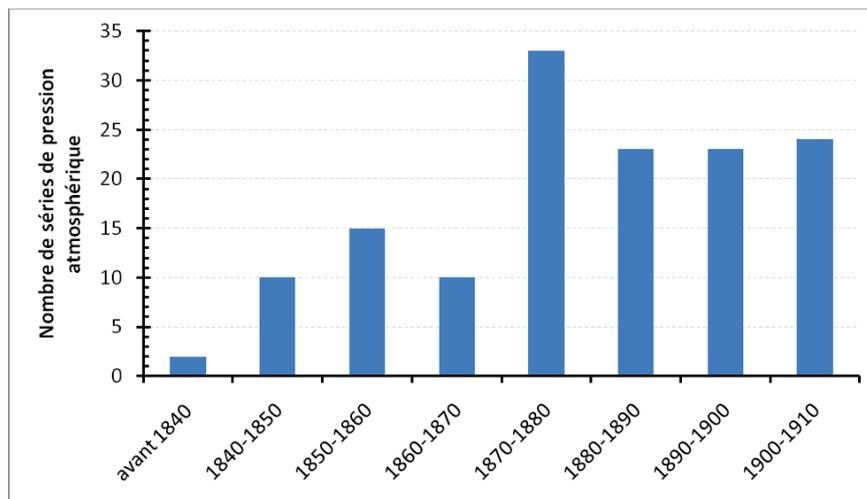


Figure V-8 : Histogramme du nombre de séries de pression atmosphérique effectivement en cours par tranche de dix années. Réalisé à partir des 55 stations répertoriées dans BDCLIM, ayant des mesures entre 1800 et 1909.

V.3.3. Données inédites du SHOM : présentation

Comme expliqué précédemment, il est très intéressant de posséder des séries de pression atmosphérique rapportée au niveau de la mer afin de mieux décrypter les variations du niveau marin. Or, les registres de marée conservés dans les archives du SHOM ne contiennent pas uniquement des mesures du niveau de la mer. On y retrouve également des observations météorologiques régulières, dont la mesure de la pression atmosphérique. Ainsi, il existe un potentiel de mesures encore inexploitées qu'il serait très intéressant de numériser avec la perspective d'enrichir la base de données BDCLIM et de permettre des reconstructions plus fines des champs de pression sur la France au 19^e siècle. Le tableau V-

7 dresse une première liste non-exhaustive des mesures de pression atmosphériques contenues dans les registres de marée des archives du SHOM.

Nom de l'observatoire	Latitude	Longitude	Période couverte	Nombre d'années couvertes	Période numérisée
Dunkerque	51,05	2,35	1865 - 1875	11	-
Le Havre	49,47	0,12	1850 - 1920	71	-
Cherbourg	49,65	-1,62	1832 - 1884	53	-
Saint-Malo	48,64	-2,02	1851 - 1917	67	-
Brest	48,38	-4,49	1836 - 1943	108	jan. 1876 - déc. 1884
Lorient	47,74	-3,35	1839 - 1858	20	-
Saint-Nazaire	47,27	-2,20	1863 - 1920	58	-
La Rochelle	46,15	-1,15	1863 - 1875	13	fév. 1863 - mars 1872
fort Enet	46,00	-1,14	1860 - 1873	14	mai 1860 - juin 1873
fort Boyard	45,99	-1,21	1873 - 1909	37	juil. 1873 - mai 1909
Rochefort	45,95	-0,95	1860 - 1918	59	-
Ciboure (Socoa)	43,39	-1,68	1875 - 1920	46	-
Toulon	43,11	5,92	1841 - 1860	20	-

Tableau V-7 : Inventaire non exhaustif des mesures de pression atmosphérique archivées dans des registres de marée du SHOM. L'inventaire ne comprend que les observatoires du niveau de la mer français dont les mesures sont archivées dans la section marégraphie des archives du SHOM.

Dans le cadre de nos travaux de recherche, nous avons numérisé la série de pression atmosphérique de La Rochelle (février 1863 à mars 1872, 9 ans) ainsi que celle des forts Enet et Boyard (mai 1860 à mai 1909, 47 ans). Un stagiaire de notre équipe a également numérisé une partie de la série de Brest, de janvier 1876 à décembre 1884 (9 ans). Afin de mieux comprendre le contexte de ces mesures, réalisées dans le cadre d'observations du niveau de la mer, voici un extrait des instructions données aux observateurs :

INSTRUCTIONS

POUR LES OBSERVATEURS DES MAREGRAPHES

19° L'observateur des marées consigne en outre sur son journal les observations météorologiques indiquées par l'entête des colonnes.

Il note la force et la direction du vent. Il observe, autant que cela lui est possible, la hauteur du baromètre de 3 heures en 3 heures (de 6 heures du matin à 9 heures du soir). Pour rendre, en hiver surtout, les observations de 6 heures du matin et celles de 6 heures et 9 heures du soir plus faciles, l'observateur pourra les faire chez lui au moyen d'un anéroïde mis à sa disposition. Ce dernier instrument étant sujet à des altérations, on compare assez souvent sa marche à celle du baromètre Fortin, en faisant des observations simultanées sur chaque instrument. On n'en fera usage qu'à défaut d'observations faites avec le baromètre à mercure. (L'observateur pourra être dispensé de faire les observations météorologiques lorsqu'elles sont déjà faites à l'Observatoire du port. Dans ce cas il se borne à en faire la transcription sur son journal et sur le cahier bi-mensuel.)

20° Les observations barométriques doivent être réduites à la température zéro, au moyen de la table 1. Elles sont en outre transformées en pression équivalente d'eau de mer au moyen d'une petite table (n°2) de correspondance et dans l'hypothèse que 3 millimètres de mercure équivalent à 40 millimètres d'eau de mer.

Dans la table de correspondance n°2, la pression 760 millimètres de mercure est désignée par 1,000 millimètres d'eau de mer. Ce dernier nombre a été choisi pour la facilité des calculs.

21° Au moyen des feuilles quadrillées dont il a été fait mention à l'article 4, l'observateur des marées trace en courbes la pression barométrique transformée en pression équivalente d'eau de mer. Sur ces feuilles l'intervalle des lignes représente 2 heures et le jour se trouve ainsi représenté par douze intervalles consécutifs. Pour les hauteurs, chaque intervalle représente 10 millimètres. Les observations faites pendant le jour servent à tracer à vue d'œil celles de la nuit ; cette interpolation graphique permet d'obtenir à peu près la pression pour l'instant de la pleine mer et de la basse mer.

Cette pression, ainsi conclue, est inscrite en centimètres dans la colonne du journal intitulée : correction de la pression barométrique ; elle s'ajoute à la hauteur de la pleine mer et de la basse mer placée à côté et le résultat de l'addition s'inscrit dans la colonne intitulée : hauteur corrigée.

L'ingénieur hydrographe de 1^{re} classe, chargé du service des marées,

R. CHAZALLON.

Les observations météorologiques étaient donc réalisées toutes les trois heures, de 6 h le matin à 21 h le soir, soit six mesures par journée. L'observateur relevait trois paramètres atmosphériques : pression, température et vent.

La pression atmosphérique était mesurée à l'intérieur même de la pièce dans laquelle se situait le marégraphe, principalement à l'aide d'un baromètre à mercure de type Fortin (colonne intitulée « Baromètre (10^e de mm) » du registre des marées). Ce baromètre transportable était relativement précis (incertitude sur la mesure : $\pm 0,1$ mmHg⁸⁰), mais assez imposant (environ un mètre de longueur). Les observateurs possédaient donc un deuxième baromètre, anéroïde (figure V-9), beaucoup plus petit (environ 10 cm de diamètre), mais également moins précis (incertitude sur la mesure : $\pm 0,5$ mmHg), qu'ils pouvaient utiliser lorsque les conditions ne permettaient pas une mesure du baromètre Fortin (colonne intitulée « Anéroïde (mm) » du registre des marées).

⁸⁰ 0,1 mmHg = 0,13 hPa = 0,13 mbar

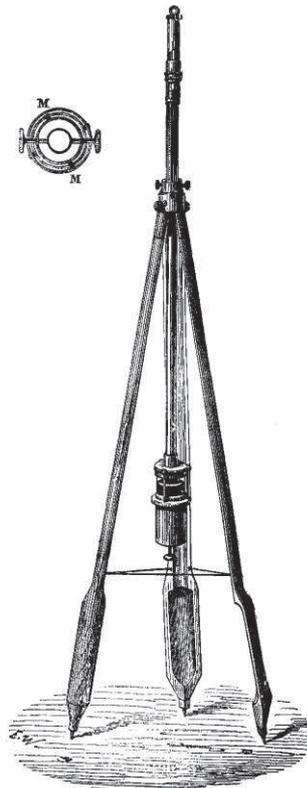


Fig. 279. — Baromètre de Fortin et son pied. — MM, suspension à la Cardan du baromètre de Fortin.



Fig. 283. — Baromètre de Bourdon.

Figure V-9 : A gauche : baromètre à mercure de type Fortin. A droite : baromètre anéroïde. [Privat-Deschanel & Focillon, 1880].

La température atmosphérique était elle aussi mesurée à l'intérieur de l'observatoire, à l'aide d'un thermomètre attaché au baromètre à mercure (inscrite dans la colonne intitulée « *Thermomètre attaché (°)* » du registre des marées). Les températures relevées ne correspondent donc pas aux températures extérieures de l'air, mais bel et bien à la température de la pièce, que celle-ci soit chauffée l'hiver ou tenue au frais l'été. L'objectif était de connaître la température de l'environnement dans lequel se déroulent les mesures du baromètre à mercure. En effet, le mercure est connu pour avoir un coefficient de dilatation thermique important⁸¹, ce qui entraîne des variations dans le tube de mercure du baromètre uniquement dues à des variations de température.

Afin de tenir compte de la dilatation du mercure, la pression atmosphérique était donc rapportée à la température 0°C à l'aide d'une table de conversion fournie à l'observateur (en annexe). Cette pression corrigée était inscrite dans la colonne intitulée « *Pression Mercure (10^e de mm)* » du registre des marées. Cette correction est loin d'être négligeable, comme le montre quelques valeurs du *tableau V-8*. Par exemple, en 1861, la température de la pièce du marégraphe du fort Enet a varié de 1,5°C à 28°C, entraînant une correction de la pression de 0,13 à 4,53 hPa, soit une variation saisonnière de 4,40 hPa (*tableau V-8*).

⁸¹ Propriété pour laquelle le mercure a longtemps été utilisé dans les thermomètres.

Température du local du marégraphe	Valeur à soustraire à la pression mesurée	
	mmHg	hPa
1°C	0,1	0,13
4°C	0,5	0,67
8°C	1	1,33
12°C	1,5	2,00
16°C	2	2,67
20°C	2,5	3,33
24°C	2,9	3,87
28°C	3,4	4,53

Tableau V-8 : Extrait de la table de conversion pour réduire les hauteurs barométriques à la température zéro.

Après avoir corrigé la pression de la température, l'observateur devait ensuite corriger les hauteurs des pleines et basses mers mesurées de la pression. Pour cela, il disposait également d'une table de conversion, basée sur l'hypothèse qu'une variation de 3 mmHg entraîne une variation de 4 cm du niveau de la mer. Cette hypothèse est conforme à la relation générale du baromètre inverse (variation de 1 hPa \Leftrightarrow variation de 1 cm). Par contre, il est surprenant de constater que cette relation n'est pas appliquée dans la table de conversion. En effet, il est écrit que pour faciliter les calculs « *la pression 760 millimètres de mercure est désignée par 1,000 millimètres d'eau de mer* », ce qui correspond environ à 3 mmHg équivaut à 4 mm du niveau de la mer (soit variation de 1 hPa \Leftrightarrow variation de 1 mm). La correction de la pression calculée était inscrite dans la colonne intitulée « *Pression Eau (mm)* » du registre des marées.

A noter que les valeurs de pressions inscrites dans les registres correspondent à ce que les météorologues appellent « *pression brute* » (colonnes « *Baromètre* » et « *Anéroïde* ») et « *pression station corrigée* » (colonne « *Pression Mercure* »). A aucun moment il n'est fait mention d'une correction de l'altitude afin d'obtenir une pression réduite au niveau de la mer.

Les données numérisées sont celles de la colonne intitulée « *Pression Mercure* » et ont donc déjà subies une première correction : la réduction de la pression atmosphérique à la température 0°C. Les séries numérisées sont disponibles en annexe électronique sous l'appellation « AP_C1_nomobservatoire_période.dat », où :

- AP = *atmospheric pressure* (pression atmosphérique)
- C1 = 1^{ère} correction : réduction de la pression atmosphérique à la température 0°C
(unité de mesure : millimètres de mercure *mmHg*)

V.3.4. Méthodes

V.3.4.1. Présentation

Les corrections à appliquer lors de la numérisation de données historiques sont généralement nombreuses. Heureusement, un certain nombre d'incertitudes a pu être évité lors des mesures réalisées par les observateurs des marées, et en grande partie grâce aux instructions précises de Chazallon. En effet, il n'y a aucun doute, ici, sur l'heure de la mesure, la localisation de l'observatoire, les corrections appliquées sur les mesures par les observateurs ou encore le type d'instrument utilisé. Par contre, il manque une information essentielle aux météorologues : l'altitude de l'instrument. Celle-ci n'étant pas demandée par Chazallon dans ses instructions, nous n'avons retrouvé aucune mention faisant référence à cette information dans les registres. Cependant, nous pourrions la déduire de l'altitude des repères de marée situés à proximité, ou même dans l'observatoire.

A ces corrections d'ordre général s'ajoutent des corrections spécifiques aux mesures historiques de pression atmosphérique. La première d'entre elles est la correction de la marée barométrique, qui est une oscillation diurne de la pression liée à l'attraction gravitationnelle du Soleil et aux variations de la température de l'air. C'est-à-dire qu'en l'absence de perturbation atmosphérique, si la pression était « stable », on pourrait observer une marée barométrique. Toutefois, son amplitude est assez faible en Europe, de l'ordre de 1 hPa [Dai & Wang, 1999], ce qui est inférieur à la variabilité journalière naturelle de la pression atmosphérique (comprise entre 1 et 21 hPa sur le littoral charentais). Nous pouvons donc négliger cette correction.

La deuxième correction spécifique à appliquer est la réduction de la pression atmosphérique à la température 0°C. En effet, au 19^e siècle, la pression est obtenue à partir de la lecture de la hauteur de mercure du baromètre. Or le mercure ayant un coefficient de dilatation thermique important, la lecture de la pression en est faussée. L'équation utilisée au 19^e siècle pour réduire la pression à la température 0°C est la formule de Kämtz (1832) [Können *et al.*, 2003] :

$$\boxed{P_{stat} = P_{brut}(1 - (qT))} \quad (5.6)$$

Avec P_{stat} : pression réduite à la température 0°C ; P_{brut} : pression brute mesurée ; q : coefficient de dilatation thermique du mercure = $1,62 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; T : température attachée au baromètre.

La troisième et dernière correction spécifique à appliquer est la correction de l'altitude du baromètre, ou le passage de la pression mesurée à la station (P_{stat}) à la pression réduite au niveau de la mer (P_{mer}). Cette réduction implique que la pression mesurée à la station soit ramenée à la valeur qu'elle

aurait si le baromètre se situait à une altitude de zéro mètre. Pour obtenir la formule permettant de réduire la pression au niveau de la mer, il faut combiner l'équation d'état des gaz parfaits (5.7) avec l'équation de l'équilibre hydrostatique (5.11) [Können *et al.*, 2003] :

$$P.V = n.R.T \quad (5.7)$$

Avec P : pression atmosphérique ; V : volume ; n : nombre de moles ; R : constante universelle des gaz parfaits = 8,314 J.mol⁻¹.K⁻¹ ; T : température.

En prenant
$$n = \frac{m}{M_{air}} \quad (5.8)$$

Avec n : nombre de moles ; m : masse ; M_{air} : masse molaire de l'air sec = 0,0289644 kg.mol⁻¹
D'où, en combinant les équations 5.7 et 5.8 :

$$P.V = \frac{m}{M_{air}} . R.T \quad \Rightarrow \quad P = \frac{m}{V} . \frac{R}{M_{air}} . T \quad (5.9)$$

Où ρ : masse volumique = $\frac{m}{V}$ et $R_{air} = \frac{R}{M_{air}} = 287,058 \text{ J.kg}^{-1} . \text{K}^{-1}$

Après remplacement dans l'équation 5.9, on obtient :

$$P = 287 . \rho . T \quad (5.10)$$

Prenons l'hypothèse de l'équilibre hydrostatique, dont l'équation est :

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho . g \quad (5.11)$$

Avec $\partial P = \Delta P$: variation de pression entre deux points ; $\partial z = H$: différence d'altitude entre deux points ;
 ρ : masse volumique ; g : accélération de la pesanteur.

En développant, on obtient :
$$\Delta P = -\rho . g . H \quad (5.12)$$

En combinant les équations 5.10 et 5.12 :
$$\Delta P = -P \frac{g.H}{287.T} \quad (5.13)$$

Avec P : pression atmosphérique au niveau de la mer = 1013,25 hPa ; T : température atmosphérique au niveau de la mer = 288,15 K (15°C) ; $g = 9,80665 \text{ m.s}^{-2}$.

D'où
$$\boxed{\Delta P = -0,12H} \quad (5.14)$$

Si l'on considère une variation de pression de 1 hPa :
$$H = \frac{\Delta P}{-0,12} = -\frac{1}{0,12} = -8,33 \text{ m}$$

Une variation de pression de 1 hPa correspond donc à une variation d'altitude de 8,33 m.

V.3.4.2. Applications

Nous avons utilisé quatre jeux de données différents lors de cette étude : des données du SHOM, des données issues de la BDCLIM (Météo France), des données issues du modèle HadSLP2 et des données issues du projet EMULATE. Dans un premier temps, l'objectif était de créer des séries de pression rapportée au niveau de la mer à partir des données numérisées du SHOM. Dans un second temps, nous nous sommes appliqués à contrôler la qualité de ces séries inédites en les comparant à des séries géographiquement proches issues de BDCLIM, du modèle HadSLP2 ou du projet EMULATE.

Dans les archives du SHOM, les mesures de pression atmosphérique sont conservées sous la forme de registres, la première étape consiste donc à les numériser. La méthode appliquée est la plus basique qu'il puisse exister puisqu'il s'agit de recopier, à la main, l'ensemble des valeurs dans un tableur. Cette étape de numérisation peut engendrer des erreurs dues à des fautes de frappe. Afin de limiter au maximum ces erreurs, nous avons mis en place une chaîne de numérisation comprenant un contrôle systématique des données. En effet, les données sont inscrites dans un tableur à raison de six valeurs par jour, toutes les trois heures, de 6h à 21h. Nous pouvions donc vérifier la continuité des données entrées et lorsque la différence de deux mesures successives dépassait 4 mmHg (équivalent à ≈ 5 hPa), une alerte était affichée. Cela permettait ensuite à l'opérateur de contrôler la valeur suspecte par une comparaison avec la valeur inscrite dans le registre de marée. L'erreur potentielle maximale commise lors de la numérisation est donc de 4 mmHg par valeur. Lors de cette même chaîne de numérisation, les valeurs sont automatiquement converties en hPa, à l'aide de la relation $1\ 013,25\ \text{hPa} = 760\ \text{mmHg}$.

A la fin de cette chaîne de numérisation, nous obtenons des fichiers de pression atmosphérique, mesurée à la station et réduite à la température 0°C. Ces fichiers numériques sont disponibles en annexe électronique sous l'appellation « AP_C2_nomobservatoire_période.dat », où :

- C2 = 2^{ème} correction : correction des erreurs dues à des fautes de frappe
(unité de mesure : conversion en hectopascal *hPa*)

Une copie de ces fichiers est réalisée avant de rapporter les valeurs au niveau de la mer. Pour cette opération, nous avons besoin de connaître l'altitude du baromètre ayant servi aux mesures. Celles-ci s'effectuant dans la pièce même où se situait le marégraphe, il suffit donc de connaître l'altitude de cette pièce pour en déduire une estimation de l'altitude du baromètre. Voici les valeurs déduites pour nos quatre lieux de mesures, ainsi que la correction à appliquer pour réduire les valeurs au niveau de la mer :

- fort Enet :

Altitude : 8,4 m NGF-IGN69

Correction : 1,01 hPa

$$P_{mer} = P_{stat} + 1,01$$

- fort Boyard :

Altitude : 11,9 m NGF-IGN69

Correction : 1,43 hPa

$$P_{mer} = P_{stat} + 1,43$$

- La Rochelle :

Altitude : 4,5 m NGF-IGN69

Correction : 0,54 hPa

$$P_{mer} = P_{stat} + 0,54$$

- Brest :

Altitude : 5,0 m NGF-IGN69

Correction : 0,60 hPa

$$P_{mer} = P_{stat} + 0,60$$

Les séries de pression atmosphérique réduites au niveau de la mer sont disponibles en annexe électronique sous l'appellation « AP_C3_nomobservatoire_période.slp », où :

- C3 = 3^{ème} correction : réduction de la pression au niveau de la mer

- .slp = *sea level pressure*

De même, nous avons utilisé quatre séries de pression issues de la base de données de Météo-France, BDCLIM : Rochefort, Brest-Plougonvelin, Nantes et Bordeaux-Floirac. Voici les altitudes des stations et les corrections à apporter pour réduire la pression au niveau de la mer :

- Rochefort (1860-1895) :

Altitude : 9 m

Echantillonnage : 2 valeurs par jour (à 08h et 15h)

Correction : 1,08 hPa

$$P_{mer} = P_{stat} + 1,08$$

- Nantes (1883-1909) :

Altitude : 41 m

Echantillonnage : 1 valeur par jour (à 13h)

Correction : 4,92 hPa

$$P_{mer} = P_{stat} + 4,92$$

- Brest-Plougonvelin :

- 1882-1888 et 1893-1909 :

Altitude : 66 m

Echantillonnage : 1 valeur par jour (à 12h)

Correction : 7,92 hPa

$$P_{mer} = P_{stat} + 7,92$$

- 1889-1892 :

Altitude : 34 m

Echantillonnage : 1 valeur par jour (à 14h)

Correction : 4,08 hPa

$$P_{mer} = P_{stat} + 4,08$$

- Bordeaux-Floirac (1899-1909) :

Altitude : 74 m

Echantillonnage :

Correction : 8,88 hPa

$$P_{mer} = P_{stat} + 8,88$$

- de 1899 à 1906 : 6 valeurs par jour (à 00h, 09h, 12h, 15h, 18h et 21h)

- du 1^{er} janvier au 30 avril 1907 : 1 valeur par jour (à 12h)

- du 1^{er} mai 1907 à 1909 : 4 valeurs par jour (à 07h, 09h, 12h et 18h)

Les séries de Météo-France sont complètes, excepté celle de Brest-Plougonvelin. Il manque en effet les valeurs de 1890 et de janvier 1899 à mars 1900. L'explication est annotée dans les annales météorologiques : les pressions notées à Brest sont « *par suite d'un accident survenu au baromètre de l'Observatoire de Brest, ..., celles qui ont été faites au Sémaphore de la Pointe Saint-Mathieu* ». Une fois l'ensemble de ces séries rapportées au niveau de la mer, elles deviennent comparables entre elles.

Nous avons également choisi d'intégrer un jeu de données issu du modèle HadSLP2. Ces données sont téléchargeables gratuitement sur internet⁸². Les données sont des moyennes mensuelles de pression atmosphérique rapportée au niveau de la mer et fournies pour un lieu précis, correspondant à un point de la grille de 5°x5°. Les quatre points de la grille encadrant notre zone d'étude sont assez éloignés (le plus proche étant situé à 144 km), comme le montre la figure V-10. Nous avons donc choisi de recalculer un point composite (point en bleu sur la figure V-10) à partir des quatre points du modèle (points en rouge sur la figure V-10) en utilisant la méthode de la pondération inverse à la distance. Le principe est simple. Plus le point à interpoler est proche d'un point dont on connaît la valeur, plus la valeur du point à interpoler sera similaire à la plus proche valeur connue. Il suffit donc de connaître la distance entre le point à interpoler et les points connus aux alentours, la pondération sera alors inversement proportionnelle à la distance séparant le point à interpoler des points du voisinage. Après avoir extrait les valeurs des quatre points de HadSLP2, nous avons donc appliqué l'équation suivante :

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{P_i}{(d_i)^j}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{(d_i)^j}} \quad (5.15)$$

Avec P : pression interpolée ; P_i : pression connue au point i ; d_i : distance entre le point à interpoler et le point i . On a quatre points connus de la grille HadSLP2, l'équation devient donc, avec $j = 1$:

$$P = \frac{\left(\frac{P_{NO}}{d_{NO}} + \frac{P_{NE}}{d_{NE}} + \frac{P_{SO}}{d_{SO}} + \frac{P_{SE}}{d_{SE}} \right)}{\frac{1}{d_{NO}} + \frac{1}{d_{NE}} + \frac{1}{d_{SO}} + \frac{1}{d_{SE}}} \quad \text{avec} \quad \begin{aligned} d_{NO} &= 528 \text{ km} \\ d_{NE} &= 453 \text{ km} \\ d_{SO} &= 319 \text{ km} \\ d_{SE} &= 144 \text{ km} \end{aligned}$$

⁸² <http://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadslp2/>, consulté le 1^{er} décembre 2011.



Figure V-10 : En bleu : point situant notre zone d'étude, le littoral charentais. En rouges : points issus du modèle HadSLP2, encadrant notre zone d'étude.

Enfin, nous utiliserons un jeu de données issu du projet EMULATE, et composant la base de données EMSLP3. Il s'agit de moyennes journalières de pression réduite au niveau de la mer et non corrigées de la marée barométrique, donc parfaitement comparables à nos jeux de données. Les séries sont téléchargeables gratuitement sur internet⁸³. Nous avons ainsi récupéré deux séries enregistrées à Brest, du 3 janvier 1861 au 31 décembre 1881, et à Rochefort, du 15 décembre 1862 au 31 décembre 1881.

V.3.5. Contrôle qualité des séries inédites

Après avoir numérisé les quatre séries inédites des archives du SHOM (Enet, Boyard, La Rochelle et Brest) et réalisé un premier contrôle des erreurs de frappe, il est important de pouvoir contrôler la qualité de ces séries. Pour cela, nous allons comparer nos séries à d'autres séries proches : Brest-Plougonvelin, Brest (EMSLP3), Nantes, Rochefort, Bordeaux-Floirac et le point composite de HadSLP2 (*figure V-11*). Les séries des forts Enet et Boyard ayant été enregistrées à moins de cinq kilomètres l'une de l'autre, nous considérerons désormais qu'elles forment une seule et même série. Elles ont en effet été enregistrées selon le même protocole, avec les mêmes instruments et ont toutes les deux été rapportées au niveau de la mer.

⁸³ http://www.cru.uea.ac.uk/projects/emulate/LANDSTATION_MSLP/, consulté le 1^{er} décembre 2011.

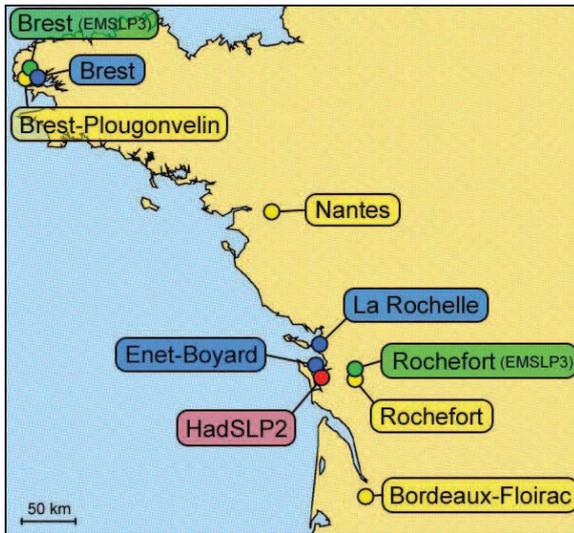


Figure V-11 : Localisation des séries de pression atmosphérique utilisées au cours de cette étude. En bleu : séries inédites numérisées à partir des archives du SHOM. En jaune : séries issues de la base de données BDCLIM de Météo-France. En rouge : série composite créée à partir du modèle HadSLP2. En vert : séries issues du projet EMULATE.

La répartition temporelle des différentes séries utilisées est représentée sur la figure V-12 ci-dessous. Dans un premier temps, nous allons contrôler la série inédite de Brest, en la comparant aux deux séries issues de la BDCLIM (Brest-Plougonvelin et Nantes) ainsi qu'à la série Brest (EMSLP3). Par la suite, nous nous intéresserons à la zone du littoral charentais en contrôlant les séries inédites de La Rochelle et Enet-Boyard.

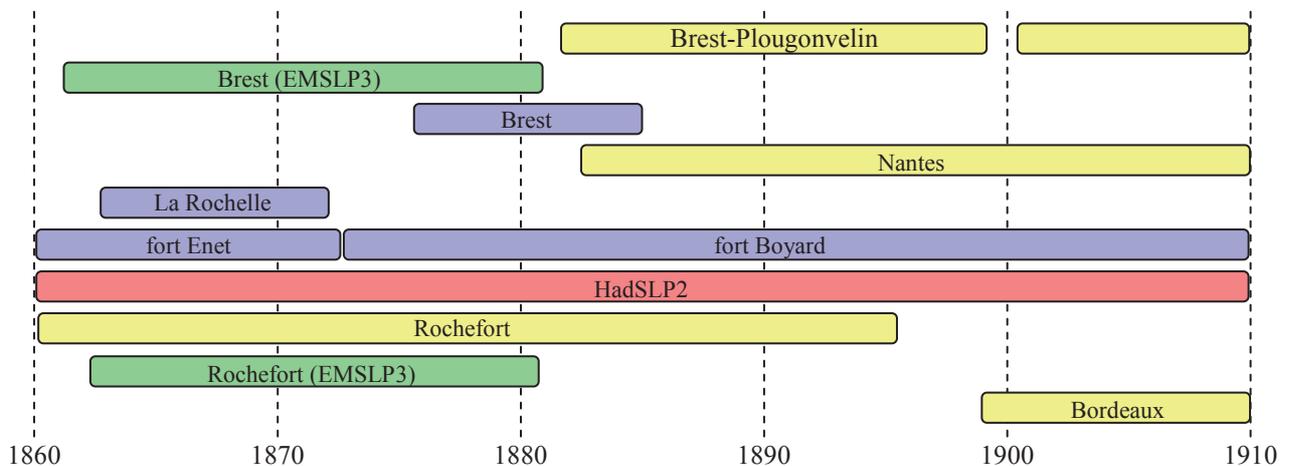


Figure V-12 : Représentation temporelle des séries de pression atmosphérique utilisées au cours de cette étude. En bleu : séries inédites numérisées à partir des archives du SHOM. En jaune : séries issues de la base de données BDCLIM de Météo-France. En rouge : série composite créée à partir du modèle HadSLP2. En vert : séries issues du projet EMULATE, base de données EMSLP3.

V.3.5.1. Série de Brest

La série inédite de Brest, numérisée à partir des registres de marée des archives du SHOM, débute le 1^{er} janvier 1876 et se termine le 31 décembre 1884. Elle contient six valeurs par jour, mesurées à 06h, 09h, 12h, 15h, 18h et 21h. Les trois séries utilisées comme référence pour un contrôle de la qualité de la série inédite de Brest sont Brest-Plougonvelin, Brest (EMSLP3) et Nantes. La période commune entre la série de Brest-Plougonvelin et notre série inédite débute le 1^{er} janvier 1882 et se termine le 31 décembre 1884. La période commune avec la série de Nantes est encore plus réduite, car elle débute le 1^{er} janvier 1883 et se termine le 31 décembre 1884. Les deux séries de BDCLIM ne contiennent qu'une seule valeur par jour, mesurée à 12h (Brest-Plougonvelin) et 13h (Nantes). Quant à la série de Brest (EMSLP3), sa période commune débute le 1^{er} janvier 1876 et se termine le 31 décembre 1881. Afin de travailler sur des données comparables, nous avons donc calculé des moyennes journalières de notre série inédite de Brest, puis des moyennes mensuelles.

La moyenne journalière a été effectuée par une simple moyenne arithmétique des six valeurs diurnes. Le résultat est une moyenne centrée sur 13h30. Nous avons ensuite calculé des moyennes mensuelles à partir de ces moyennes journalières par une simple moyenne arithmétique. Nous avons fait de même avec les séries de Brest-Plougonvelin, Brest (EMSLP3) et Nantes. Nous avons ensuite réalisé des comparaisons graphiques, des calculs de résidus entre deux séries ainsi que des calculs de coefficient de corrélation linéaire mensuel (formule de Bravais-Pearson) entre deux séries, à partir des moyennes journalières. Les résultats sont présentés ci-dessous.

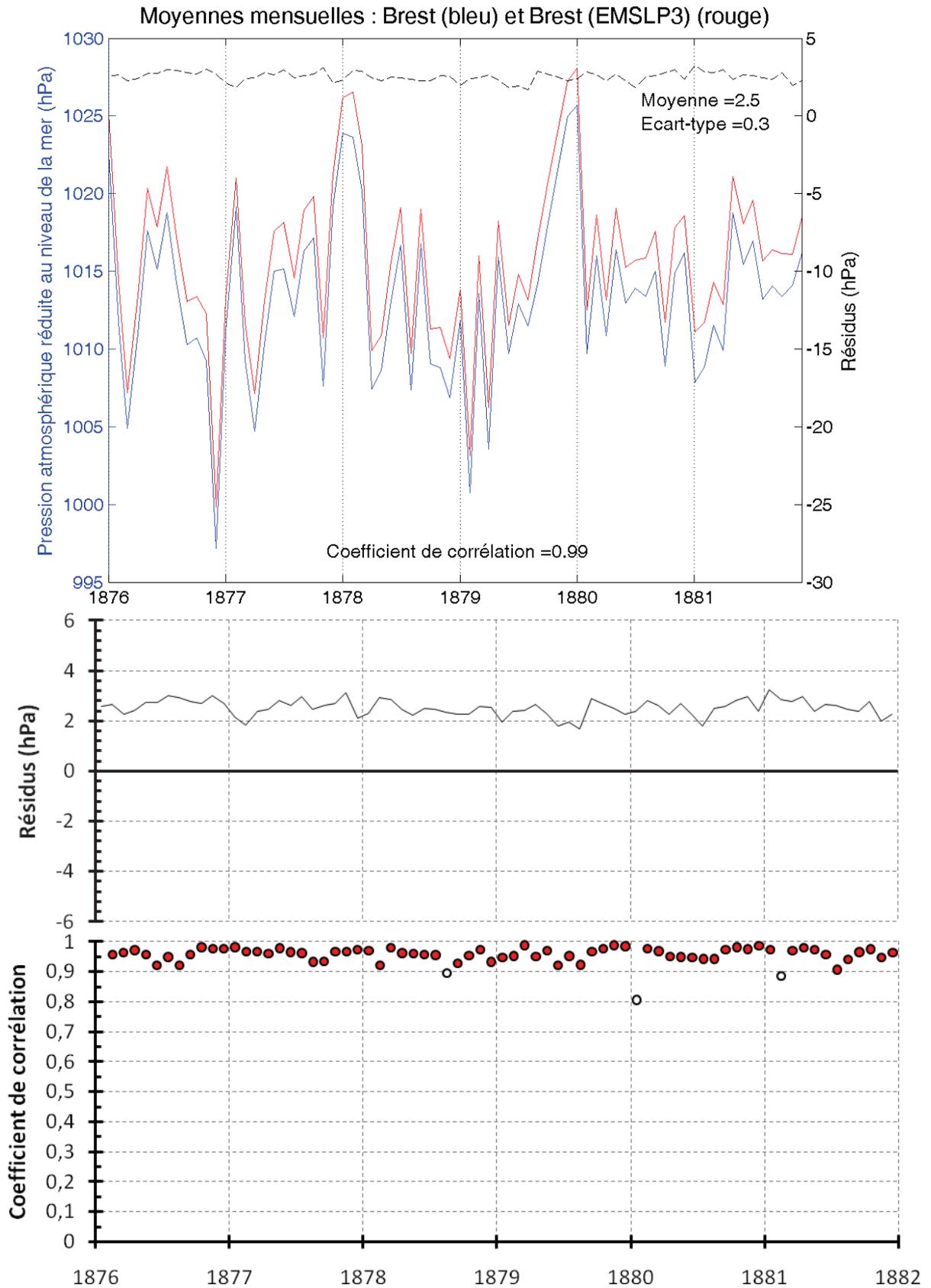


Figure V-13 : En haut : Moyennes mensuelles de la P_{mer} pour les séries de Brest (courbe bleue) et Brest-EMSLP3 (courbe rouge) avec leur coefficient de corrélation linéaire. Résidus entre les deux séries (courbe pointillée noire) avec leur moyenne et leur écart-type. Au milieu : Résidus entre les deux séries. En bas : coefficient de corrélation linéaire mensuel calculé à partir des données journalières. Les points blancs indiquent une corrélation inférieure à 0.9, synonyme de valeur(s) mensuelle(s) suspecte(s).

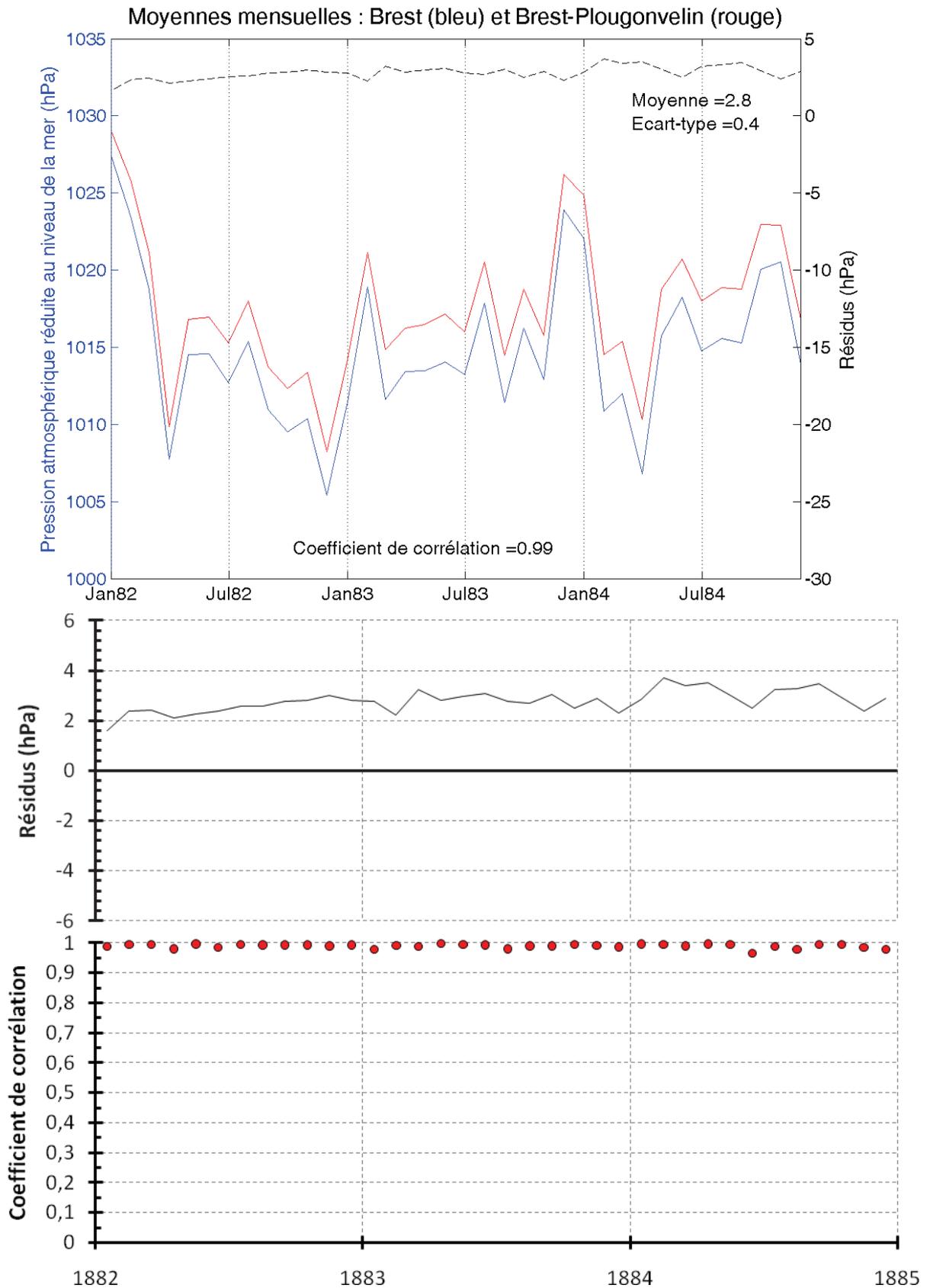


Figure V-14 : En haut : Moyennes mensuelles de la P_{mer} pour les séries de Brest (courbe bleue) et Brest-Plougonvelin (courbe rouge) avec leur coefficient de corrélation linéaire. Résidus entre les deux séries (courbe pointillée noire) avec leur moyenne et leur écart-type. Au milieu : Résidus entre les deux séries. En bas : coefficient de corrélation linéaire mensuel calculé à partir des données journalières.

Le tableau V-9 ci-dessous résume les résultats trouvés :

Séries comparées		Coefficient de corrélation	Moyenne des résidus	Ecart-type des résidus
Brest	Brest (EMSLP3)	0,99	2,52	0,33
	Brest-Plougonvelin	0,99	2,78	0,44
	Nantes	0,96	2,72	1,20
Brest-Plougonvelin	Nantes	0,95	- 0,21	1,23

Tableau V-9 : Résultats des comparaisons avec la série de Brest

De façon globale, les résultats montrent que l'ensemble de la série inédite de Brest est d'excellente qualité. Les résultats de la comparaison avec Brest (EMSLP3) sur la période 1876-1881 et avec Brest-Plougonvelin sur la période 1882-1884 affichent tous deux un coefficient de corrélation de 0,99 et un écart-type des résidus inférieur à 0,5 hPa, prouvant ainsi la qualité des mesures réalisées par l'observateur des marées sur ces périodes. La comparaison avec Nantes, ville distante de 260 km, fournit un coefficient de corrélation plus petit mais toujours très satisfaisant (0,96). La diminution du coefficient de corrélation n'est pas due, ici, à une qualité moindre des séries analysées, mais simplement à une distance géographique plus grande, comme en témoigne le coefficient de corrélation entre Brest-Plougonvelin et Nantes (0,95). Cependant, un point retient notre attention : la moyenne des résidus entre la série inédite de Brest et les autres est centrée sur 2,67 hPa, alors qu'elle devrait être centrée sur 0 hPa (comme c'est le cas par exemple entre Brest-Plougonvelin et Nantes). Cette différence est probablement due à une mauvaise correction de l'altitude des données inédites de Brest. En effet, nous avons estimé l'altitude du baromètre à environ 5 m, mais les résultats montrent que ce chiffre est certainement faux. Après prise en compte de cette différence, l'altitude déduite des mesures inédites de Brest serait plutôt 27,2 m. Ce qui signifie que les mesures n'ont pas été réalisées à l'intérieur même du local où se situait le marégraphe. A priori, elles auraient été effectuées à l'observatoire astronomique de Brest (communication personnelle de Nicolas Pouvreau).

Nous venons de voir que la série de Brest est globalement d'excellente qualité. Mais l'analyse des graphiques des coefficients de corrélation mensuels peut également nous fournir une indication plus détaillée de la qualité de la série. En effet, l'expérience nous a montré qu'un coefficient de corrélation mensuel inférieur à 0,9 signifie qu'il y a un doute non négligeable sur la qualité de la moyenne mensuelle d'une des deux séries. Cela est valable lorsque l'on compare deux séries très proches géographiquement (distance inférieure à 30 km). Si les séries comparées sont plus éloignées, la limite s'abaisse. Ainsi, si la distance entre les deux séries est comprise entre 30 km et 300 km, la limite pour le coefficient de corrélation est de 0,85. Enfin, si la distance est comprise entre 300 km et 400 km, la limite est fixée à 0,8. Nous avons déterminé ces limites par l'expérience.

En analysant les graphiques des coefficients de corrélation mensuels, on s'aperçoit que quatre moyennes mensuelles sont de qualité suspecte :

- août 1878 (comparaison avec Brest-EMSLP3)
- janvier 1880 (comparaison avec Brest-EMSLP3)
- février 1881 (comparaison avec Brest-EMSLP3)
- décembre 1884 (comparaison avec Nantes)

Malheureusement, nous manquons de jeux de données suffisamment proches et sur la même période pour pouvoir définir précisément d'une part si ces moyennes sont de mauvaise qualité et d'autre part, laquelle des deux séries est suspectée. Nous conserverons donc ces quatre moyennes mensuelles dans la série inédite de Brest tout en gardant à l'esprit qu'il subsiste un doute sur la qualité de celles-ci. La série finale a été corrigée de l'erreur sur l'estimation de l'altitude de l'observatoire. L'altitude réelle est donc d'environ 27 m et la correction réelle à apporter pour réduire les valeurs au niveau de la mer est : $P_{mer} = P_{stat} + 3,27$.

V.3.5.2. Série de La Rochelle

La série inédite de La Rochelle débute le 1^{er} février 1863 et se termine le 28 janvier 1875. Elle a été numérisée partiellement à partir des registres de marée des archives du SHOM, du 1^{er} février 1863 au 31 mars 1872. Elle contient six valeurs par jour, mesurées à 06h, 09h, 12h, 15h, 18h et 21h. Les cinq séries utilisées comme référence pour un contrôle de la qualité de la série inédite de La Rochelle sont Brest (EMSLP3), HadSLP2, Rochefort, Rochefort (EMSLP3) et Enet-Boyard. Nous ne présenterons, ici, que les résultats de trois comparaisons, les autres se trouvant en annexe. La période commune entre les séries d'Enet-Boyard, Rochefort, Rochefort (EMSLP3) et notre série inédite débute le 1^{er} février 1863 et se termine le 31 mars 1872. La série d'Enet-Boyard contient autant de valeurs par jour que la série de La Rochelle. La série de Rochefort issue de BDCLIM contient deux valeurs par jour, relevées à 08h et 15h. Quant à la série de Rochefort (EMSLP3), il s'agit de moyennes journalières. Afin de travailler sur des données comparables, nous avons donc calculé des moyennes journalières pour l'ensemble des séries, puis des moyennes mensuelles, de la même façon que pour la série inédite de Brest (cf. paragraphe précédent). Nous avons ensuite réalisé des comparaisons graphiques, des calculs de résidus entre deux séries ainsi que des calculs de coefficient de corrélation linéaire mensuel (formule de Bravais-Pearson) entre deux séries, à partir des moyennes journalières. Les résultats sont présentés ci-dessous.

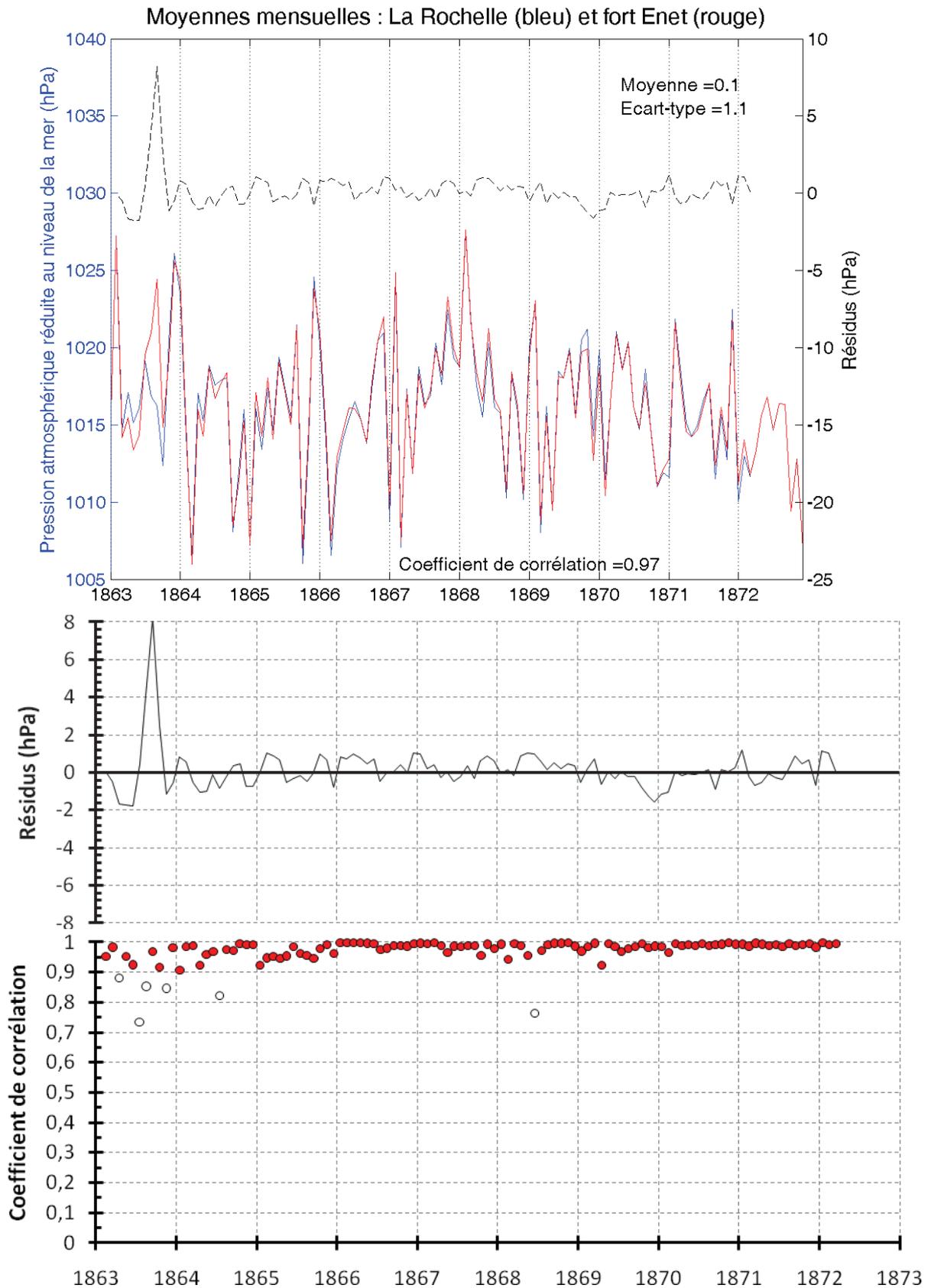


Figure V-16 : En haut : Moyennes mensuelles de la P_{mer} pour les séries de La Rochelle (courbe bleue) et Enet-Boyard (courbe rouge) avec leur coefficient de corrélation linéaire. Résidus entre les deux séries (courbe pointillée noire) avec leur moyenne et leur écart-type. Au milieu : Résidus entre les deux séries. En bas : coefficient de corrélation linéaire mensuel calculé à partir des données journalières. Le point blanc indique une corrélation inférieure à 0.9, synonyme de valeur(s) mensuelle(s) suspecte(s).

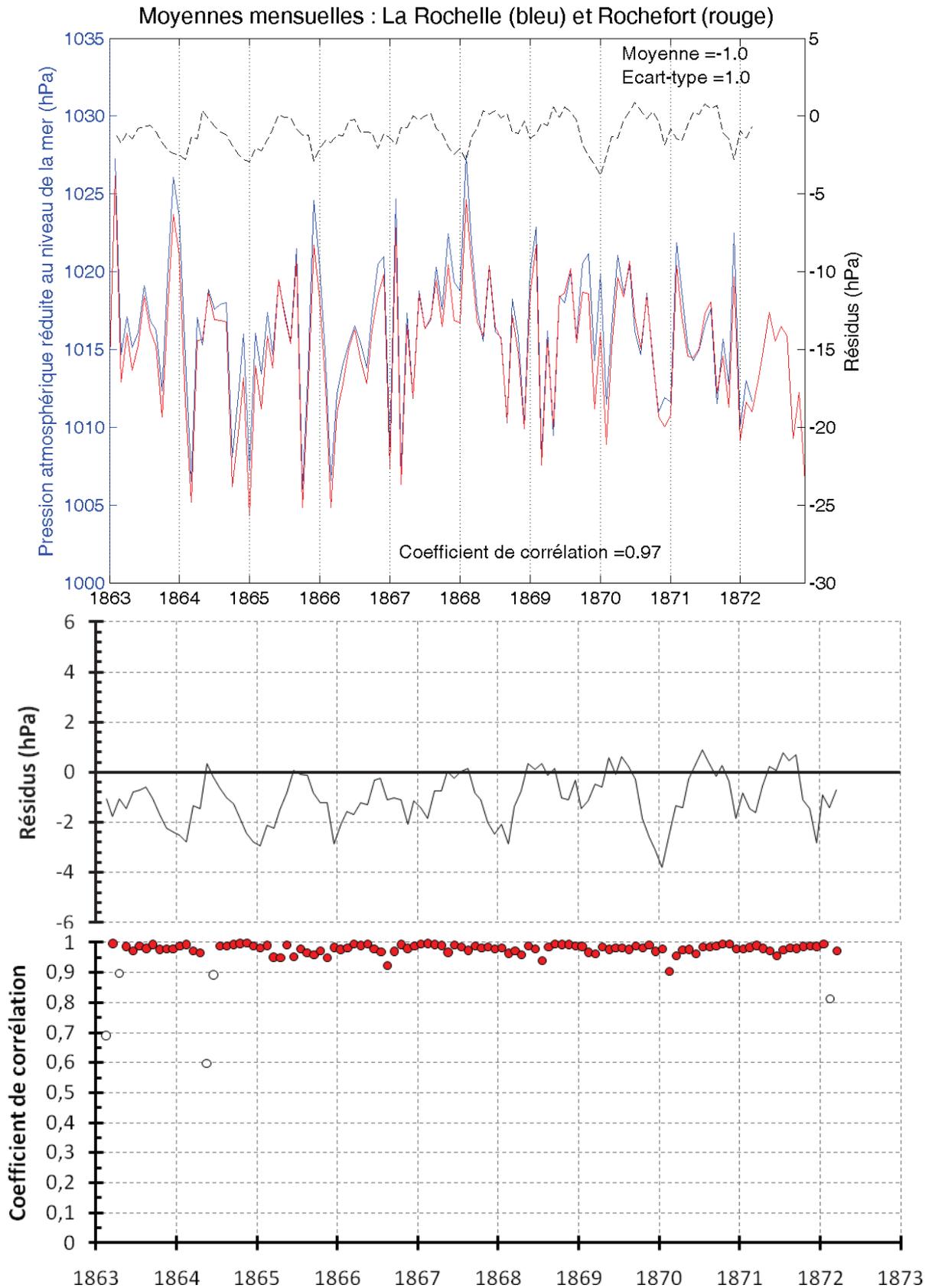


Figure V-17 : En haut : Moyennes mensuelles de la Pmer pour les séries de La Rochelle (courbe bleue) et Rochefort (courbe rouge) avec leur coefficient de corrélation linéaire. Résidus entre les deux séries (courbe pointillée noire) avec leur moyenne et leur écart-type. Au milieu : Résidus entre les deux séries. En bas : coefficient de corrélation linéaire mensuel calculé à partir des données journalières. Le point blanc indique une corrélation inférieure à 0.9, synonyme de valeur(s) mensuelle(s) suspecte(s).

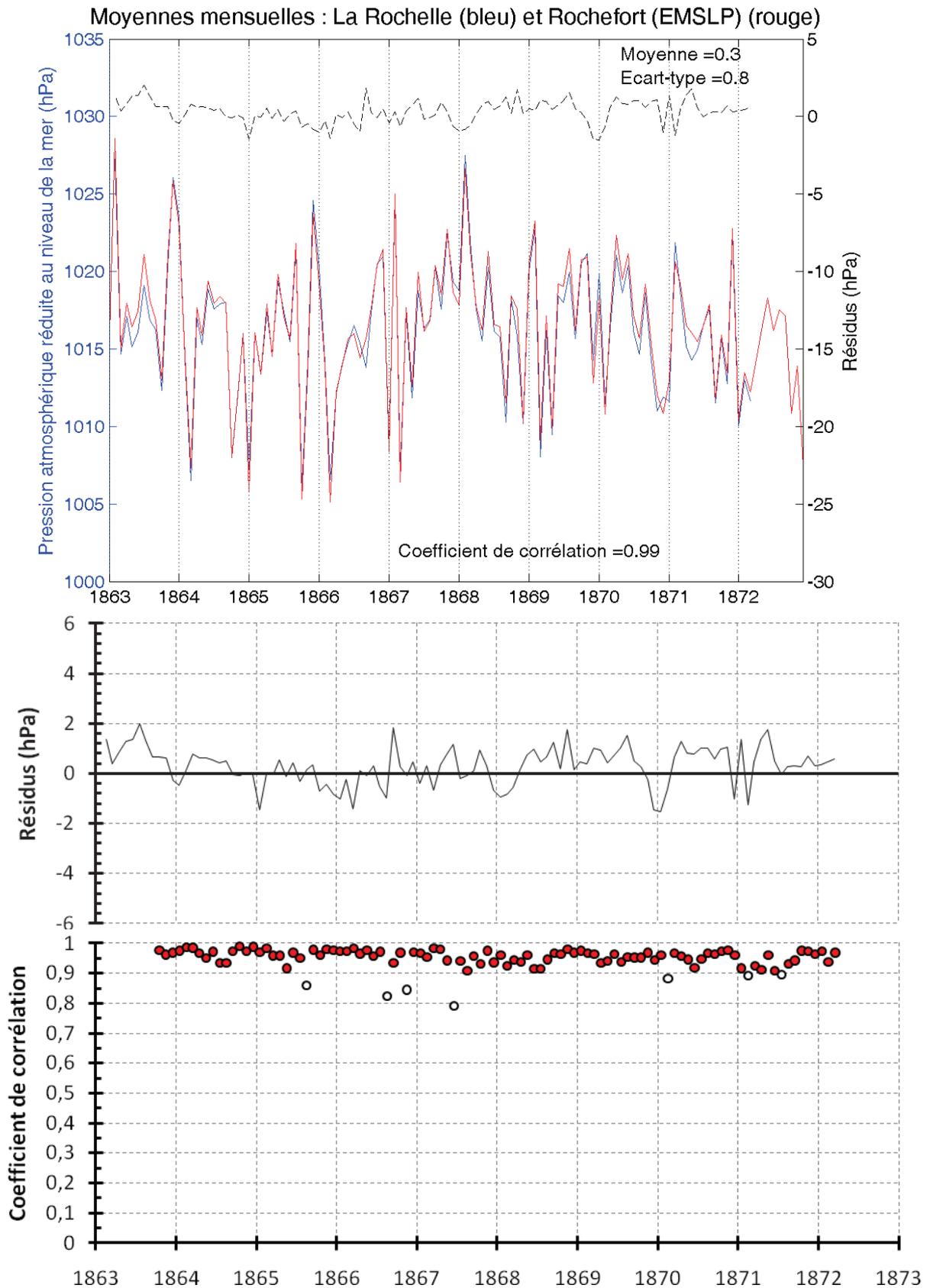


Figure V-18 : En haut : Moyennes mensuelles de la Pmer pour les séries de La Rochelle (courbe bleue) et Rochefort EMSLP3 (courbe rouge) avec leur coefficient de corrélation linéaire. Résidus entre les deux séries (courbe pointillée noire) avec leur moyenne et leur écart-type. Au milieu : Résidus entre les deux séries. En bas : coefficient de corrélation linéaire mensuel calculé à partir des données journalières. Le point blanc indique une corrélation inférieure à 0.9, synonyme de valeur(s) mensuelle(s) suspecte(s).

Le tableau V-10 ci-dessous résume les résultats trouvés :

Séries comparées		Coefficient de corrélation	Moyenne des résidus	Ecart-type des résidus
La Rochelle	Brest (EMSLP3)	0,92	- 0,51	2,05
	HadSLP2	0,94	0,69	1,91
	Rochefort	0,97	- 1,04	1,01
	Rochefort (EMSLP3)	0,99	0,30	0,75
	Enet-Boyard	0,97	0,14	1,12
Rochefort (EMSLP3)	Rochefort	0,98	- 1,33	0,85

Tableau V-10 : Résultats des comparaisons avec la série de La Rochelle.

De façon globale, les résultats montrent que l'ensemble de la série inédite de La Rochelle est d'excellente qualité. Le résultat de la comparaison avec Rochefort (EMSLP3), sur l'ensemble de la série, montre un coefficient de corrélation de 0,99 et un écart-type des résidus inférieur de 0,75 hPa, prouvant ainsi la qualité des mesures réalisées par l'observateur des marées à La Rochelle. La comparaison avec Enet-Boyard donne un coefficient de corrélation légèrement plus faible mais toujours très satisfaisant (0,97), certainement dû aux valeurs de l'année 1863 qui diffèrent quelque peu entre les deux sites.

La comparaison avec la série de Rochefort issue de BDCLIM laisse apparaître la présence d'un cycle saisonnier annuel dans les résidus. Ce cycle démontre que les données de Rochefort n'ont pas été rapportées à la température 0°C, comme cela aurait dû être le cas. C'est certainement pour cette raison qu'Auffray *et al.* [2009] ont éliminé la série de Rochefort lors de leur étude. Nous ferons donc de même et nous écarterons, à l'avenir, cette série qui ne peut être comparée aux autres.

Nous venons de voir que la série de La Rochelle est globalement d'excellente qualité. Mais l'analyse des graphiques des coefficients de corrélation mensuels peut également nous fournir une indication plus détaillée de la qualité de la série. En effet, l'expérience nous a montré qu'un coefficient de corrélation mensuel inférieur à 0,9 signifie qu'il y a un doute non négligeable sur la qualité de la moyenne mensuelle d'une des deux séries (lorsque la distance entre elles est inférieure à 30 km). En analysant les graphiques des coefficients de corrélation mensuels, on s'aperçoit que cinq moyennes mensuelles sont de qualité suspecte :

- juillet 1864 (comparaison avec Enet-Boyard et Brest-EMSLP3)
- juin 1867 (comparaison avec Rochefort-EMSLP3 et Brest-EMSLP3)
- juin 1868 (comparaison avec Enet-Boyard et Brest-EMSLP3)
- février 1870 (comparaison avec Rochefort-EMSLP3 et Brest-EMSLP3)
- juillet 1871 (comparaison avec Rochefort-EMSLP3 et Brest-EMSLP3)

Ces cinq moyennes mensuelles seront donc retirées de la série corrigée disponible sous format numérique en annexe électronique sous l'appellation « AP_MM_C4_LaRochelle_1863-1872.slp ».

V.3.5.3. Série des forts Enet et Boyard

La série inédite Enet-Boyard, numérisée à partir des registres de marée des archives du SHOM, débute le 1^{er} mai 1860 et se termine le 16 mai 1909. Elle contient six valeurs par jour, mesurées à 06h, 09h, 12h, 15h, 18h et 21h. Cette série composite est l'association de deux séries enregistrées distinctement : la série du fort Enet (1860-1873) et la série du fort Boyard (1873-1909). La construction de cette série composite est rendue possible car les conditions environnementales et méthodologiques sont identiques pour les deux sites, comme cela a été décrit précédemment.

Les six séries utilisées comme référence pour un contrôle de la qualité de la série inédite Enet-Boyard sont Brest-Plougonvelin, Brest (EMSLP3), Nantes, HadSLP2, Rochefort (EMSLP3) et Bordeaux-Floirac. Nous ne présenterons, ici, que les résultats de trois comparaisons, les autres se trouvant en annexe. La période commune entre la série de Nantes et notre série inédite débute le 1^{er} janvier 1883 et se termine le 16 mai 1909. La période commune avec la série de Rochefort (EMSLP3) précède celle de Nantes, car elle débute le 15 décembre 1862 et se termine le 31 décembre 1881. Quant à la série de Bordeaux-Floirac, sa période commune débute le 1^{er} janvier 1899 et se termine le 16 mai 1909. Afin de travailler sur des données comparables, nous avons calculé des moyennes journalières de nos séries, puis des moyennes mensuelles. Nous avons ensuite réalisé des comparaisons graphiques, des calculs de résidus entre deux séries ainsi que des calculs de coefficient de corrélation linéaire mensuel (formule de Bravais-Pearson) entre deux séries, à partir des moyennes journalières. Les résultats sont présentés ci-dessous.

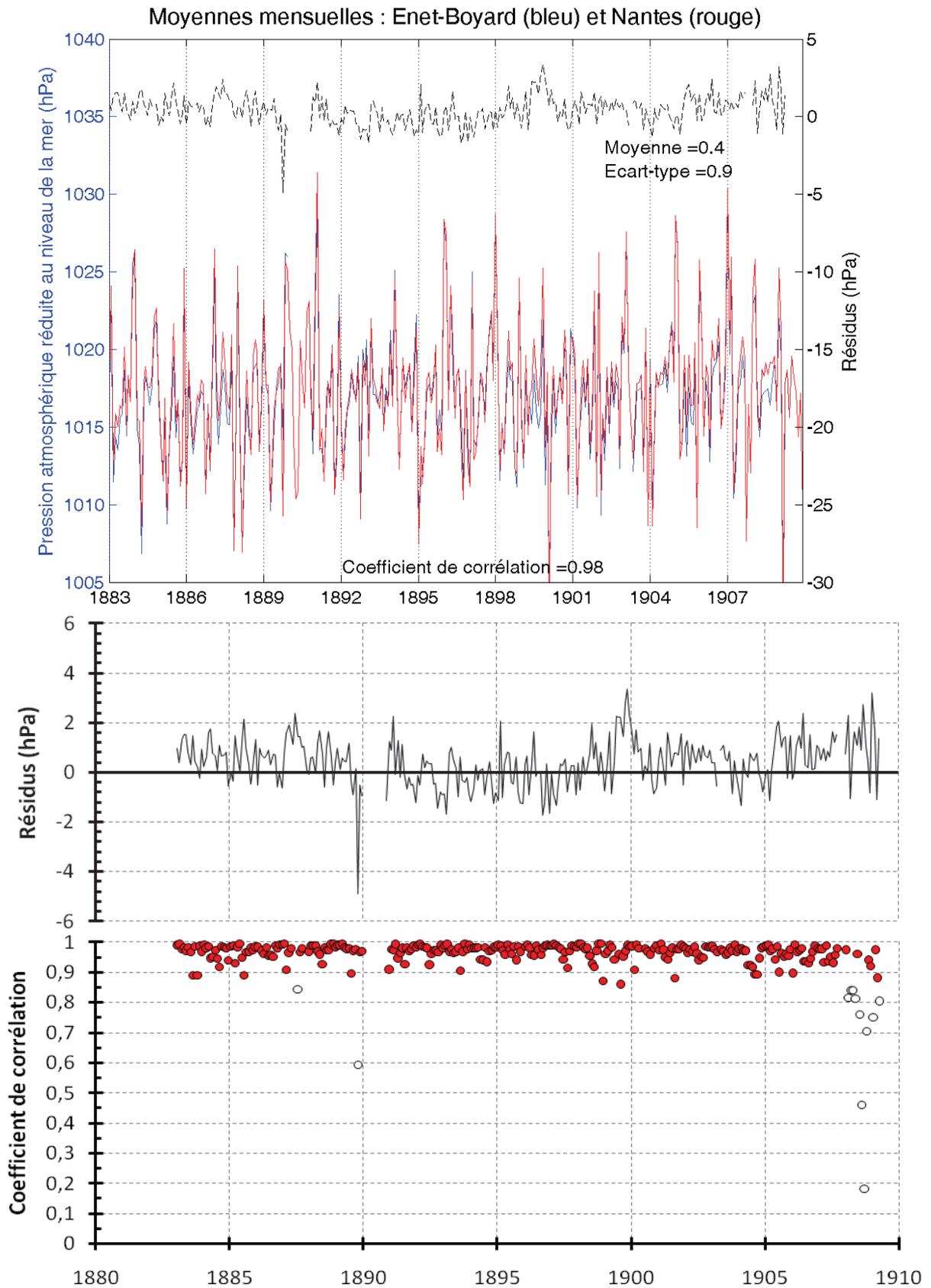


Figure V-19 : En haut : Moyennes mensuelles de la Pmer pour les séries d'Enet-Boyard (courbe bleue) et Nantes (courbe rouge) avec leur coefficient de corrélation linéaire. Résidus entre les deux séries (courbe pointillée noire) avec leur moyenne et leur écart-type. Au milieu : Résidus entre les deux séries. En bas : coefficient de corrélation linéaire mensuel calculé à partir des données journalières. Le point blanc indique une corrélation inférieure à 0.85, synonyme de valeur(s) mensuelle(s) suspecte(s).

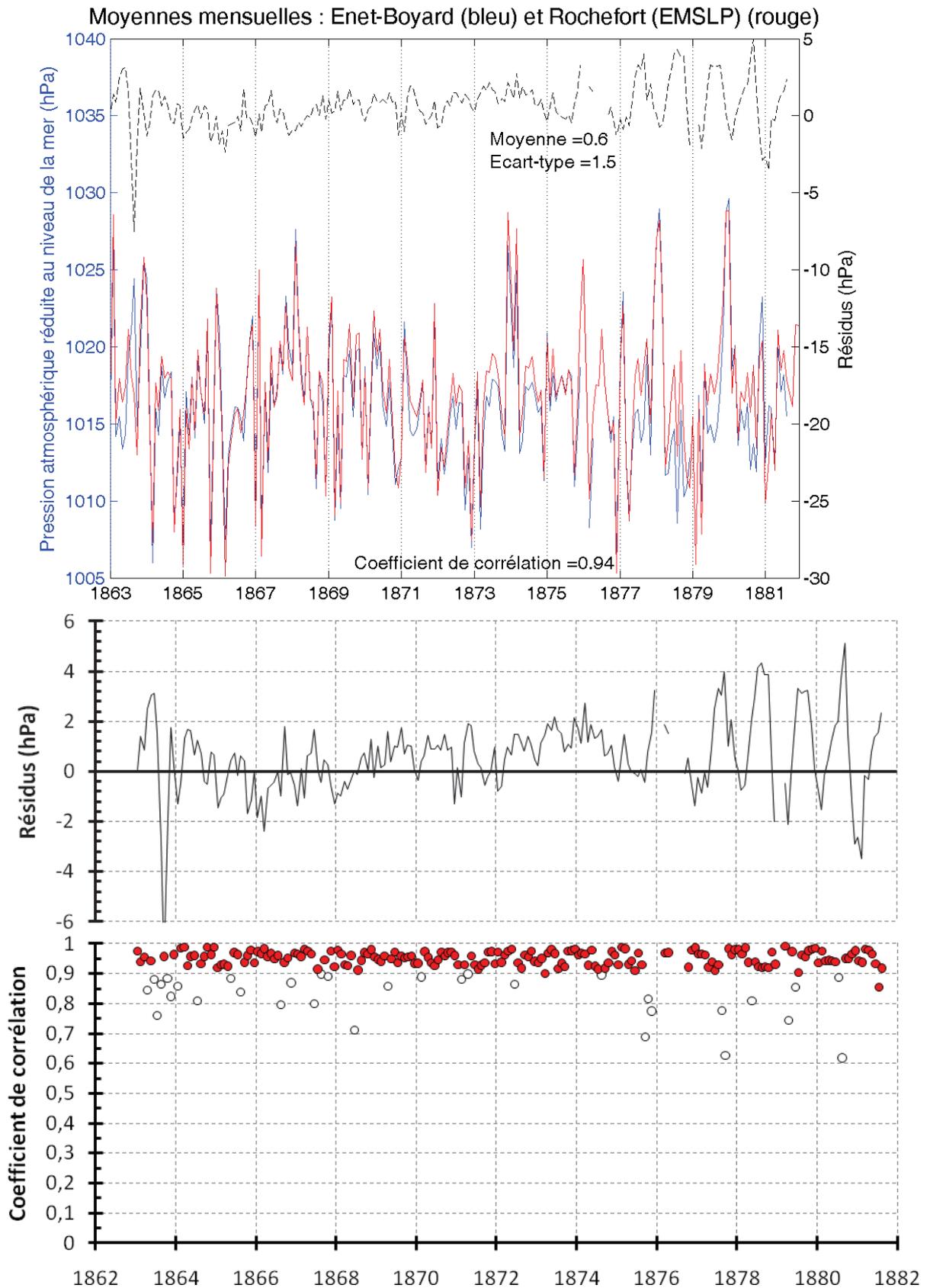


Figure V-20 : En haut : Moyennes mensuelles de la Pmer pour les séries d'Enet-Boyard (courbe bleue) et Rochefort EMSLP3 (courbe rouge) avec leur coefficient de corrélation linéaire. Résidus entre les deux séries (courbe pointillée noire) avec leur moyenne et leur écart-type. Au milieu : Résidus entre les deux séries. En bas : coefficient de corrélation linéaire calculé à partir des données journalières. Le point blanc indique une corrélation inférieure à 0.9, synonyme de valeur(s) mensuelle(s) suspecte(s).

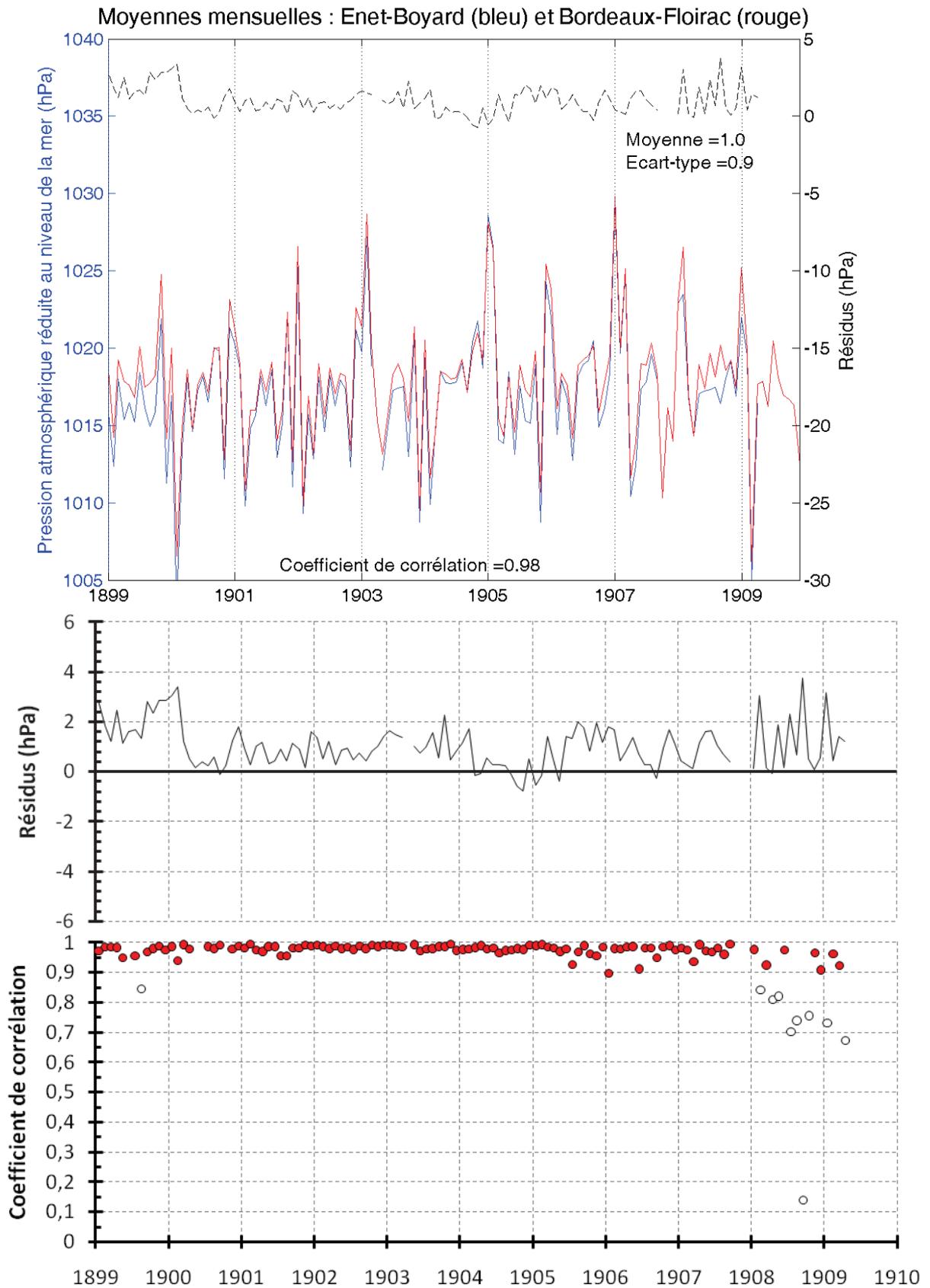


Figure V-21 : En haut : Moyennes mensuelles de la Pmer pour les séries d'Enet-Boyard (courbe bleue) et Bordeaux-Floirac (courbe rouge) avec leur coefficient de corrélation linéaire. Résidus entre les deux séries (courbe pointillée noire) avec leur moyenne et leur écart-type. Au milieu : Résidus entre les deux séries. En bas : coefficient de corrélation linéaire mensuel calculé à partir des données journalières. Le point blanc indique une corrélation inférieure à 0.85, synonyme de valeur(s) mensuelle(s) suspecte(s).

Le tableau V-11 ci-dessous résume les résultats trouvés :

Séries comparées		Coefficient de corrélation	Moyenne des résidus	Ecart-type des résidus
Enet-Boyard	Brest (EMSLP3)	0,88	- 0,34	2,35
	Brest-Plougonvelin	0,91	- 0,47	1,92
	Nantes	0,98	0,42	0,97
	HadSLP2	0,92	0,59	1,90
	Rochefort (EMSLP3)	0,94	0,58	1,50
	Bordeaux-Floirac	0,98	1,02	0,89

Tableau V-11 : Résultats des comparaisons avec la série Enet-Boyard.

De façon globale, les résultats montrent que la série inédite Enet-Boyard est de bonne qualité. La comparaison avec Rochefort (EMSLP3) donne une indication de qualité sur la première partie de la série (1863-1882), tandis que les comparaisons avec Nantes (1883-1909) et Bordeaux-Floirac (1899-1909) donnent une indication sur la deuxième partie. Le résultat de la comparaison avec Rochefort (EMSLP3) affiche un coefficient de corrélation de 0,94 et un écart-type des résidus de l'ordre de 1,5 hPa, montrant deux choses : d'une part la qualité de la série Enet-Boyard jusqu'en 1876 et d'autre part, la présence d'un cycle saisonnier annuel dans les résidus de 1877 à 1881, laissant supposer que les données n'ont pas été rapportées à la température 0°C à cette période.

Les comparaisons avec Nantes et Bordeaux-Floirac affichent d'excellents résultats : coefficients de corrélation de 0,98 pour les deux séries et un écart-type des résidus inférieur à 1 hPa, malgré la grande distance entre les sites comparés. Ce qui montre l'excellente qualité de la série Enet-Boyard à partir de 1883. Avec un bémol cependant : les deux comparaisons montrent que les données des années 1908 et 1909 sont entachées de nombreuses erreurs.

Nous venons de voir que la série Enet-Boyard est globalement de bonne qualité. Mais l'analyse des graphiques des coefficients de corrélation mensuels peut également nous fournir une indication plus détaillée de la qualité de la série. En effet, l'expérience nous a montré qu'un coefficient de corrélation mensuel inférieur à 0,9 (respectivement 0,85) signifie qu'il y a un doute non négligeable sur la qualité de la moyenne mensuelle d'une des deux séries lorsque la distance entre elles est inférieure à 30 km (respectivement 300 km). En analysant les graphiques des coefficients de corrélation mensuels, on s'aperçoit que plusieurs moyennes mensuelles sont de qualité suspecte :

- avril, juillet, août, novembre 1863 (comp. avec Rochefort-EMSLP3 et La Rochelle)
- juillet 1864 (comparaison avec Rochefort-EMSLP3 et La Rochelle)
- août 1867 (comparaison avec Rochefort-EMSLP3 et Brest-EMSLP3)
- juin 1868 (comparaison avec Rochefort-EMSLP3 et La Rochelle)
- février 1870 (comparaison avec Rochefort-EMSLP3 et Brest-EMSLP3)

- juin 1872 (comparaison avec Rochefort-EMSLP3 et Brest-EMSLP3)
- août et septembre 1877 (comparaison avec Rochefort-EMSLP3 et Brest-EMSLP3)
- mai 1878 (comparaison avec Rochefort-EMSLP3 et Brest-EMSLP3)
- avril 1879 (comparaison avec Rochefort-EMSLP3 et Brest-EMSLP3)
- août 1880 (comparaison avec Rochefort-EMSLP3 et Brest-EMSLP3)
- octobre 1889 (comparaison avec Nantes et Brest-Plougonvelin)
- février, avril, mai, juillet à octobre 1908 (comp. avec Nantes et Bordeaux-Floirac)
- janvier et avril 1909 (comparaison avec Nantes et Bordeaux-Floirac)

Ces vingt-quatre moyennes mensuelles seront donc retirées de la série numérisée corrigée disponible sous format numérique en annexe électronique sous l'appellation « AP_MM_C4_Enet-Boyard_1860-1909.slp ».

V.3.6. Résultats et discussion

A l'issue de ces travaux, trois nouvelles séries de pression atmosphérique viennent compléter la base de données française : Enet-Boyard (1860-1909), La Rochelle (1863-1872) et Brest (1876-1884). Les valeurs et les graphiques des moyennes mensuelles de ces trois séries sont présentés ci-dessous. Pour une lecture plus rapide de la qualité des données, nous avons mis en place un code de chiffres et de couleur, inspiré de celui recommandé par GLOSS [2009] pour qualifier la qualité des données du niveau marin. Ce code est défini dans le *tableau V-12* ci-dessous.

Code	Signification	Définition
0	Pas de contrôle	Aucune procédure de contrôle n'a été appliquée
1	Bonne qualité	Le contrôle qualité a montré que la valeur est de qualité
2	Probablement bonne	Il subsiste un doute sur la qualité
3	Probablement mauvaise	La valeur est suspectée d'être de mauvaise qualité
4	Mauvaise qualité	Il ne fait aucun doute que la valeur est de mauvaise qualité
9	Absence de données	Moyenne non calculée, faute de données suffisantes

Tableau V-12 : Code de chiffres et de couleurs qualifiant la qualité des moyennes mensuelles de pression atmosphérique.

• *Série de Brest (1876-1884)*

Moyennes du fichier « AP_MM_C4_Brest_1876-1884.slp » :

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Octobre	Nov.	Déc.
1876	1025,67	1014,41	1007,57	1013,69	1020,30	1017,81	1021,42	1016,92	1012,95	1013,37	1011,92	999,84
1877	1013,79	1021,81	1011,95	1007,37	1012,98	1017,65	1017,84	1014,78	1018,96	1019,81	1010,26	1021,8
1878	1026,53	1026,31	1022,88	1010,10	1011,27	1015,76	1019,34	1010,03	1019,45	1011,69	1011,46	1009,51
1879	1014,52	1003,43	1016,26	1006,25	1018,60	1012,40	1015,56	1014,15	1016,91	1020,52	1024,22	1027,66
1880	1028,37	1012,38	1018,68	1013,54	1019,06	1015,62	1016,59	1016,04	1017,65	1011,58	1017,52	1018,86
1881	1010,51	1011,53	1014,21	1012,56	1021,42	1018,08	1019,64	1015,86	1016,70	1016,07	1016,78	1018,86
1882	1030,14	1026,01	1021,40	1010,41	1017,21	1017,26	1015,39	1018,07	1013,61	1012,17	1013,06	1008,09
1883	1014,16	1021,57	1014,30	1016,08	1016,16	1016,70	1015,91	1020,52	1014,09	1018,92	1015,55	1026,6
1884	1024,70	1013,50	1014,66	1009,47	1018,42	1020,91	1017,43	1018,22	1017,95	1022,72	1023,20	1016,59

Tableau V-13 : Moyennes mensuelles de pression atmosphérique - Brest (1876-1884).

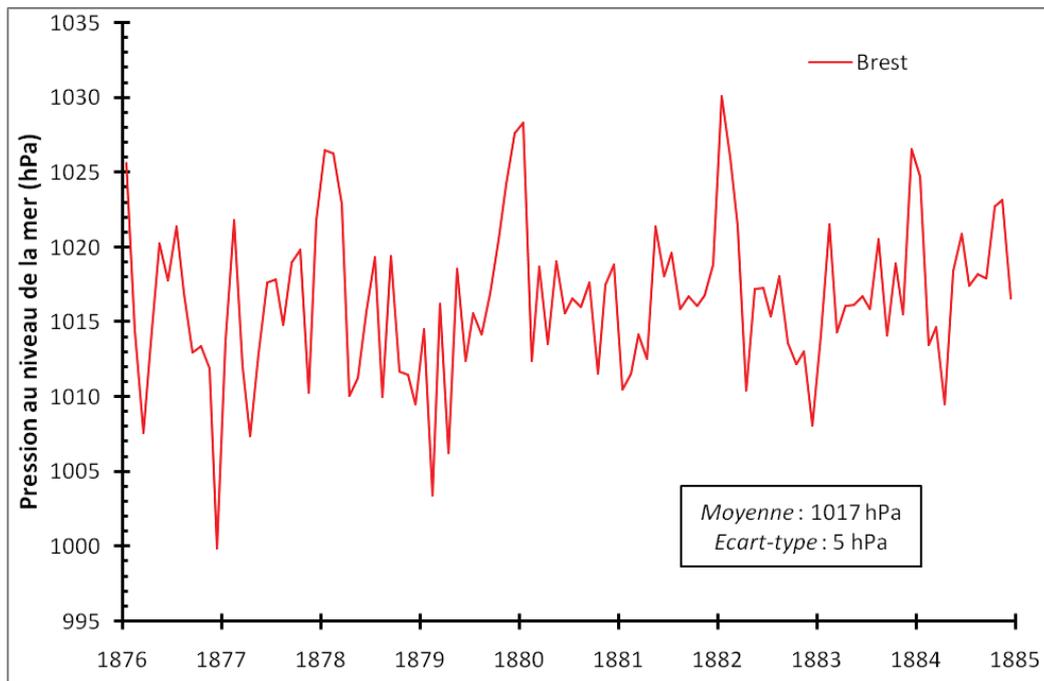


Figure V-22 : Moyenne mensuelle de la pression atmosphérique au niveau de la mer à Brest, de 1876 à 1884.

• *Série de La Rochelle (1863-1872)*

Moyennes du fichier « AP_MM_C4_LaRochelle_1863-1872.slp » :

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Octobre	Nov.	Déc.
1863	NaN	1027,23	1014,67	1017,11	1015,12	1016,07	1019,12	1016,84	1016,22	1012,35	1020,41	1026,08
1864	1023,54	1014,44	1006,53	1017,04	1015,26	1018,84	1017,55	1017,90	1018,02	1008,06	1012,04	1016,00
1865	1007,28	1016,05	1013,41	1017,36	1014,64	1019,39	1017,36	1015,49	1021,47	1006,03	1014,18	1024,59
1866	1020,25	1014,07	1006,54	1012,13	1014,02	1015,37	1016,51	1015,38	1013,82	1017,35	1020,48	1020,94
1867	1008,78	1024,67	1007,07	1017,33	1011,84	1018,76	1016,31	1016,90	1020,29	1017,59	1022,45	1019,35
1868	1018,75	1027,48	1021,91	1017,54	1015,50	1020,29	1016,13	1015,75	1010,28	1018,24	1015,83	1010,19
1869	1020,04	1022,85	1008,03	1016,19	1009,46	1018,45	1018,02	1019,97	1015,67	1020,51	1021,17	1014,28
1870	1019,87	1011,45	1016,42	1021,05	1018,64	1020,38	1016,21	1014,68	1018,60	1014,30	1010,99	1011,89
1871	1011,60	1021,85	1018,73	1015,12	1014,27	1014,94	1016,55	1017,60	1011,51	1015,66	1012,74	1022,49
1872	1010,03	1012,99	1011,67									

Tableau V-14 : Moyennes mensuelles de pression atmosphérique - La Rochelle (1863-1872).

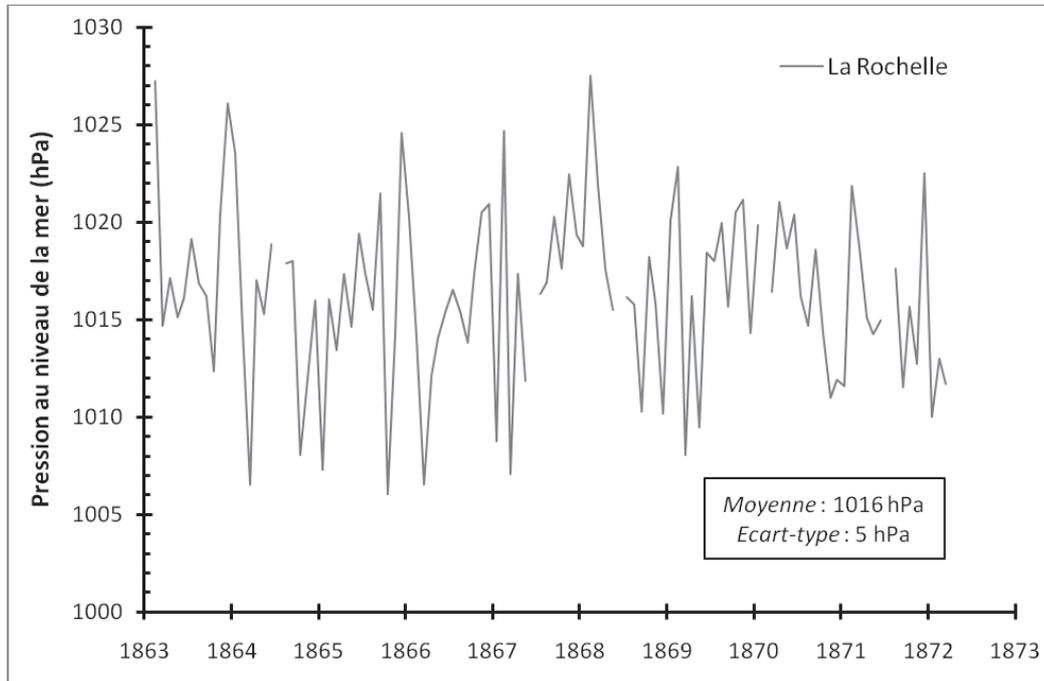


Figure V-23 : Moyenne mensuelle de la pression atmosphérique au niveau de la mer à La Rochelle de 1863 à 1872

• Série Enet-Boyard (1860-1909)

Moyennes du fichier « AP_MM_C4_Enet-Boyard_1860-1909.slp » :

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Octobre	Nov.	Déc.
1860	NaN	NaN	NaN	NaN	1015,85	1012,90	1015,28	1012,64	1012,63	1019,52	NaN	1003,74
1861	1018,38	1011,32	1014,38	1014,85	1014,27	1012,57	1011,53	1017,46	1012,50	1010,81	1011,61	1018,26
1862	1014,96	1016,17	1004,57	1015,35	1011,98	1014,51	1014,09	1010,92	1013,45	1016,20	1014,30	1023,65
1863	1015,10	1027,20	1014,18	1015,46	1013,38	1014,31	1019,58	1020,94	1024,42	1014,86	1019,27	1025,57
1864	1024,38	1015,03	1006,00	1015,99	1014,26	1018,72	1016,71	1017,71	1018,38	1008,51	1011,32	1015,28
1865	1007,26	1017,11	1014,28	1018,04	1014,10	1019,09	1017,18	1015,03	1021,39	1007,01	1014,86	1023,79
1866	1021,06	1014,79	1007,52	1012,90	1014,49	1016,10	1016,02	1015,38	1013,87	1017,74	1020,45	1021,98
1867	1009,76	1024,87	1007,48	1017,07	1011,86	1018,28	1016,07	1017,25	1019,95	1018,23	1023,31	1019,97
1868	1018,69	1027,62	1021,73	1018,42	1016,52	1021,25	1016,69	1015,88	1010,80	1018,42	1016,27	1010,56
1869	1019,51	1023,06	1008,75	1015,55	1009,52	1018,15	1018,06	1019,74	1015,46	1019,72	1019,92	1012,69
1870	1018,72	1010,42	1016,46	1020,87	1018,56	1020,27	1016,18	1014,84	1017,70	1014,43	1011,06	1012,15
1871	1012,78	1021,62	1018,07	1014,58	1014,21	1014,65	1016,20	1017,73	1012,37	1016,14	1013,42	1021,82
1872	1011,16	1014,04	1011,76	1013,37	1015,60	1016,78	1014,67	1016,36	1016,32	1009,42	1012,81	1006,99
1873	1013,57	1017,27	1008,15	1014,34	1016,81	1016,14	1017,88	1017,76	1017,43	1014,34	1013,22	1026,56
1874	1023,03	1018,64	1024,94	1013,06	1013,92	1017,41	1017,20	1017,70	1016,92	1015,73	1016,13	1011,32
1875	1020,92	1015,85	1018,35	1016,48	1017,40	1018,16	1017,08	1018,46	1018,12	1010,96	1014,31	1018,66
1876	NaN	NaN	1008,28	1014,05	NaN	NaN	NaN	NaN	1015,81	1013,82	1015,47	1006,71
1877	1019,01	1023,58	1012,51	1009,32	1013,07	1015,65	1015,92	1013,81	1014,71	1019,47	1012,98	1022,27
1878	1026,93	1028,95	1023,37	1011,65	1011,80	1013,90	1014,66	1008,55	1015,89	1010,28	1010,86	1012,81
1879	NaN	NaN	1016,87	1009,97	1018,88	1014,35	1014,93	1013,82	1014,81	1017,25	1021,09	1028,70
1880	1029,62	1018,56	1020,11	1013,59	1015,94	1014,62	1016,33	1012,05	1013,72	1011,90	1020,50	1023,26
1881	1012,45	1016,20	1016,05	1012,30	1020,30	1017,09	1018,20	1015,50	NaN	NaN	NaN	NaN
1882	NaN	NaN	NaN	NaN	1015,23	1018,18	1016,16	1017,71	1012,26	1012,40	1014,79	1010,61
1883	1015,45	1023,70	1011,44	1014,33	1013,50	1015,58	1015,90	1018,64	1014,42	1018,11	1016,89	1024,51
1884	1026,20	1014,92	1013,80	1006,83	1017,05	1018,25	1017,52	1016,44	1017,60	1021,34	1021,85	1017,24
1885	1013,96	1011,85	1015,33	1008,72	1014,00	1015,60	1019,53	1014,33	1016,47	1011,65	1012,88	1023,88
1886	1010,26	1018,24	1015,43	1013,28	1014,79	1016,23	1016,34	1017,34	1017,01	1011,30	1016,47	1012,83
1887	1018,37	1024,90	1017,21	1013,87	1016,21	1018,71	1017,65	1015,22	1015,12	1019,88	1007,03	1016,14
1888	1024,79	1014,57	1007,00	1012,49	1016,91	1014,49	1013,83	1018,64	1019,00	1019,17	1013,92	1016,13
1889	1022,19	1017,62	1017,10	1009,62	1011,89	1015,06	1017,54	1018,82	1018,94	1014,17	1026,20	1026,02

1890	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	1018,34	1013,26
1891	1022,71	1029,14	1013,59	1013,62	1011,73	1015,62	1017,94	1016,97	1020,29	1011,20	1013,35	1023,52
1892	1015,16	1012,12	1013,94	1016,04	1016,59	1018,37	1017,18	1017,05	1019,56	1010,54	1019,99	1018,62
1893	1020,62	1014,82	1021,19	1017,11	1017,08	1016,52	1017,14	1018,19	1015,07	1017,53	1016,53	1021,24
1894	1017,48	1025,12	1017,50	1012,57	1015,26	1019,28	1017,53	1018,41	1018,65	1015,05	1019,35	1022,25
1895	1008,59	1011,65	1012,35	1013,78	1017,25	1017,75	1016,97	1018,13	1019,63	1014,20	1016,10	1014,50
1896	1028,07	1026,79	1016,99	1023,71	1018,82	1015,71	1018,29	1018,71	1015,67	1011,57	1018,35	1014,20
1897	1011,22	1025,01	1014,21	1013,78	1015,11	1018,25	1017,50	1016,08	1019,45	1021,07	1022,22	1018,92
1898	1028,32	1021,38	1011,54	1015,24	1013,27	1017,20	1019,21	1018,08	1017,97	1012,52	1011,13	1024,41
1899	1016,03	1012,38	1018,00	1015,38	1016,47	1015,21	1018,43	1016,14	1014,96	1015,88	1021,90	1011,29
1900	1016,96	1003,12	1013,60	1018,09	1014,59	1017,23	1018,19	1016,53	1020,06	1019,82	1011,54	1021,34
1901	1020,30	1018,67	1009,77	1014,79	1015,65	1018,18	1016,28	1018,63	1012,92	1015,11	1022,19	1011,04
1902	1025,22	1009,33	1015,70	1012,85	1018,15	1014,63	1018,21	1016,29	1017,93	1017,37	1012,34	1021,21
1903	1019,74	1027,20	1018,83	NaN	1012,11	1014,90	1017,28	1017,40	1017,52	1013,00	1020,89	1008,75
1904	1019,38	1009,91	1014,70	1018,54	1017,77	1017,73	1017,79	1019,04	1017,23	1020,36	1021,78	1018,71
1905	1028,64	1026,54	1014,07	1013,85	1018,48	1013,14	1017,56	1015,33	1015,11	1018,97	1008,74	1024,28
1906	1022,01	1014,41	1017,93	1016,73	1012,77	1018,17	1018,95	1019,20	1020,47	1014,90	1016,14	1018,38
1907	1029,38	1019,66	1025,02	1010,41	1012,35	1017,36	1017,82	1019,60	1017,89	NaN	NaN	NaN
1908	1022,92	1023,48	1016,79	1014,39	1017,06	1017,21	1017,33	1017,48	1016,43	1018,05	1019,14	1016,88
1909	1022,02	1019,50	1004,74	1016,44	NaN							

Tableau V-15 : Moyennes mensuelles de pression atmosphérique - Enet-Boyard (1860-1909).

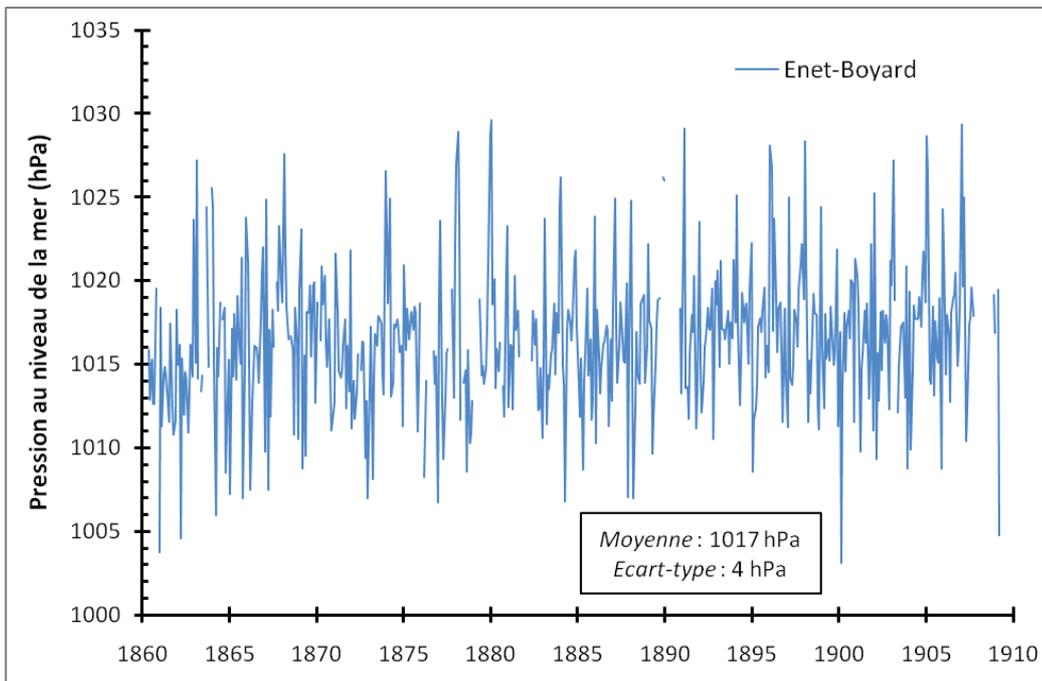


Figure V-24 : Moyenne mensuelle de la pression atmosphérique au niveau de la mer à Enet-Boyard (1860 à 1909).

Ces trois séries sont globalement d'excellente qualité, ce qui tend un peu plus à prouver tout le sérieux du travail réalisé par les observateurs de marée du réseau de Chazallon. Cependant, quelques moyennes mensuelles de faible qualité ont été découvertes, comme par exemple en 1908 et 1909 au fort Boyard, à une époque où les registres de marée nous apprennent que l'observateur en place ne prenait aucun soin à effectuer de bonnes mesures. D'autre part, pour la même série (Enet-Boyard), il existe un doute quant aux mesures réalisées entre 1877 et 1881. En effet, les résultats laissent entrevoir la présence d'un cycle saisonnier annuel dans les résidus, ce qui pourrait supposer que les mesures réalisées lors de cette période n'ont pas été rapportées à la température 0°C. Pour le vérifier, il faudrait de nouveau

consulter les registres de marée originaux conservés dans les archives du SHOM. Cependant, ceux-ci ne révèlent pas l'ensemble des informations utiles à l'exploitation de ces données, comme en témoigne le problème d'altitude détecté sur la série inédite de Brest. En effet, l'altitude supposée de l'observatoire (5 m) s'est révélée être fautive, les mesures de pression atmosphérique ayant été réalisées à une altitude avoisinant les vingt-sept mètres. Enfin, il faut également garder à l'esprit que ces trois séries inédites ne contiennent que des mesures diurnes de la pression. Elles ne peuvent donc pas être comparées directement à des séries contenant à la fois des mesures diurnes et nocturnes.

Nos trois séries inédites sont, de plus, particulièrement intéressantes dans le panorama des séries françaises, puisque deux d'entre elles (Enet-Boyard et La Rochelle) possèdent des mesures dans la période 1860-1870, alors que BDCLIM n'en compte que dix au niveau national pour cette même période. En outre, la série Enet-Boyard (47 ans) devient la quatrième série française en termes de durée effective de mesures sur la période 1800-1909, derrière Rochefort (81 ans), Lyon (54 ans) et Brest (51 ans).

Dans un contexte plus général, ces travaux de recherche ont permis de mettre en évidence l'existence d'un grand potentiel de mesures de pression atmosphérique encore inexploité dans les archives du SHOM. Ces mesures, si elles venaient à être numérisées, pourraient considérablement enrichir la base de données existante, BDCLIM, et permettre ainsi une meilleure précision dans la reconstruction des champs de pression sur la France au 19^e siècle.

V.4. Séries du niveau de la mer

V.4.1. Introduction

De nombreuses séries du niveau marin ont été enregistrées sur le littoral charentais depuis la fin du 18^e siècle. La majorité d'entre elles est aujourd'hui conservée dans des centres d'archives, sous la forme de registres de marée ou de marégrammes, dans un format non-utilisable immédiatement par la communauté scientifique. L'objectif principal de ce travail, une fois la mise au jour des lots de mesures effectuées, est de transformer cet intéressant potentiel scientifique archivé, d'accès restreint, en séries de mesures numérisées offrant toute la qualité nécessaire aux études scientifiques, et accessible à tous.

Parmi les lots de mesures anciens, vingt-quatre ont retenus notre attention, répartis sur trois zones géographiques : La Rochelle (Vieux port et La Pallice : 8 lots de mesures), la rade de l'île d'Aix (5 lots) et le phare de Cordouan (11 lots). L'objectif est dans un premier temps de construire trois séries temporelles, correspondant à ces trois sites. L'une des particularités de ce travail est qu'il s'agit de construire des séries cohérentes à partir de lots de mesures enregistrées sur des sites parfois distants,

jusqu'à 5 km parfois. La question est alors de savoir si les conditions de mesures sont suffisamment proches pour envisager une telle construction. Lorsque ce travail sera accompli, nous étudierons alors la possibilité de construire une série composite unique du pertuis d'Antioche, à partir des sites de La Rochelle et de la rade de l'île d'Aix, qui couvrirait une période de plus de 235 ans, de 1775 à aujourd'hui.

Nous commencerons cette étude par une présentation des procédures de sauvegarde et de numérisation des données historiques, ainsi que des données utilisées et des instructions précises régissant ces mesures anciennes. Quelques méthodes utilisées seront exposées, notamment la méthode usitée pour la détection et la correction d'erreurs de retranscription et de sauts dans les séries. Puis, nous analyserons l'ensemble des paramètres environnementaux, méthodologiques et le suivi des systèmes de référence afin de déterminer si la construction de séries temporelles est possible. Cette construction établie, les lots de mesures de La Rochelle et de la rade de l'île d'Aix seront rigoureusement contrôlés et détaillés ; les problèmes détectés seront listés et corrigés si cela est possible. Enfin, les résultats seront présentés et discutés. Afin de faciliter la lecture de la qualité des séries temporelles, un code de couleur a été mis en place, permettant au lecteur d'avoir une idée précise et rapide de la qualité d'une moyenne (mensuelle la plupart du temps).

V.4.2. Données

V.4.2.1. Sauvegarde et numérisation des données historiques

L'originalité de ce travail de recherche est d'utiliser principalement des données historiques du niveau de la mer, qui ne sont pas encore accessibles sous format numérique. Elles sont, en effet, conservées au sein de différents centres d'archives français, et notamment celui du SHOM, sous la forme de registres de marée manuscrits ou de marégrammes anciens (cf. *I.4.1.1. Données du niveau de la mer*). Malgré tout le soin apporté à la conservation de ces documents, parfois pluriséculaires, nul n'est à l'abri d'une destruction locale de documents d'archives. C'est pourquoi il est important de réaliser des opérations de sauvegarde de ces données anciennes, par le biais de copies numériques. D'autre part, malgré l'important travail d'inventaire réalisé par Pouvreau [2008], des lots de mesures historiques du niveau de la mer peuvent encore se trouver dans des centres d'archives, oubliés de tous. Pouvreau ayant, en effet, démontré que la France possède un riche patrimoine historique de mesures du niveau de la mer, qu'il serait très intéressant d'exploiter, et par conséquent, de numériser.

La procédure de sauvegarde et de numérisation mise en place pour ce travail de recherche a été la suivante :

1. Parcourir les centres d'archives à la recherche de mesures historiques

L'inventaire réalisé par Pouvreau [2008] fait état de nombreux lots de mesures enregistrés sur le littoral charentais, et bien que fourni, celui-ci n'est pas exhaustif. La première étape a donc été de compléter cet inventaire en réalisant une enquête systématique dans les centres d'archives locaux ou auprès d'organismes départementaux.

2. Réaliser une copie numérique des documents anciens

Lorsque des mesures historiques, ainsi que leur description (ou métadonnées) sont retrouvées, il convient d'en réaliser une copie numérique. Pour des raisons pratiques, cette copie était souvent réalisée à l'aide d'un appareil photographique numérique, mais l'idéal serait de pouvoir utiliser un scanner couleur, ou à défaut noir et blanc. Cependant, certains documents sont si fragiles ou si grands qu'ils ne peuvent être scannés par des méthodes classiques. L'appareil photographique devient donc la solution la moins onéreuse et la plus rapide.

3. Stocker les copies numériques sur plusieurs disques durs

L'important est de multiplier les copies numériques afin de s'assurer de la pérennité de la conservation de ces données anciennes. A ce stade de la procédure, les documents sauvegardés sont sous la forme d'images numériques.

4. Numériser les mesures du niveau marin

Cette étape se déroule de deux manières différentes selon le type de support sur lequel étaient consignées les mesures du niveau de la mer. Si le support était un marégramme, alors la procédure de numérisation passe par l'utilisation du logiciel NUNIEAU (cf. V.2.2. *Numérisation des marégrammes*). Si le support est un registre de marée, dans lequel les mesures sont inscrites dans un tableau, la procédure de numérisation est manuelle. C'est-à-dire qu'il faut recopier, à la main, toutes les mesures inscrites dans le registre de marée dans un tableur informatique (*figure V-25*).

Toutes les séries numérisées sont disponibles en annexe électronique sous l'appellation « SL_RD_nomobservatoire_période.dat », où :

- SL = *sea level* (niveau marin)
- RD = *raw data* (données brutes issues de la numérisation)

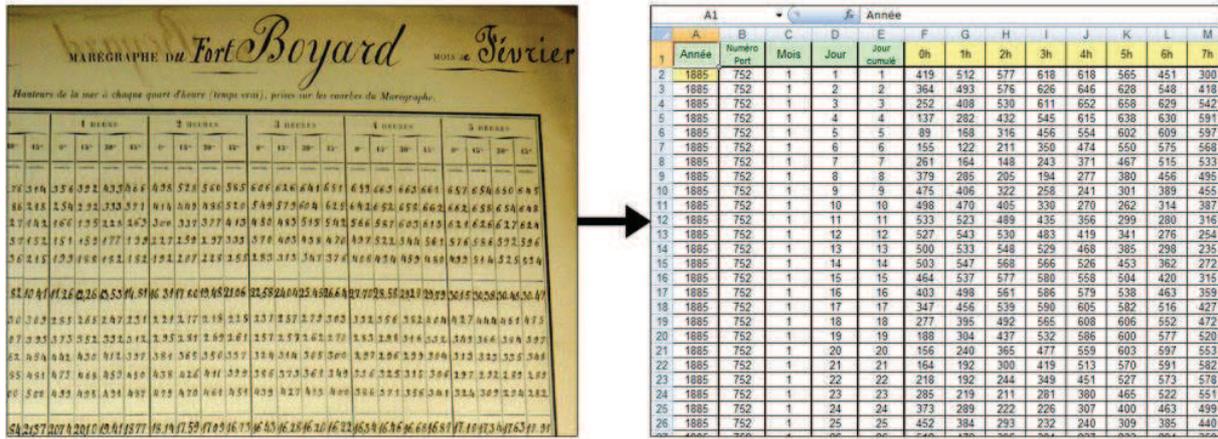


Figure V-25 : Procédure de numérisation manuelle des registres de marée anciens. Les mesures inscrites dans le registre (à gauche, archives du SHOM) sont recopiées à la main dans un tableur informatique (à droite).

Cette étape est plus ou moins longue, selon la longueur de la série historique. Par exemple, pour les séries des forts Enet et Boyard, c’est approximativement 400 000 valeurs qui ont été numérisées, ce qui représente de nombreux mois de travail. Et encore, en se limitant à numériser une valeur par heure, mais les registres anciens contiennent en réalité une valeur tous les quarts d’heure. Afin de vérifier qu’un échantillonnage horaire est suffisant pour mes travaux, le *tableau V-16* ci-dessous présente les résultats d’un test de comparaison. Pour exemple, nous avons réalisé une analyse harmonique sur l’ensemble des mesures réalisées en 2010 au port de La Pallice (disponibles en ligne sur le serveur REFMAR), d’une part avec des données échantillonnées toutes les dix minutes, et d’autre part avec des données échantillonnées toutes les heures. Les résultats sont présentés pour les 14 ondes principales, qui représentent environ 88% de l’amplitude totale de la marée à La Pallice. Les résultats montrent que la fréquence de l’échantillonnage n’a pas d’impact statistiquement significatif sur le calcul de l’amplitude des ondes composant la marée au port de La Pallice. On remarque cependant un écart moyen de 4° sur le calcul de la phase, mais qui n’aura pas de conséquences pour la suite de nos travaux dans la mesure où l’ensemble des jeux de données utilisés a un échantillonnage horaire.

Onde	Amplitude		Phase	
	10 min.	Hor.	10 min.	Hor.
M2	174,1 ± 0,8	174,3 ± 0,7	94,1 ± 0,3	98,3 ± 0,2
S2	62,6 ± 0,7	62,9 ± 0,6	127,4 ± 0,7	131,5 ± 0,6
N2	36,5 ± 0,8	36,4 ± 0,6	75 ± 1	79 ± 1
M4	24,8 ± 1,1	25 ± 1	1 ± 2	10 ± 2
K2	18,5 ± 0,7	17,7 ± 0,6	124 ± 2	129 ± 2
MN4	11 ± 1	11 ± 1	310 ± 6	319 ± 6
MS4	10 ± 1	10 ± 1	88 ± 6	96 ± 6
O1	7,3 ± 0,3	7,3 ± 0,3	324 ± 3	326 ± 2
NU2	7,2 ± 0,8	6,8 ± 0,6	80 ± 6	82 ± 5
K1	6,5 ± 0,4	6,5 ± 0,3	74 ± 3	76 ± 3
MU2	6,2 ± 0,8	6,0 ± 0,6	66 ± 7	68 ± 5
L2	5,4 ± 0,9	5,5 ± 0,8	92 ± 11	93 ± 8
2N2	4,9 ± 0,8	4,9 ± 0,5	50 ± 9	54 ± 6
M6	4,4 ± 0,4	4,4 ± 0,3	300 ± 5	313 ± 4

Tableau V-16 : Amplitudes et phases des 14 ondes principales du port de La Pallice en 2010, calculées avec *t_tide*, d’une part à partir de données échantillonnées toutes les 10 minutes, et d’autre part toutes les heures.

V.4.2.2. Rade de la Rochelle

La première des trois zones d'études est la rade de La Rochelle. L'objectif, ici, est de regrouper les données du Vieux port et de La Pallice afin de construire une série composite temporelle de La Rochelle, débutant en 1775 et se poursuivant de nos jours. L'ensemble des mesures du niveau de la mer réalisées dans la rade de La Rochelle est présenté au chapitre précédent (cf. IV.1.5. *Inventaire et description des mesures enregistrées*). Pour la construction de la série composite, nous utiliserons cinq jeux de données répartis entre le site de La Pallice et le site du Vieux port (figure V-26).



Figure V-26 : Localisation des différents jeux de données utilisés pour la construction de la série composite temporelle de La Rochelle. Images modifiées © 2011 GeoEye.

Les lots de mesures utilisés couvrent une période totale de 237 ans, de 1775 à aujourd'hui (2011), pour une durée effective d'enregistrement de 52 ans (figure V-27).

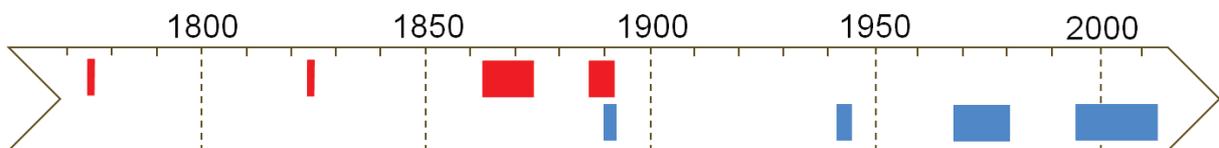


Figure V-27 : Représentation temporelle des lots de mesures du niveau marin utilisés pour la construction d'une série composite de La Rochelle de 1775 à aujourd'hui. En rouge : Vieux port ; en bleu : La Pallice.

Comme le montre la description de ces différents lots de mesures (tableau V-17), les références utilisées pour mesurer le niveau de la mer (systèmes de temps et de hauteur) ne sont pas toujours les mêmes. De plus, l'échantillonnage des mesures ainsi que l'outil utilisé pour la mesure ont également varié avec le temps. Ce tableau illustre bien toute la difficulté de construire une série temporelle cohérente à partir de lots de mesures hétérogènes.

Période	Durée effective	Mesures		Système de hauteur		Système de temps		
		Appareil	Description	Pieds	Mètres	TSV	TSM	TU
VIEUX PORT DE LA ROCHELLE								
1775 - 1776	1 an	Echelle gravée	Hauteurs des PM diurnes	X		-		
1824	3 mois	Echelle	Hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	X		X		
1863 - 1874	12 ans	Marégraphe Chazallon	Hauteurs tous les ¼ d'heure + Pression atm.		X	X		
1887 - 1892	6 ans	Echelle	Heures et hauteurs des PM et BM diurnes		X		X	
LA PALLICE								
1890 - 1892	3 ans	Echelle	PM et BM diurnes		X		X	
1941 - 1944	3 ans	Marégraphe flotteur	Hauteurs horaires		X			X
1967 - 1980	10 ans	Marégraphe flotteur	Hauteurs horaires		X			X
1995 - 2011	17 ans	Marégraphe numérique	Hauteurs toutes les 10 minutes		X			X

Tableau V-17 : Description des lots de mesures utilisés pour la construction de la série composite temporelle de La Rochelle.

V.4.2.3. Rade de l'île d'Aix

La deuxième zone d'étude est la rade de l'île d'Aix, objectif principal de ce travail de recherche. Comme expliqué au chapitre précédent, cette zone est particulièrement intéressante car elle est située à la verticale d'une trace des satellites altimétriques Jason. De plus, l'installation d'un nouvel observatoire du niveau de la mer à l'île d'Aix permet d'étendre la future série composite historique à aujourd'hui, augmentant encore un peu plus son intérêt. Les jeux de données utilisés pour la construction de la série cohérente sont répartis entre l'île d'Aix, le fort Enet et le fort Boyard, dans un triangle où la distance maximale entre deux sites est de 5 km. (figure V-28).

Les lots de mesures utilisés couvrent une période totale de 188 ans (de 1824 à 2011) pour une durée effective d'enregistrement de 47,7 ans (figure V-29).

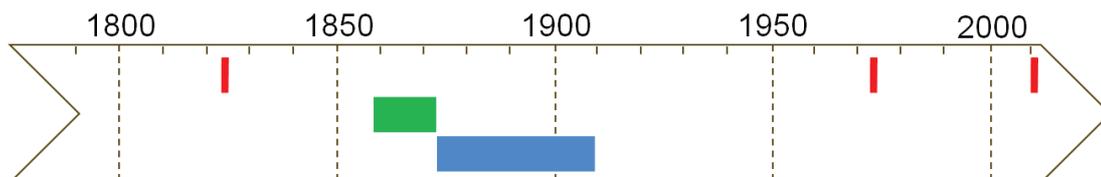


Figure V-29 : Représentation temporelle des lots de mesures du niveau marin utilisés pour la construction d'une série composite Aix-Enet-Boyard. En rouge : l'île d'Aix ; en vert : fort Enet ; en bleu : fort Boyard.



Figure V-28 : Localisation des différents jeux de données utilisés pour la construction de la série composite temporelle Aix-Enet-Boyard. Images modifiées © 2011 GeoEye

Le tableau V-18 ci-dessous présente les différents jeux de données et les systèmes de référence utilisés pour chacun d'entre eux. Comme pour la rade de La Rochelle, les références ont changé au cours du temps, de même que l'échantillonnage et les appareils de mesure.

Période	Durée effective	Mesures		Système de hauteur		Système de temps		
		Appareil	Description	Pieds	Mètres	TSV	TSM	TU
ILE D'AIX								
1824	4,5 mois	Echelle	Hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	X		X		
1973 - 1974	11 mois	Marégraphe flotteur	Marégrammes - Hauteur en continu		X			X
2011	5 mois	Marégraphe numérique	Hauteurs toutes les 10 minutes		X			X
FORT ENET								
1859 - mai 1860	14 ans	Marégraphe Chazallon	Hauteurs tous les ¼ d'heure + Pression atm.		X		X	
juin 1860 - 1873					X	X		
FORT BOYARD								
1873 - 1893	32 ans	Marégraphe Chazallon	Hauteurs tous les ¼ d'heure + Pression atm.		X	X		
1894 - 1909					X		X	

Tableau V-18 : Description des lots de mesures utilisés pour la construction de la série composite Aix-Enet-Boyard.

V.4.2.4. Phare de Cordouan

La dernière des trois zones d'études est le phare de Cordouan. Ici, pas de différents sites, toutes les mesures ayant été réalisées au même endroit. La seule difficulté est d'assembler des lots de mesures n'ayant pas les mêmes systèmes de référence, afin de construire une série temporelle, de 1812 à 1994. L'ensemble des mesures du niveau de la mer réalisées au phare de Cordouan est présenté au chapitre précédent (cf. IV.3.5. *Inventaire et description des mesures enregistrées*). Pour la construction de la série cohérente, nous utiliserons onze jeux de données couvrant une période totale de 183 ans, pour une durée effective d'enregistrement de 3,5 ans (figure V-30).

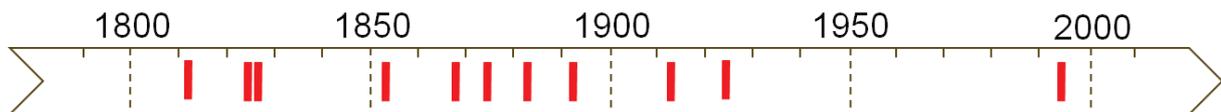


Figure V-30 : Représentation temporelle des lots de mesures du niveau de la mer utilisés pour la construction de la série composite du phare de Cordouan.

De même que pour les deux zones d'études précédentes, le tableau V-19 présente les différents systèmes de référence utilisés pour chaque jeu de données.

Période	Durée effective	Mesures		Système de hauteur		Système de temps		
		Appareil	Description	Pieds	Mètres	TSV	TSM	TU
1812	3 mois	Echelle	Hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	X		X		
1825	4 mois	Echelle	Hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	X		X		
1826	4 mois	Echelle	PM et BM diurnes		X	X		
1853	2 mois	Echelle	Hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure		X	X		
1868	4,5 mois	Echelle	Hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure		X	X		
1874	5 mois	Echelle	Hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure		X	X		
1882	2 mois	Echelle	Hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure		X		X	
1892	5,5 mois	Echelle	Hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure		X		X	
1912	5 mois	Echelle	Hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure		X	X		
1924	5 mois	Echelle	Hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure		X			X
1994	3 mois	Marégraphe	Hauteurs toutes les 10 minutes		X			X

Tableau V-19 : Description des lots de mesures utilisés pour la construction de la série composite de Cordouan.

V.4.2.5. « *Instructions pour les observateurs des Marégraphes* »

La part la plus importante des données utilisées dans le cadre de ces travaux de recherche est issue d'observations marégraphiques : La Rochelle Vieux port (12 ans), fort Enet (14 ans) et fort Boyard (32 ans). Ces observations ont été réalisées dans un cadre bien précis et ces observatoires faisaient partie du premier réseau français d'observations du niveau marin mis en place par Chazallon. Dans ce contexte, les mesures ont été enregistrées selon un protocole commun et détaillé, avec le même type d'appareils de mesures et les mêmes instructions [Chazallon, 1860] :

INSTRUCTIONS

POUR LES OBSERVATEURS DES MAREGRAPHES

1° *Chaque observateur des marées doit avoir à sa disposition, dans le bureau du marégraphe :*

Un registre, dit Journal des Marées, pouvant comprendre deux années d'observations ;

Un journal bi-mensuel sur lequel doivent être reportées la plupart des observations consignées dans le Journal des Marées ;

Un tableau sur lequel on porte les hauteurs de la mer à chaque quart d'heure d'après les courbes fournies par les marégraphes ;

Des feuilles quadrillées servant à l'observateur pour tracer en courbes la pression barométrique transformée en pression équivalente d'eau de mer ;

Enfin un tableau contenant deux tables destinées à corriger de la variation de pression barométrique les hauteurs de la pleine mer et de la basse mer.

2° *Le journal bi-annuel des marées est envoyé au bout de deux ans au dépôt de la marine.*

3° *Le journal bi-mensuel, le tableau des hauteurs de la mer à chaque quart d'heure, les courbes fournies par les marégraphes, celles qui donnent la pression barométrique, sont adressés tous les deux mois, par la voie hiérarchique, à l'ingénieur chargé du service des marées, et revêtus de la signature du Directeur de l'Observatoire du marégraphe. Les courbes doivent être roulées et non pliées.*

4° *L'observateur des marées veille à ce que le marégraphe fonctionne convenablement et soit toujours réglé en temps vrai, à trente ou trente-cinq seconde près.*

Une montre à secondes indépendantes lui sert pour cet objet. Il la porte, chaque deux jours, chez le Directeur de l'Observatoire ou chez le professeur d'Hydrographie ; celui-ci la règle matériellement en temps vrai et inscrit dans le Journal des Marées, sur la page Remarques diverses, de combien elle avançait ou retardait sur ce temps.

5° Dès que la montre a été réglée, l'observateur compare ses indications à celles de la pendule du marégraphe ; si la différence n'excède pas vingt-cinq secondes, il laisse les choses en cet état ; s'il y a excès, il règle le marégraphe et consigne le fait aux pages Remarques diverses de son journal et du cahier bi-mensuel.

6° Pour régler le marégraphe, l'observateur ne touche jamais au balancier qui bat la seconde ; il se contente de dégager la fourchette. Si le marégraphe avançait de trente quatre secondes, par exemple, il dégagerait la fourchette et la maintiendrait immobile jusqu'à ce que le balancier eût exécuté trente-quatre oscillations, et au même instant il restituerait à ces deux organes leur solidarité.

Pour la facilité du réglage il vaut mieux que le marégraphe ait une légère tendance à l'avance ; il suffit pour cela de toucher à la vis de rappel qui surmonte le balancier.

Si l'observateur remarque que sa montre, réglée par le Directeur de l'Observatoire, fait éprouver un saut brusque (deux ou trois minutes) à l'heure du marégraphe, dont la marche est habituellement régulière, il s'abstiendra de faire la correction avant d'avoir prévenu de ce fait M. le Directeur, qui a pu se tromper de signe en appliquant l'équation du temps.

7° L'observateur s'assure chaque jour de l'exacte concordance des heures indiquées simultanément par la pendule du marégraphe et par le tambour sur lequel est enroulé le papier où se tracent les courbes. A cet effet, à une certaine heure précise, quart ou demie, il presse le traçoir ou le crayon, de manière à former sur le papier un petit point bien visible qu'il marque ensuite à l'encre. S'il s'aperçoit d'un dérangement dans la concordance des heures, il en recherche la cause et consigne le fait sur son journal à l'article Remarques diverses.

8° La feuille des courbes reste en place pendant un mois (à moins d'instructions contraires) ; elle est changée le premier jour du mois.

Sur trois ou quatre points de ses extrémités, elle doit être collée sur le drap du tambour, afin qu'elle ne puisse glisser.

9° Dès que cette opération est terminée, l'on abat une des roulettes extrêmes seulement, afin que la pointe du crayon ne puisse s'engager dans les petits trous qu'elle forme sur le papier. On n'abat tout le système des roulettes qu'au moment de l'enlèvement de la feuille. Lorsque la nouvelle feuille est placée, on embraye le tambour et l'on place le crayon noir.

10° Pendant les premiers jours du mois et sans interrompre le jeu de la machine, l'agent trace avec une équerre ad hoc les amorces des heures et des demi-heures. Il pointille sur plusieurs endroits commodes les courbes des trois premiers jours du mois, afin de pouvoir aisément les reconnaître plus tard sans courir le risque de les confondre avec les courbes du 15, du 16 ou du 17 ; il est bien entendu que ces opérations doivent être faites avec précaution et sans appuyer le bras trop fortement sur le tambour.

11° Le 18 de chaque mois, à midi précis, le crayon noir sera remplacé par un crayon rouge, à moins d'instructions contraires.

12° Lorsque la feuille des courbes a été détachée du tambour, on inscrit à l'encre, sur plusieurs points du parcours de chaque courbe, le jour du mois auquel elle appartient ; on trace en noir les lignes qui indiquent les heures et les demi-heures ; on trace en rouge celles qui indiquent les quarts et les trois quarts.

13° Les courbes tracées au crayon sur les feuilles doivent être religieusement respectées lorsqu'il est nécessaire de les renforcer à l'encre (noire, rouge, verte) ; on doit avoir grand soin d'en suivre les diverses sinuosités, à l'exception toutefois des très-petites ondes formant des dents de scie : dans ce cas, on fait passer la courbe colorée par le milieu. On laisse subsister les traces du crayon, qui ne doivent jamais être effacées avec de la gomme. Les courbes des trois premiers jours du mois sont tracées en couleur verte.

14° Pour déterminer l'heure et la hauteur des pleines mers et des basses mers, on cherche le point maximum et le point minimum de chaque courbe au moyen d'une petite équerre qui sert à trouver la tangente au sommet de la courbe. Lorsque les sommets sont très-aplatis, on trace une petite corde horizontale, c'est-à-dire parallèle à la trace des roulettes, à un ou deux millimètres du sommet, et l'on prend le milieu de cette corde pour point de tangence au sommet et par conséquent pour l'heure de la pleine mer ou celle de la basse mer. Le point, ainsi déterminé sur la courbe, est indiqué par un petit trait vertical qui la coupe, ainsi qu'on le voit ci-après.

15° Les heures et les hauteurs qui leur correspondent sont inscrites dans la colonne du Journal des Marées, intitulée heure et hauteur de la pleine mer ou de la basse mer. La hauteur est exprimée en centimètres.

16° L'agent du marégraphe, au moyen du mètre ou du double décimètre mis à sa disposition, extrait des courbes les hauteurs relatives à chaque quart d'heure en partant de minuit et les inscrit sur le tableau intitulé : Hauteur de la mer à chaque quart d'heure.

17° Lorsque la mer est belle, l'observateur observe à l'échelle des marées, placée près du marégraphe, l'heure et la hauteur de la mer vers le moment du plein et du bas de l'eau. Il consigne ces observations sur son journal dans les colonnes intitulées : heure, hauteur à l'échelle, et il inscrit au-dessous la hauteur donnée à la même heure par le marégraphe. Il indique aussi, dans la colonne agitation, l'état de la mer, en exprimant en centimètres l'amplitude de ses vagues, amplitude qu'il apprécie au moyen de l'échelle placée extérieurement près du puits de marée.

18° Deux fois par mois, vers l'époque des syzygies (le lendemain ou le surlendemain de la nouvelle ou pleine lune, ou un peu plus tard si la mer était trop agitée), l'agent observe, de quart d'heure en quart d'heure, à la même échelle, la hauteur de la mer pendant sept heures consécutives. Ces observations sont inscrites dans les colonnes qui leur sont destinées à la page intitulée : Remarques diverses. La montre dont on se sert pour ces observations doit être en concordances parfaite avec la pendule du marégraphe.

19° L'observateur des marées consigne en outre sur son journal les observations météorologiques indiquées par l'entête des colonnes.

Il note la force et la direction du vent. Il observe, autant que cela lui est possible, la hauteur du baromètre de 3 heures en 3 heures (de 6 heures du matin à 9 heures du soir). Pour rendre, en hiver surtout, les observations de 6 heures du matin et celles de 6 heures et 9 heures du soir plus faciles, l'observateur pourra les faire chez lui au moyen d'un anéroïde mis à sa disposition. Ce dernier instrument étant sujet à des altérations, on compare assez

souvent sa marche à celle du baromètre Fortin, en faisant des observations simultanées sur chaque instrument. On n'en fera usage qu'à défaut d'observations faites avec le baromètre à mercure. (L'observateur pourra être dispensé de faire les observations météorologiques lorsqu'elles sont déjà faites à l'Observatoire du port. Dans ce cas il se borne à en faire la transcription sur son journal et sur le cahier bi-mensuel.)

20° Les observations barométriques doivent être réduites à la température zéro, au moyen de la table 1. Elles sont en outre transformées en pression équivalente d'eau de mer au moyen d'une petite table (n°2) de correspondance et dans l'hypothèse que 3 millimètres de mercure équivalent à 40 millimètres d'eau de mer.

Dans la table de correspondance n°2, la pression 760 millimètres de mercure est désignée par 1,000 millimètres d'eau de mer. Ce dernier nombre a été choisi pour la facilité des calculs.

21° Au moyen des feuilles quadrillées dont il a été fait mention à l'article 4, l'observateur des marées trace en courbes la pression barométrique transformée en pression équivalente d'eau de mer. Sur ces feuilles l'intervalle des lignes représente 2 heures et le jour se trouve ainsi représenté par douze intervalles consécutifs. Pour les hauteurs, chaque intervalle représente 10 millimètres. Les observations faites pendant le jour servent à tracer à vue d'œil celles de la nuit ; cette interpolation graphique permet d'obtenir à peu près la pression pour l'instant de la pleine mer et de la basse mer.

Cette pression, ainsi conclue, est inscrite en centimètres dans la colonne du journal intitulée : correction de la pression barométrique ; elle s'ajoute à la hauteur de la pleine mer et de la basse mer placée à côté et le résultat de l'addition s'inscrit dans la colonne intitulée : hauteur corrigée.

L'ingénieur hydrographe de 1^{re} classe, chargé du service des marées,

R. CHAZALLON.

Pour plus de précisions sur chacun des lots de mesures, se reporter au chapitre IV. Quant aux observateurs, voici la liste de ceux qui ont travaillé aux forts Enet et Boyard :

- C. Rivet : juillet 1859 - octobre 1862 (fort Enet)
- N. Rivet : novembre 1862 - décembre 1875 (forts Enet et Boyard)
- E. Pillet : septembre 1876 - août 1881 (fort Boyard)
- J. Petillon : mai 1882 - juin 1889 (fort Boyard)
- Massé : juillet - décembre 1889 (fort Boyard)
- Drouillard : novembre 1890 - décembre 1897 (fort Boyard)
- Fage : janvier 1898 - mars 1903 (fort Boyard)
- Guiberteau : mai 1903 - juin 1905 (fort Boyard)
- Monneraud : juillet 1905 - septembre 1907 (fort Boyard)
- Bourdin : décembre 1907 - mai 1909 (fort Boyard)

V.4.3. Méthodes

V.4.3.1. Détection d'erreurs et de sauts

Lorsque la procédure de sauvegarde et de numérisation des données est réalisée, une deuxième procédure est appliquée, visant à détecter et corriger, d'abord les erreurs de retranscription des mesures, puis les sauts accidentels (et/ou non répertoriés) dans la série.

1. Détection des erreurs de retranscription

Les erreurs de retranscription peuvent avoir deux origines différentes : une erreur de l'observateur ou une erreur de l'opérateur en charge de la numérisation.

- *Erreur de l'observateur* : Les mesures anciennes utilisées étaient principalement enregistrées à l'aide d'un marégraphe, sur un rouleau de papier, appelé marégramme. Tous les quinze jours ou tous les mois, l'observateur changeait le marégramme et reportait les hauteurs de la mer sur un registre de marée, quart d'heure par quart d'heure (figure V-31). Cette opération, longue et minutieuse, était réalisée entièrement à la main et des erreurs de retranscription de la part de l'observateur ont été détectées dans les données utilisées (en moyenne, une dizaine d'erreurs de ce type par année).

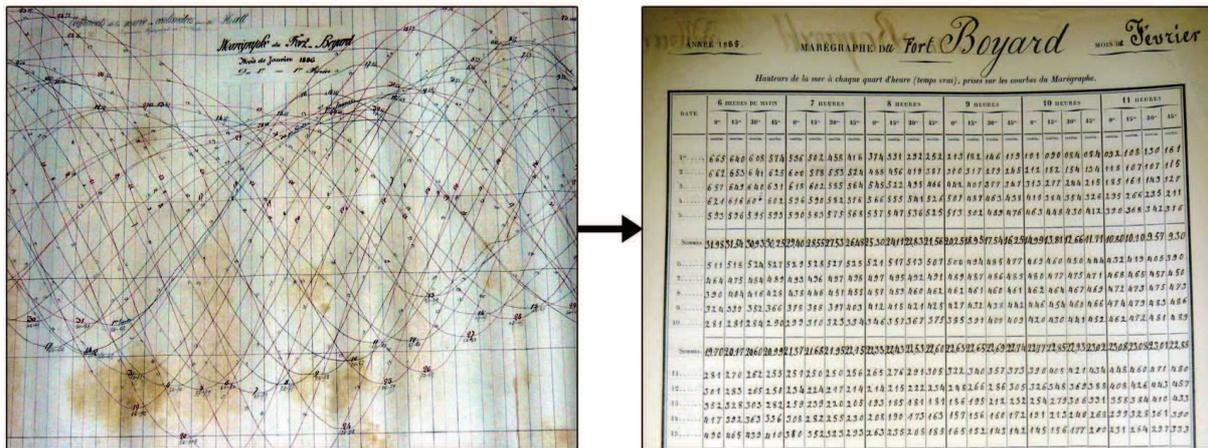


Figure V-31 : A gauche : marégramme représentant les variations de la hauteur d'eau, enregistrement brut du niveau marin. A droite : l'observateur reporte les mesures, de quart d'heure en quart d'heure, dans un registre de marée. Documents provenant de l'observatoire du fort Boyard (archives du SHOM).

- *Erreur de l'opérateur en charge de la numérisation* : Lors de l'étape de la numérisation des données, décrite précédemment (cf. V.4.2.1. Sauvegarde et numérisation des données historiques), il est également courant de réaliser des erreurs de retranscription, ce type de travail étant très long et demandant beaucoup de concentration (en moyenne, une vingtaine d'erreurs de ce type par année numérisée).

Dans les deux cas de figure, la méthode utilisée pour détecter et corriger ces erreurs de retranscription est une méthode de vérification visuelle systématique. Elle permet à la fois de repérer les erreurs ponctuelles, mais également une partie des sauts, comme nous le verrons ci-dessous. La méthode consiste à contrôler, jour après jour, les résidus (pour rappel, résidus = observations – prédictions de la marée) d’une série de données (*figure V-32*). La présence d’un pic dans les résidus traduit une différence entre la valeur observée et la valeur prédite, plus ou moins grande selon la taille du pic. Il est donc fort probable que cela corresponde à une erreur de retranscription de la valeur observée. L’amplitude des résidus étant généralement comprise entre - 20 et + 20 cm, cette méthode permet donc de détecter toutes les erreurs de retranscription supérieures à 20 cm. Attention cependant, la présence d’un pic ou de valeurs « anormales » dans les résidus n’est pas systématiquement synonyme d’une erreur de retranscription. C’est pourquoi cette méthode implique de vérifier si le pic détecté correspond bien à une erreur ou alors à un évènement réellement enregistré par le marégraphe (*e.g.* tempête, raz de marée, seiche, etc.). Pour cela, une seule façon de procéder, il faut de nouveau consulter la copie numérique du registre de marée. Si les valeurs « anormales » détectées sont bel et bien inscrites dans le registre, sans erreur, il convient alors de ne surtout pas les supprimer. Elles font en effet partie du signal enregistré par le marégraphe et il conviendra par la suite de trouver une explication à cette anomalie. Malgré tout le soin et l’attention portée à cette étape de la procédure, il est possible que quelques erreurs de retranscription aient pu subsister.

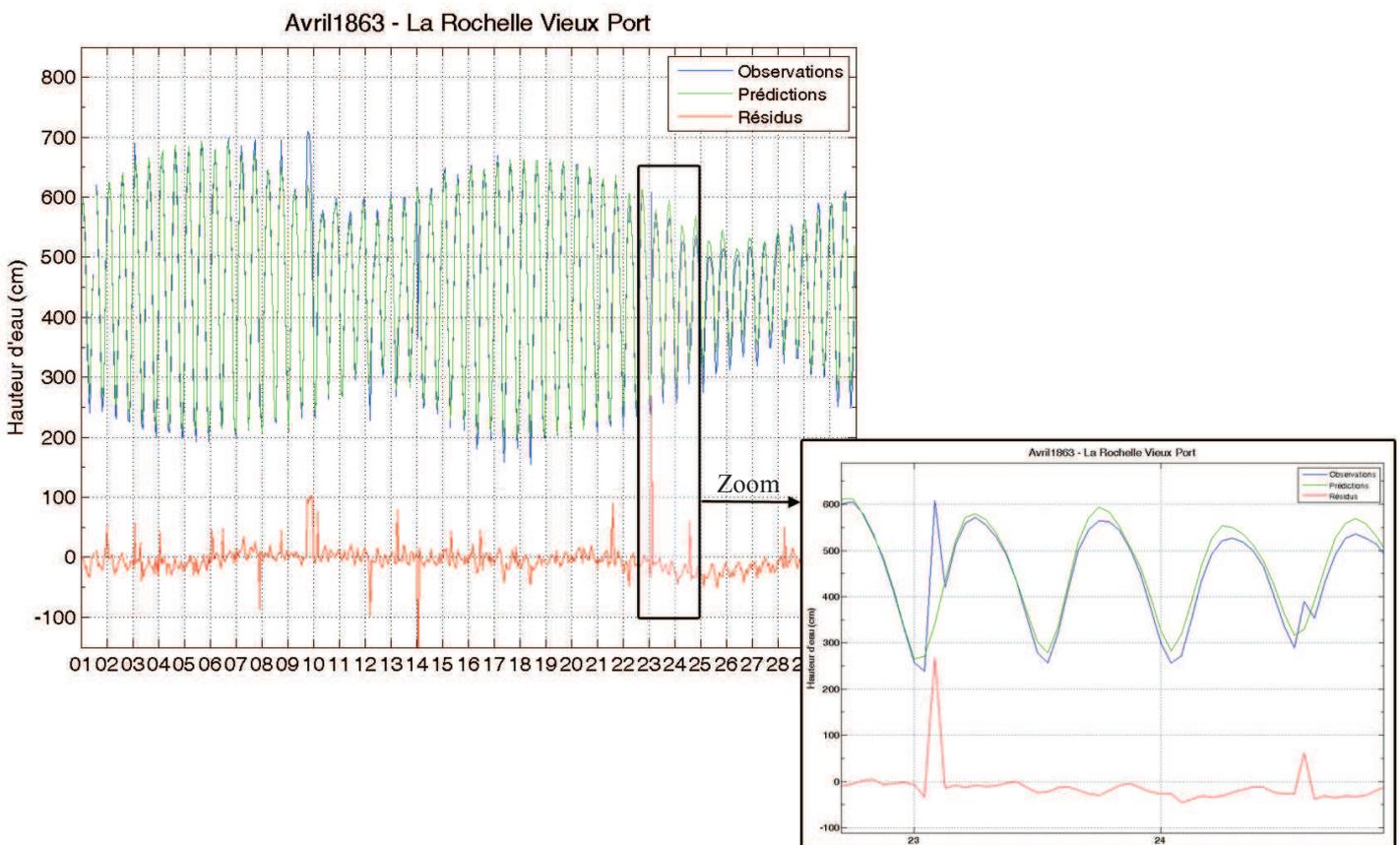


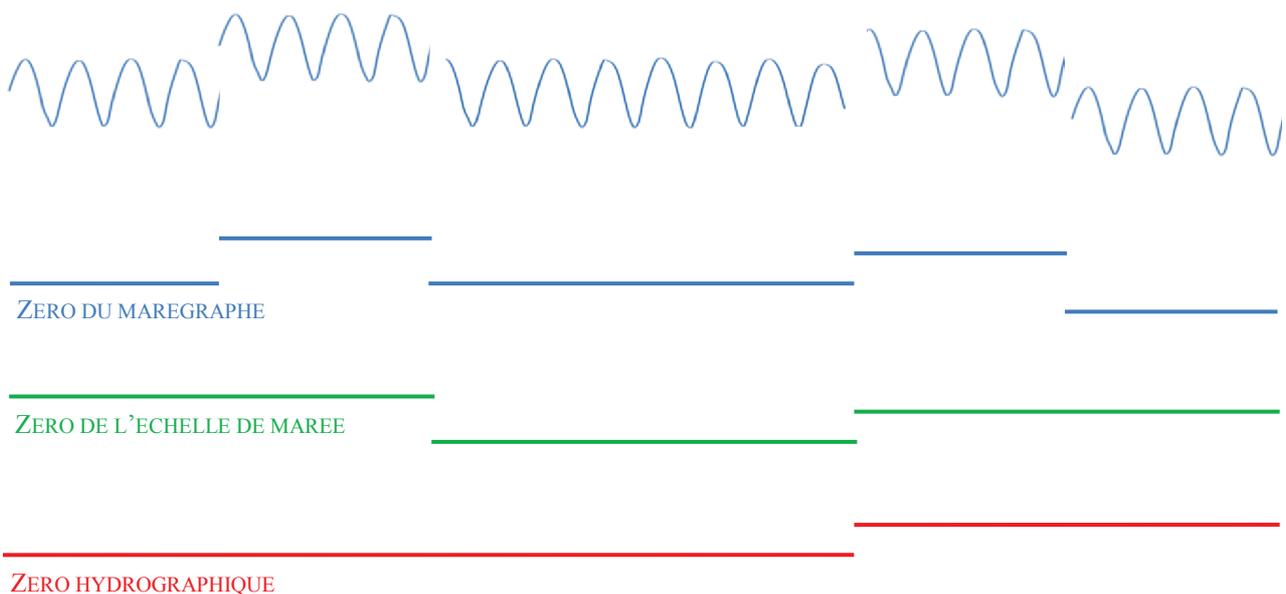
Figure V-32 : Méthode de détection des erreurs de retranscription des données. Les pics supérieurs à $|20|$ cm détectés dans la courbe des résidus (courbe rouge) correspondent quasi-systématiquement à ce type d’erreurs.

2. Détection des sauts

La détection et la correction des sauts est une étape très importante dans la construction d'une série temporelle du niveau marin [e.g. Wöppelmann *et al.*, 2008]. Elle vise à mettre toutes les données de la série sur une seule et même référence de hauteur : ici le zéro hydrographique. Or, plus la série est longue et plus les références sont susceptibles d'avoir été modifiées. D'autant qu'il n'est pas question que d'une seule référence, mais de trois : le zéro hydrographique, le zéro de l'échelle de marée et le zéro du marégraphe. Idéalement, ces trois zéros devraient être à la même hauteur si tous les calages sont effectués correctement. Si cela n'est pas le cas, la relation les reliant doit être connue avec précision et si possible stable. Malheureusement, il arrive parfois qu'aucune de ces conditions ne soit respectée. C'est, par exemple, le cas aux forts Enet et Boyard. Malgré des instructions extrêmement précises (cf. V.4.2.5. « *Instructions pour les observateurs des Marégraphes* »), toutes les opérations de contrôle permettant de connaître la relation entre ces différents zéros n'étaient pas toujours effectuées par les observateurs, laissant apparaître des sauts non expliqués. Cependant, parfois, un saut était justifié par l'observateur, comme ce fut le cas en août 1864, au fort Enet : « *le 17 août, j'ai raccourci les fils du chariot et du flotteur afin de mettre le marégraphe en parfaite concordance avec l'échelle de marée, les fils furent raccourci de 0,30m.* ».

En résumé, un saut traduit un changement de référence, qui peut être de deux sortes (définition ou réalisation) et de trois origines différentes : le zéro hydrographique, le zéro de l'échelle de marée ou le zéro du marégraphe. Les informations sur le changement de référence n'étant pas toujours disponibles, il est parfois difficile de déterminer avec précision le début et la fin du saut. Dès lors, plusieurs changements de zéro peuvent se superposer et le saut détecté à l'écran est alors la somme de ces changements (*figure V-33*).

REPÈRE DE MAREE



ZERO HYDROGRAPHIQUE

Figure V-33 : Représentation graphique des différents changements de référence de hauteur pour une série du niveau de la mer, par rapport à un repère de marée.

La première méthode utilisée pour détecter ces sauts est la même que celle utilisée pour détecter des erreurs de retranscription : le contrôle des résidus, jour après jour, d'une série de données (*figure V-34*). Cette méthode est très efficace pour détecter tous les sauts importants, supérieurs à 20 cm. Pour les sauts plus petits, nous verrons qu'il existe une autre méthode (« *Buddy checking* ») [Woodworth, 2003].

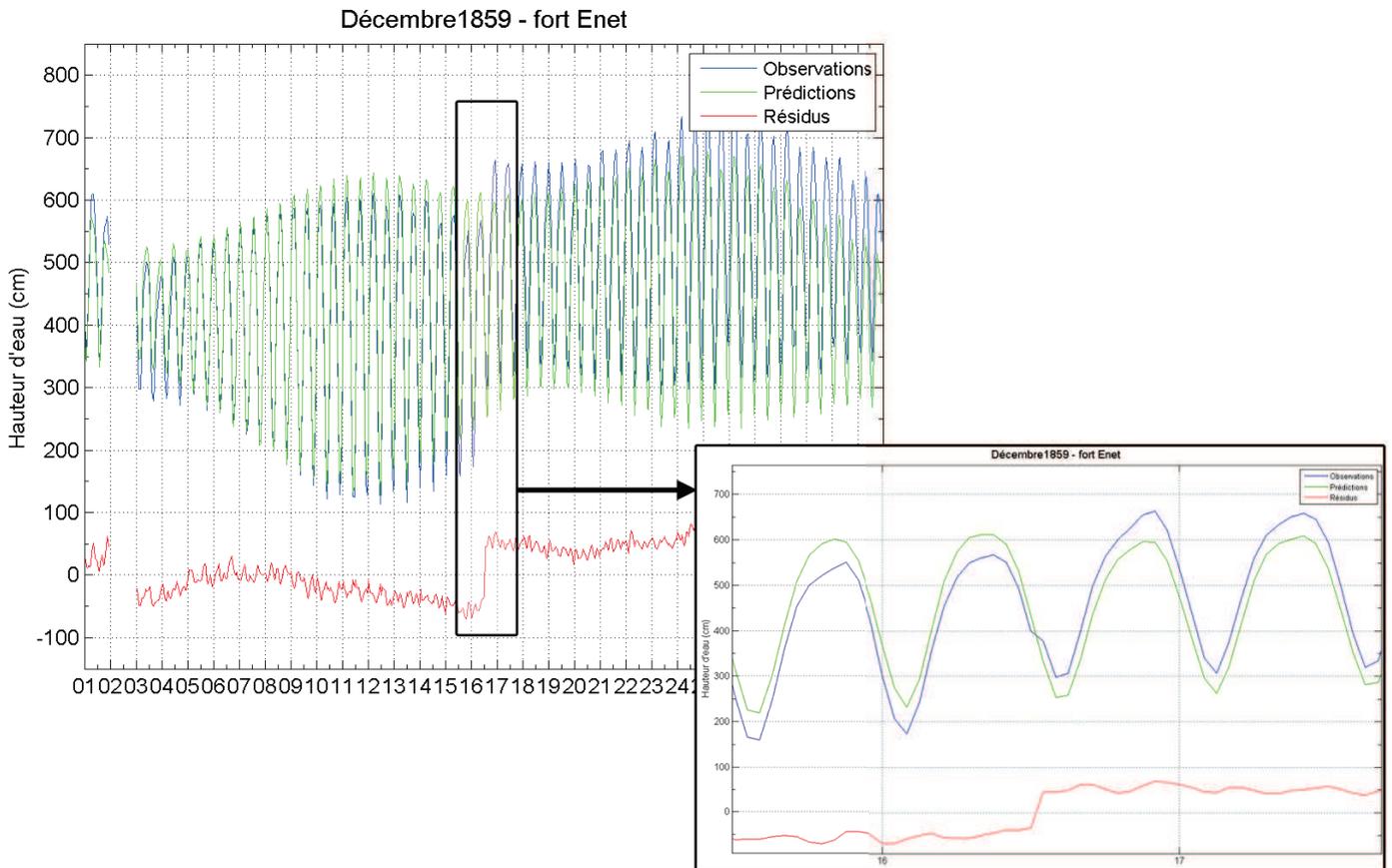


Figure V-34 : Méthode de détection des sauts supérieurs à 20 cm : contrôle de la courbe des résidus (rouge).

Lorsqu'un saut a été détecté, il reste à en déterminer sa cause et surtout s'il faut le corriger. Comme indiqué précédemment, la raison du saut peut être écrite dans les registres de marée, à la rubrique « *Remarques diverses* ». Si tel n'est pas le cas, il reste encore des possibilités d'expliquer ce saut, par exemple en étudiant les mesures réalisées simultanément à l'échelle de marée et au marégraphe. Théoriquement, d'après les instructions laissées aux observateurs par Chazallon, ces mesures de contrôle à l'échelle de marée étaient obligatoires et devaient être réalisées quotidiennement. Dans les faits, nous avons constaté qu'elles étaient rarement effectuées aux forts Enet et Boyard, contrairement au Vieux port de La Rochelle. Ce qui nécessite d'utiliser une autre technique pour confirmer la présence d'un saut à corriger : la méthode du « *Buddy checking* », ou la comparaison à une station proche.

Prenons un exemple simple. La *figure V-35* présente les moyennes journalières du niveau de la mer au fort Boyard, entre 1873 et 1876 (graphique du haut). Les lots sont de différentes couleurs, et chaque changement de couleur indique que le marégraphe a été arrêté à la suite d'un problème matériel,

susceptible d'avoir engendré un saut dans la série. A la vue de ce graphique, on peut déjà se faire une première idée des sauts existants dans cette série. Or, le graphique du bas montre que les sauts devinés à l'œil ne sont pas forcément les sauts réels. En effet, en comparant les moyennes journalières du niveau marin au fort Boyard (courbe rouge) et à Brest (courbe grise), on peut se faire une idée plus précise des lots de mesures qui ont effectivement subi un saut.

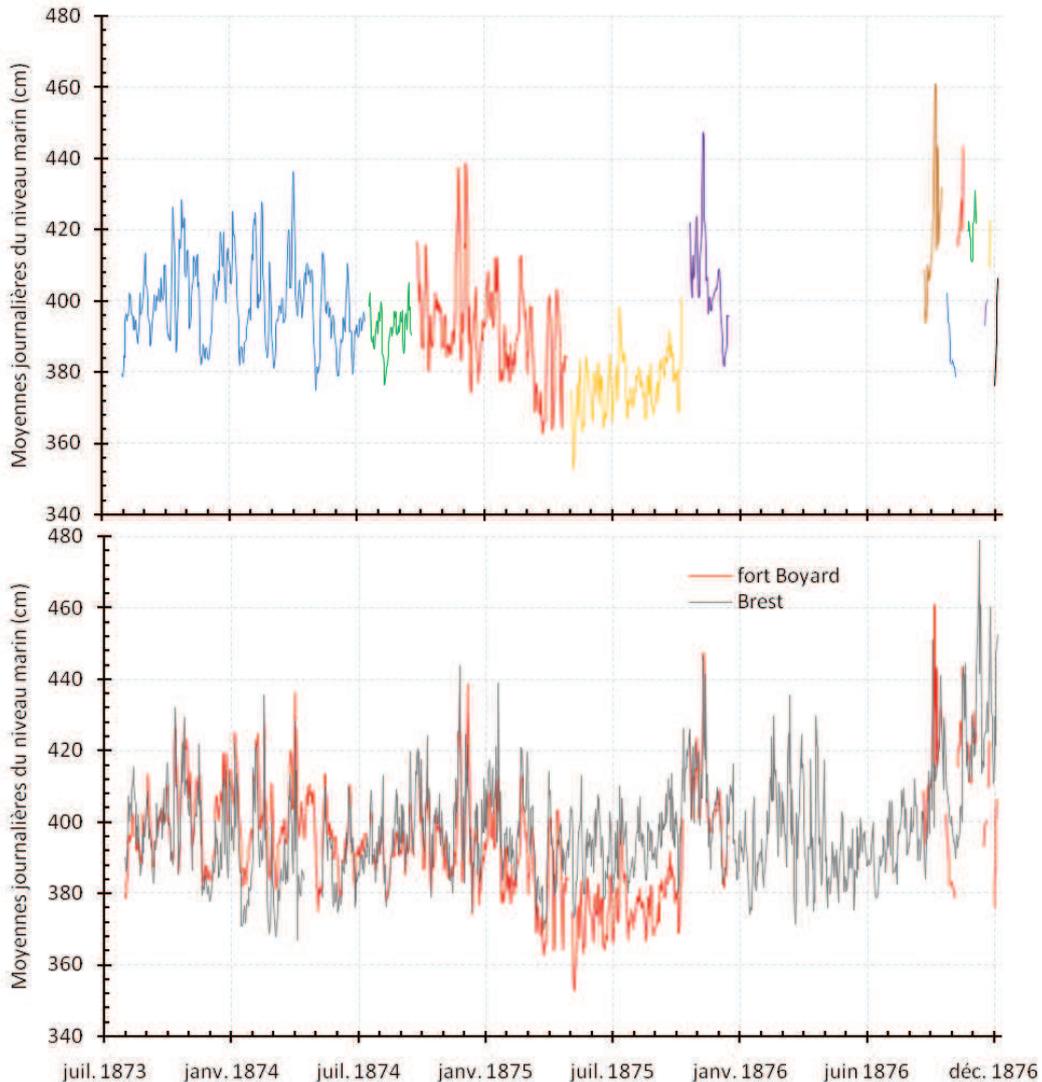


Figure V-35 : En haut : Moyennes journalières du niveau de la mer au fort Boyard, entre 1873 et 1876. Le changement de couleur indique que le marégraphe a été arrêté à la suite d'un problème matériel, susceptible d'avoir engendré un saut dans la série. En bas : En rouge, courbe identique au graphique du haut. En gris : moyennes journalières du niveau marin à Brest sur la même période. On constate que les sauts devinés à la vue du graphique du haut ne sont pas forcément les sauts réels constatés en étudiant le graphique du bas.

C'est le principe du « *Buddy checking* », en prenant l'hypothèse que les variations journalières, et à fortiori les variations mensuelles, du niveau marin évoluent de la même façon sur les deux sites. Ce qui se justifie, d'une part car ces variations sont principalement influencées par le forçage de la pression atmosphérique, et d'autre part car les champs de pression sont suffisamment grands pour considérer que la pression journalière (et à fortiori mensuelle) est la même à Brest que dans le pertuis d'Antioche.

En pratique, nous avons mis au point des programmes sous MATLAB permettant d'automatiser la comparaison graphique entre la série de Brest et les séries du littoral charentais. La *figure V-36* présente un cas où aucun saut n'est détecté dans les moyennes journalières de fort Boyard (1874). Le coefficient de corrélation entre les deux séries atteint alors 0.91, ce qui est un très bon résultat, et les résidus (différence entre Brest et fort Boyard) sont centrés sur - 8.7 cm, ce qui correspond à la différence entre les deux zéros des séries.

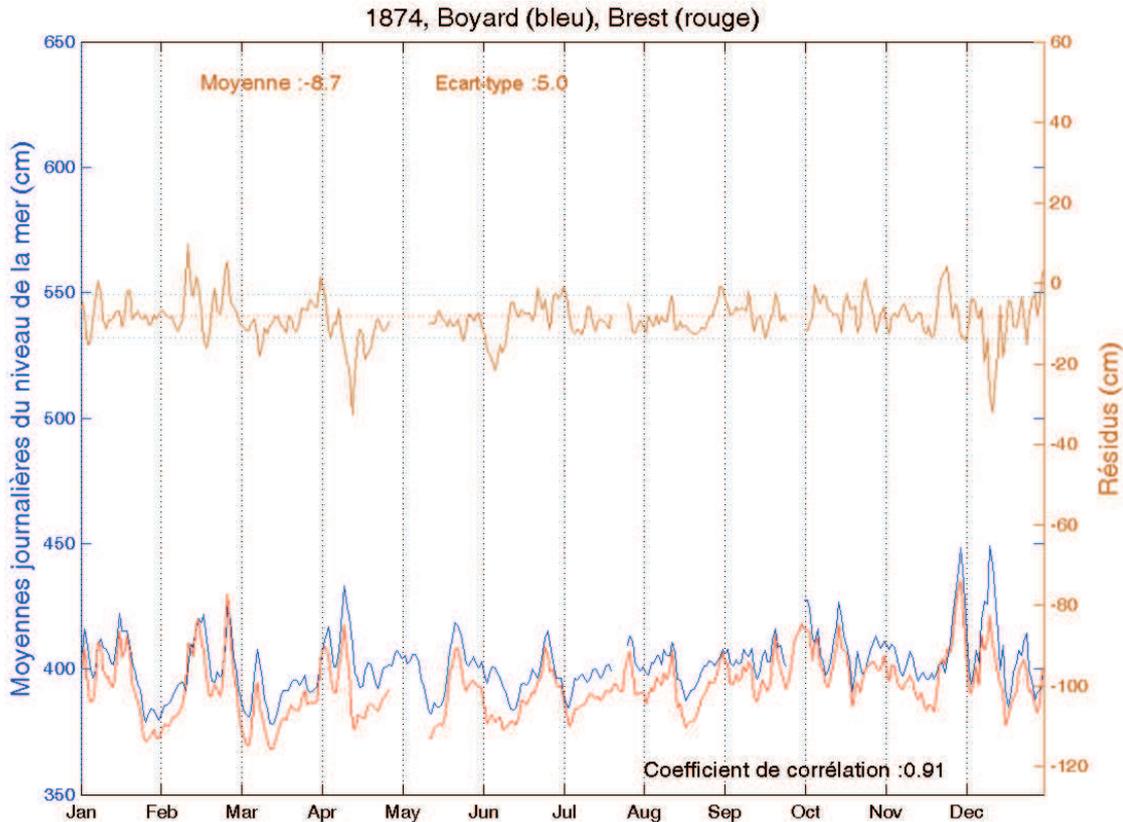


Figure V-36 : Moyennes journalières du niveau marin au fort Boyard (courbe bleue) et à Brest (courbe rouge). La courbe orange correspond à la différence Brest-Boyard et est centrée sur - 8 cm si aucun saut n'est présent.

La détection de sauts par cette méthode est plus fine : on peut en effet détecter des sauts supérieurs à 5 cm. Cependant, la variabilité journalière du niveau marin, principalement due aux variations de pression atmosphérique, ne permet pas, sur la *figure V-36*, d'être certain de la présence d'un saut compris entre 5 et 10 cm. C'est pourquoi nous avons également réalisé un « *Buddy checking* » avec des moyennes hebdomadaires du niveau marin, calculées à partir des moyennes journalières. Mais plutôt que de n'avoir qu'une seule valeur par semaine, nous avons réalisé une moyenne mobile : une moyenne hebdomadaire tous les jours, en se décalant d'un jour à chaque fois. La *figure V-37* présente ce type de comparaison où l'on détecte bien la présence de sauts.

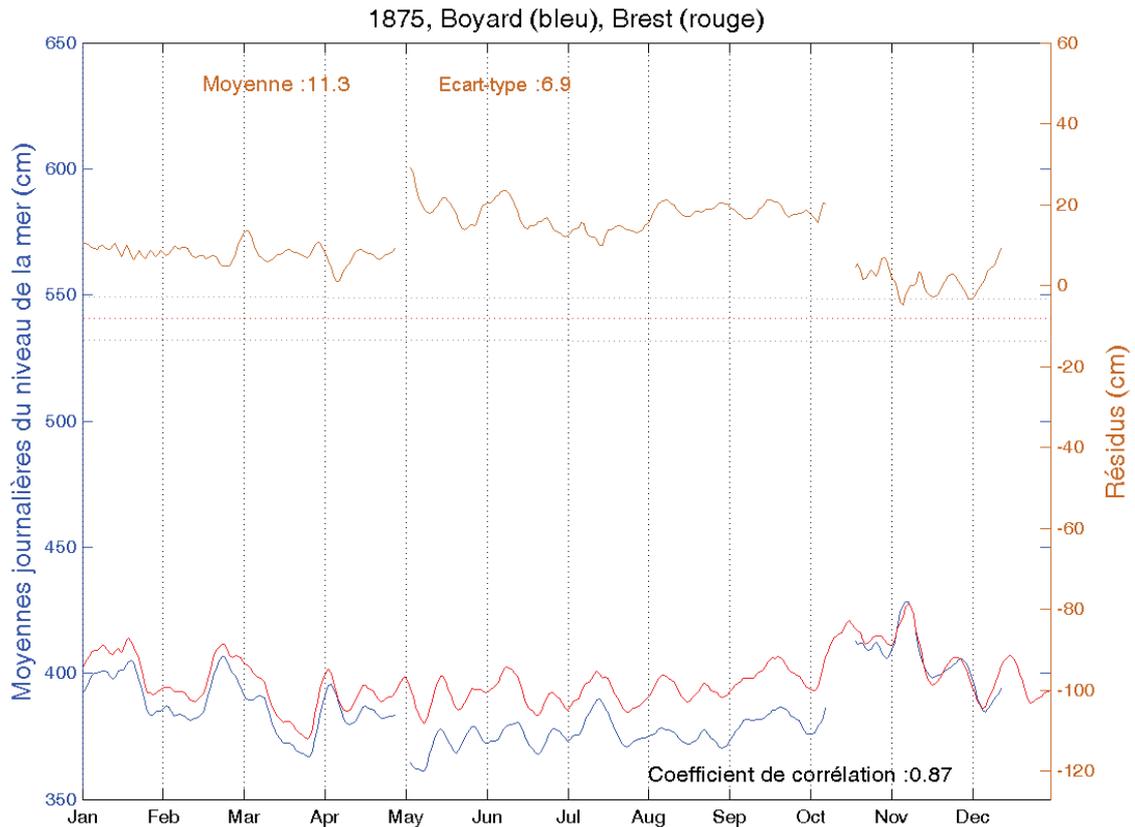


Figure V-37 : Moyennes mobiles hebdomadaires, avec un décalage d'un jour, du niveau marin au fort Boyard (courbe bleue) et à Brest (courbe rouge). La courbe orange correspond à la différence Brest-Boyard et est centrée sur - 8 cm si aucun saut n'est présent.

Lors de l'analyse des sauts détectés, nous effectuons également une analyse systématique du couplage pression atmosphérique / niveau marin. D'après la relation du baromètre inverse, si les jeux de données sont de qualité, alors les variations du niveau marin suivent l'inverse des variations de la pression atmosphérique. Nous avons démontré que les jeux de données de pression atmosphérique construits sont de très bonne qualité (cf. V.3. *Séries de pression atmosphérique*). Ainsi, en traçant les graphiques de l'effet du baromètre inverse pour nos sites d'études, nous pouvons vérifier la qualité de nos données du niveau de la mer mais également confirmer la présence d'un saut dans les données. En effet, en l'absence d'un saut, les deux courbes seront bien corrélées (*figure V-38*) et la présence d'un saut pourra être confirmée par une corrélation moindre.

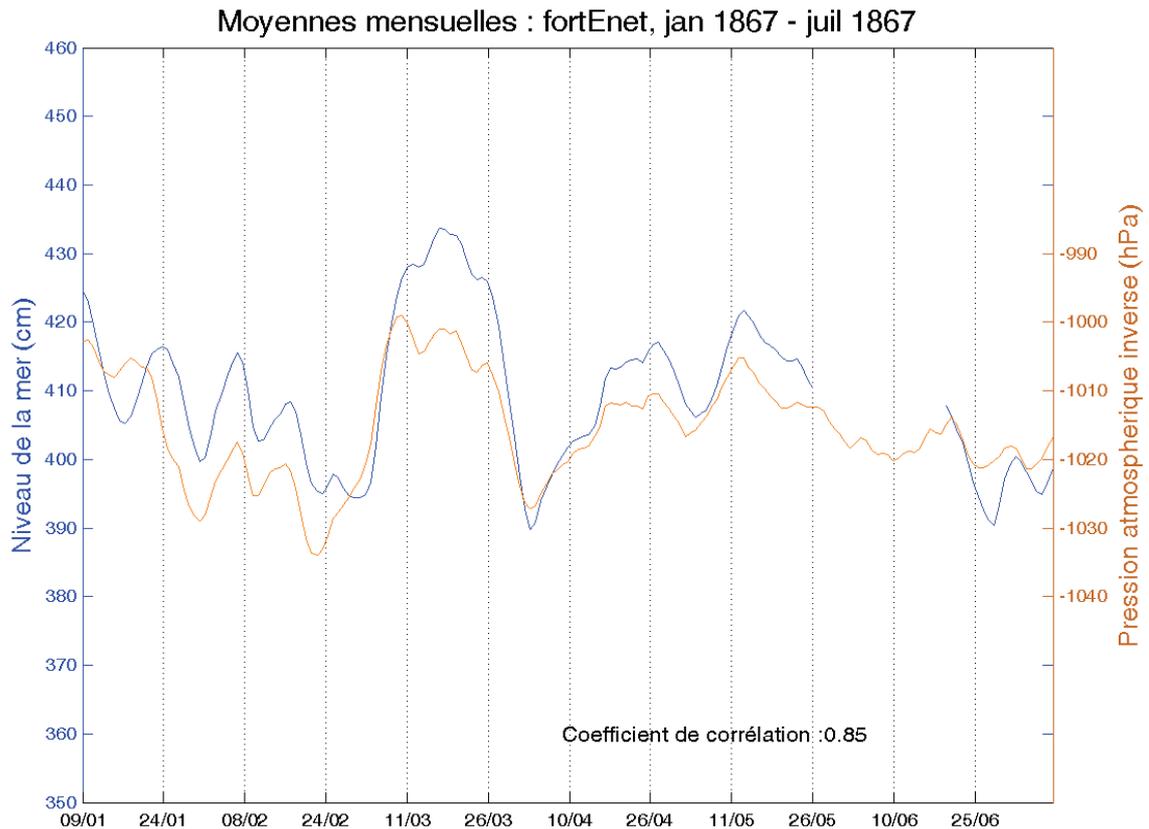


Figure V-38 : Graphique représentant la relation du baromètre inverse. Les courbes du niveau marin (bleue) et de pression atmosphérique inverse (orange) sont bien corrélées, démontrant l'absence de sauts.

Enfin, pour confirmer l'existence d'un saut ou en détecter de nouveaux, une dernière analyse, plus fine, a été appliquée : l'analyse de la concordance des hauteurs des pleines et basses mers entre les séries du littoral charentais et la série de Brest. Cette méthode est décrite dans l'ouvrage de Simon [2007a]. Le principe est de comparer les hauteurs des pleines et basses mers de deux stations proches et de tracer une droite de régression linéaire. Si la valeur de l'ordonnée à l'origine change brusquement au cours du temps, c'est probablement la conséquence d'un saut. L'exemple suivant (*figure V-39*) démontre la présence d'un saut d'environ 72 cm (128,1 - 55,89) dans la série de fort Enet. Après vérifications, ce saut est confirmé par les données des registres de marée. Les mesures simultanées réalisées au marégraphe et à l'échelle de marée pour les mois d'octobre et novembre 1859 indiquent la présence d'un saut d'environ 75 cm débutant le 1^{er} novembre 1859, à 14h.

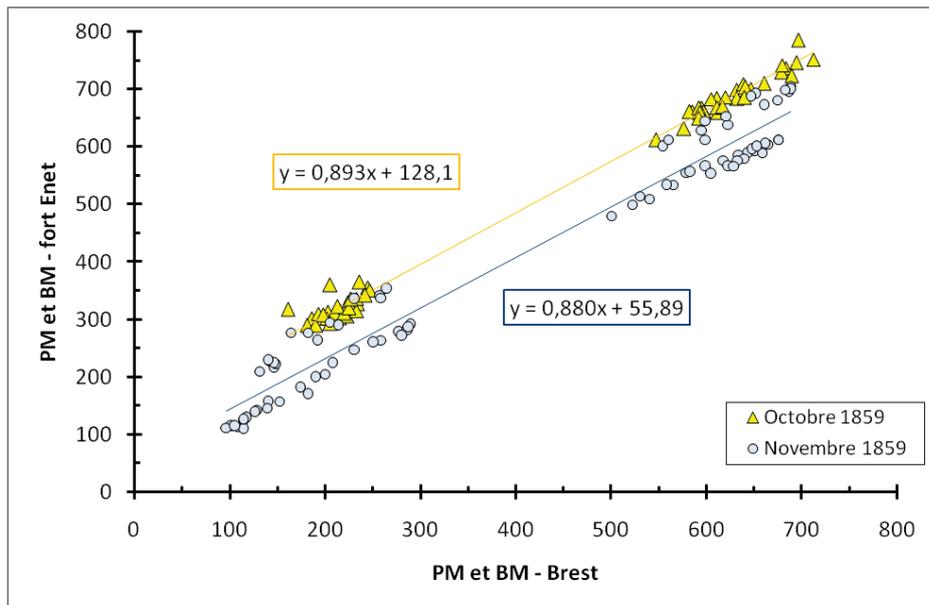


Figure V-39 : Concordance des pleines et basses mers entre Brest et fort Enet pour les mois d'octobre et novembre 1859. Méthode utilisée pour affiner la détection de sauts dans les séries du littoral charentais.

V.4.3.2. Interpolation de valeurs manquantes

Les séries historiques du niveau marin présentent souvent de très courtes lacunes dans les observations. Par exemple, tous les quinze jours (ou tous les mois), lorsque l'observateur change le marégramme, le niveau marin cesse d'être enregistré l'espace d'une ou deux heures, entraînant une ou deux lacunes consécutives dans la série. Or, ces lacunes sont problématiques, car comme nous l'avons vu au paragraphe 1.2.1.1. *Le niveau moyen journalier*, le calcul d'une moyenne journalière avec un filtre de Demerliac nécessite d'avoir 71 valeurs consécutives, sans lacunes, soit l'équivalent de trois jours pour une série de hauteurs horaires. Ce qui signifie qu'une seule hauteur horaire manquante dans un mois entraîne l'absence de trois moyennes journalières. Si cela se reproduit cinq fois dans le mois, alors cela entraîne l'absence de 15 moyennes journalières, rendant ainsi impossible le calcul d'une moyenne mensuelle, selon les règles de calcul établies par le PSMSL. Enfin, si ces problèmes surviennent sur deux mois différents dans une année, alors selon ces mêmes règles, c'est la moyenne annuelle que l'on ne peut calculer.

On le voit, de petites lacunes peuvent avoir de grandes conséquences et être très dommageables. C'est pourquoi il est courant d'interpoler les valeurs manquantes afin de combler les lacunes. La méthode d'interpolation que nous avons utilisée est la méthode d'interpolation par spline cubique décrite au paragraphe V.2.3. *Éléments de traitements statistiques pour le niveau de la mer*. Mais est-ce que les valeurs interpolées sont suffisamment précises pour remplacer les lacunes ? C'est ce que nous avons voulu tester. A partir d'une série de hauteurs horaires sans lacunes, nous avons progressivement retiré une valeur, puis deux consécutives, puis trois consécutives et effectué à chaque fois une interpolation par spline cubique des valeurs manquantes. Ces tests ont été réalisés aussi bien en période de morte-eau qu'en

période de vive-eau, en pleine mer, en basse mer, en période de flot et en période de jusant (fort Boyard, 1887). Les résultats sont présentés ci-dessous (*figure V-40*).

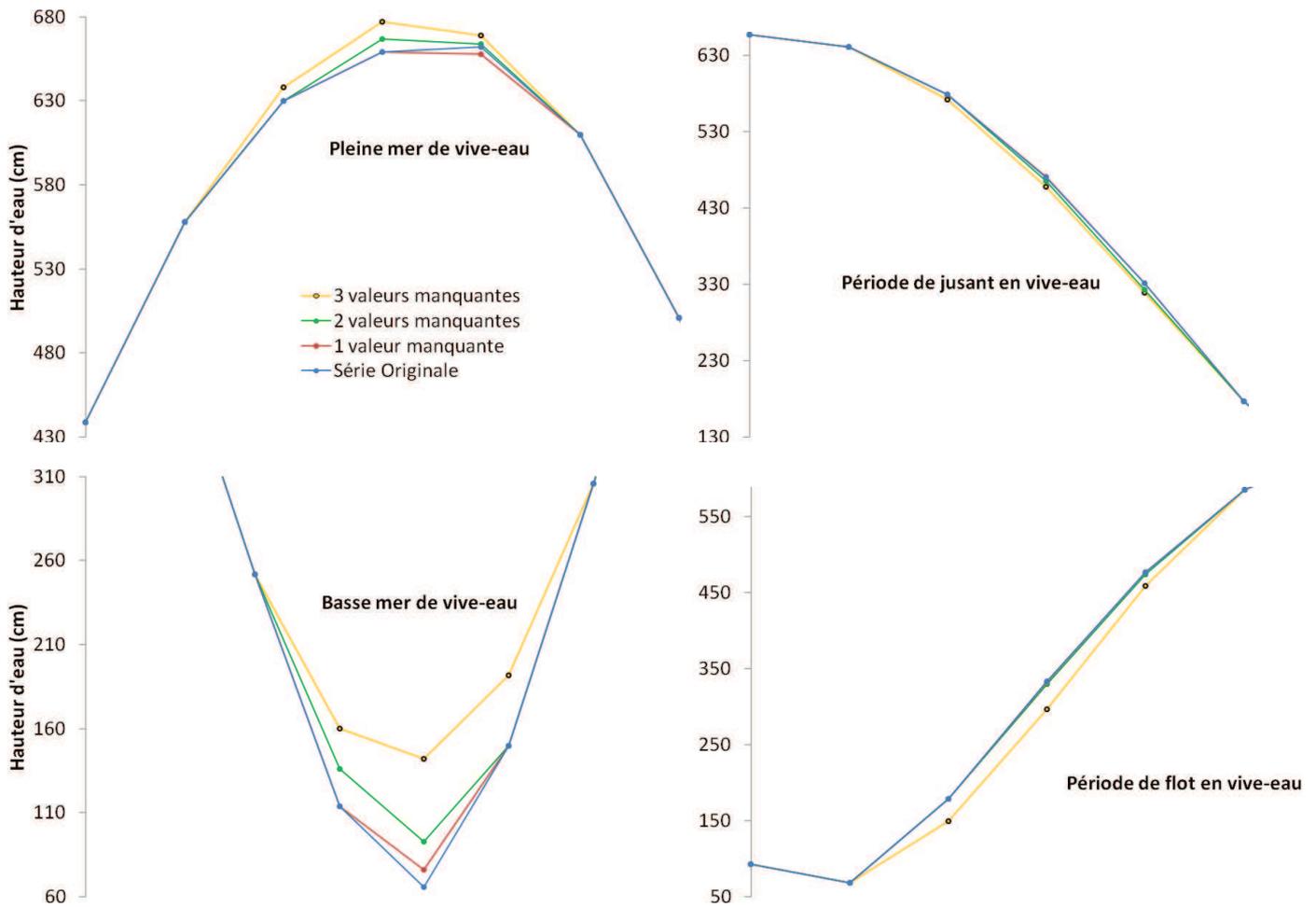


Figure V-40 : Test d'interpolation par spline cubique en pleine et basse mer de vive-eau, ainsi qu'en période flot et jusant de vive-eau.

Globalement, l'interpolation est d'autant plus juste et proche de la réalité que le marnage est petit. En effet, les valeurs sont mieux interpolées en morte-eau qu'en vive-eau, même en cas de marée asymétrique (déformation de la marée typique du pertuis d'Antioche, cf. VI.1.1.2. *Asymétrie tidale*). Lorsqu'une seule valeur est manquante, l'interpolation est plutôt bonne. La différence moyenne entre la valeur interpolée et la valeur réelle est d'environ 3 cm en pleine mer, en flot et en jusant. En basse mer, la différence est de 5 cm en moyenne. Lorsque deux valeurs sont manquantes, l'interpolation reste correcte. La différence moyenne entre la valeur interpolée et la valeur réelle est d'environ 5 cm en pleine mer, en flot et en jusant. En basse mer, la différence oscille entre 7 cm (en morte-eau) et 24 cm (en vive-eau) selon le marnage. Enfin, lorsque trois valeurs sont manquantes, l'interpolation s'éloigne trop de la réalité. La différence moyenne entre la valeur interpolée et la valeur réelle est d'environ 11 cm en pleine mer, en flot et en jusant. En basse mer, la différence oscille entre 17 cm (en morte-eau) et 55 cm (en vive-eau) selon le marnage.

En résumé, les résultats montrent que les pleines et basses mers ont tendance à être surestimées (plus grandes que dans la réalité), tandis qu'en période de flot et de jusant, les valeurs interpolées ont tendance à être sous-estimées. Enfin, les résultats confirment la pratique en vigueur consistant à ne pas interpoler plus de deux valeurs manquantes successives. Au-delà, l'interpolation ne paraît plus valable, s'éloignant trop de la réalité.

V.4.3.3. Extraction des PM et BM à partir des données horaires

Comme expliqué précédemment, le travail de numérisation des hauteurs horaires est un travail très long, nécessitant beaucoup de temps (pour rappel, environ 400 000 valeurs numérisées pour les seules séries des forts Enet et Boyard). Numériser aussi les registres des pleines et basses mers reviendrait donc à allonger encore plus le temps imparti à la numérisation, au risque de décourager l'opérateur en charge de ce travail. Il existe donc une solution pour avoir accès aux données de pleines et basses mers sans les numériser : les extraire à partir des valeurs des hauteurs horaires. Pour cela, on utilise la méthode de l'interpolation par spline cubique. A partir des points situés autour de la pleine mer ou de la basse mer, on recalcule une courbe de hauteur d'eau (*figure V-41*) d'où l'on extrait la valeur minimale (pour la basse mer) ou la valeur maximale (pour la pleine mer).

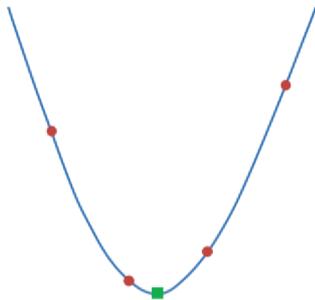


Figure V-41 : Extraction de la basse mer (carré vert) à partir des hauteurs horaires (points rouges) par la méthode d'interpolation par spline cubique permettant de recalculer la courbe du niveau marin (courbe bleue).

Mais nous avons vu précédemment que cette méthode d'interpolation pouvait engendrer des erreurs, nous avons donc voulu comparer des pleines et basses mers numérisées directement à partir du registre des marées avec des pleines et basses mers extraites avec cette méthode. Le test a été réalisé à partir des données du mois de janvier 1860 enregistrées au fort Enet. Les résultats sont présentés ci-dessous.

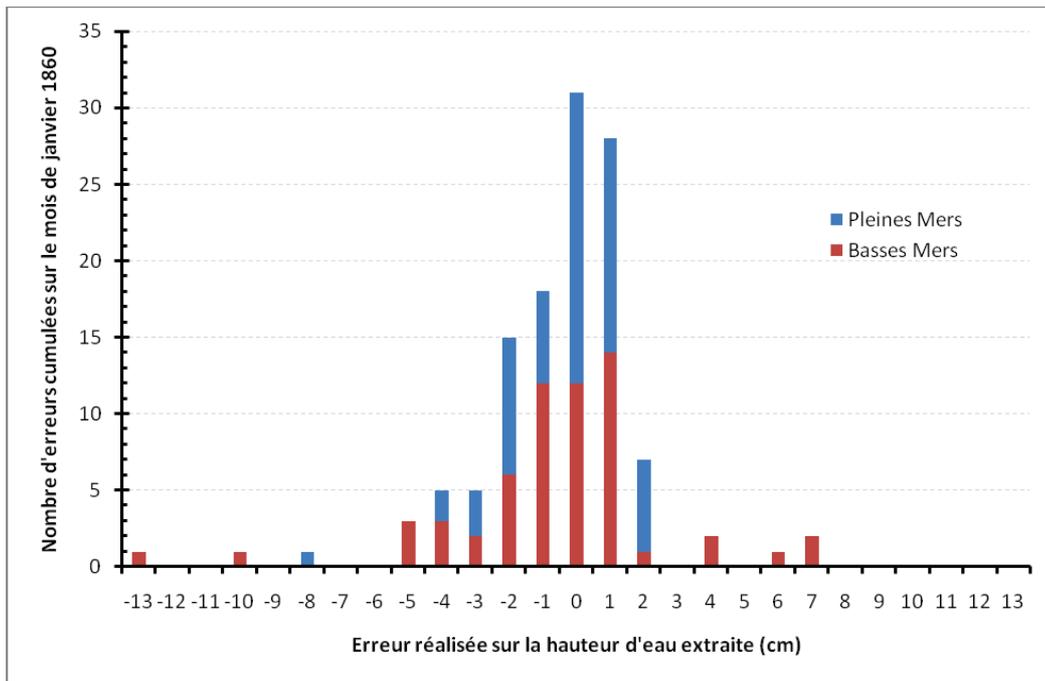


Figure V-42 : Répartition des erreurs commises par l'interpolation sur la hauteur d'eau lors de l'extraction des pleines et basses mers au fort Enet pour le mois de janvier 1860.

Sur un mois de valeurs de pleines et basses mers (soit au total 120 valeurs), la moyenne des erreurs commises par l'interpolation sur la hauteur d'eau extraite est de $-0,4 \pm 1,8$ cm sur les pleines mers et de $-0,6 \pm 3,2$ cm sur les basses mers. La figure V-42 montre la répartition de ces erreurs, globalement comprises entre - 5 et 2 cm. On constate que l'extraction de la hauteur de la basse mer est deux fois plus incertaine que celle de la hauteur de la pleine mer puisque l'erreur-type obtenue lors de ce test est de 3,2 cm contre 1,8 cm pour les pleines mers. Malgré tout, ces erreurs sont très petites et représentent moins de 1 % du marnage moyen du mois de janvier 1860 (380 cm). Elles sont, de plus, identiques avec les valeurs trouvées par Pouvreau [2008] à Brest ($0,4 \pm 2$ cm pour les PM et $-0,4 \pm 2$ cm pour les BM) et légèrement supérieures à celles obtenues par Woodworth *et al.* [1991] à Liverpool (0,2 cm).

Concernant les erreurs commises sur l'horaire des pleines et basses mers extraites, la moyenne des erreurs est de 2 ± 11 min sur les pleines mers et de $3,1 \pm 5,4$ min sur les basses mers, en concordance avec les valeurs calculées par Pouvreau (3 ± 4 min pour les PM et les BM) [2008]. La figure V-43 montre la répartition de ces erreurs, globalement comprises entre - 8 et 15 minutes. On constate que l'extraction de l'heure des basses mers est assez précise puisque son erreur-type est d'environ 5 minutes (pour rappel, le temps s'écoulant entre deux basses mers consécutives est de 12h25). Cela est moins le cas pour l'extraction des pleines mers, avec une erreur-type de 11 minutes, qui peut s'expliquer facilement. Les plus grandes erreurs relevées pour les pleines mers ont lieu en période de morte-eau, lorsque l'étale de pleine mer est assez long (30 à 40 minutes). De plus, il arrive que la déformation de l'onde de marée provoque une double pleine mer en période de morte-eau (cf. VI.1.1.2. *Asymétrie tidale*). Celle-ci étant parfois peu marquée, le moment exact de la pleine mer devient encore plus difficile à déterminer. Néanmoins, une erreur de 11 minutes sur l'heure de la pleine mer reste encore un résultat acceptable.

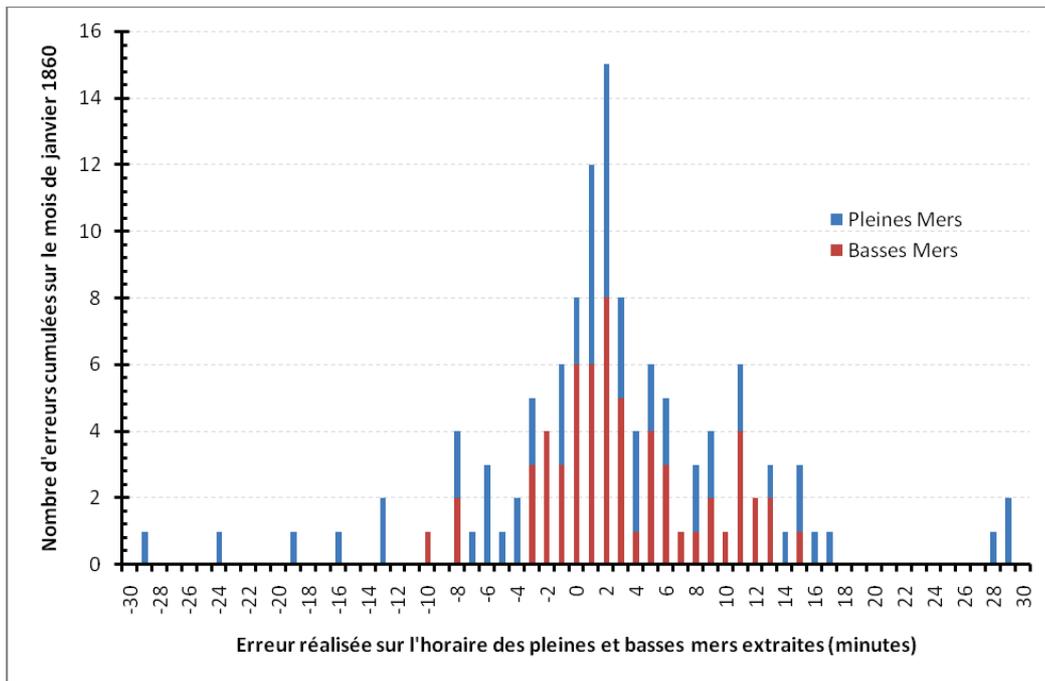


Figure V-43 : Répartition des erreurs commises par l'interpolation sur l'horaire des pleines et basses mers extraites au fort Enet pour le mois de janvier 1860.

V.4.3.4. Analyse des résidus

Dans notre étude, les résidus sont définis comme la différence entre les observations du niveau marin et les prédictions de la marée. Ici, les prédictions de la marée seront calculées à l'aide d'une analyse harmonique de la marée. Les résidus peuvent être calculés aussi bien en hauteur qu'en temps et leur analyse peut s'effectuer à partir de pleines et basses mers ainsi qu'à partir de hauteurs horaires. Cette analyse permet de caractériser plus finement la qualité des mesures et de confirmer d'éventuels problèmes d'horloge du marégraphe, ou de mesures de la hauteur d'eau.

Le principe est simple, à chaque hauteur horaire d'eau observée correspond une hauteur horaire d'eau prédite que l'on soustrait. En revanche, pour les pleines et basses mers, pour réussir à identifier la bonne valeur prédite avec son observation correspondante, nous avons écrit un script MATLAB, permettant d'identifier la pleine ou la basse mer prédite correspondante, en recherchant la seule valeur éloignée de moins de deux heures de l'observation (cf. V.4.5.2.4. *Etude des résidus*).

V.4.4. Construction des séries temporelles du littoral charentais

L'objectif, ici, est d'analyser toutes les conditions nécessaires à la construction d'une série temporelle du niveau marin. Par la suite, un contrôle qualité des lots de mesures utilisés pour la construction de ces séries sera effectué et enfin, les séries temporelles construites seront étudiées au

chapitre VI. La Discussion Générale abordera la question de savoir si l'on peut construire une série encore plus globale au niveau du pertuis d'Antioche.

V.4.4.1. Analyse des conditions environnementales

V.4.4.1.1. Conditions hydrodynamiques

V.4.4.1.1.1. Pertuis d'Antioche

- *Rade de La Rochelle*

Les paramètres hydrodynamiques pouvant influencer sur le niveau marin sont la température de l'eau et sa salinité ainsi que les courants locaux dans le cas de l'utilisation d'un puits de tranquillisation. Les huit lots de mesures considérés pour la construction de la série composite de La Rochelle sont répartis sur quatre sites différents : au port de La Pallice, et au sein du Vieux port, au niveau du canal Maubec, au bassin à flot intérieur, et au bassin à flot extérieur. Les trois sites du Vieux port sont si proches que les gradients de densité sont les mêmes. Regardons maintenant si ces conditions sont aussi identiques entre le port de La Pallice et le Vieux port, séparés d'environ 5 km.

Les mesures réalisées dans ces deux ports l'ont été à des endroits bien abrités de la houle. Il n'y a donc pas de présence de forts courants pouvant influencer significativement sur la mesure du niveau marin. De plus, aucun cours d'eau ou fleuve ne vient se jeter dans la mer à proximité de ces deux ports, ce qui aurait pu laisser envisager une modification de la salinité. La température et la salinité sont, ici, identiques dans les deux ports (communication personnelle de Mikhail Karpytchev).

- *Rade de l'île d'Aix*

Les cinq lots de mesures utilisés pour la construction de la série composite de l'île d'Aix sont, eux, répartis sur trois sites différents : le port de l'île d'Aix, le fort Enet et le fort Boyard. La distance séparant les deux forts est d'environ 5 km, l'île d'Aix se trouvant plus ou moins au milieu (cf. *figure V-28*). Les sites de mesure du fort Enet et de l'île d'Aix sont situés à des endroits très envasés, beaucoup utilisés aujourd'hui pour l'ostréiculture. Entre les deux, les courants se concentrent dans un couloir de mer, reliant la rade de l'île d'Aix à la rade des Basques. Le fort Enet, puis l'île d'Aix, sont dans le prolongement de l'embouchure de l'estuaire de la Charente, dont le débit est trop faible (jusqu'à 250 m³/s en période de crues) pour pouvoir influencer sur la température et la salinité de la rade de l'île d'Aix (cf. *III.4. Contexte hydrologique*). En effet, en comparaison, le débit tidal est nettement supérieur et l'emporte sur le débit fluvial [Chaumillon *et al.*, 2008a].

Contrairement aux observatoires d'Aix et Enet, construits sur un socle rocheux, le fort Boyard a lui été bâti sur un banc de sable appelé longe de Boyard (cf. *IV.2.1. Historique des observatoires du niveau de la mer*), où les courants sont plus importants (environ 1 m.s^{-1} en vive-eau) qu'aux abords d'Aix et d'Enet [Bertin & Chaumillon, 2005]. Cependant, le puits de tranquillisation du marégraphe du fort Boyard était abrité à l'intérieur du barachois, limitant très fortement les courants. L'influence des courants sur les mesures du niveau marin à Aix, Enet et Boyard peut donc être considérée comme négligeable.

Un autre aspect a été évoqué au cours de discussions scientifiques au sein de notre équipe : [Bertin & Chaumillon, 2005] ont montré que la forme allongée de la longe de Boyard par rapport aux crêtes de houle entraîne une forte réfraction convexe, augmentant ainsi significativement l'amplitude de la houle au niveau du sommet de la longe. Cette augmentation de l'amplitude de la houle peut-elle avoir pour conséquence une surélévation du niveau marin liée à son déferlement, au niveau du fort Boyard ? A priori, d'après quelques simulations effectuées au sein de notre équipe, aucune surélévation significative n'a été détectée, peut-être parce que le fort Boyard n'est pas situé au sommet du banc, mais à son extrémité Est.

Enfin, différents travaux ont montré que la longe de Boyard a subi de nombreuses évolutions morphologiques au cours du temps [Chaumillon *et al.*, 2002; Bertin & Chaumillon, 2005; Chaumillon *et al.*, 2008b]. D'après leurs résultats, les alentours du fort Boyard seraient en légère érosion (*figure V-44*). Nous verrons dans la partie « *V.4.4.1.2.2. Stabilité relative des forts Enet et Boyard* » si cela a une conséquence sur la stabilité du fort.

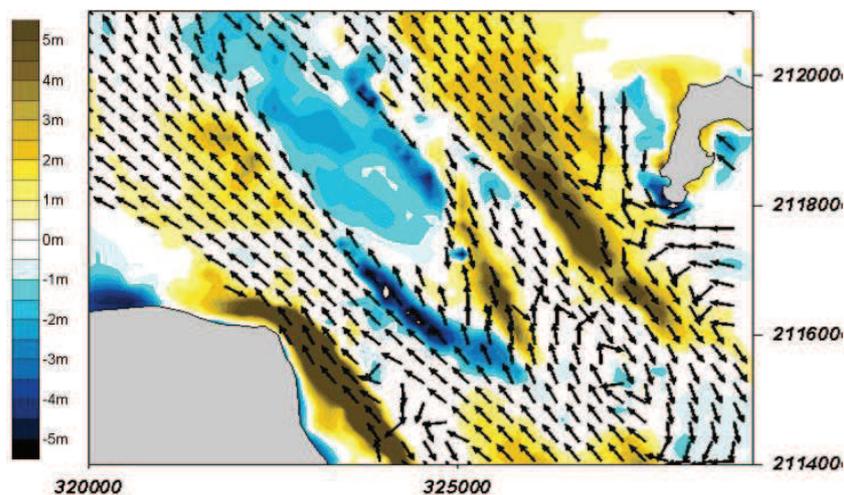


Figure V-44 : Simulation du transport par charriage en 1824 (flèches noires), et évolution bathymétrique entre 1824 et 2003 (en bleu : érosion, en jaune : accrétion). Modifié d'après Bertin & Chaumillon [2005].

V.4.4.1.1.2. Phare de Cordouan

Le cas du phare de Cordouan est particulier, car les mesures ont toujours eu lieu au même endroit. Ainsi, s'il s'avère que des changements de température, salinité ou de courants locaux sont survenus au cours du temps, ceux-ci doivent être considérés comme une partie intégrante du signal physique du niveau marin, dont l'évolution pourra être étudiée sans artéfacts de localisation. Aucune condition environnementale ne s'oppose donc à la construction de cette série.

V.4.4.1.2. Stabilité du socle du marégraphe

V.4.4.1.2.1. Stabilité des repères de marée

V.4.4.1.2.1.1. Rade de La Rochelle

L'étude de la stabilité verticale des repères de marée permet ici de s'assurer que le quai sur lequel ont été effectuées des mesures du niveau de la mer n'a pas subi de mouvements verticaux. Cette méthode est particulièrement utile dans le cas du Vieux port de La Rochelle où les lots de mesures ont été réalisés dans trois endroits différents. Pour cela, dix repères répartis sur le Vieux port ont été observés par nivellement géométrique de précision en cheminement aller/retour en juin 2010 (*figure V-45*). L'emplacement et la description de chacun de ces repères sont précisés au chapitre 4. Les résultats complets sont détaillés dans le rapport de mission disponible en ligne sur SONEL⁸⁴ [Gouriou *et al.*, 2010].

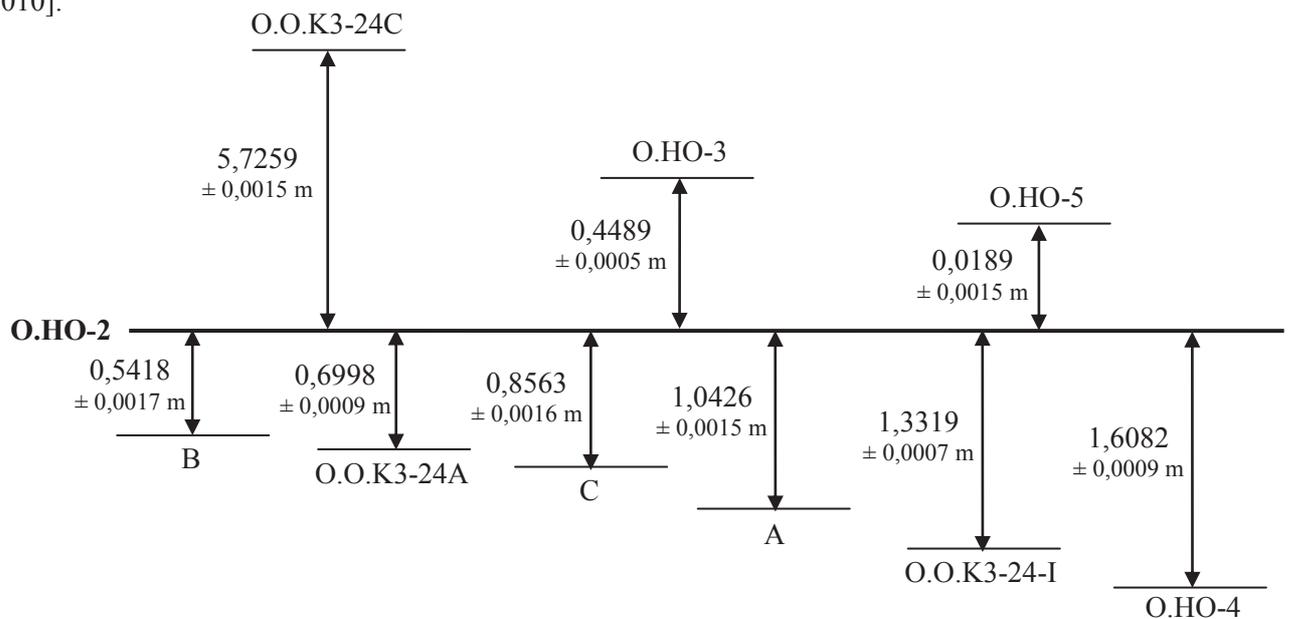


Figure V-45 : Situation relative des différents repères de marée du Vieux port de La Rochelle mesurés en 2010.

⁸⁴<http://www.sonel.org/-Documentation-.html?lang=fr>, consulté le 1^{er} décembre 2011.

Dénivelés par rapport au repère O.HO-2 (phare blanc)				
Nom du repère	2010 - LIENSs	1995 - IGN (± 0,001 m)	1986 – IGN (± 0,0005 m)	Mouvement du repère
A	- 1,0426 ± 0,0015 m	-	-	-
B	- 0,5418 ± 0,0017 m	-	-	-
C	- 0,8563 ± 0,0016 m	-	- 0,8577	1,4 ± 1,7 mm
Echelle E5	- 1,6931 ± 0,0006 m	-	-	-
Echelle E6	- 1,5431 ± 0,0005 m	-	-	-
O.HO-3	+ 0,4489 ± 0,0005 m	+ 0,447	+ 0,4447	1,9 ± 1,1 mm
O.HO-4	- 1,6082 ± 0,0009 m	- 1,603	-	5,2 ± 1,3 mm
O.HO-5	+ 0,0189 ± 0,0015 m	+ 0,021	+ 0,0314	2,1 ± 1,8 mm
O.O.K3-24A	- 0,6998 ± 0,0009 m	-	- 0,6983	1,5 ± 1 mm
O.O.K3-24C	+ 5,7259 ± 0,0015 m	-	+ 5,7248	1,1 ± 1,6 mm
O.O.K3-24-I	- 1,3319 ± 0,0007 m	-	-	0,3 ± 0,9 mm
H	- 1,3324 ± 0,0016 m	-	- 1,3316	0,8 ± 1,7 mm

Tableau V-20 : dénivelés entre les repères du Vieux port de La Rochelle et le repère O.HO-2. Mesures réalisées par nivellement géométrique. Les incertitudes calculées tiennent compte de la loi de propagation des erreurs. En vert : repères stables, en orange : repères suspects, en rouge : mouvement détecté

Nous avons choisi de calculer les dénivelés de tous les repères par rapport au repère O.HO-2 (phare blanc), car c'est celui qui apparait comme le plus stable depuis 1861 [Gouriou *et al.*, 2010]. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous, et comparés avec les résultats précédents les plus récents de l'IGN. Pour certains repères (O.HO-2, 3, 4 et 5), 1995 est l'année de dernière détermination. Pour les autres repères anciens, 1986 est l'année de nouveau calcul des altitudes, lors du passage du réseau NGF-Lallemand au réseau NGF-IGN69, ces repères ayant été observés pour la dernière fois en 1957.

• Les repères ont-ils été stables entre 1861 et 2010 ?

Dénivelés par rapport au repère O.HO-2 (phare blanc)						
Nom du repère	1861 (± 0,001 m)	1913 (± 0,001 m)	1957 (± 0,0005 m)	1986 (± 0,0005 m)	1995 (± 0,001 m)	2010
C	- 1,026	- 0,854	- 0,8585	- 0,8577	-	- 0,856 ± 0,002 m
		+0,172± 0,001	-0,005± 0,001	+0,001± 0,001	+0,002± 0,002	
O.HO-3 (stable)	+ 0,441	+ 0,444	+ 0,4440	+ 0,4447	+ 0,447	+ 0,4489 ± 0,0005 m
		+0,003± 0,001	0,000± 0,001	+0,001± 0,001	+0,002± 0,001	+0,002± 0,001
O.HO-5	+ 0,053	+ 0,056	+ 0,0301	+ 0,0314	+ 0,021	+ 0,019 ± 0,002 m
		+0,003± 0,001	-0,026± 0,001	+0,001± 0,001	-0,010± 0,001	-0,002± 0,002
O.O.K3-24A (stable)	- 0,693	- 0,693	- 0,6991	- 0,6983	-	- 0,700 ± 0,001 m
		0,000± 0,001	-0,006± 0,001	+0,001± 0,001	-0,002± 0,001	
O.O.K3-24C (stable)	-	+ 5,732	+ 5,7227	+ 5,7248	-	+ 5,726 ± 0,002 m
			-0,009± 0,001	+0,002± 0,001	+0,001± 0,002	
H ou O.O.K3-24-I	- 1,392	- 1,313	- 1,3321	- 1,3316	-	- 1,332 ± 0,001 m
		+0,079± 0,001	+0,019± 0,001	+0,001± 0,001	+0,0004± 0,001	

Tableau V-21 : Stabilité des repères du Vieux port de La Rochelle par rapport au repère O.HO-2 entre 1861 et 2010. Les incertitudes calculées tiennent compte de la loi de propagation des erreurs. En vert : stable ; en orange : mouvement inférieur à 1 cm ; en rouge : mouvement supérieur ou égal à 1 cm.

D'après les résultats du *tableau V-21* et de la *figure V-46*, trois repères semblent stables par rapport au repère O.HO-2 entre 1861 et 2010. Il s'agit des repères O.HO-3 (église Saint-Sauveur), O.O.K3-24A (phare rouge) et O.O.K3-24C (tour de la lanterne). De même, trois autres repères semblent instables par rapport au repère O.HO-2 : le repère C (couronnement du bassin à flot extérieur), O.HO-5 (tour de la chaîne) et O.O.K3-24-I (couronnement du bassin à flot intérieur). Cette instabilité est-elle la conséquence d'un mouvement vertical d'une partie du port ou à une reconstruction des repères ?

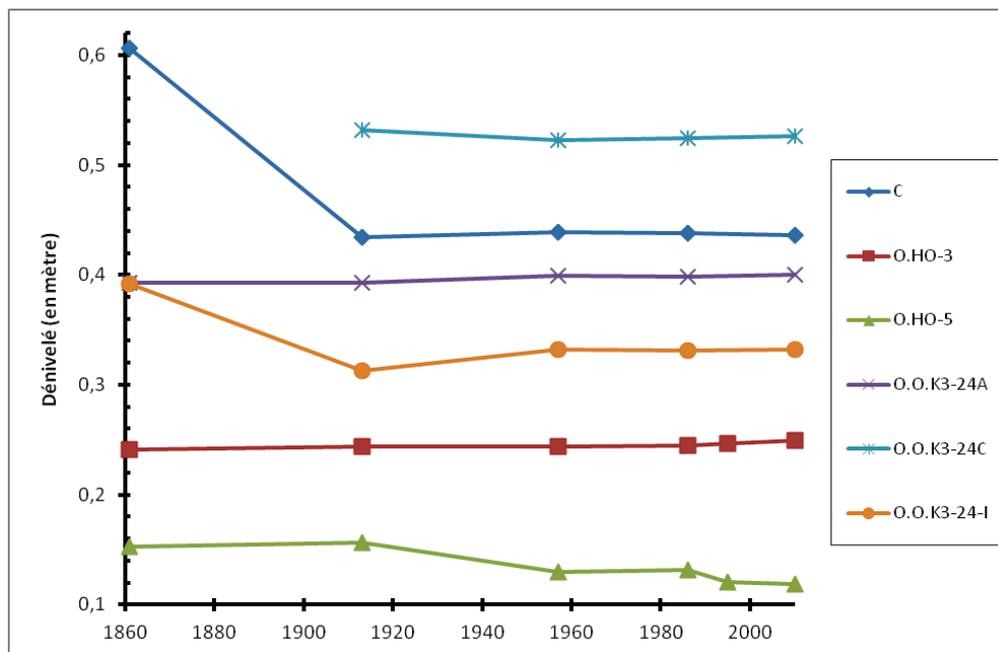


Figure V-46 : Evolution des dénivelés entre le repère O.HO-2 et les autres repères du Vieux port de La Rochelle. L'ordonnée de chaque courbe a été décalée arbitrairement pour une meilleure lisibilité du graphique. Les incertitudes des dénivelés (comprises entre 0,0005 m et 0,002 m) sont trop faibles pour être représentées.

Etudions en détail chacun des repères instables. Le repère C correspond au couronnement du bajoyer du bassin à flot extérieur et son mouvement détecté semble se situer entre 1861 et 1913 (environ 17 cm). L'hypothèse que nous pouvons avancer pour expliquer ce mouvement est que le point de repère ayant été nivelé n'est pas le même en 1861 et en 1913. En effet, 1862 marque la fin des travaux du bassin à flot extérieur (cf. chapitre 4). Par conséquent, lors du nivellement réalisé par Leclerc en 1861, il est possible que le point pris pour repère soit légèrement différent de celui pris en 1913. Concernant le repère O.O.K3-24-I (ou H), qui correspond au couronnement du bajoyer du bassin à flot intérieur, il semble avoir bougé deux fois : la première entre 1861 et 1913 (environ 8 cm) et la deuxième entre 1913 et 1957 (environ 2 cm). Ces deux mouvements sont probablement dus à des travaux d'aménagement de l'écluse. Enfin, concernant le repère O.HO-5, qui correspond à un repère Bourdalouë scellé au pied de la tour de la chaîne, il semble avoir bougé deux fois également : entre 1913 et 1957 (environ 3 cm) et entre 1957 et 1995 (environ 1 cm). Ces mouvements sont plus surprenants et nous n'avons, pour le moment, aucune hypothèse à proposer qui les expliquerait.

Malgré la présence d'un déplacement de repère inexplicé (O.HO-5), le Vieux port de La Rochelle ne semble donc pas avoir subi de mouvements verticaux différentiels particuliers (localement) à prendre en compte lors de la construction de la série temporelle.

V.4.4.1.2.1.2. Rade de l'île d'Aix

• Stabilité des repères du fort Enet

Six repères de marée ont été observés par nivellement de précision aller-retour en août 2009, afin de contrôler la stabilité locale du site (figure V-47). L'emplacement et la description de chacun de ces repères sont précisés au chapitre 4. La précision obtenue lors de ces mesures est très bonne puisque l'erreur de fermeture de ces nivellements est de l'ordre d'un millimètre. Les résultats complets sont détaillés dans le rapport de mission disponible en ligne sur SONEL [Gouriou & Tiphaneau, 2010b]. A partir du repère K, nous avons déterminé les dénivelés des autres repères. Les résultats sont présentés ci-dessous.

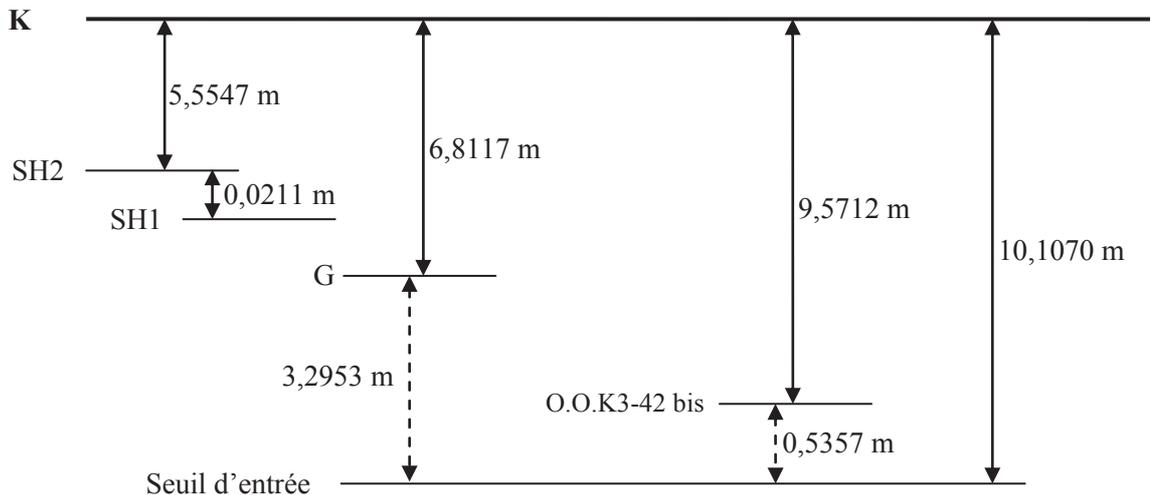


Figure V-47 : Situation relative des différents repères de marée du fort Enet mesurés en 2009. L'incertitude de ces mesures est de l'ordre de $\pm 0,0005$ m.

A partir des coordonnées géographiques du repère K, obtenues par positionnement GPS [Gouriou & Tiphaneau, 2010b] et à partir des résultats du nivellement ci-dessus, nous pouvons déterminer une altitude des six repères mesurés au cours de l'été 2009. Voici le tableau récapitulatif des altitudes de ces repères en 2009, mais aussi en 1960 et en 1860 :

Nom du repère	Cote rapportée au zéro NGF-IGN69		
	2009 ($\pm 0,03$ m)	1960 ($\pm 0,004$ m)	1860 ($\pm 0,009$ m)
K	14,15	-	-
O.O.K3-42 bis	4,58	4,551	-
SH1	8,57	8,538	-
SH2	8,59	8,559	-
Seuil	4,04	4,025	4,009
G	7,34	-	6,390

Tableau V-22 : Altitudes des repères de marée du fort Enet, de 1860 à 2009, dans le système NGF-IGN69. Les précisions dépendent de la méthode employée pour les mesures.

La précision obtenue lors du calcul de l'altitude du repère K à l'aide du logiciel CIRCE étant centimétrique [Duquenne, 1998], une comparaison des altitudes 1860, 1960 et 2009 ne permet pas de déceler un mouvement vertical inférieur à trois centimètres. Nous allons donc utiliser les valeurs de nivellement entre le repère SH1 (qui est *a priori* le repère le plus stable) et les trois autres repères communs aux années 1960 et 2009, afin d'estimer d'éventuels mouvements verticaux entre ces quatre repères (tableau V-23).

Nom du repère	Dénivelé par rapport au repère SH1 (± 0,0005 m)		
	2009	1960	
SH2	0,0211	0,0208	+ 0,0003
O.O.K3-42 bis	- 3,9954	- 3,9872	- 0,0082
Seuil	- 4,5312	- 4,5109	- 0,0203

Tableau V-23 : Dénivelés entre le repère SH1 et trois autres repères de marée mesurés à la fois en 1960 et en 2009 au fort Enet.

La différence de dénivelé entre 1960 et 2009 pour le repère SH2 étant inférieure à l'incertitude de mesure, nous pouvons considérer que les repères SH1 et SH2 n'ont pas bougé entre eux. La différence d'environ 2 cm entre 1960 et 2009 pour le seuil de la porte d'entrée est probablement due à l'endroit exact où a été posée la mire de nivellement. En effet, les agents du SHOM ont posé leur mire au centre du seuil de la porte d'entrée du fort (d'après la photographie prise lors de leur nivellement) alors que nous l'avons posé au pied du pilastre ouest, comme l'avait fait Delbalat en 1860 [Delbalat *et al.*, 1860]. Enfin, nous pouvons avoir une première estimation du déplacement du repère O.O.K3-42 bis suite aux travaux de rénovation des pilastres en juillet 2008. Ce repère a été abaissé de $0,008 \pm 0,001$ m. L'altitude normale du repère O.O.K3-42 bis est donc de **$4,542 \pm 0,001$ m NGF-IGN69**.

A partir de cette nouvelle altitude, et en prenant en compte uniquement les résultats du nivellement de l'été 2009, nous pouvons maintenant recalculer les altitudes des repères nivelés en 2009 (tableau V-24).

Nom du repère	Cote rapportée au zéro NGF-IGN69		
	2009 (± 0,001 m)	1960 (± 0,004 m)	1860 (± 0,009 m)
K	14,113	-	-
O.O.K3-42 bis	4,542	4,551	-
SH1	8,537	8,538	-
SH2	8,559	8,559	-
Seuil	4,007	4,025	4,009
G	7,302	-	6,390

Tableau V-24 : Altitudes des repères de marée du fort Enet, de 1860 à 2009, dans le système NGF-IGN69. Les précisions dépendent de la méthode employée pour les mesures.

► L'analyse des résultats nous montre que le repère G, qui était situé sur l'escalier situé à gauche en entrant dans le fort a bel et bien été détruit et reconstruit entre 1860 et 2009. Il existe en effet une différence de hauteur de 0,91 m entre 1860 et 2009.

► Les repères SH1 et SH2 sont stables entre eux et n'ont pas bougé entre 1960 et 2009, l'écart détecté (0,0003 m) étant plus petit que l'incertitude de mesure.

► Nous pouvons aussi noter que le seuil de la porte d'entrée est stable entre 1860 et 2009 dans un repère local et à l'incertitude près puisque l'écart constaté est de $0,002 \pm 0,009$ m. La stabilité de ce repère est importante car c'est le repère fondamental de l'observatoire du fort Enet.

Globalement, nous pouvons conclure que le fort Enet est stable localement. Une étude couplée de la stabilité des forts Enet et Boyard nous indiquera par la suite si l'un des deux forts a subi un mouvement vertical par rapport à l'autre (cf. *V.4.4.1.2.2. Stabilité relative des forts Enet et Boyard*).

• *Stabilité des repères du fort Boyard*

A partir du repère G, notre repère principal, neuf repères de marée ont été observés par nivellement géométrique en avril 2011 (*figure V-48*), alors qu'un précédent nivellement avait permis d'observer cinq repères en 2009. L'erreur de fermeture obtenue au cours du nivellement de 2011 est de l'ordre d'un millimètre. Les résultats complets sont détaillés dans les rapports de mission disponibles en ligne sur SONEL [Gouriou & Tiphaneau, 2010a; Gouriou *et al.*, 2011].

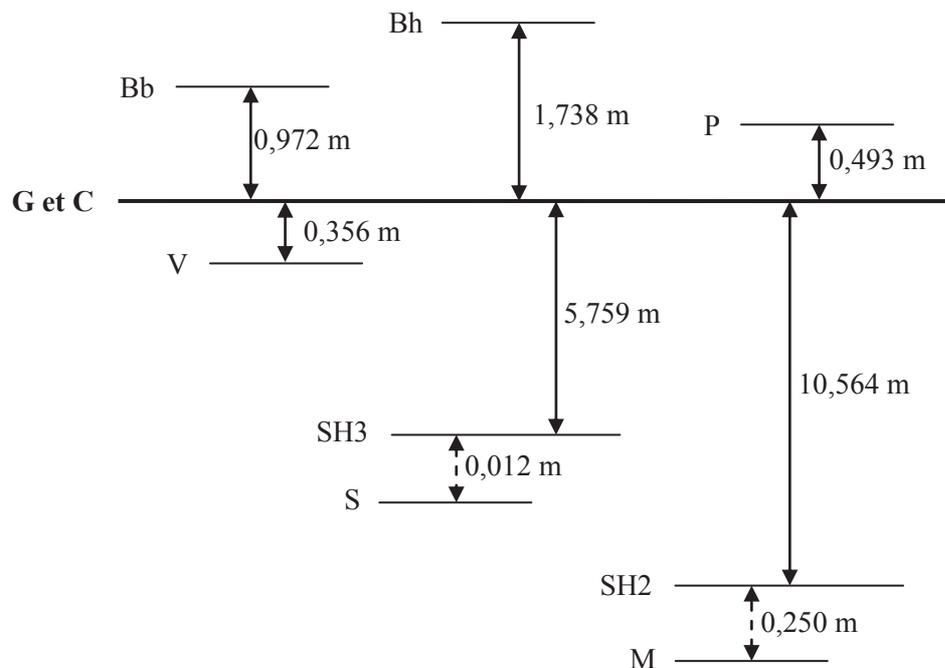


Figure V-48 : Situation relative des différents repères de marée du fort Boyard mesurés en avril 2011. L'incertitude de ces mesures est de l'ordre de $\pm 0,001$ m.

En combinant les résultats du nivellement à l'altitude du repère G (22,54 m NGF-IGN69, déterminée en août 2009 [Gouriou & Tiphaneau, 2010a]), nous pouvons déterminer l'altitude des neuf repères mesurés. Voici le tableau récapitulatif des altitudes de ces repères en 2011, mais aussi en 1878, en 1960 et en 2009 :

Nom du repère	Cote rapportée au zéro NGF-IGN69			
	2011 (± 0,03 m)	2009 (± 0,03 m)	1960 (± 0,004 m)	1878 (± 0,01 m)
Bh	24,28	24,26	-	24,26
Bb	23,51	23,51	-	23,61
P	23,03	-	-	23,16
C	22,54	-	-	22,66
V	22,18	22,18	-	22,31
SH3	16,78	16,78	16,753	-
S	16,77	-	-	16,98
SH2	11,98	-	11,939	-
M	11,73	-	-	11,88

Tableau V-25 : Altitudes des repères de marée du fort Boyard, de 1878 à 2011, dans le système NGF-IGN69. Les précisions dépendent de la méthode employée pour les mesures.

Attention, le *tableau V-25* est difficilement exploitable pour une comparaison directe des altitudes au cours du temps, car d'une part la précision obtenue lors du calcul de l'altitude du repère G à l'aide du logiciel CIRCE est de l'ordre de 3 centimètres, et d'autre part les altitudes de 1878 étaient connues dans le réseau NGF-Bourdalouë et celles de 1960 dans le réseau NGF-Lallemand, or il existe des incertitudes quant à la conversion précise de ces altitudes dans le réseau actuel NGF-IGN69 (cf. *IV.2.4. Relation entre les réseaux NGF*). Nous allons donc plutôt nous intéresser aux différences de hauteur entre les repères, et ainsi se dissocier de leur altitude et du réseau NGF utilisé.

• Comparaison entre 2009 et 2011

Pour comparer une éventuelle évolution des repères entre les nivellements de 2009 et 2011, nous allons nous baser sur notre repère principal G, et comparer les dénivelés des autres repères par rapport à celui-ci :

Nom du repère	Dénivelé par rapport au repère G		
	2011 (± 0,001 m)	2009 (± 0,001 m)	
Bh	1,738	1,723	+ 0,015
Bb	0,972	0,974	- 0,002
V	- 0,356	- 0,359	- 0,003
SH3	- 5,759	- 5,756	+ 0,003

Tableau V-26 : Dénivelés entre le repère G et quatre autres repères mesurés en 2009 et en 2011 au fort Boyard.

Les repères Bh, Bb et V sont des repères naturels, c'est-à-dire que le "repère" est en fait la surface supérieure d'un élément de construction du fort : pierre, brique, etc. Par conséquent, ils ne sont pas localisés précisément en X et en Y, contrairement à un rivet implanté dans le sol par exemple. La

détermination de leur hauteur dépend donc énormément de l'endroit choisi pour définir ce repère, c'est-à-dire l'endroit choisi pour poser la mire de nivellement. Les repères Bb et V sont relativement plats, ce qui explique que leurs dénivelés avec le repère G soient constants entre 2009 et 2011. Les 2 ou 3 millimètres de différence peuvent être considérés comme une incertitude de mesure liée au positionnement de la mire. Le repère Bh quant à lui, est mal défini, car le sommet du mur de brique de la terrasse du fort n'est pas uniforme en hauteur. En effet, selon la brique sur laquelle on pose la mire, le dénivelé avec G pourra varier d'environ 2 cm d'amplitude. Ce qui explique la différence de 1,5 cm mesurée entre 2009 et 2011.

Enfin, le repère SH3 est, lui, un repère bien déterminé, puisqu'il s'agit d'une soupape scellée dans le sol. La différence de 3 millimètres entre 2009 et 2011 ne peut donc pas s'expliquer par un positionnement de la mire différent, mais peut révéler, par contre, l'incertitude de la méthode employée pour ce nivellement. En effet, le chemin suivi pour aller de G à SH3 emprunte un escalier en colimaçon assez étroit dans lequel il est difficile d'effectuer un nivellement. Il est donc possible que la différence de 3 millimètres entre 2009 et 2011 provienne de ce passage dans cet escalier. Dans ce cas, cela signifie qu'un mouvement vertical peut être détecté par cette méthode si celui-ci est supérieur à 3 mm.

• Comparaison entre 1960 et 2011

Pour comparer une éventuelle évolution des repères entre les nivellements de 1960 et 2011, nous n'avons à notre disposition que deux repères : SH2 et SH3.

Nom du repère	Dénivelé par rapport au repère SH2		
	1960 (± 0,001 m)	2011 (± 0,001 m)	
SH3	4,814	4,805	- 0,009

Tableau V-27 : Dénivelé entre le repère SH2 et le repère SH3 mesurés en 1960 et en 2011 au fort Boyard.

Les repères SH2 et SH3 sont deux repères bien déterminés, puisqu'il s'agit de soupapes scellées dans le sol. La différence de 9 millimètres entre 1960 et 2011 ne peut donc pas s'expliquer, là non plus, par un positionnement de la mire différent, mais peut révéler, par contre, l'incertitude de la méthode employée pour ce nivellement. En effet, le chemin suivi pour aller de SH2 (1^{er} étage du fort) à SH3 (2^e étage du fort) emprunte un grand escalier en bois, ce qui peut provoquer des erreurs de mesure, le bois n'étant pas aussi stable que la pierre. Nous pouvons donc considérer ces repères comme relativement stables entre eux entre 1960 et 2011 (sur 52 ans).

• Comparaison entre 1878 et 2011

Pour comparer une éventuelle évolution des repères entre les nivellements de 1878 et 2011, nous allons nous baser sur le repère V, qui semble être, *a priori*, le plus stable. Les dénivelés indiqués dans le tableau suivant proviennent des résultats précédents.

Nom du repère	Dénivelé par rapport au repère V		
	1878 ($\pm 0,01$ m)	2011 ($\pm 0,001$ m)	
Bh	1,95	2,094	+ 0,14
Bb	1,30	1,328	+ 0,03
P	0,85	0,849	0
C	0,35	0,356	+ 0,01
S	- 5,33	- 5,415	+ 0,09
M	- 10,43	- 10,458	+ 0,03

Tableau V-28 : Dénivelés entre le repère V et six autres repères mesurés en 1878 et en 2011 au fort Boyard.

De la même façon que pour les repères Bb, Bh et V, les repères P, C, S et M sont des repères naturels. Ceci dit, nous pouvons différencier les repères Bb, V, P et C qui sont situés sur des pierres plutôt stables et plates et les repères Bh, S et M dont la localisation est plus imprécise du fait de l'usure des pierres ou des briques, qui peut provoquer une erreur selon l'endroit où la mire est posée. Au vu des résultats du *tableau V-28*, nous pouvons classer les repères en trois groupes : les repères parfaitement stables entre eux, les repères où un léger mouvement est détecté, et les repères qui ont été modifiés.

Parmi les repères parfaitement stables entre eux, nous retrouvons les repères P (pilier de la terrasse) et C (sur-terrasse des canons) qui ont statistiquement le même dénivelé avec le repère V (sol près de la porte de la vigie) en 1878 et en 2011. **Nous pouvons en conclure que ces trois repères n'ont pas subi de mouvements verticaux relatifs entre eux depuis 1878 (sur 134 ans) et peuvent donc aussi être considérés comme d'origine.**

Les repères Bb et M ont quant à eux subi un léger mouvement, ou tout du moins, une différence de dénivelé significative a été détectée (3 ± 1 cm). Concernant le repère Bb, nous savons que le mur de briques qui entoure la terrasse du fort a été entièrement refait et que les briques d'origine ont été enlevées puis remplacées. Il est probable que la différence de 3 centimètres soit consécutive à ces travaux. Quant au repère M, nous savons que le sol du repère M est d'origine mais celui-ci est assez usé, et les pierres qui composent le sol sont irrégulières. Peut-être que les 3 centimètres détectés sont une conséquence à la fois de cette usure et des méthodes de nivellement employées (localisation du « point » où la mire est posée au sol). Enfin, les repères Bh et S ont probablement été modifiés au cours du temps. Une différence de hauteur de 14 ± 1 cm a été détectée pour Bh et de 9 ± 1 cm pour S. Nous savons que le repère Bh a été modifié suite aux travaux de rénovation du mur de briques de la terrasse. Ces résultats le confirment. Quant au repère S, qui représente le sol du 2^e étage, sa définition est assez imprécise, et une différence d'un centimètre n'est pas aberrante selon l'endroit où l'on place sa mire sur le sol du 2^e étage.

• En conclusion

Globalement, nous pouvons conclure que les différentes parties du fort Boyard sont stables entre elles.

• *Stabilité des repères de l'île d'Aix*

Cinq repères de marée ont été observés par nivellement de précision aller-retour en novembre 2010 (figure V-49). L'emplacement et la description de chacun de ces repères sont précisés au chapitre 4. A partir du repère O.O.K3-196, nous avons déterminé les dénivelés des autres repères. Les résultats sont présentés ci-dessous.

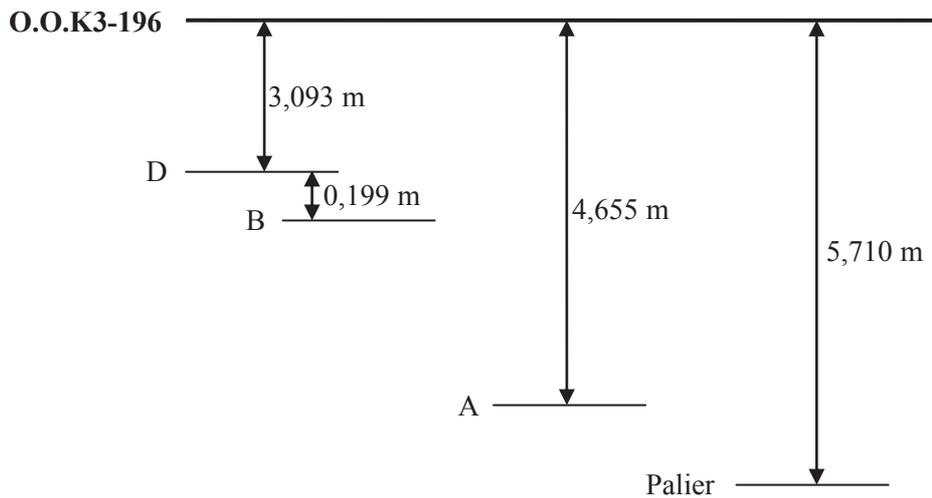


Figure V-49 : Situation relative de différents repères de l'île d'Aix en 2010. L'incertitude de ces mesures est de l'ordre de $\pm 0,001$ m.

Le tableau V-29 donne les altitudes de ces repères déduites de l'altitude du repère O.O.K3-196. Voici le tableau récapitulatif des altitudes de ces repères en 2010, mais aussi en 1983, 1960 et en 1868 :

Nom du repère	Cote rapportée au zéro NGF-IGN69			
	2010 ($\pm 0,001$ m)	1983 ($\pm 0,01$ m)	1960 ($\pm 0,0005$ m)	1868 ($\pm 0,01$ m)
O.O.K3-196	7,374	-	-	-
D	4,281	-	-	-
B	4,082	4,11	-	-
A	2,719	2,72	2,7195	2,71
Palier	1,664	-	1,6940	1,67

Tableau V-29 : Altitudes des repères de marée de l'île d'Aix, de 1860 à 2010, dans le système NGF-IGN69. Les précisions dépendent de la méthode employée pour les mesures.

Le tableau V-29 montre que les repères A et « Palier » sont restés stables de 1868 à 2010, ce qui équivaut à dire que le quai de l'île d'Aix sur lequel sont fixés ces repères est également stable depuis 1868. De la même façon que pour le repère « Seuil » du fort Enet, le point mesuré en 1960 pour le « Palier » ne correspond pas tout à fait à celui mesuré en 1868, 1983 et 2010, d'où une altitude différente. On note aussi le déplacement de 2,8 cm du repère B implanté par le SHOM en 1983. Probablement à la suite de travaux de rénovation récents et importants effectués sur le quai où est installé le repère B.

V.4.4.1.2.2. Stabilité relative des forts Enet et Boyard

Un des deux objectifs des missions réalisées au cours de l'été 2009 était de vérifier la stabilité relative des forts Boyard et Enet, c'est-à-dire de vérifier que l'un des deux forts n'avait pas subi de mouvements verticaux par rapport à l'autre, depuis le milieu du 19e siècle jusqu'à aujourd'hui. La méthode employée pour cela consiste d'abord à calculer la différence d'altitudes entre deux repères : l'un situé sur le fort Enet et l'autre situé sur le fort Boyard. Puis, après avoir calculé cette différence à la fois pour le 19e siècle et pour le 20e siècle, nous pourrions les comparer entre elles. Si ces résultats sont identiques, alors les forts auront été stables entre eux. Si ces résultats sont différents, alors l'un des deux forts aura subi un mouvement vertical par rapport à l'autre.

• *Choix des repères de référence*

Pour appliquer la méthode décrite ci-dessus, il convient de choisir deux repères différents : l'un sur le fort Enet et l'autre sur le fort Boyard. Mais le choix de ces deux repères est soumis à plusieurs conditions. Tout d'abord, il faut que ceux-ci soient anciens (c'est-à-dire implantés au 19e siècle de préférence) et existent toujours à l'heure actuelle. D'autre part, il faut qu'ils aient été localement stables au cours du temps. Enfin, il faut que ces deux repères aient été cotés à peu près en même temps à chaque époque. En étudiant les documents d'archives, il s'avère que les repères répondant à ces critères sont :

fort Enet	- repère « Seuil » (coté en 1860 et 2009) - repère « SH2 » (coté en 1960 et 2009)
fort Boyard	- repère « V » (coté en 1878 et 2009) - repère « SH3 » (coté en 1960 et 2009)

Le repère « Seuil » sur le fort Enet a été nivelé en 1860 et en 2009. A la suite de ces deux nivellements, il apparait que ce repère n'a bougé que de deux millimètres en 149 ans (cf. *tableau V-24*). Nous pouvons donc le considérer comme stable et prendre l'hypothèse que sa cote était la même en 1878 qu'en 1860. Nous allons donc pouvoir effectuer deux comparaisons différentes, la première entre 1878 et 2009 (sur 131 ans) à l'aide des repères « Seuil » et V et la deuxième entre 1960 et 2009 (sur 49 ans) à l'aide des repères SH2 et SH3.

• *Stabilité relative entre 1878 et 2009*

D'après les résultats précédents, voici un tableau récapitulant les altitudes des repères « Seuil » et V en 1878 :

	Altitude NGF-Bourdalouë
Seuil (fort Enet)	$H_{\text{seuil}} = 4,442 \pm 0,001 \text{ m}$
V (fort Boyard)	$H_V = 22,74 \pm 0,01 \text{ m}$

D'où une différence d'altitudes entre les deux repères en 1878 :

$$\Delta H_{1878} = H_V - H_{\text{seuil}} = 18,30 \pm 0,01 \text{ m}$$

Afin d'obtenir des altitudes comparables des points situés sur les forts Enet et Boyard, des observations GPS ont été réalisées en simultané sur les deux sites en 2009. Ces observations GPS nous ont permis d'obtenir les coordonnées géographiques ainsi que les hauteurs ellipsoïdales de deux repères installés à l'aplomb des antennes GPS aux forts Boyard (repère G, hauteur ellipsoïdale h_B) et Enet (repère K, hauteur ellipsoïdale h_E). Les informations relatives à ces observations et leurs résultats sont consultables sur SONEL [Gouriou & Tiphaneau, 2010a; Gouriou & Tiphaneau, 2010b]. Comme indiqué sur la *figure V-50*, la hauteur ellipsoïdale correspond à la distance entre le GPS installé sur le fort et le pied de la normale à l'ellipsoïde de référence (ici : l'ellipsoïde IAG GRS 1980). h_B et h_E sont donc deux hauteurs ellipsoïdales exprimées en mètres dans le système ITRS [Altamimi *et al.*, 2007]. Or, en France, le système géodésique légal est le RGF93, qui est une réalisation régionale du système ITRS. Nous pouvons donc considérer que h_B et h_E sont exprimées dans le système réglementaire français RGF93.

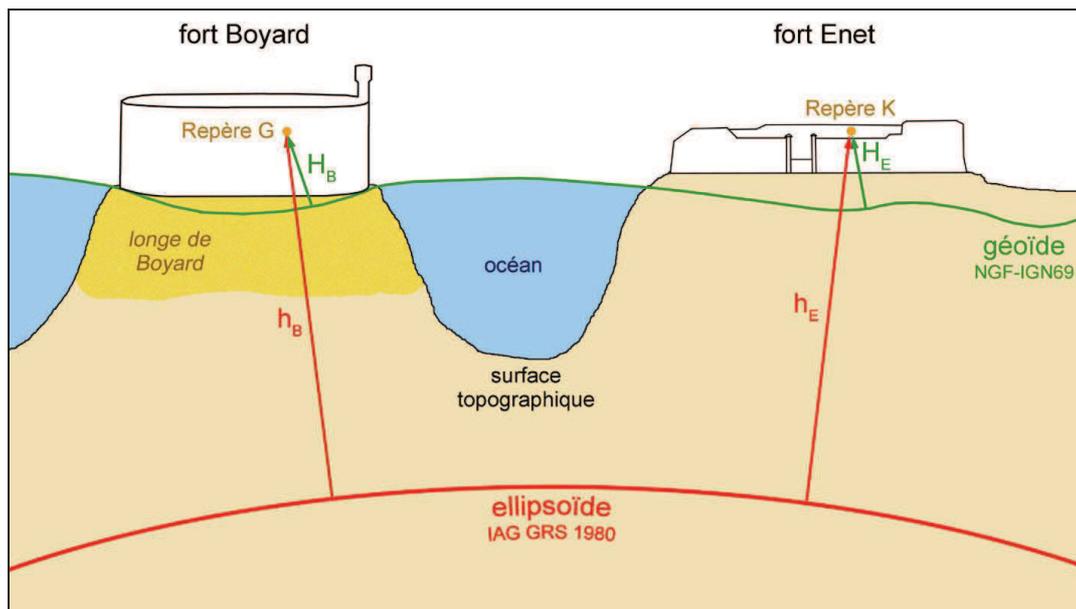


Figure V-50 : Schéma explicatif des observations GPS réalisées simultanément aux forts Boyard et Enet. h_B et h_E sont des hauteurs ellipsoïdales ; H_B et H_E sont des altitudes.

Pour transformer ensuite ces hauteurs ellipsoïdales en altitudes, c'est-à-dire obtenir une distance entre les repères G et K et la géoïde (surface équipotentielle du champ de pesanteur), nous avons utilisé la grille de conversion altimétrique RAF98 (via le logiciel CIRCE 3.2). Cette grille permet en effet de calculer les altitudes NGF-IGN69 de points connus dans le système de référence géodésique RGF93 [Duquenne, 1998]. Voici un tableau récapitulatif des résultats des observations GPS réalisées en 2009 :

	fort Boyard : repère G	fort Enet : repère K
Système géodésique	RGF93	
Ellipsoïde de référence	IAG GRS 1980	
Hauteur ellipsoïdale ($\pm 0,01$ m)	$h_B = 69,44$ m	$h_E = 61,01$ m
Altitude NGF-IGN69 ($\pm 0,03$ m)	$H_B = 22,54$ m	$H_E = 14,15$ m

Tableau V-30 : Récapitulatif des résultats des observations GPS réalisées aux forts Boyard et Enet en 2009.

A partir du tableau V-30, nous pouvons déduire la différence d'altitudes entre les repères « Seuil » et V en 2009 :

	Dénivelé par rapport au repère à l'aplomb du GPS	Hauteur ellipsoïdale	Altitude NGF-IGN69
Seuil (fort Enet)	$-10,1070 \pm 0,0005$ m	$h_{\text{seuil}} = 50,90 \pm 0,01$ m	$H_{\text{seuil}} = 4,04 \pm 0,03$ m
V (fort Boyard)	$-0,359 \pm 0,001$ m	$h_V = 69,08 \pm 0,03$ m	$H_V = 22,18 \pm 0,04$ m

$$\Delta H_{2009} = H_V - H_{\text{seuil}} = 18,14 \pm 0,05 \text{ m}$$

Nous venons donc de calculer les différences d'altitudes entre les repères « Seuil » et V en 1878 et 2009. Mais ces deux calculs ont été effectués à partir de systèmes NGF (Nivellement Général de la France) différents : le système NGF-Bourdalouë en 1878 et le système NGF-IGN69 en 2009. Comme le montre la figure V-51, si ces deux systèmes ne sont pas parallèles entre eux au niveau de notre zone d'étude, notre comparaison entre 1878 et 2009 risque d'être entachée d'une erreur égale à $N_E - N_B$.

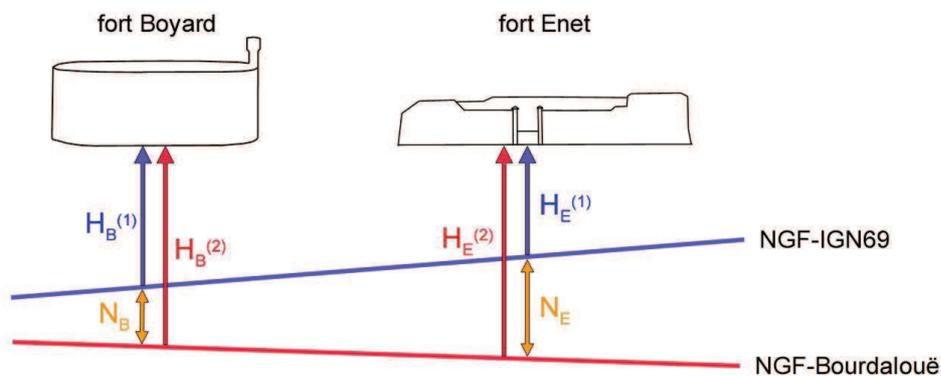


Figure V-51 : Schéma représentant les altitudes H_B et H_E en fonction du système de référence NGF de l'époque : NGF-Bourdalouë en 1878 et NGF-IGN69 en 2009.

La distance séparant les forts Enet et Boyard étant relativement faible (environ 5 km), nous pouvons considérer ici que l'écart séparant les systèmes NGF-Bourdalouë et NGF-IGN69 est constant (communication personnelle d'Alain Coulomb). Autrement dit, $N_B = N_E$. Nous pouvons donc comparer les différences d'altitudes entre les repères « Seuil » et V calculées pour 1878 et 2009 :

$$\Delta H = \Delta H_{2009} - \Delta H_{1878}$$

$$\Delta H = 18,14 - 18,30$$

$$\Delta H = -0,16 \pm 0,05 \text{ m}$$

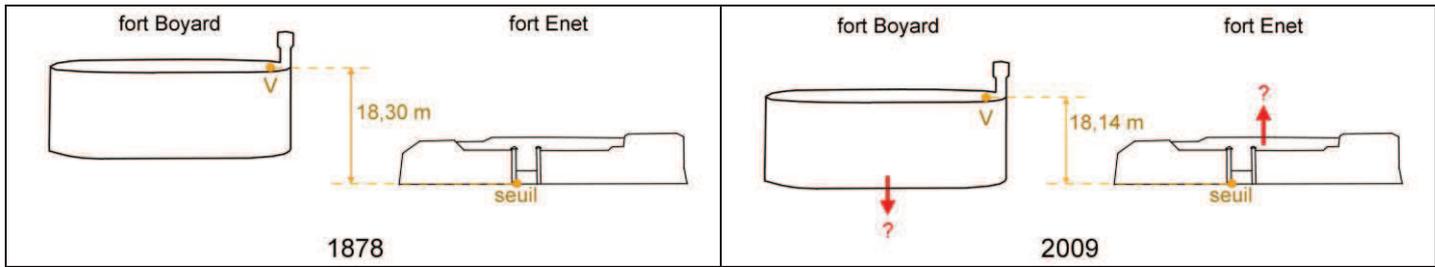


Figure V-52 : Schéma présentant les différences d'altitudes calculées entre 1878 et 2009. Le résultat montre qu'il y a eu, soit un affaissement du fort Boyard, soit une élévation du fort Enet.

Ce résultat montre clairement un léger mouvement vertical entre 1878 et 2009. Plusieurs questions se posent maintenant quant à l'interprétation de ce résultat. Ce mouvement détecté est-il la résultante du déplacement vertical d'un des deux forts ou des deux forts à la fois ? S'il ne s'agit que de l'un des deux forts, alors lequel est-ce ? D'autre part, s'agit-il d'un déplacement vertical lent et continu depuis 1878 ou d'un déplacement rapide suite à un tremblement de terre par exemple ? Ces questions seront discutées juste après l'étude de la stabilité relative entre 1960 et 2009.

• *Stabilité relative entre 1960 et 2009*

Pour cette deuxième étude, nous allons utiliser les repères SH2 (fort Enet) et SH3 (fort Boyard), qui ont été nivelés à la fois en 1960 et en 2009. D'après les résultats précédents, voici un tableau récapitulatif des altitudes des repères SH2 et SH3 en 1960 :

	Altitude NGF-Lallemand
SH2 (fort Enet)	$H_{SH2} = 8,4032 \pm 0,0005 \text{ m}$
SH3 (fort Boyard)	$H_{SH3} = 16,597 \pm 0,001 \text{ m}$

D'où une différence d'altitudes entre les deux repères en 1960 :

$$\Delta H_{1960} = H_{SH3} - H_{SH2} = 8,194 \pm 0,001 \text{ m}$$

Avec la même méthode que celle utilisée pour l'étude ci-dessus, nous pouvons déterminer la différence d'altitudes entre les repères SH2 et SH3 en 2009 :

	Dénivelé par rapport au repère à l'aplomb du GPS	Hauteur ellipsoïdale ($\pm 0,01 \text{ m}$)	Altitude NGF-IGN69 ($\pm 0,03 \text{ m}$)
SH2 (fort Enet)	$-5,5547 \pm 0,0005 \text{ m}$	$h_{SH2} = 55,46$	$H_{SH2} = 8,60$
SH3 (fort Boyard)	$-5,756 \pm 0,001 \text{ m}$	$h_{SH3} = 63,68$	$H_{SH3} = 16,78$

$$\Delta H_{2009} = H_{SH3} - H_{SH2} = 8,18 \pm 0,04 \text{ m}$$

Nous venons de calculer les différences d'altitudes entre les repères SH2 et SH3 en 1960 et 2009. Mais ces deux calculs ont été effectués à partir de systèmes NGF (Nivellement Général de la France) différents : le système NGF-Lallemand en 1960 et le système NGF-IGN69 en 2009. De la même façon

que précédemment, nous pouvons considérer que l'écart séparant les systèmes NGF-Lallemand et NGF-IGN69 est constant. Par conséquent, nous pouvons donc comparer les différences d'altitudes entre les repères SH2 et SH3 :

$$\Delta H = \Delta H_{2009} - \Delta H_{1960}$$

$$\Delta H = 8,18 - 8,194$$

$$\Delta H = -0,01 \pm 0,04 \text{ m}$$

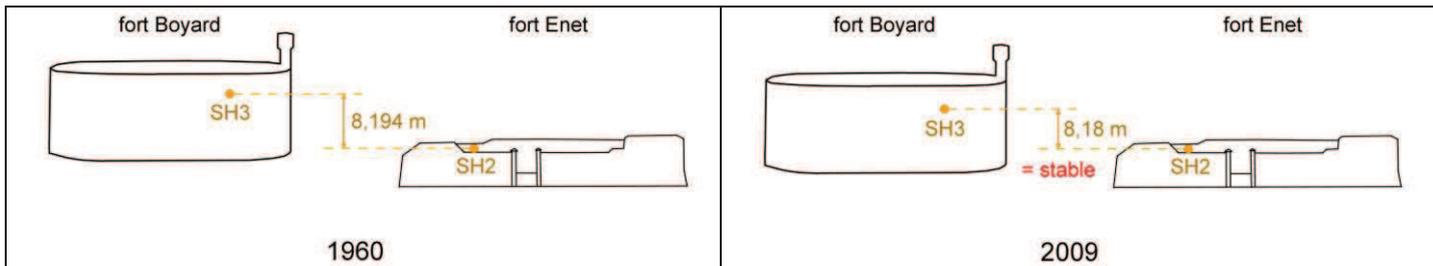


Figure V-53 : Schéma présentant les différences d'altitudes calculées entre 1960 et 2009. Le résultat montre que les deux forts sont stables l'un par rapport à l'autre pendant cette période (incertitude de 4 cm).

Le résultat obtenu ici ne permet pas de détecter un éventuel mouvement vertical. En effet, l'incertitude sur le résultat (environ 4 centimètres) est plus grande que le résultat en lui-même (1 centimètre).

• Conclusion et discussion

Entre 1878 et 1960, un léger mouvement vertical de l'ordre de $0,16 \pm 0,05$ m a été détecté entre les deux forts, alors qu'ils semblent avoir été stables entre 1960 et 2009. Plusieurs questions se posent maintenant quant à l'interprétation de ce résultat. Ce mouvement détecté est-il la résultante du déplacement vertical d'un des deux forts ou des deux forts à la fois ? S'il ne s'agit que de l'un des deux forts, alors lequel est-ce ? Malheureusement, il est assez difficile de répondre à ces questions avec les données dont nous disposons. Ce que nous avons mesuré est la résultante d'un ou des mouvements entre les forts Enet et Boyard, ce qui implique que : soit le fort Enet a bougé et le fort Boyard est stable, soit c'est l'inverse, soit les deux forts ont bougé. D'autre part, une autre question se pose : s'agit-il d'un déplacement vertical lent et continu depuis 1878 ou d'un déplacement brusque suite à un tremblement de terre par exemple ?

Comme le montre la figure V-54a, la rade de l'île d'Aix est située dans une zone où les séismes sont assez fréquents, mais modérés. En effet, entre 1858 et 2009, 62 séismes d'intensité épicentrale comprise entre 2 et 7 ont été enregistrés en Charente-Maritime, dont 40 entre 1960 et 2009⁸⁵. Le séisme le plus intense en Charente-Maritime a été enregistré le 7 septembre 1972. Son épicentre était situé sur l'île

⁸⁵ <http://www.sisfrance.net>, consulté le 1^{er} décembre 2011.

d'Oléron et son intensité épacentrale était de 7 [Rothé, 1983]. C'est d'ailleurs lors de ce séisme que le puits du marégraphe du fort Enet se serait écroulé (cf. IV.2.5.2. *Le fort Enet*). Or, malgré cet important séisme, nous n'avons pu détecter aucun mouvement vertical entre les forts Enet et Boyard entre 1960 et 2009. Nous pouvons donc prendre pour hypothèse que les différents séismes qui ont affectés la Charente-Maritime depuis 1858 n'ont pas entraîné de mouvements verticaux des forts Enet et Boyard.

S'il ne s'agit pas d'un mouvement vertical brusque lié à un séisme, alors il est possible que ce soit un mouvement vertical lent lié à un affaissement de l'un des deux forts par exemple. Le fort Enet repose sur un socle rocheux, mais le fort Boyard, lui, a été construit sur un banc de sable : la longe de Boyard. Pour rappel (cf. IV.2.1. *Historique des observatoires du niveau de la mer*), les premiers travaux d'encrochement du fort Boyard ont débuté en mai 1804, mais se sont très vite interrompus fin 1807. L'encrochement s'était alors affaissé de 1,2 à 1,5 m (sur 3,3 ans, soit 405 mm/an). Puis, en 1837, les ingénieurs se sont rendu compte que l'encrochement s'était enfoncé d'un mètre dans le sable depuis 1815 (sur 23 ans, soit 44 mm/an). Il est donc possible que le mouvement d'environ 16 cm détecté entre 1878 et 1960 (sur 74 ans, soit 2 mm/an) ait été causé par un affaissement lent et progressif du fort Boyard, dans la continuité des deux observations historiques du même type. D'autant plus que la longe de Boyard subit une évolution morphologique importante et continue et est en érosion constante depuis 1824 [Bertin & Chaumillon, 2005; Chaumillon *et al.*, 2008b]. Cette hypothèse est représentée sur la *figure V-54b* qui montre les trois tassements enregistrés au fort Boyard depuis 1804. Le tassement a l'air de type exponentiel.

**Les séismes en France
du 15/12/1964 au 31/08/2008**

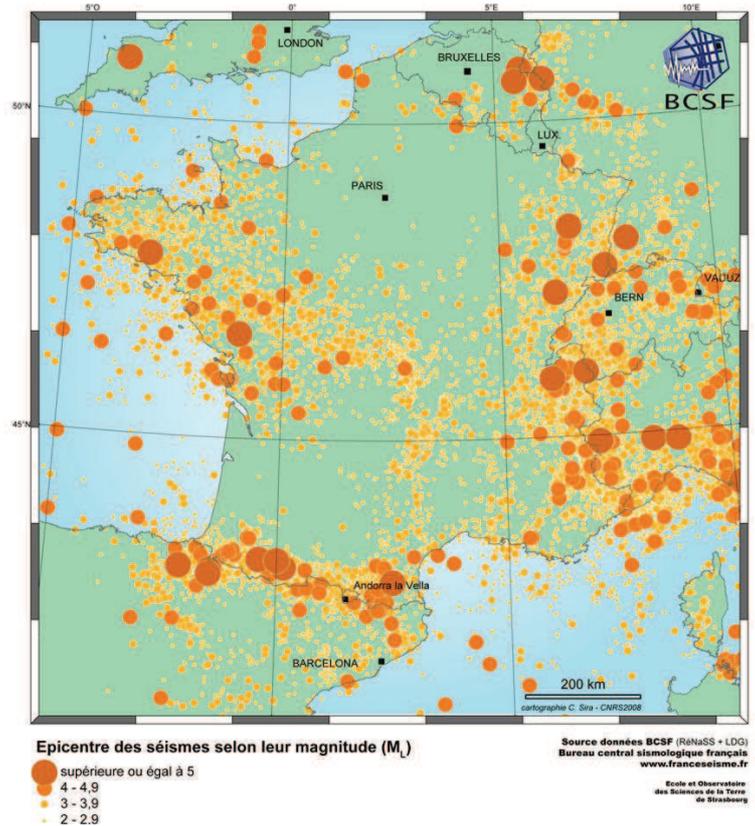


Figure V-54a : Carte des séismes en France de 1964 à 2008.
Source : <http://www.seisme.fr>

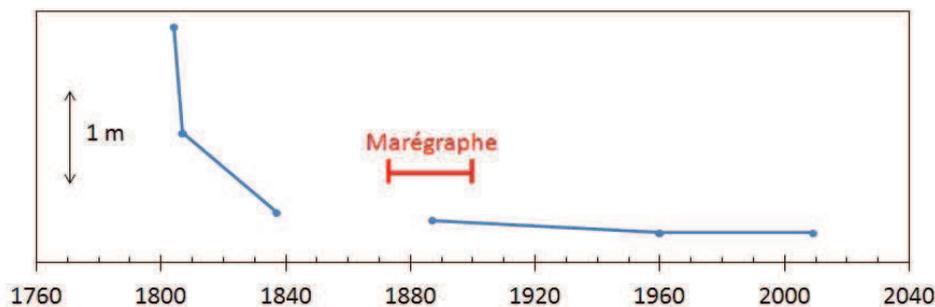


Figure V-54b : Représentation schématique du tassement du fort Boyard entre 1804 et 2009.

L'hypothèse la plus probable pour expliquer le mouvement vertical de $0,16 \pm 0,05$ m, détecté entre 1878 et 1960 entre les forts Enet et Boyard, est donc un affaissement du fort Boyard d'environ 2 mm/an sur cette période. Les mesures marégraphiques du fort Boyard ont été enregistrées entre 1873 et 1909, soit sur une période de 36 ans. En prenant en compte cette hypothèse, le fort Boyard se serait donc affaissé d'environ 7 cm durant cette période. Ce tassement, s'il est avéré n'est pas négligeable, puisque sa vitesse (de l'ordre de 2 mm/an) est du même ordre de grandeur que l'élévation du niveau marin au 20^e siècle. Afin de confirmer ce résultat, il paraît donc important de renouveler les mesures entreprises, sur une période plus longue que la précédente.

V.4.4.1.2.3. Le cas du phare de Cordouan

Le phare de Cordouan est un cas particulier car les repères de marée que nous avons nivelés sur place n'ont pas pu être rattachés à un repère IGN sur le continent, le phare étant isolé en pleine mer. La solution aurait été de réaliser la même opération qu'au fort Boyard, en réalisant des observations GNSS simultanées à la fois au phare et sur un repère IGN continental. Nous ne pouvons donc quantifier un éventuel mouvement du socle rocheux sur lequel est construit le phare de Cordouan.

V.4.4.1.3. Autres

D'autres paramètres environnementaux sont à prendre en compte lors de la construction d'une série temporelle : est-ce que la pression atmosphérique, qui influe grandement sur les variations du niveau marin, est identique pour les différents sites ? Est-ce que les ondes de marée ont les mêmes ordres de grandeur, en amplitude et en phase ? Y-a-t'il eu des modifications anthropiques majeures (en particulier, sur la bathymétrie) pouvant modifier la mesure du niveau de la mer ?

Premièrement, comme vu précédemment, les champs de pression sont suffisamment grands pour que l'on puisse considérer que la pression atmosphérique est identique, à la fois à La Pallice et au Vieux port ainsi que dans la rade de l'île d'Aix. Deuxièmement, nous avons calculé les constantes harmoniques de quatre ondes caractéristiques, d'une part, du port de La Pallice et du Vieux port, d'autre part, de l'île d'Aix, du fort Enet et du fort Boyard, afin de les comparer. Les résultats sont présentés dans les tableaux ci-dessous.

• *Port de La Pallice et Vieux port*

	Amplitude (cm)		Phase (°)	
	Vieux port	La Pallice	Vieux port	La Pallice
M2	174,2	174,6	93,3	98,7
S2	62,1	62,9	125,6	131,6
N2	35,4	36,2	74,4	80,0
M4	23,7	24,8	1,4	10,9

Tableau V-31 : Constantes harmoniques de quatre ondes caractéristiques du port de La Pallice (calculées sur la période 1941-2011) et du Vieux port de La Rochelle (calculées sur la période 1863-1874).

La Pallice (1941-2011)	(A_{M4}/A_{M2})	0,142
	2. $G_{M2}-G_{M4}$	186,5
Vieux port (1863-1874)	(A_{M4}/A_{M2})	0,136
	2. $G_{M2}-G_{M4}$	185,2

Tableau V-32 : Caractérisation de l'asymétrie tidale au port de La Pallice et au Vieux port.

On constate que l'amplitude des composantes harmoniques est très proche dans les deux ports, tout comme l'asymétrie tidale (cf. VI.1.1.2. *Asymétrie tidale*) qui est la même aussi bien à La Pallice qu'au Vieux port. Il existe toutefois une légère différence de phase, comprise entre 5° et 6°, qui correspond à un décalage en temps compris entre 10 et 12 minutes. Deux hypothèses possibles pour expliquer cette différence : soit le niveau de la pleine mer (par exemple) est atteint à La Pallice une douzaine de minutes avant qu'il ne soit atteint à La Rochelle ; soit la phase des composantes harmoniques a augmenté de 5 à 6° entre le milieu du 19^e siècle et la fin du 20^e siècle.

• *Île d'Aix, fort Enet et fort Boyard*

	Amplitude (cm)			Phase (°)		
	Aix	Enet	Boyard	Aix	Enet	Boyard
M2	177,7	179,9	178,1	95,7	93,1	92,7
S2	64,4	65,1	64,5	131,1	125,5	124,8
N2	36,7	37,2	36,8	77,1	74,0	73,6
M4	25,8	26,7	26,4	4,6	359,3	356,9

Tableau V-33 : Constantes harmoniques de quatre ondes caractéristiques de l'île d'Aix (calculées sur la période 1973-1974), du fort Enet (calculées sur la période 1859-1873) et du fort Boyard (calculées sur la période 1873-1902).

Île d'Aix (1973-1974)	(A_{M4}/A_{M2})	0,145
	2. $G_{M2}-G_{M4}$	186,8
fort Enet (1859-1873)	(A_{M4}/A_{M2})	0,148
	2. $G_{M2}-G_{M4}$	186,9
fort Boyard (1873-1902)	(A_{M4}/A_{M2})	0,148
	2. $G_{M2}-G_{M4}$	188,5

Tableau V-34 : Caractérisation de l'asymétrie tidale dans la rade de l'île d'Aix.

Les résultats montrent que l'amplitude des composantes harmoniques est très proche sur les trois sites, tout comme l'asymétrie tidale, qui caractérise la marée dans la rade de l'île d'Aix. Il existe une légère différence de phase entre les trois sites, qui peut s'expliquer par les deux mêmes hypothèses que pour le site de La Rochelle. En effet, les constantes harmoniques ont été calculées sur des périodes différentes : 1859-1873 pour le fort Enet, 1873-1902 pour le fort Boyard et 1973-1974 pour l'île d'Aix. A noter que l'ensemble de ces résultats concernant l'amplitude concorde également avec les conclusions de Mannevy [1971], qui indiquait dans son rapport que, pour le pertuis d'Antioche, « *l'amplitude de la marée est pratiquement identique en tous lieux (amplitude légèrement plus forte à Aix qu'à La Rochelle)* ». A noter que l'on peut déjà remarquer les résultats proches entre les sites de la rade de La Rochelle et ceux de la rade de l'île d'Aix. Ces similitudes seront discutés plus tard (cf. VI.1. Ondes de marée).

Troisièmement, comme décrit au chapitre 4, les différents sites ont connu de nombreux aménagements, mais pas, *a priori*, de modifications majeures empêchant la construction d'une série composite.

V.4.4.2. Conditions instrumentales

L'analyse des conditions instrumentales doit nous permettre de déterminer si la mesure du niveau de la mer a pu être suffisamment modifiée par un changement d'appareil ou de protocole de mesures, de sorte que la construction de la série soit impossible. Dans le cas de la rade de La Rochelle, les modifications ont été nombreuses entre 1775 et 2011. Elles sont moindres pour la rade de l'île d'Aix et le phare de Cordouan. Voici un récapitulatif du matériel utilisé pour la mesure :

- *Rade de La Rochelle (Vieux port et port de La Pallice)*

- 1775 : échelle gravée en Pieds et en pouces dans le quai
- 1824 : échelle en bois (Pieds et pouces)
- 1863-1874 : marégraphe mécanique à flotteur de type Chazallon
- 1885-1892 : échelle(s) de marée en lave émaillée (système métrique)
- 1941-1944 : marégraphe mécanique à flotteur de marque Richard
- 1967-1980 : marégraphe mécanique à flotteur de marque Saint-Chamond Granat
- 1995-2011 : marégraphe côtier numérique
 - ↳ 1995-mars 2001 : capteur à ultrasons
 - ↳ avr. 2001-août 2008 : capteur radar (Krohne BM70)
 - ↳ sept. 2008-2011 : capteur radar (Krohne Optiflex)

- *Rade de l'île d'Aix (île d'Aix, fort Enet et fort Boyard)*

- 1824 : échelle en bois (Pieds et pouces)
- 1859-1873 et 1873-1909 : marégraphe mécanique à flotteur de type Chazallon
- 1973-1974 : marégraphe mécanique à flotteur (OTT R16)
- 2011 : marégraphe côtier numérique (capteur radar à air libre Optiwave)

- *Phare de Cordouan*

- 1812 et 1825 : échelle en bois (Pieds et pouces)
- 1826 à 1924 : échelle en bois (système métrique)
- 1994 : marégraphe plongeur à capteur de pression

Nous pouvons regrouper le matériel utilisé selon trois catégories : les échelles de marée, les marégraphes mécaniques à flotteur, et les marégraphes côtiers numériques. Premièrement, pour les échelles de marée, la seule incidence que ces changements entraînent concerne la précision des mesures. Il est en effet moins précis de lire une hauteur d'eau sur une échelle gravée dans le quai que sur une échelle en bois plus lisible. De même, le système métrique est plus fin que le système Pieds-pouces, entraînant plus d'approximations dans la lecture sur une échelle Pieds-pouces [Woodworth, 1999a]. Deuxièmement, les marégraphes mécaniques à flotteur sont, eux, identiques dans leur méthode de mesure. Même si le fabricant change, il est peu probable que cela ait une grande incidence sur la mesure finale. Troisièmement, il existe effectivement une différence dans la méthode de mesure entre un capteur à ultrasons et un capteur radar pour les marégraphes côtiers numériques. Au final, les capteurs radars sont jugés plus stables, plus précis (différence centimétrique) et plus faciles à entretenir [Martin Miguez *et al.*, 2008a]. De même, les capteurs radar Optiflex et Optiwave offrent également une plus grande précision de mesure d'une surface agitée, que les capteurs radar BM70, grâce à une fréquence d'émission de l'onde radar plus élevée (autour de 26 GHz pour l'Optiwave contre 10 GHz pour le BM70). Mais la différence de précision n'excède pas le centimètre, selon un test réalisé à Brest : 97,2 % des écarts observés entre les deux capteurs radar sont inférieurs ou égal au centimètre [Poffa *et al.*, 2011].

Enfin, le protocole de mesure a évolué au cours du temps, s'adaptant aux nouvelles technologies, mais toujours avec la même volonté, dictée par les ingénieurs hydrographes, de produire des mesures sur le long terme. Il n'y a donc aucune contre-indication à la construction de séries temporelles à partir des conditions instrumentales.

V.4.4.3. Unités et référentiels

V.4.4.3.1. Uniformisation des unités

Deux systèmes d'unités de mesure de la hauteur d'eau ont été utilisés : le système métrique et le système Pieds-pouces (cf. III.1.2.1. *Unités de mesure de la longueur*). L'ensemble des données utilisées a donc été rapporté au système actuellement en vigueur : le système métrique. Pour cela, on convertit les mesures en Pieds et en pouces selon la relation :

$$1 \text{ Pied} = 0,324839 \text{ m} = 12 \text{ pouces}$$

$$1 \text{ pouce} = 0,027069 \text{ m}$$

V.4.4.3.2. Référentiels temporels et corrections associées

Les différents lots de mesures utilisés pour la reconstruction de séries temporelles n'ont pas tous été enregistrés dans le même référentiel de temps. Certains sont en Temps Solaire Vrai (TSV), d'autres en Temps Solaire Moyen (TSM) ou en Temps Universel (TU), et depuis 1984, en Temps Universel Coordonné (UTC). Il est donc nécessaire d'harmoniser les mesures en convertissant tous les lots en Temps Universel Coordonné (UTC), temps qui est aujourd'hui en vigueur. Pour plus de détails sur ces différents systèmes de temps, se référer au paragraphe « III.1.2.2. *Du Temps Solaire Vrai au Temps Universel Coordonné* ».

- *Passage du TSV au TSM*

Pour transformer un lot de données enregistré en Temps Solaire Vrai en Temps Solaire Moyen, il faut appliquer l'équation du temps (5.16) à l'ensemble des hauteurs horaires. Cette équation permet de calculer l'écart $E(t)$ (en minutes) entre le TSM et le TSV :

$$\text{Equation du temps } E(t) = \text{Temps Solaire Moyen} - \text{Temps Solaire Vrai} \quad (5.16)$$

$$\text{d'où} \quad \Rightarrow \quad \text{TSM} = E(t) + \text{TSV}$$

L'application numérique de cette équation, ci-dessous (5.17), est fournie par le Bureau des Longitudes [2011] (Paris) et est valable de 1900 à 2100. Nous pouvons malgré tout l'appliquer à nos données du 19^e siècle, les variations étant minimes (communication personnelle de Bernard Simon). Les lecteurs désireux de plus détails et d'une démonstration complète sont invités à consulter l'ouvrage du Bureau des Longitudes [2011] ou celui de Simon [2007a]. Les valeurs du temps t dans cette équation sont en jours moyens :

$$E(t) = 7,362 \sin M - 0,144 \cos M + 8,955 \sin 2M + 4,302 \cos 2M + 0,288 \sin 3M + 0,133 \cos 3M + 0,131 \sin 4M + 0,167 \cos 4M + 0,009 \sin 5M + 0,011 \cos 5M + 0,001 \sin 6M + 0,006 \cos 6M - 7,064 \cdot 10^{-5} t \sin 2M + 1,46 \cdot 10^{-5} t \cos 2M \quad (5.17)$$

avec $M = 357,0363 + 0,9856t$

Pour exemple, les variations de l'équation du temps sont représentées sur la *figure V-55*. Les extremums se situent aux mois de février (+ 14 min) et novembre (- 16 min) et l'écart E(t) s'annule quatre fois par an : mi-avril, mi-juin, début septembre et fin décembre.

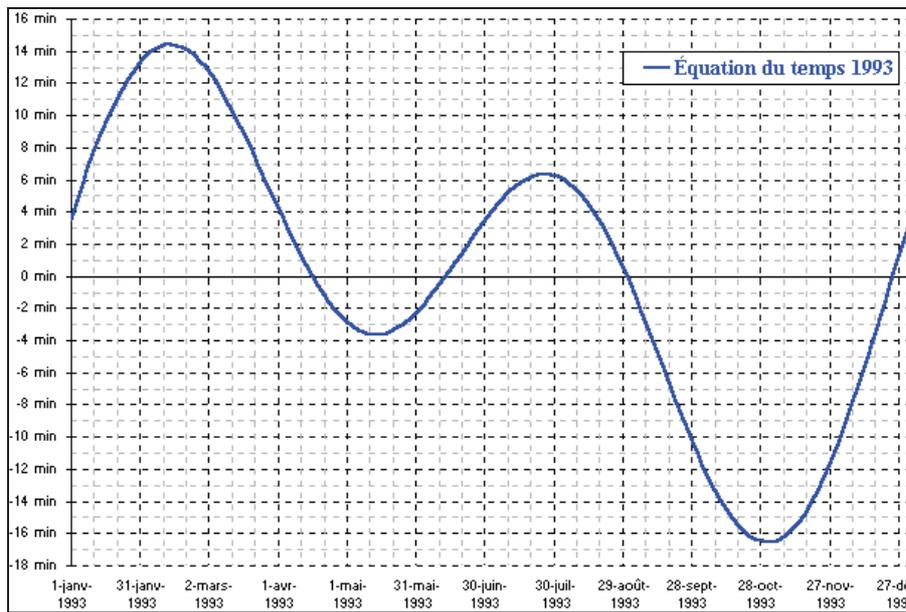


Figure V-55 : Représentation graphique de l'équation du temps pour l'année 1993.

• *Passage du TSM au TU*

Lorsque les lots de données sont en Temps Solaire Moyen, il faut appliquer une correction de la longitude pour les transformer en Temps Universel. Le but étant de caler les observations sur le méridien de Greenwich, il faut calculer la différence de longitude existante entre ce méridien et le lieu de l'observatoire. En supposant constant le mouvement de rotation de la Terre sur elle-même, le Soleil passe au méridien de l'observatoire exactement toutes les 24 heures lorsque la Terre a effectué une rotation complète (360°). Un écart de longitude de 1° correspond alors à un écart en temps de 4 min. Cet écart est ajouté aux hauteurs horaires si l'observatoire est situé à l'Est du méridien de Greenwich et il est soustrait si l'observatoire est à l'Ouest (*figure V-56*).

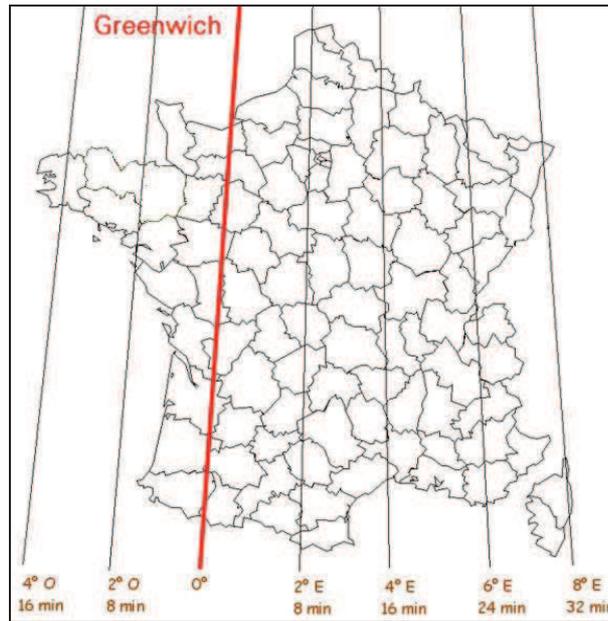


Figure V-56 : Chaque écart de longitude de 1° entre le lieu de l’observatoire et le méridien de Greenwich entraîne une correction de 4 min pour transformer les données de TSM à TU.

Voici les écarts de longitude et les corrections en temps à appliquer pour nos observatoires :

	Ecart de longitude avec Greenwich	Correction en temps à appliquer
La Pallice	- 1,221°	-4,88 min
Vieux port	- 1,152°	-4,61 min
Île d’Aix	- 1,174°	-4,70 min
fort Enet	- 1,143°	-4,57 min
fort Boyard	- 1,213°	-4,85 min
Cordouan	- 1,173°	-4,69 min

Tableau V-35 : Ecarts de longitude et correction en temps à appliquer entre le méridien de Greenwich et les observatoires charentais.

• *Passage du TU à UTC*

Pour rappel, depuis 1984, l’échelle de temps légale n’est plus basée sur le Temps Universel mais sur le Temps Universel Coordonné. Cependant, cela n’a aucune incidence sur nos lots de mesures, puisque le Temps Universel Coordonné est défini de telle sorte que la différence entre UTC et TU n’excède pas 0,9 s en valeur absolue.

V.4.4.3.3. Références verticales et corrections associées

V.4.4.3.3.1. La Rochelle

En plus des systèmes de temps et de hauteur qui diffèrent selon la période de mesure, un autre paramètre est à prendre en compte : par rapport à quelle référence verticale les mesures ont-elles été réalisées ? Pour les quatre lots de mesure du Vieux port, les enregistrements ont à chaque fois été

effectués par rapport au zéro d'une échelle de marée. L'objectif est donc de rattacher les zéros de ces échelles à une référence verticale commune stable sur la période 1775-1892. Le *tableau V-36* présente un récapitulatif de la cote des zéros des échelles utilisées, réalisé à partir des informations du chapitre 4.

Lot de mesures du Vieux port	Altitude ou hauteur du zéro des mesures	Référence	Source
1775 - 1776	+ 2,876 m	Zéro hydrographique de Beautemps-Beaupré	« Mémoire sur les observations à faire du Flux et du Reflux de la Mer », archives médiathèque La Rochelle, cote MS 783
1824	- 2,300 m	NGF-Bourdalouë	« Baie de La Rochelle - Etude Hydrographique par MM. Bouquet de la Grye et Hatt - 1876 », archives du SHOM
	- 7,899 m	R. Phare blanc	
1863 - 1874	- 3,924 m	NGF-Bourdalouë	« Baie de La Rochelle - Etude Hydrographique par MM. Bouquet de la Grye et Hatt - 1876 », archives du SHOM
	- 9,523 m	R. Phare blanc	
1887 - 1892	- 0,83 m	Zéro des cartes marines	« Port de La Rochelle, Nivellement des ouvrages du port et de la rade, 1894 », Viennot, archives AD17, cote DDE 3965
	- 3,83 m	NGF-Bourdalouë	
	- 9,429 m	R. Phare blanc	

Tableau V-36 : Récapitulatif de la cote des différents zéros utilisés pour les mesures du niveau de la mer au Vieux port de La Rochelle entre 1775 et 1892. La position du zéro du lot de 1775-1776 n'est pas clairement établie, mais découle d'une hypothèse de travail (cf. IV.1.5.1. Le Vieux port de La Rochelle).

L'étape suivante consiste à replacer ces lots de mesure par rapport au zéro hydrographique le plus récent du Vieux port de La Rochelle, puis par rapport à celui du port de La Pallice, qui est actuellement le zéro hydrographique officiel pour la zone de marée du pertuis d'Antioche. Nous avons fait ce choix car dans l'objectif de construire une série temporelle, il est cohérent de rapporter les anciennes mesures à la même référence verticale que les mesures actuelles. 1960 est l'année la plus récente pour laquelle la cote du zéro hydrographique du Vieux port a été vérifiée (cf. IV.1.2. *Suivi historique de la position du zéro hydrographique*). En 1960, sa cote était de $-7,265 \pm 0,001$ m par rapport au repère O.O.K3-24-I. Or, nous avons vu que le repère O.O.K3-24-I est stable depuis 1960 par rapport au repère du phare blanc. Le dénivelé entre ces deux repères étant de $-1,332 \pm 0,001$ m, le zéro hydrographique du Vieux port est donc situé à $-8,597 \pm 0,001$ m par rapport au repère du phare blanc. De plus, nous savons (cf. IV.1.2.1. *Au Vieux port de La Rochelle*) qu'il existe une différence de 20 cm entre le zéro hydrographique actuel et celui de Beautemps-Beaupré (*figure V-57*), dont il faut tenir compte pour le lot de mesures de 1775-1776.

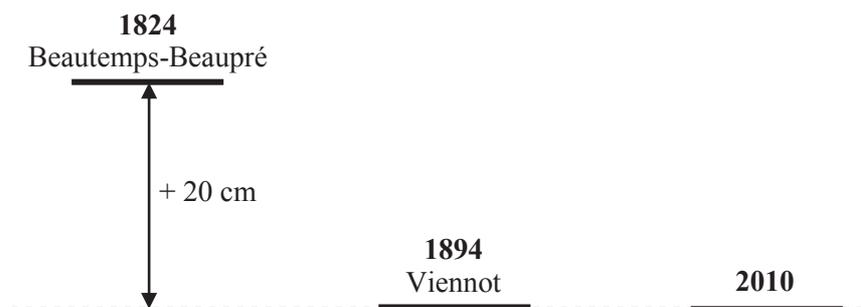


Figure V-57 : Situation relative des zéros hydrographiques utilisés au Vieux port de La Rochelle de 1824 à 2010.

A partir de ces différents éléments, nous pouvons déduire la cote des zéros des lots de mesure par rapport au zéro hydrographique du Vieux port. De plus, connaissant l'altitude du repère O.HO-2 (phare blanc) : $5,150 \pm 0,001$ m NGF-IGN69, nous pouvons en déduire l'altitude des zéros dans le réseau NGF-IGN69 (*tableau V-37*). Enfin, le zéro hydrographique en vigueur à La Rochelle en 2010 est celui du port de La Pallice, coté - 3,504 m NGF-IGN69. Au Vieux port, le zéro hydrographique étant situé à - 7,262 m par rapport au repère O.O.K3-24-I, et l'altitude de ce repère ayant été calculée à + 3,820 m NGF-IGN69, l'altitude du zéro hydrographique est donc de - 3,442 m NGF-IGN69. Il y a donc une différence d'environ 6,2 cm entre les zéros hydrographiques du Vieux port et du port de La Pallice.

Lot de mesures du Vieux port	Altitude ou hauteur du zéro par rapport au		
	Zéro hydro. du Vieux port	Zéro hydro. de La Pallice	NGF-IGN69
1775 - 1776	+ 3,076 m	+ 3,138 m	- 0,371 m
1824	+ 0,698 m	+ 0,760 m	- 2,749 m
1863 - 1874	- 0,926 m	- 0,864 m	- 4,373 m
1887 - 1892	- 0,832 m	- 0,770 m	- 4,279 m

Tableau V-37 : Récapitulatif de la cote des différents zéros utilisés pour les mesures du niveau de la mer au Vieux port de La Rochelle entre 1775 et 1892. Incertitude : 0,002 m. La position du zéro du lot de 1775-1776 n'est pas clairement établie, mais découle d'une hypothèse de travail (cf. IV.1.5.1. Le Vieux port de La Rochelle).

Concernant le port de La Pallice, tous les lots de mesures disponibles sur le site internet REFMAR sont définis par rapport au zéro hydrographique actuel, il n'y a donc pas de modifications à y apporter. La seule modification à effectuer concerne le lot de mesures de 1890-1892. Les observations des pleines mers réalisées simultanément au port de La Pallice et au Vieux port ont montré que le zéro de l'échelle de marée de La Pallice était situé 4,188 mètres plus bas que celui de l'échelle du Vieux port. Par conséquent, le zéro de l'échelle de La Pallice est situé à 4,963 m en dessous du zéro hydrographique actuellement en vigueur (*tableau V-38*).

Lot de mesures de La Pallice	Altitude ou hauteur du zéro par rapport au	
	Zéro hydro. de La Pallice	NGF-IGN69
1890 - 1892	- 4,963 m	- 8,467 m

Tableau V-38 : Cotes du zéro utilisé pour les mesures du niveau de la mer au port de La Pallice entre 1890 et 1892. Incertitude : 0,002 m.

V.4.4.3.2. Aix-Enet-Boyard

• Île d'Aix

Trois lots de mesures sont à rapporter au zéro hydrographique de La Pallice : 1824, 1973-1974 et 2011. Pour les deux derniers lots, les corrections sont rapides car ceux-ci ont été enregistrés par rapport au zéro hydrographique de l'île d'Aix de 1960 (pour le lot 1973-1974) et actuel (pour 2011). Or, la définition de ce zéro en 1960 (défini par Mannevy) est toujours en vigueur aujourd'hui, les deux lots de mesures ont

donc la même référence de hauteur. Reste maintenant à les rapporter au zéro de La Pallice. Nous avons vu (chapitre 4) que le zéro hydrographique actuel de La Pallice est à la cote - 3,504 m NGF-IGN69 et celui de l'île d'Aix à la cote - 3,540 m NGF-IGN69. Il existe donc une différence de 3,6 cm entre les deux zéros qu'il faudra retirer aux mesures de l'île d'Aix.

Concernant le lot de mesures de 1824, nous avons retrouvé les informations de Beautemps-Beaupré permettant de relier le zéro des échelles de marée utilisées au repère « Palier » du port de l'île d'Aix. Pour rappel, le zéro de réduction des sondes adopté par Beautemps-Beaupré est situé à 16 Pieds 4 pouces, soit 5,306 m, en dessous de ce palier. On sait également que le zéro de la grande échelle est situé 2 Pieds 8 pouces (0,866 m) en dessous de ce zéro de réduction des sondes (cf. *IV.2.5.1. L'île d'Aix*). De plus, du 13 mai au 25 juin 1824, il faut ajouter 2 Pieds 8 pouces, pour rapporter les observations faites sur la petite échelle aux divisions de la grande échelle. Du 26 juin au 1^{er} octobre, cette valeur change, ce n'est plus que 2 Pieds 6 pouces (0,812 m), qu'il faut ajouter. Le zéro hydrographique actuel de l'île d'Aix étant situé à - 5,204 m du palier, cela signifie que le zéro de réduction des sondes de 1824 est situé à 0,102 m en dessous du zéro hydrographique actuel de l'île d'Aix et que le zéro de la grande échelle est situé à 0,968 m en dessous de ce même zéro hydrographique actuel. Par conséquent, le zéro des mesures de la grande échelle de 1824 est situé à 1,004 m en dessous du zéro actuel de La Pallice. Il faut donc retirer 1,004 m aux données de 1824 pour les rattacher au zéro hydrographique de La Pallice.

Lots de mesures de l'île d'Aix	Altitude ou hauteur du zéro par rapport au			
	Zéro hydro. de l'île d'Aix	Zéro hydro. de La Pallice	Repère A (Bourdaluë) de l'île d'Aix	NGF-IGN69
1824	- 0,968 m	- 1,004 m	- 7,227 m	- 4,508 m
1973 - 1974	0 m	- 0,036 m	- 6,259 m	- 3,540 m
2011	0 m	- 0,036 m	- 6,259 m	- 3,540 m

Tableau V-39 : Récapitulatif de la cote des différents zéros utilisés pour les mesures du niveau de la mer à l'île d'Aix entre 1824 et 2011. Incertitude : 0,001 m.

• *Forts Enet et Boyard*

Les lots de mesures des forts Enet et Boyard sont un cas particulier dans cet exercice de rattachement de la référence de hauteur. En effet, contrairement aux autres lots de données, de très nombreux changements de référence(s) de hauteur ont été relevés, rendant ainsi très complexe son uniformisation. Comme expliqué au paragraphe « *V.4.3.1. Détection d'erreurs et de sauts* », le zéro du marégraphe et le zéro de l'échelle de marée ont connus des modifications au cours des mesures. Toutefois, théoriquement, il ne devrait pas y avoir de différences entre ces deux zéros. En effet, les documents d'archives indiquent régulièrement la position du zéro de l'échelle du marégraphe, qui est une échelle de contrôle installée à proximité du marégraphe, afin que l'observateur des marées puisse s'assurer que celui-ci fonctionnait correctement. Cette échelle servait également à recalibrer le zéro du

marégraphe, par exemple après un problème mécanique de l'appareil. Le zéro de l'échelle devrait donc être considéré comme identique au zéro du marégraphe (*figure V-58*).

On lit alors la hauteur de la mer à l'échelle de contrôle — dont nous parlerons plus loin. On place le long de la génératrice sur laquelle repose la pointe du crayon une règle divisée dont le zéro occupe la place adoptée pour le zéro de l'échelle de contrôle : ce sera la base du cylindre ou un point placé à une petite distance. On lit alors sur la règle

Figure V-58 : Extrait d'un ouvrage de [Rollet de l'Isle, 1905] indiquant que le zéro de l'échelle de contrôle sert de référence pour caler le zéro du marégraphe. Archives du SHOM, Brest.

Dans la réalité, les nombreuses notes laissées par les observateurs dans les registres de marée ainsi que l'étude approfondie des données montrent que le zéro des marégraphes des forts Enet et Boyard est souvent différent de celui de l'échelle de marée installée à proximité, comme en témoigne, par exemple, l'observateur du fort Enet le 21 septembre 1861 : « *Le 21, en remontant le marégraphe avec les mêmes cordes et les mêmes fils, m'apercevant que le contre-poids du flotteur était plus bas que d'habitude, le 22 vers le bas d'eau, je pris avec un mètre la hauteur de l'eau et je reconnus qu'il y avait une différence de 12 centimètres, c'est-à-dire que la différence du marégraphe avec l'échelle était encore le 18, de 62 centimètres et que le 21 elle était de 72 à 74 centimètres.* »

La méthode la plus simple pour replacer toutes les mesures par rapport au zéro de l'échelle de marée est de disposer de mesures réalisées simultanément à l'échelle et par le marégraphe. En comparant la hauteur d'eau donnée par les deux instruments au même instant, on en déduit facilement la différence existante entre les deux zéros. Malheureusement, ces mesures de contrôle à l'échelle de marée, bien que faisant partie des instructions laissées aux observateurs, n'ont été que très peu réalisées aux forts Enet et Boyard. Deux raisons à cela : d'une part, l'échelle de marée était souvent emportée par la houle et l'observateur était alors dans l'incapacité d'effectuer ces mesures, faute d'échelle, d'autre part les observateurs qui se sont succédés au cours du temps ne mettaient pas tous la même énergie à réaliser leur travail, délaissant certaines tâches comme les mesures de contrôle. Le tableau suivant est une synthèse de ces mesures :

Date de début	Date de fin	Différence de hauteur déduite des mesures entre l'échelle et le marégraphe	Annotations de l'observateur dans le registre des marées
4 juil. 1859, 19h	18 oct. 1859, 11h	-96 cm	
18 oct. 1859, 12h	25 oct. 1859, 21h	-122 cm	
26 oct. 1859, 22h	1 nov. 1859, 13h	-106 cm	
1 nov. 1859, 14h	16 déc. 1859, 12h	-31 cm	
16 déc. 1859, 13h	16 jan. 1860, 13h	-57 cm	
16 jan. 1860, 14h	31 mars 1860, 8h	-47 cm	<i>Le 10, calme plat pas un souffle dans l'air, la mer ne faisant pas une ride, j'en ai profité pour changer la courbe des hauteurs de l'échelle,</i>

			<i>toutes m'ont donnés une différence exacte de 0,32m. La brise reprend, et pour peu que la mer frise ou moutonne, je ne peu plus avoir qu'une moyenne de 0,44m à 0,46m.</i>
31 mars 1860, 9h	21 sept. 1861, 8h	-61 cm	<i>Le 3 observé la hauteur de l'eau à l'échelle de marée, de 5 heures du matin à 3 heures du soir. En portant les hauteurs en courbe sur la feuille du marégraphe, je suis naturellement porté à justifier mes observations et je trouve pendant 4 heures consécutives une différence exacte de 59 à 60 centimètres</i>
21 sept. 1861, 9h	12 oct. 1861, 4h	-72 cm	<i>Le 21, en remontant le marégraphe avec les mêmes cordes et les mêmes fils, m'apercevant que le contre-poids du flotteur était plus bas que d'habitude, le 22 vers le bas d'eau, je pris avec un mètre la hauteur de l'eau et je reconnu qu'il y avait une différence de 12 centimètres, c'est-à-dire que la différence du marégraphe avec l'échelle était encore le 18, de 62 centimètres et que le 21 elle était de 72 à 74 centimètres</i>
12 oct. 1861, 5h	17 sept. 1862, 0h	-43 cm	
17 sept. 1862, 1h	27 sept. 1862, 10h	-53 cm	
1 oct. 1862, 11h	16 oct. 1862, 11h	-88 cm	
16 oct. 1862, 12h	1 nov. 1862, 5h	-50 cm	
1 nov. 1862, 6h	8 nov. 1862, 10h	-60 cm	<i>Dans les derniers avaris du flotteur, la chaine manquant je fus obligé d'allonger le grand fils qui cassa et pour faire exister toujours la même différence ou à peu près entre l'échelle et le marégraphe, je fus obligé de réduire ou raccourcir le petit, pour que les observations courantes soient dans le même rapport qu'avait le passé c'est-à-dire le marégraphe devant compter 60 centimètres de plus que l'échelle ou a peu de chose près comme cela a toujours existé.</i>
8 nov. 1862, 11h	30 déc. 1862, 8h	-50 cm	
30 déc. 1862, 9h	31 jan. 1863, 20h	-41 cm	
31 jan. 1863, 21h	17 août 1864, 12h	-30 cm	<i>J'ai raccourci les fils du chariot et du flotteur afin de mettre le marégraphe en parfaite concordance avec l'échelle de marée, les fils furent raccourci de 0,30m.</i>
Août 1865		-	<i>Le 18 août à 10h45 changé la feuille et réduit le fils du chariot de 75 centimètres, afin de mettre la hauteur donnée par le marégraphe en parfaite concordance avec celle donnée par l'échelle de marée qui fut placé au point donné par Monsieur Bouquet de Lagrille.</i>
Septembre 1867		-	<i>Le 6 septembre, Monsieur Bouquet de Lagrille vint au fort Enet, il trouva les fils du marégraphe 2 centimètres trop courts. Le 16 septembre en changeant la feuille, j'ai remédié à cette erreur et les fils sont en parfaite concordance avec l'échelle de marée, placée dans l'intérieur du puits.</i>
1865-1873 : aucunes mesures de contrôle (Enet)			
1873-1876 : aucunes mesures de contrôle (Boyard)			
1877	1881	0 cm	
28 nov. 1882	11 déc. 1882	-6 cm	
1883-1909 : aucunes mesures de contrôle (Boyard)			

Tableau V-40 : Synthèse des mesures de contrôle réalisées aux forts Enet et Boyard par les observateurs des marées. Si la différence de mesure entre l'échelle et le marégraphe est de -96 cm, par exemple, cela signifie que la hauteur d'eau du marégraphe est trop haute de 96 cm par rapport à celle de l'échelle.

Le *tableau V-40* illustre bien notre problématique : seize sauts ont été répertoriés à partir des informations écrites des registres de marée, de 1859 à 1864 (5 ans). La période non-couverte par ces mesures de contrôle, et pour laquelle nous n'avons aucune information écrite, est de 39 ans (entre 1865 et 1909). Il est donc fort probable que de nombreux sauts soient présents dans la série, sans qu'ils ne puissent être répertoriés de la même façon que dans le *tableau V-36*. Pour les détecter et les corriger, nous avons appliqué la méthode décrite au paragraphe « *V.4.3.1. Détection d'erreurs et de sauts* ». La liste des sauts répertoriés et corrigés serait trop longue à exposer ici ; elle se trouve en annexe. Une fois ce travail effectué, on peut considérer que l'ensemble des mesures des deux séries Enet et Boyard sont rapportées au zéro de leurs échelles de marée.

La deuxième étape consiste à contrôler le calage des zéros des échelles par rapport au plan de référence verticale. Le zéro de ces échelles a-t-il toujours été le même ? Le tableau suivant (*tableau V-41*) est un récapitulatif de la cote des zéros des échelles utilisées aux forts Enet et Boyard entre 1858 et 1909.

Année et Lieu	Altitude ou hauteur du zéro par rapport au				Source
	Zéro Delbalat	Repère « Seuil »	Zéro hydro. de l'île d'Aix (Delbalat, 1858)	NGF-Bourdalouë	
1858 fort Enet	+ 2,088 m	- 7,912 m	- 0,184 m	- 3,469 m	« Plans de nivellement, échelles de marées, seuils, repères, travail de M. Bona-Christave, 1868 », archives du SHD-Marine (Rochefort), cote : 2D ⁴ 5t
1859 fort Enet	+ 1,699 m	- 8,301 m	- 0,573 m	- 3,858 m	« Etude du lit de la Charente - 2 ^{ème} partie : Nivellement général », Delbalat, 1860, archives du SHOM, cotes 12-7-20bis, 12-7-21 et 12-7-22)
1863 fort Enet	+ 1,521 m	- 8,479 m	- 0,751 m	- 4,036 m	« Plans de nivellement, échelles de marées, seuils, repères, travail de M. Bona-Christave, 1868 », archives du SHD-Marine (Rochefort), cote : 2D ⁴ 5t
1868 fort Enet	+ 2,272 m	- 7,728 m	0 m	- 3,285 m	« Plans de nivellement, échelles de marées, seuils, repères, travail de M. Bona-Christave, 1868 », archives du SHD-Marine (Rochefort), cote : 2D ⁴ 5t
1882 fort Boyard	-	-	0 m	- 3,28 m	« Plan détaillé du marégraphe du fort Boyard, port militaire de Rochefort, le 15 mars 1882 », Garnier, archives du SHD-Marine (Rochefort), cote 1K4W4

Tableau V-41 : Récapitulatif de la cote des différents zéros des échelles utilisés pour les mesures du niveau de la mer aux forts Enet et Boyard entre 1859 et 1873.

Comme le montre le *tableau V-41*, la position du zéro de l'échelle utilisée pour caler les mesures du marégraphe a varié deux fois pendant la période de mesures. Les sauts provoqués par ce déplacement d'échelles ont été retrouvés dans les données et les corrections suivantes ont été appliquées afin de les corriger :

- du 4 juillet 1859 à 19h au 12 octobre 1863 à 10h : - 57 cm
- du 12 octobre 1859 à 11h au 18 août 1865 à 10h : - 75 cm

A la suite de cette correction, l'ensemble des mesures des séries Enet et Boyard sont replacées par rapport au zéro hydrographique de l'île d'Aix de l'époque, défini par Delbalat en 1858.

La dernière étape consiste à replacer les mesures par rapport au zéro hydrographique actuel de l'île d'Aix, puis par rapport à celui de La Pallice. Comme le montre la *figure IV-41*, il existe une différence de 18 cm entre le zéro hydrographique actuel et celui de 1858 pour la rade de l'île d'Aix. Il faut donc retirer 18 cm aux mesures des forts Enet et Boyard. De plus, comme pour les lots de mesures de l'île d'Aix, il faudra également retirer 3,6 cm pour se replacer par rapport au zéro hydrographique actuel de l'île d'Aix (*tableau V-42*).

Lots de mesures	Altitude ou hauteur du zéro par rapport au				
	Repère « Seuil »	Zéro hydro. de l'île d'Aix (Delbalat, 1858)	Zéro hydro. de l'île d'Aix (2011)	Zéro hydro. de La Pallice (2011)	NGF-IGN69
forts Enet et Boyard	- 7,728 m	0 m	- 0,180 m	- 0,216 m	- 3,721 m

Tableau V-42 : Récapitulatif de la cote des différents zéros utilisés pour les mesures du niveau de la mer aux forts Enet et Boyard entre 1859 et 1873.

V.4.4.3.3. Phare de Cordouan

Le phare de Cordouan présente moins de difficultés quant à l'uniformisation des zéros des lots de mesures. En effet, la seule correction à prendre en compte est le changement de définition du zéro hydrographique en 1874, par Manen (*figure IV-73*). Celui-ci étant situé 5 cm plus bas que le précédent, il convient d'ajouter 5 cm à l'ensemble des mesures antérieures à 1874.

V.4.5. Contrôle qualité des séries temporelles

Pour réaliser un contrôle qualité de l'ensemble de nos données, nous avons regroupé les lots de mesure en trois catégories : les mesures enregistrées à l'échelle de marée (1775-1892), les mesures enregistrées avec un marégraphe à flotteur de type Chazallon (1859-1909) et les mesures marégraphiques récentes (1941-2011). A la suite des analyses de chaque lot de mesures, un bilan du contrôle qualité a été dressé. Pour une meilleure lisibilité de la qualité des données, nous avons mis en place un code de chiffres et de couleur, inspiré de celui recommandé par GLOSS [2009] pour qualifier la qualité mensuelle des données du niveau marin. Ce code est défini dans le *tableau V-43* ci-dessous. Les lots de mesures utilisés ci-après ont tous été recalés à la même référence verticale (zéro hydrographique de La Pallice), et sont exprimés dans le même référentiel de temps (UTC). A la suite du contrôle qualité, les lots de La Pallice et du Vieux port de La Rochelle seront fusionnés pour construire la série composite de La Rochelle. Les lots

de l'île d'Aix, du fort Enet et du fort Boyard seront associés pour former la série composite Aix-Enet-Boyard. De même, les différents lots du phare de Cordouan formeront la série de Cordouan.

Code	Signification	Définition
0	Pas de contrôle	Aucune procédure de contrôle n'a été appliquée
1	Bonne qualité	Le contrôle qualité a montré que la valeur est de qualité
2	Probablement bonne	Il subsiste un doute sur la qualité
3	Probablement mauvaise	La valeur est suspectée d'être de mauvaise qualité
4	Mauvaise qualité	Il ne fait aucun doute que la valeur est de mauvaise qualité
9	Absence de données	Données insuffisantes ou absentes pour un contrôle de la qualité

Tableau V-43 : Code de chiffres et de couleurs qualifiant la qualité mensuelle des données du niveau marin. Adapté de GLOSS [2009].

V.4.5.1. Lots de mesures enregistrées à l'échelle de marée

V.4.5.1.1. La Rochelle Vieux port : 1775-1776

Pour contrôler la qualité du lot de mesures de 1775-1776, nous allons utiliser deux méthodes différentes. La première nous donnera une indication sur la précision des mesures effectuées par l'observateur, le chevalier de Vialis. En effet, les hauteurs des pleines mers étaient lues sur une échelle de marée gravée en Pieds et en pouces (cf. IV.1.5.1. *Le Vieux port de La Rochelle*) et il n'est pas toujours facile de réaliser cette lecture, surtout lorsque les conditions météorologiques sont mauvaises. De plus, les mesures ayant été entièrement réalisées par la même personne, il est possible qu'un systématisme ait été introduit : par exemple, le chevalier pouvait arrondir systématiquement, soit au pouce supérieur, soit au pouce inférieur et il est probable qu'il ait toujours eu le même raisonnement. Quelle conséquence en tirer quant à la précision des mesures ? Pour le savoir, nous allons observer la distribution des valeurs en pouces.

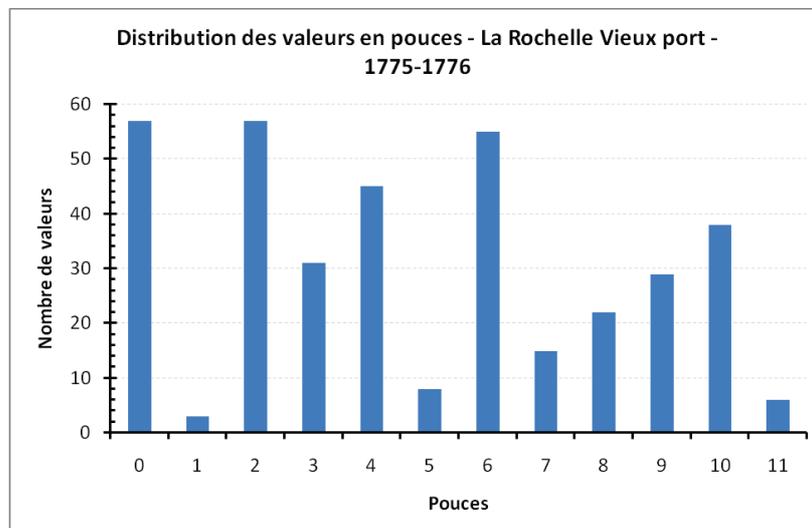


Figure V-62 : Distribution des valeurs en pouces pour l'ensemble des mesures 1775-1776.

La *figure V-62* montre la répartition des valeurs de pouces utilisées pour l'ensemble des mesures de 1775-1776 (pour rappel : 1 Pied = 12 pouces). On remarque que les quatre valeurs les plus utilisées sont 0, 2, 4 et 6 pouces. Dans une moindre mesure, les valeurs 3, 9 et 10 pouces sont également utilisées. Par contre, les valeurs 1, 5 et 11 pouces ne sont presque pas utilisées, montrant ainsi que le chevalier arrondissait la hauteur d'eau, soit au Pied inférieur ou supérieur, soit à un demi-Pied (6 pouces). Globalement, on peut estimer que la précision des mesures réalisées en 1775-1776 est de l'ordre de ± 1 pouce ($\approx \pm 3$ cm).

Il aurait été intéressant de pouvoir réaliser le même travail avec les horaires des pleines mers, afin de déterminer si le chevalier y avait également introduit un systématisme, malheureusement les horaires n'ont pas été notés par de Vialis. Cette méthode d'observation de la distribution des valeurs en pouces a également été utilisée pour quantifier la qualité des mesures réalisées entre 1768 et 1793 à Liverpool [Woodworth, 1999a] et entre 1757 et 1792 à Brest [Pouvreau, 2008]. A Liverpool, la précision des mesures est sensiblement identique à celle du Vieux port de La Rochelle, de l'ordre de ± 1 ou 2 pouce(s). A Brest, elle est légèrement moins bonne : ± 3 pouces.

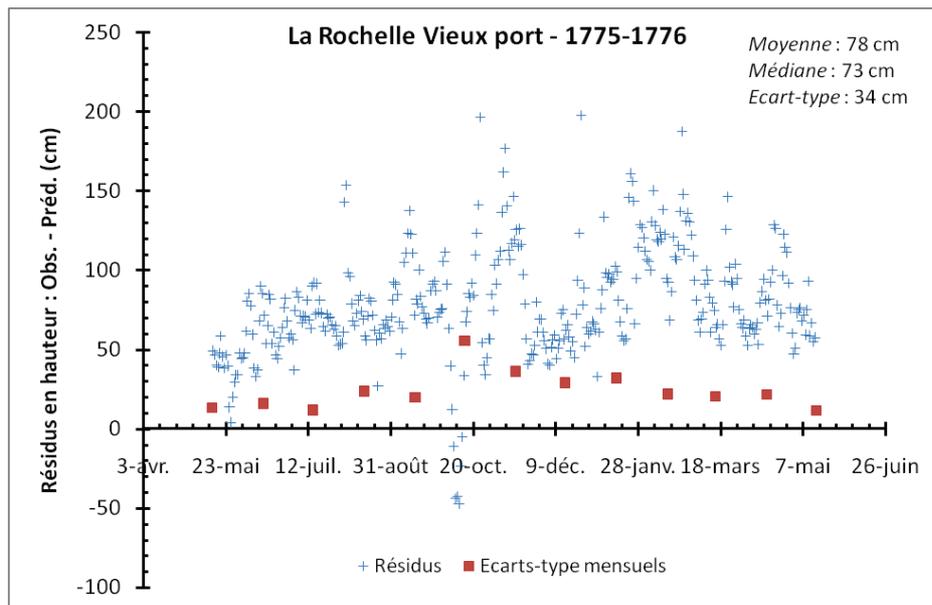


Figure V-63 : Résidus en hauteur pour les mesures de pleine mer enregistrées entre 1775 et 1776 au Vieux port de La Rochelle. Les prédictions ont été réalisées à partir du lot de mesures de 1863-1874.

La deuxième méthode utilisée pour contrôler la qualité du jeu de données de 1775-1776 consiste à étudier les résidus entre les pleines mers diurnes observées et les pleines mers diurnes prédites. Le jeu de données le plus proche de 1775 et pouvant être utilisé pour la prédiction des pleines mers est celui de 1863-1874 également enregistré au Vieux port. Les prédictions ont été calculées à la suite d'une analyse harmonique réalisée avec le programme *mas* (cf. *V.2.1.1. mas*). La pleine mer diurne prédite était choisie comme celle étant la plus proche de 12h. Les résultats sont présentés sur la *figure V-63*. Pour caractériser ces résultats, trois paramètres sont calculés : la moyenne, la médiane et l'écart-type. La moyenne

arithmétique simple étant influencée par les valeurs extrêmes, il peut être utile de posséder aussi l'information sur la valeur de la médiane, qui représente la valeur intermédiaire d'une série. Quant à l'écart-type, il nous informe sur la dispersion des valeurs autour de la moyenne.

Théoriquement, si le zéro des lots de mesures de 1775-1776 et 1863-1874 est identique et si le niveau moyen de la mer n'a pas évolué entre ces deux périodes, alors la moyenne des résidus devrait être centrée sur 0 cm. Ce n'est pas le cas, la moyenne étant à + 78 cm et la médiane à + 73 cm, ce qui signifie que le niveau moyen des hauteurs d'eau de 1775-1776 est plus haut d'environ 75 cm que celui de 1863-1874. Comme il est extrêmement peu probable que le niveau moyen réel de la mer ait diminué d'autant en un peu moins d'un siècle, ce résultat prouve que le zéro des mesures de 1775-1776 n'a pas été correctement replacé par rapport au zéro hydrographique actuel. L'hypothèse que nous avons prise (cf. *IV.1.5.1. Le Vieux port de La Rochelle*), selon laquelle le zéro des mesures se situait à la base du radier du canal Maubec ne semble donc pas être correcte. Malheureusement, n'ayant retrouvé, pour le moment, aucun document mentionnant la position du zéro utilisé pour ces mesures, nous ne pourrions pas les utiliser en l'état pour la reconstruction d'une série composite de La Rochelle.

Sans toutefois avoir de certitudes, on peut tout de même tenter d'estimer l'erreur commise lors du recalage du zéro des mesures de 1775-1776. Les hauteurs d'eau sont plus hautes d'environ 75 cm que celles de 1863-1874. Or, sur cette même période, des travaux montrent que le niveau moyen de la mer a augmenté d'environ 0,7 mm/an au nord de l'Espagne [Woodworth *et al.*, 2011b], 1 mm/an à Brest [Pouvreau, 2008], 1,5 mm/an à Liverpool [Woodworth, 1999b] et 0,5 mm/an à Stockholm [Ekman, 2003]. On peut donc prendre l'hypothèse que le niveau marin a augmenté d'environ 8 cm à La Rochelle entre 1775-1776 et 1863-1874. Par conséquent, l'erreur commise sur le recalage du zéro serait d'environ + 83 cm.

L'écart-type annuel des résidus, seul indicateur ici de la qualité des mesures réalisées, est de 34 cm. Cette valeur semble élevée à première vue et représente plus du double de la valeur de l'écart-type (15 cm) des mesures réalisées à Brest entre 1757 et 1792 [Pouvreau, 2008]. En détaillant le calcul de l'écart-type par mois (*tableau V-44*), on peut se faire une idée plus précise de la qualité des mesures : l'écart-type du mois d'octobre 1775 est de 56 cm, ce qui signifie soit qu'il y a eu un grand nombre de fortes surcotes de pleine mer ce mois-ci, soit que la qualité des mesures est médiocre. De même, les mois de novembre 1775, décembre 1775 et janvier 1776 présentent des écarts-types élevés, proches ou supérieurs à 30 cm. Les recherches dans les documents d'archives n'ont pas permis de détecter d'importantes tempêtes au cours de l'hiver 1775-1776, ce qui ne signifie pas qu'il n'y en a pas eu. Malgré tout, l'hypothèse la plus probable pour expliquer ces écarts-types élevés serait donc une mauvaise qualité des mesures. Ce qui peut s'expliquer simplement : sans toutefois provoquer d'importantes surcotes, le climat hivernal engendre une plus forte agitation du plan d'eau du Vieux port, rendant plus difficile la tâche consistant à prendre la mesure de la pleine mer.

• *Bilan*

Le contrôle qualité du lot de mesures enregistrées au Vieux port de La Rochelle entre 1775 et 1776 a été réalisé en utilisant deux méthodes : l'étude de la distribution des valeurs en pouces et l'étude des résidus en hauteur entre les pleines mers observées et prédites.

- *Précision des mesures* $\approx \pm 3$ cm (± 1 pouce)

- *Ecart-types mensuels des résidus* :

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Octobre	Nov.	Déc.
1775					14	16	12	24	20	56	36	30
1776	32	22	21	22	12							

Tableau V-44 : Ecart-types mensuels des résidus de pleine mer au Vieux port de La Rochelle. Le code couleur correspond à l'indice de qualité défini par le tableau V-43.

V.4.5.1.2. Île d'Aix et La Rochelle Vieux port : 1824

Les deux lots de mesures de l'île d'Aix et du Vieux port de La Rochelle ont été enregistrés dans le cadre des campagnes hydrographiques de Beutemps-Beaupré et ont donc été réalisés avec les mêmes instructions, à l'aide d'échelles de marée graduées en Pieds et en pouces. La série de l'île d'Aix a débuté plus tôt (13 mai) que celle de La Rochelle (26 juin), mais les deux prennent fin en même temps (respectivement 1^{er} et 3 octobre). De la même façon que pour le lot de mesures de 1775-1776, nous allons étudier la distribution des valeurs en pouces des deux séries, afin de déterminer la précision des mesures. Les figures V-64a et b montrent que, pour les deux sites, la distribution des valeurs en pouces est homogène sur l'ensemble des mesures. Aucune valeur de pouces n'est privilégiée par rapport à une autre, prouvant ainsi le soin apporté aux mesures par les observateurs. Nous pouvons donc estimer la précision des mesures des lots de 1824 à $\pm 0,5$ pouce ($\approx \pm 1,4$ cm), précision identique à celle des mesures de Brest de la même époque [Pouvreau, 2008].

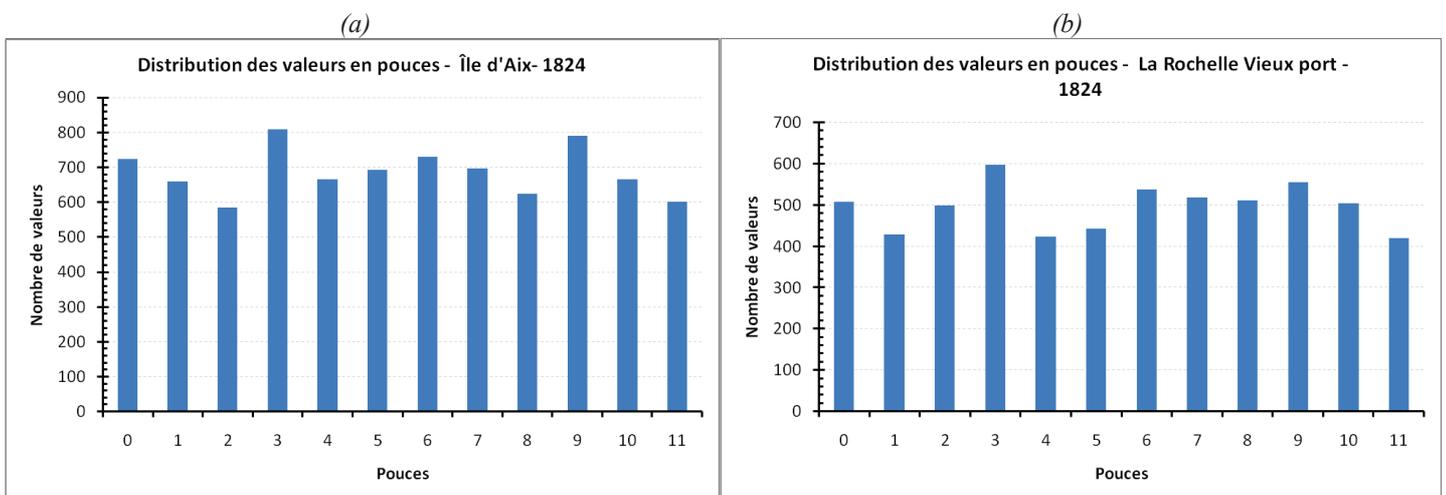


Figure V-64 : Distribution des valeurs en pouces pour l'ensemble des mesures de 1824 à l'île d'Aix (a) et au Vieux port de La Rochelle (b).

Le fait d'avoir deux séries du niveau de la mer réalisées en même temps nous donne la possibilité d'une comparaison directe des mesures. La *figure V-65* présente les résultats de la comparaison des moyennes journalières du niveau marin à l'île d'Aix et au Vieux port. Les moyennes journalières ont été calculées avec une moyenne arithmétique simple, car nous ne pouvons pas utiliser de filtres ici (en raison des lacunes nocturnes). Les courbes représentent les moyennes journalières du niveau marin à l'île d'Aix (bleue) et au Vieux port de La Rochelle (rouge). La courbe noire représente la différence des anomalies des moyennes journalières du niveau marin entre l'île d'Aix et le Vieux port.

La différence d des anomalies des moyennes journalières est définie par :

$$d_{ab}(i) = r_a(i) - r_b(i) \quad (5.18)$$

Avec a et b : indices représentant les deux stations comparées ; i : jour de la période étudiée. Et où les anomalies sont la différence entre la moyenne du niveau marin sur l'ensemble d'une période donnée M (ici : 26 juin - 1^{er} octobre) et les moyennes journalières j :

$$r_{a,b}(i) = j_{a,b}(i) - M \quad (5.19)$$

Avec j : moyenne journalière ; M : moyenne du niveau marin sur une longue période de données.

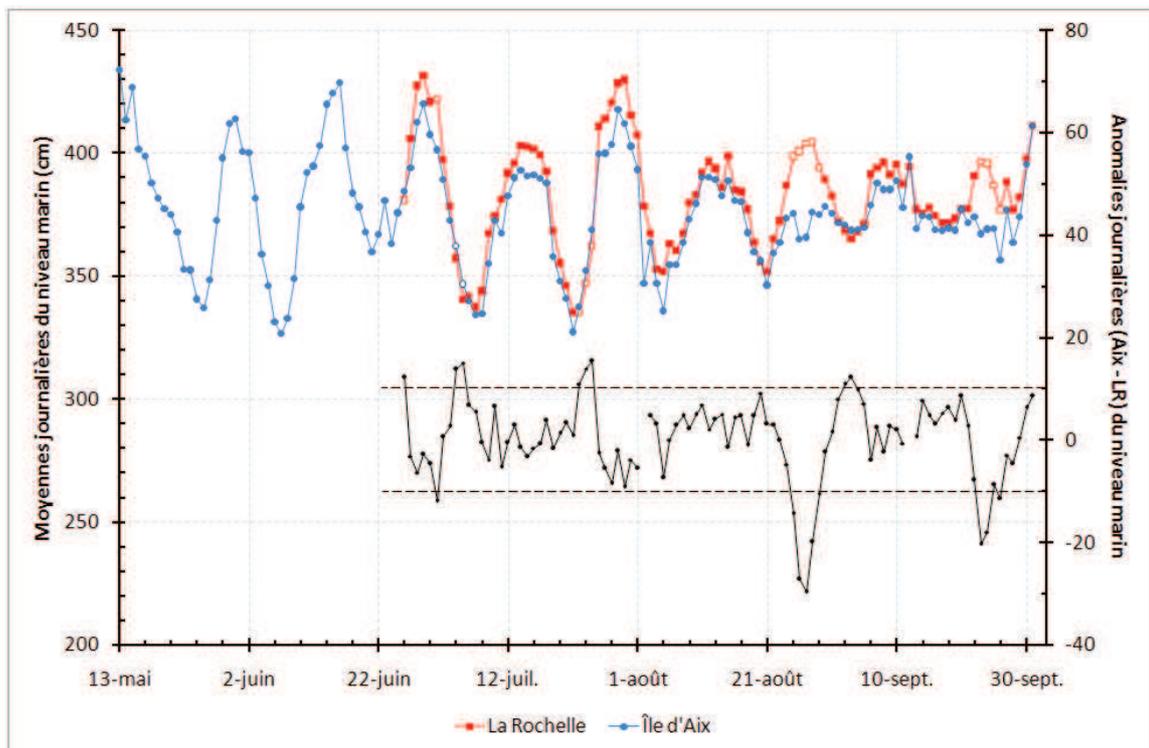


Figure V-65 : Moyennes journalières simples (non filtrées) du niveau marin à l'île d'Aix (bleu) et au Vieux port de La Rochelle (rouge), les points et les carrés blancs indiquent une moyenne journalière suspecte. Anomalies journalières d'Aix moins La Rochelle (noir), les lignes pointillées noires marquent le seuil à partir duquel une moyenne journalière est considérée comme suspecte.

La courbe de la différence des anomalies des moyennes journalières (courbe noire sur la *figure V-65*) est un bon indicateur de la qualité des deux séries. En effet, les deux stations étant proches géographiquement, les variations journalières du niveau marin doivent être cohérentes entre elles.

L'expérience nous a amené à définir le seuil de ± 10 cm au-delà duquel une valeur d'anomalie est considérée comme suspecte. A l'aide de ce seuil, nous avons considéré 17 valeurs comme suspectes, répertoriées dans le *tableau V-45*. Reste maintenant à déterminer si la moyenne journalière suspecte est celle de l'île d'Aix ou de La Rochelle. Pour cela, une vérification visuelle des courbes de hauteurs d'eau observées et prédites est nécessaire. Le *tableau V-45* répertorie également les explications de ces valeurs suspectes.

Île d'Aix / Vieux port de La Rochelle : 1824		
Date(s)	Code qualité	Description des données
26 juin	4	LR : pas d'enregistrement de la BM (arrêt à 1,57 m)
1 ^{er} juillet	4	LR : pas d'enregistrement de la BM de vive-eau (arrêt à 1,59 m)
4 et 5 juillet	2	Aucune anomalie détectée dans les résidus
23, 24 et 25 juillet	2	Aucune anomalie détectée dans les résidus
25, 26, 27, 28 et 29 août	4	LR : pas d'enregistrement des BM de vive-eau (arrêt à 1,49 m)
2 et 3 septembre	2	Aucune anomalie détectée dans les résidus
23, 24, 25 et 26 septembre	4	LR : pas d'enregistrement des BM de vive-eau (arrêt à 1,49 m)

Tableau V-45 : Récapitulatif et explication des moyennes journalières suspectes des séries de l'île d'Aix et du Vieux port de La Rochelle, en 1824.

Cette méthode a permis de détecter un problème récurrent au Vieux port de La Rochelle : les basses mers de vive-eau ne sont pas enregistrées. Pour exemple, la *figure V-66* montre la courbe des hauteurs d'eau observées (bleue) et prédites (verte) à l'île d'Aix et à La Rochelle les 26 et 27 août 1824. On voit clairement que les basses mers ne sont pas enregistrées à La Rochelle. Pour rappel, à La Rochelle, les mesures étaient effectuées à l'échelle du bassin à flot intérieur du Vieux port, qui est fréquemment soumis à des problèmes d'envasement. L'hypothèse la plus probable est donc que le bas de l'échelle de marée se trouvait envasé lors de ces basses mers de vive-eau, empêchant ainsi l'observateur de relever la hauteur d'eau à l'échelle.

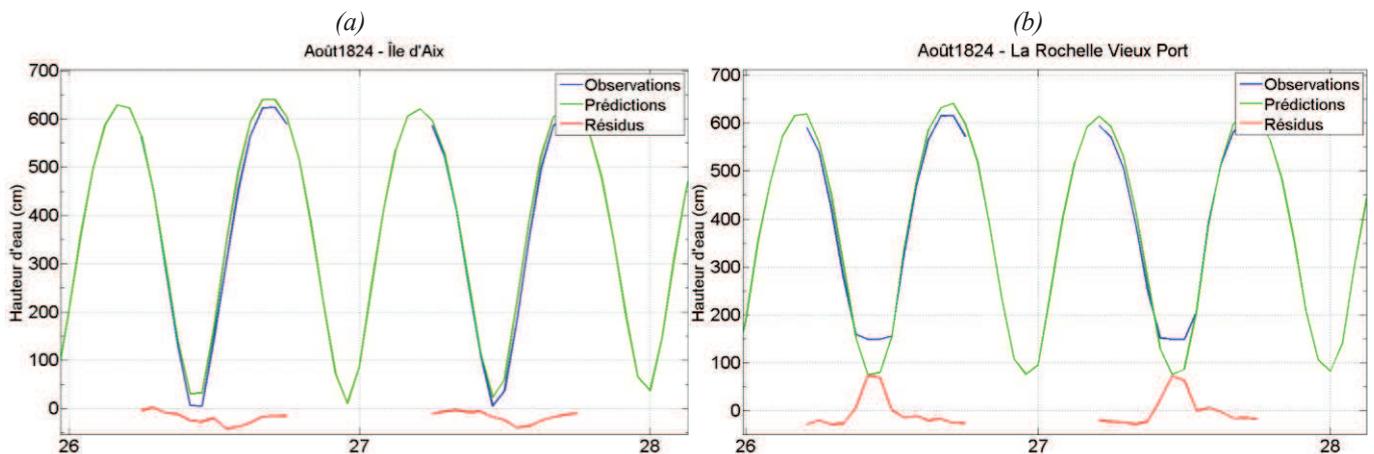


Figure V-66 : Courbes des hauteurs d'eau observées (bleue) et prédites (verte) des 26 et 27 août 1824 à l'île d'Aix (a) et au Vieux port de La Rochelle (b).

Dernière méthode utilisée pour vérifier la qualité des données de 1824 : l'étude des résidus en hauteur et en temps. Afin d'obtenir des résultats comparables, l'analyse harmonique ayant servi à calculer les prédictions a été réalisée sur une même période (1863-1874) pour les deux sites (Vieux port de La Rochelle et Enet-Boyard). Les résidus sur les hauteurs horaires sont présentés sur la *figure V-67*. Pour l'île d'Aix, la moyenne et la médiane des résidus sont de - 4 cm, avec un écart-type de 17 cm. Pour La Rochelle, la moyenne des résidus est de + 2 cm, la médiane est de + 1 cm et l'écart-type est de 15 cm. Ces valeurs sont cohérentes entre elles et les écarts-types sont du même ordre de grandeur que ceux trouvés à Brest (15 cm) pour la même période [Pouvreau, 2008]. Le détail des écarts-types par mois est détaillé dans le *tableau V-47*.

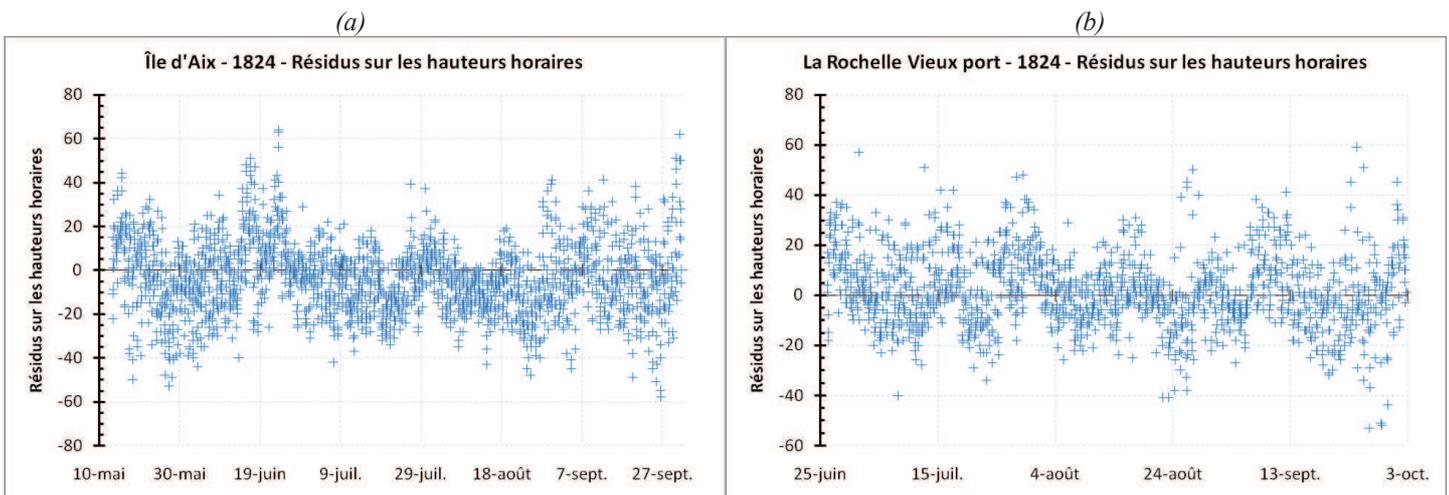
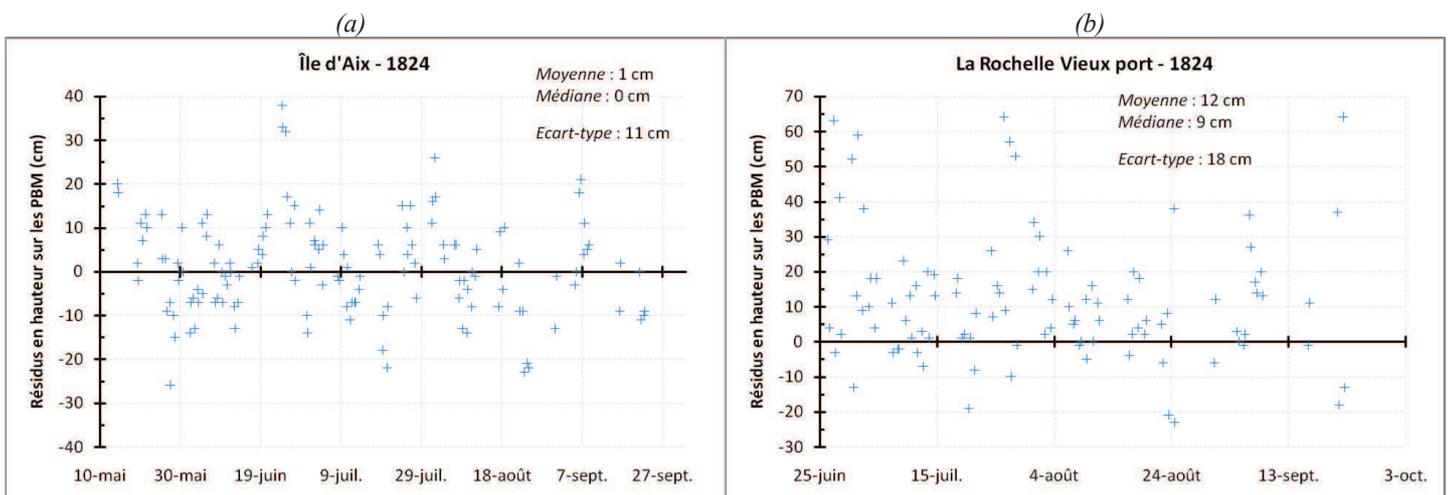


Figure V-67 : Résidus sur les hauteurs horaires pour les mesures enregistrées en 1824 à l'île d'Aix (a) et au Vieux port de La Rochelle (b). Les prédictions ont été réalisées à partir des lots de mesures d'Enet-Boyard (période 1863-1874) et du Vieux port de La Rochelle (période 1863-1874).

Le même exercice a été réalisé à l'aide des pleines et basses mers extraites des hauteurs horaires et des pleines et basses mers prédites. La prédiction s'est effectuée à partir des mêmes fichiers que pour l'analyse des résidus sur les hauteurs horaires. Les résultats du calcul des résidus en hauteur et en temps sont présentés sur la *figure V-68* et résumés dans le *tableau V-46*.



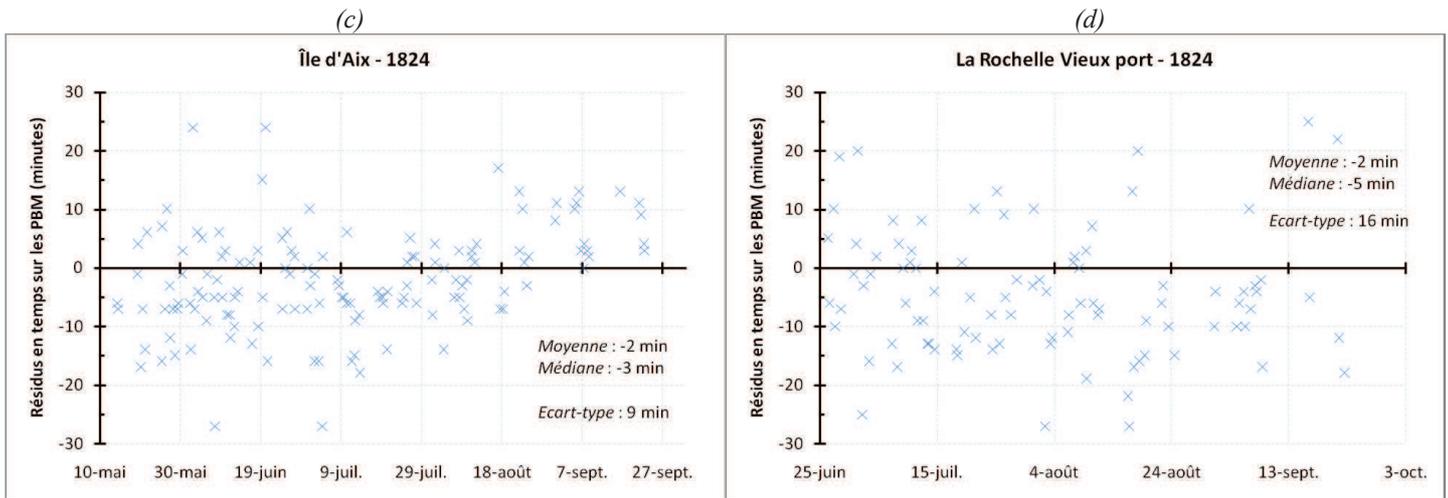


Figure V-68 : Résidus sur les hauteurs des pleines et basses mers pour les mesures enregistrées en 1824 à l'île d'Aix (a) et au Vieux port de La Rochelle (b). Résidus en temps sur l'horaire des pleines et basses mers pour les mesures enregistrées en 1824 à l'île d'Aix (c) et au Vieux port de La Rochelle (d) Les prédictions ont été réalisées à partir des lots de mesures d'Enet-Boyard (période 1863-1874) et du Vieux port de La Rochelle (période 1863-1874).

	Résidus en hauteur			Résidus en temps		
	Moyenne	Médiane	Ecart-type	Moyenne	Médiane	Ecart-type
Île d'Aix 1824	1 cm	0 cm	11 cm	- 2 min	- 3 min	9 min
La Rochelle 1824	12 cm	9 cm	18 cm	- 2 min	- 5 min	16 min

Tableau V-46 : Récapitulatif des calculs des résidus en hauteur et en temps sur les pleines et basses mers à l'île d'Aix et au Vieux port de La Rochelle en 1824.

Les résultats de l'île d'Aix sont corrects, montrant la qualité des mesures réalisées en 1824. Quant aux résultats du Vieux port de La Rochelle, la différence avec l'île d'Aix et les écarts-types plus importants s'expliquent principalement par le problème détecté de lecture d'échelle lors des basses mers de vive-eau.

• Bilan

Le contrôle qualité des lots de mesures enregistrées à l'île d'Aix et au Vieux port de La Rochelle en 1824 a été réalisé en utilisant trois méthodes : l'étude de la distribution des valeurs en pouces, la comparaison entre deux stations proches (« Buddy checking ») et l'étude des résidus en hauteur et en temps sur les hauteurs horaires.

- Précision des mesures $\approx \pm 1,4$ cm ($\pm 0,5$ pouce)
- Problème(s) détecté(s) : basses mers de vive-eau non enregistrées à La Rochelle
- Ecart-types mensuels des résidus à partir des hauteurs horaires :

		Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1824	Île d'Aix					19	18	13	14	18	20		
	La Rochelle						13	15	12	16	14		

Tableau V-47 : Ecart-types mensuels des résidus à l'île d'Aix et au Vieux port de La Rochelle en 1824. Le code couleur correspond à l'indice de qualité défini par le tableau V-43.

V.4.5.1.3. La Rochelle Vieux port et La Pallice : 1887-1892

Les mesures réalisées entre 1887 et 1892 ont également été enregistrées dans des conditions similaires. En effet, dès 1881, la construction du port de La Pallice débute, avec pour objectif de devenir le port de commerce principal de La Rochelle, au détriment du Vieux port. Des mesures des pleines et basses mers seront alors réalisées sur les deux sites entre 1887 et 1892 à l'aide d'échelles de marée (seules les données d'octobre 1890 à 1892 ont été numérisées pour La Pallice). Nous verrons que la qualité de ces deux jeux de données est très proche. Commençons par étudier la distribution des valeurs en centimètres des deux séries, afin de déterminer la précision des mesures. Les figures V-69a et b montrent que, pour les deux sites, la distribution des valeurs en centimètres est très hétérogène puisque la valeur 0 cm est très largement utilisée par rapport aux autres valeurs, qui sont pratiquement inexistantes. Seule la valeur de 5 cm est quelquefois usitée, mais en moyenne trois fois moins que la valeur 0 cm. Nous pouvons donc estimer la précision des mesures, pour les deux sites, à ± 5 cm. L'horaire des pleines et basses mers ayant été notés dans les registres, nous pouvons également en estimer sa précision. Les figures V-69c et d montrent que la distribution des valeurs en minutes est homogène pour l'ensemble des mesures sur les deux sites. Aucun groupe de valeurs ne semble privilégier par rapport à un autre, ce qui nous amène à estimer la précision des horaires notés à ± 1 min.

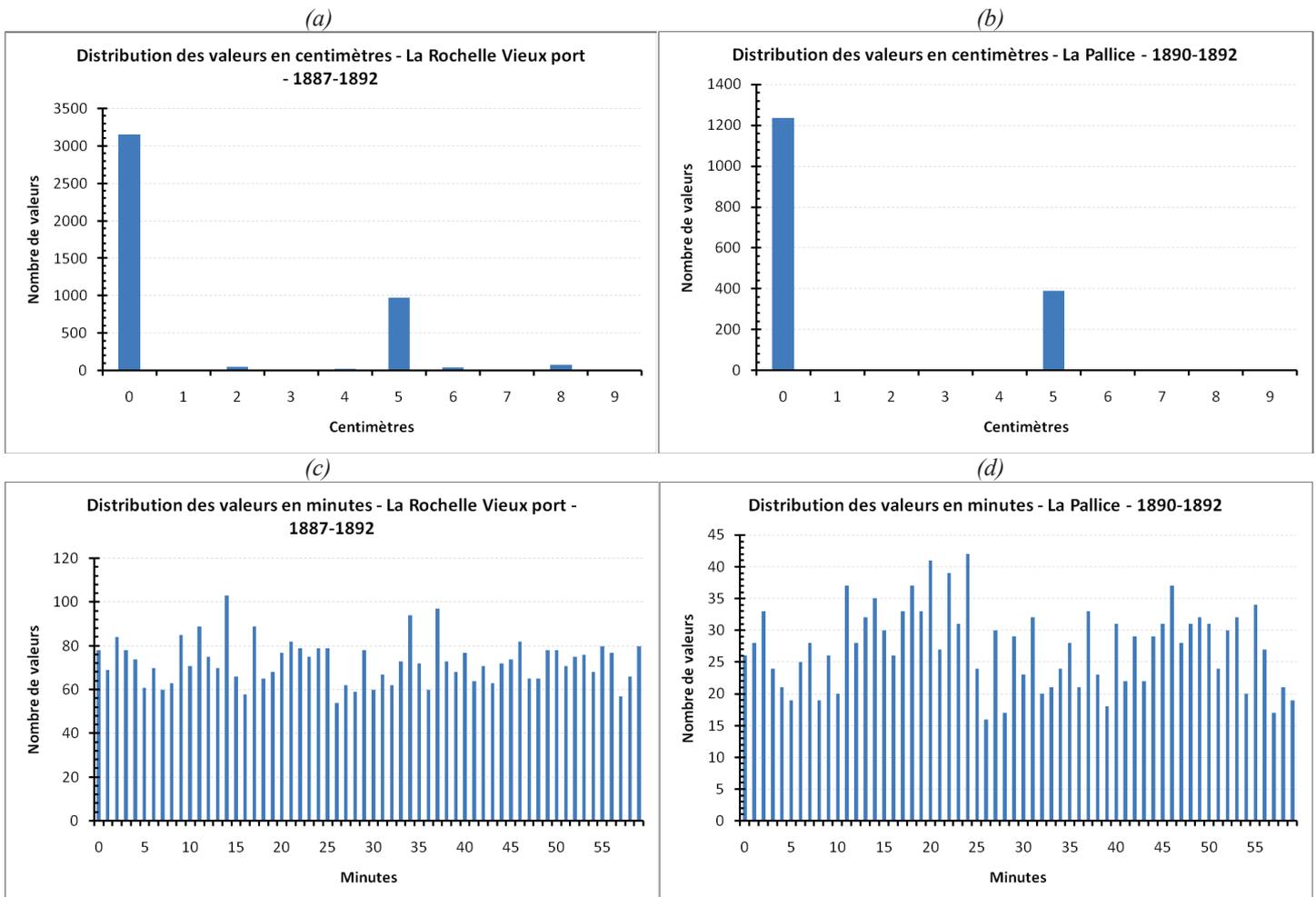


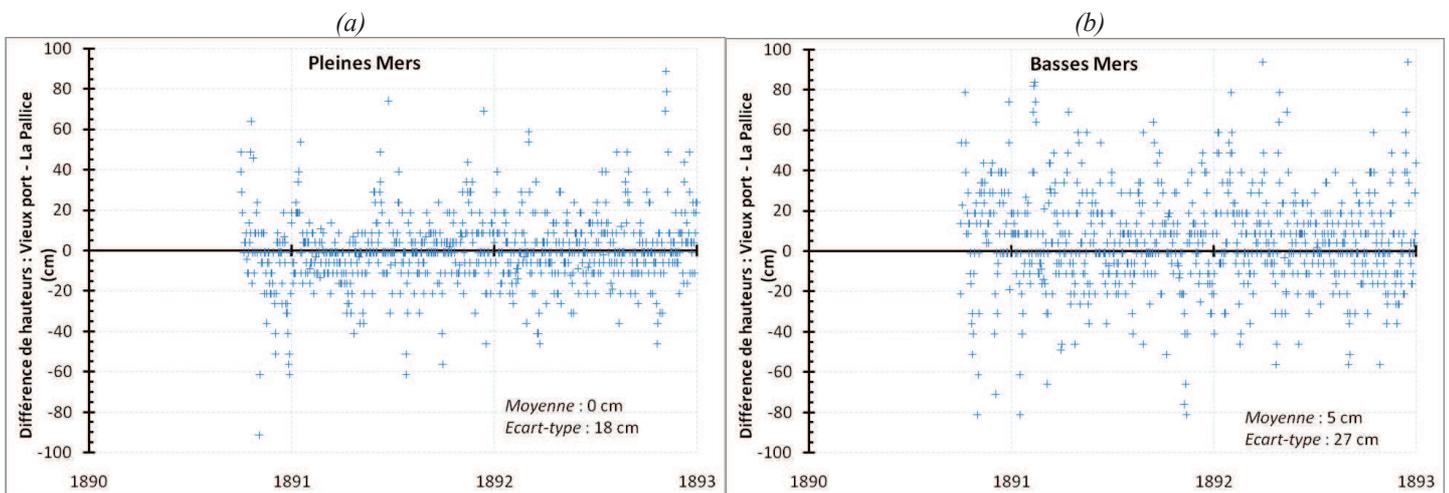
Figure V-69 : Distribution des valeurs en centimètres pour l'ensemble des mesures de 1887-1892 au Vieux port de La Rochelle (a) et de 1890-1892 à La Pallice (b). Distribution des valeurs en minutes pour l'ensemble des mesures de 1887-1892 au Vieux port de La Rochelle (c) et de 1890-1892 à La Pallice (d).

De la même façon que pour les lots de mesures de 1824, nous avons réalisé une comparaison directe des mesures réalisées simultanément au Vieux port et à La Pallice. La comparaison porte sur les hauteurs des pleines et basses mers (*figure V-70a et b*), ainsi que sur les horaires des pleines et basses mers (*figure V-70c et d*). Les résultats sont synthétisés dans le *tableau V-48*.

		Pleines mers				Basses mers			
		Moyenne	Médiane	Mode	Ecart-type	Moyenne	Médiane	Mode	Ecart-type
Hauteur		0 cm	- 1,2 cm	- 1,2 cm	18 cm	5 cm	- 1,2 cm	3,8 cm	27 cm
Temps	Jusqu'à janv. 1891	- 0,3 min	0 min	0 min	3,2 min	26 min	27 min	27 min	10 min
	A partir de fév. 1891					- 0,3 min	0 min	0 min	4 min

Tableau V-48 : Récapitulatif des résultats des comparaisons directes en hauteur et en temps : pleines et basses mers du Vieux port de La Rochelle moins celles du port de La Pallice (1890-1892).

En ce qui concerne la différence de hauteurs d'eau sur les pleines et basses mers, globalement les moyennes sont proches de 0 cm, ce qui signifie que les zéros des deux jeux de mesures ont été correctement replacés par rapport au zéro hydrographique actuel. Les écarts-types sont différents entre les pleines mers (18 cm) et les basses mers (27 cm), ce qui peut aussi s'expliquer par un problème d'envasement au pied de l'échelle du bassin à flot extérieur du Vieux port de La Rochelle. De façon générale, les mesures sont de bonne qualité, et ces écarts-types montrent que la hauteur d'eau mesurée est la même sur les deux sites, tout en gardant à l'esprit que la précision des mesures couvre une amplitude de 10 cm. Les résultats sur la différence de temps sont plus surprenants : on constate en effet que, quasi-systématiquement, l'horaire noté pour les pleines et basses mers est identique pour les deux sites. Ce qui signifie que (ceci est une hypothèse) l'horaire était probablement mesuré sur l'un des deux sites et appliqué à l'autre. De plus, on constate une différence systématique de 27 minutes entre les heures du Vieux port et de La Pallice, d'octobre 1890 à fin janvier 1891. Cette différence est probablement une erreur qu'il conviendra de corriger, car elle ne semble correspondre à aucune logique.



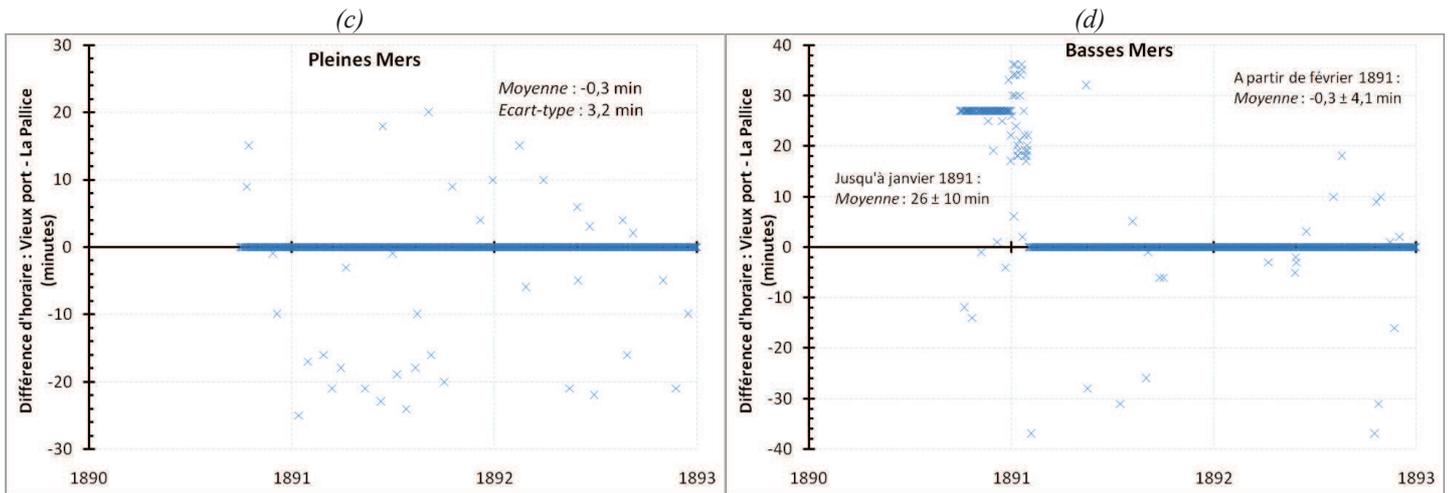


Figure V-70 : Différence de hauteurs d'eau des pleines (a) et basses mers (b) entre le Vieux port de La Rochelle et La Pallice et différence de temps sur l'horaire des pleines (c) et basses mers (d) (1890-1892).

Après avoir réalisé des comparaisons des deux sites, nous allons maintenant estimer la qualité des jeux de données individuellement, en étudiant les résidus (observations - prédictions). La figure V-71 présente les résidus en hauteur et en temps pour le Vieux port de La Rochelle, entre 1887 et 1892. Les résultats sont synthétisés dans le tableau V-49.

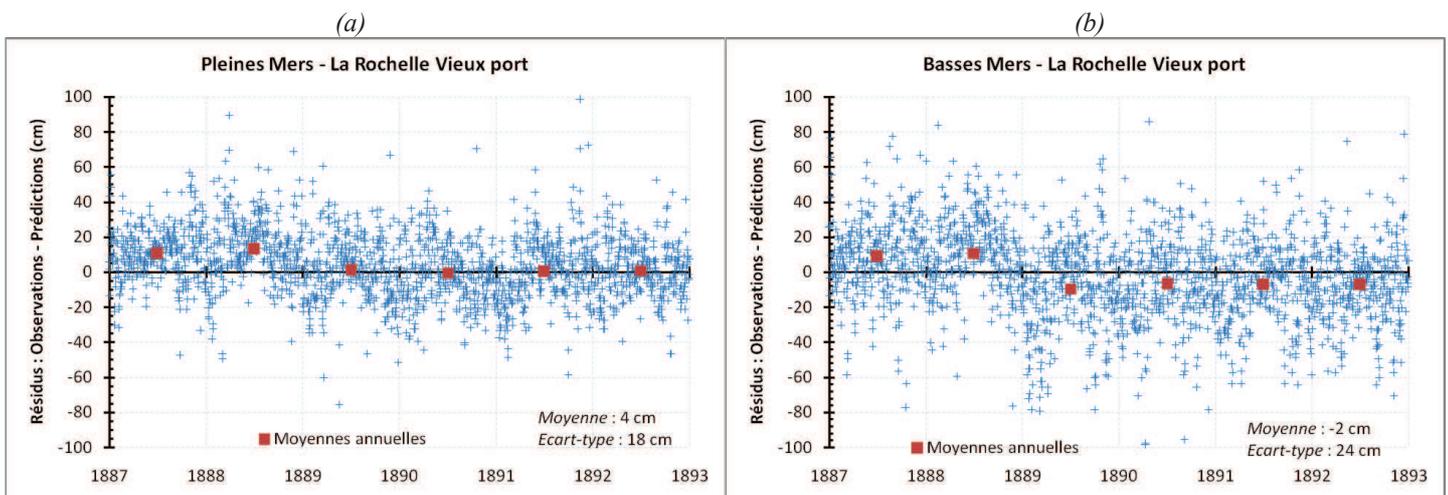
	Résidus en hauteur (cm)				Résidus en temps (min)			
	Moyenn e	Médiane	Mode	Ecart- type	Moyenn e	Médiane	Mode	Ecart- type
Pleines mers	4	4,5	4,5	18	15	16	18	20
1887	10	10,5	17,5	15	14	16	19	18
1888	13	11,5	2,5	18	14	15	23	19
1889	1	0,5	5,5	18	15	16	28	20
1890	- 1	- 0,5	1,5	17	17	17	18	22
1891	0	- 0,5	- 10,5	19	16	17	23	23
1892	1	0,5	- 6,5	15	14	14	26	22
Basses mers	- 2	- 0,5	5,5	24	18	18	20	11
1887	9	8,5	13,5	21	17	17	21	11
1888	11	10,5	0,5	21	18	18	24	14
1889	- 10	- 8,5	- 16,5	26	18	18	3	11
1890	- 7	- 6,5	5,5	25	44	44	35	11
1891	- 7	- 5,5	1,5	21	21	20	20	9
1892	- 7	- 6,5	6,5	21	19	18	17	8

Tableau V-49 : Récapitulatif des calculs des résidus en hauteur et en temps sur les pleines et basses mers du Vieux port de La Rochelle entre 1887 et 1892.

Tout d'abord, en observant les moyennes annuelles des résidus, on peut remarquer deux périodes distinctes : 1887-1888 (moyenne centrée sur 10,5 cm) et 1889-1892 (moyenne centrée sur 0 cm pour les pleines mers et centrée sur - 7 cm pour les basses mers). Ce qui veut dire que les hauteurs des pleines et basses mers de 1887 et 1888 sont trop hautes d'environ 10 cm et que les hauteurs des basses mers de 1889 à 1892 sont trop basses d'environ 7 cm par rapport à la prédiction. L'hypothèse la plus probable

pour expliquer cette différence de 10 cm sur les pleines mers est un changement de la position du zéro de l'échelle de marée utilisée pour les mesures, peut-être après un remplacement de celle-ci. Ainsi, pour rapporter l'ensemble des mesures par rapport au zéro hydrographique actuel de La Pallice, il faut retirer 10,5 cm aux hauteurs des pleines mers du Vieux port de La Rochelle de 1887 à 1888. Concernant la différence de 7 cm sur les basses mers, si cela était dû à un changement du zéro de l'échelle, la différence s'observerait également sur les hauteurs des pleines mers, or ce n'est pas le cas. Sans explication à proposer, nous conserverons donc les hauteurs des basses mers en l'état, tout en gardant à l'esprit qu'il subsiste un doute sur la référence de hauteur utilisée pour mesurer les basses mers du Vieux port de 1889 à 1892.

Ensuite, d'une façon plus générale, les résidus en hauteur sur les pleines mers sont plutôt bons, l'écart-type de 18 cm étant cohérent avec celui de 1824. Quant aux basses mers, l'écart-type plus important, de 24 cm peut s'expliquer par la difficulté à mesurer les basses mers lorsque l'eau n'atteint plus les graduations de l'échelle de marée, conséquence d'un fort envasement du port et d'une marée de vive-eau. Pour plus de détails, les écarts-types mensuels sont synthétisés dans le *tableau V-51*. Les moyennes des résidus en temps sont cohérentes entre les pleines et basses mers, globalement, celles-ci ont eu lieu environ 17 minutes plus tard que l'horaire prédit. On retrouve également le décalage de 27 minutes des mesures de janvier 1890 à fin janvier 1891 (*figure V-71d*). La correction à appliquer est donc de - 27 minutes aux heures des basses mers du Vieux port de La Rochelle entre le 1^{er} janvier 1890 et le 31 janvier 1891. A noter que l'écart-type des résidus en temps des pleines mers est presque deux fois plus grand que celui des basses mers. L'explication est peut-être à chercher du côté des marées de morte-eau. En effet, lors de celles-ci, l'asymétrie tidale provoque un aplatissement de la pleine mer, voire même une double pleine mer (cf. *VI.1.1.2. Asymétrie tidale*), compliquant ainsi considérablement la détermination du moment exact de la pleine mer.



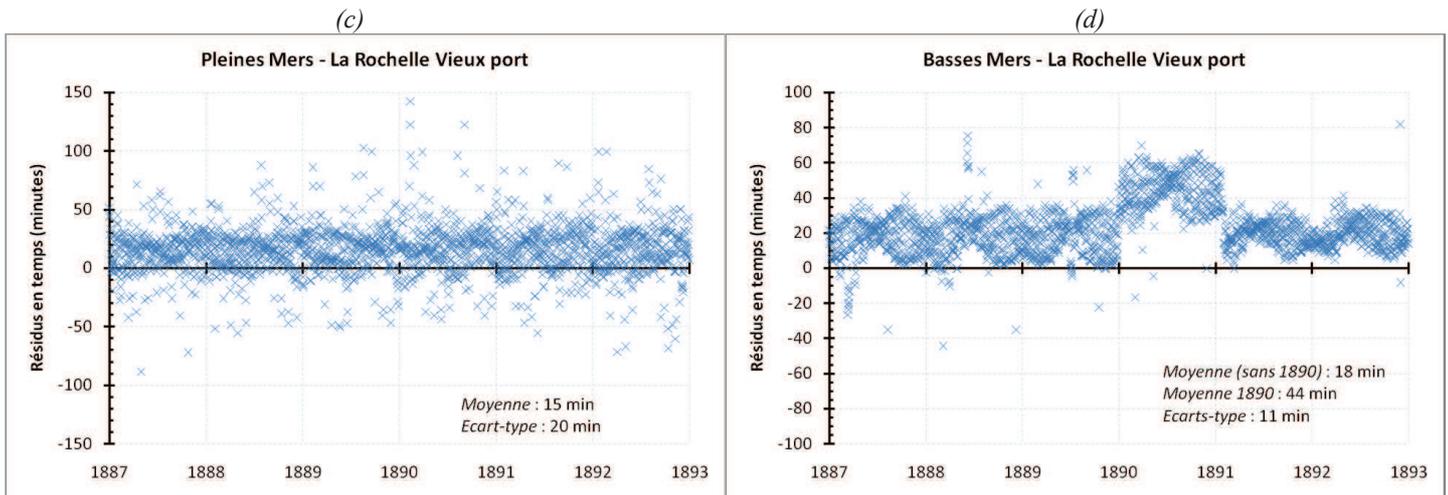


Figure V-71 : Résidus sur les hauteurs des pleines (a) et basses mers (b) et résidus en temps sur l’horaire des pleines (c) et basses mers (d) au Vieux port de La Rochelle (1887-1892) Les prédictions ont été réalisées à partir du lot de mesures de 1863-1874 du Vieux port de La Rochelle.

La figure V-72 présente les résidus en hauteur et en temps pour le port de La Pallice, entre 1890 et 1892. Les résultats sont synthétisés dans le tableau V-50.

	Résidus en hauteur				Résidus en temps			
	Moyenn e	Médiane	Mode	Écart- type	Moyenn e	Médiane	Mode	Écart- type
Pleines mers	- 21 cm	- 21 cm	- 25 cm	19 cm	- 30 min	- 31 min	- 36 min	16 min
Basses mers	- 27 cm	- 26 cm	- 22 cm	20 cm	- 27 min	- 27 min	- 24 min	9 min

Tableau V-50 : Récapitulatif des calculs des résidus en hauteur et en temps sur les pleines et basses mers du port de La Pallice entre 1890 et 1892.

Les résidus en hauteur sur les pleines mers sont, là-aussi, plutôt bons : les écarts-types de 19 et 20 cm sont cohérents avec ceux du Vieux port, tout en gardant à l’esprit que la précision des mesures est de ± 5 cm. De même, pour plus de détails, les écarts-types mensuels sont présentés dans le tableau V-52. Les résidus en hauteur sont centrés sur - 20 cm avec des prédictions réalisées à partir des mesures de 1997-2010. Ce qui signifie que le niveau moyen des prédictions est celui de 1997-2010. Par conséquent, cela donne une première estimation, uniquement à titre indicatif, sur l’évolution du niveau moyen à La Rochelle : sur la période 1890-1892, le niveau moyen de la mer apparaît être 20 cm plus bas que sur la période 1997-2010. Quant aux moyennes des résidus en temps, elles sont cohérentes entre les pleines et basses mers. Globalement, celles-ci ont eu lieu environ 28 minutes plus tôt que l’horaire prédit. De même qu’au Vieux port, on note que l’écart-type des résidus en temps des pleines mers est presque deux fois plus grand que celui des basses mers.

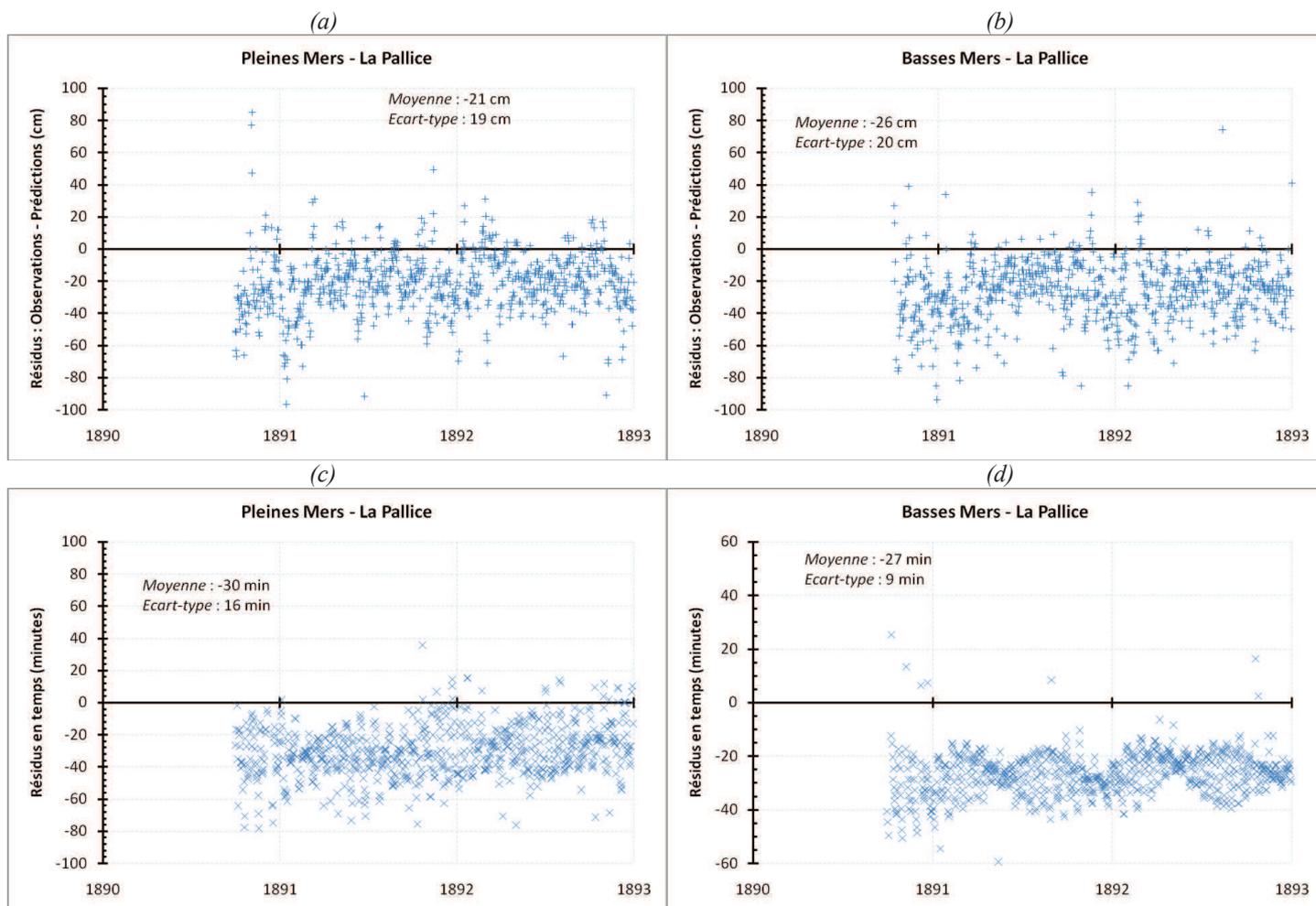


Figure V-72 : Résidus sur les hauteurs des pleines (a) et basses mers (b) et résidus en temps sur l'horaire des pleines (c) et basses mers (d) au port de La Pallice (1890-1892) Les prédictions ont été réalisées à partir du lot de mesures de 1997-2010 du port de La Pallice.

• Bilan

Le contrôle qualité des lots de mesures enregistrées au Vieux port de La Rochelle et au port de La Pallice entre 1887 et 1892 a été réalisé en utilisant trois méthodes : l'étude de la distribution des valeurs en centimètres et en minutes, la comparaison entre deux stations proches (« *Buddy checking* ») et l'étude des résidus en hauteur et en temps sur les pleines et basses mers.

- *Précision des mesures* : ± 5 cm en hauteur ; ± 1 min en temps

- *Problème(s) détecté(s)* :

- ⇒ heures des pleines et basses mers réellement enregistrées que sur un seul des deux sites
- ⇒ du 1^{er} janvier 1890 au 31 janvier 1891 : il faut retirer 27 minutes aux heures des basses mers du Vieux port de La Rochelle
- ⇒ de 1887 à 1888 : il faut retirer 10,5 cm aux hauteurs des pleines et basses mers du Vieux port de La Rochelle
- ⇒ de 1889 à 1892 : les hauteurs des basses mers du Vieux port semblent être 7 cm trop basses

- *Ecarts-types mensuels des résidus des pleines et basses mers - La Rochelle :*

		Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1887	PM	19	17	11	8	13	10	8	9	19	13	18	17
	BM	21	13	22	17	20	20	14	23	29	25	15	19
1888	PM	20	15	31	13	11	12	10	14	13	13	21	14
	BM	21	19	25	22	15	15	15	14	15	19	22	18
1889	PM	15	19	24	16	21	11	11	13	16	15	19	18
	BM	27	28	29	26	20	13	16	20	17	35	28	14
1890	PM	16	21	17	20	16	13	11	10	18	21	19	9
	BM	22	18	22	39	17	18	16	26	25	25	21	30
1891	PM	13	13	17	16	18	12	11	11	16	18	27	19
	BM	16	19	19	27	19	15	14	18	20	27	27	18
1892	PM	15	22	17	18	11	11	9	15	10	22	10	13
	BM	17	24	22	21	22	14	8	20	21	19	25	26

Tableau V-51 : Ecarts-types mensuels des résidus des pleines et basses mers au Vieux port de La Rochelle entre 1887 et 1892. Le code couleur correspond à l'indice de qualité défini par le tableau V-43.

- *Ecarts-types mensuels des résidus des pleines et basses mers - La Pallice :*

		Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1890	PM										14	32	18
	BM										41	24	21
1891	PM	23	14	20	12	12	20	14	12	9	16	23	11
	BM	16	15	20	13	17	12	9	14	19	19	22	16
1892	PM	21	16	22	14	12	11	11	17	10	15	30	15
	BM	20	28	17	14	13	11	17	21	13	16	10	17

Tableau V-52 : Ecarts-types mensuels des résidus des pleines et basses mers au port de La Pallice entre 1890 et 1892. Le code couleur correspond à l'indice de qualité défini par le tableau V-43.

V.4.5.2. Lots de mesures enregistrées avec un marégraphe Chazallon (1859-1909)

Trois lots de mesures correspondent à cette définition : fort Enet (1859-1873), fort Boyard (1873-1909) et La Rochelle Vieux port (1863-1874). Afin de contrôler la qualité de ces trois jeux de données, très importants de par leur durée, quatre méthodes différentes ont été utilisées : la comparaison des moyennes journalières et mensuelles avec une station proche ; l'étude de la stabilité de l'onde de marée M2 ; une étude couplée niveau marin / pression atmosphérique, reposant sur la relation du baromètre inverse ; et enfin, l'étude des résidus (observations - prédictions de la marée) en hauteur et en temps à partir des pleines et basses mers et des hauteurs horaires.

V.4.5.2.1. Comparaison avec une station proche ('Buddy checking')

La méthode du « *Buddy checking* » est reconnue depuis plusieurs années pour être une méthode simple, mais puissante et rigoureuse pour déterminer la qualité d'une série du niveau marin [UNESCO, 2002; García *et al.*, 2007; GLOSS, 2009]. Elle consiste en une comparaison détaillée des moyennes du niveau de la mer entre stations proches géographiquement. Si les séries sont de bonne qualité et

suffisamment proches pour que certaines hypothèses s'appliquent (conditions météo-océaniques similaires), alors les variations journalières et mensuelles du niveau marin (contenant un signal météorologique important) sont bien corrélées. Cette méthode a déjà été appliquée à différentes séries européennes : aux stations méditerranéennes [Woodworth, 2003] et plus particulièrement aux stations de la mer Adriatique [Raicich, 2007], à des stations néerlandaises [Becker *et al.*, 2009], lors d'une comparaison des stations de Brest et de Newlyn [Wöppelmann *et al.*, 2008], ou encore à des stations russes [Bogdanov *et al.*, 2000].

Ici, nous possédons trois lots de mesures à contrôler, sur deux sites différents : La Rochelle et Enet-Boyard. La station la plus proche, et surtout la seule possédant des mesures sur la même période que nos jeux de données, est Brest dont la série est globalement de bonne qualité sur la période 1859-1909, comme l'ont montré les travaux de Pouvreau [2008]. En prenant l'hypothèse que l'ensemble des moyennes journalières et mensuelles de Brest sont également de bonne qualité, nous avons effectué une comparaison entre Enet-Boyard et Brest, puis entre La Rochelle et Brest, et enfin entre Enet-Boyard et La Rochelle. Dans un premier temps nous avons appliqué cette méthode aux moyennes journalières, avant d'examiner en détail la comparaison des moyennes mensuelles.

- *Comparaison des moyennes journalières*

La comparaison des moyennes journalières du niveau marin entre Enet-Boyard, La Rochelle et Brest est la suite logique de la méthode mise en place pour détecter les sauts dans les séries originales (cf. *V.4.3.1. Détection d'erreurs et de sauts*). Les programmes écrits et mis en place précédemment ont donc été réappliqués aux jeux de données corrigés, après chacune des étapes d'analyse. Pour rappel, deux comparaisons sont effectuées : la première consiste à comparer les moyennes journalières calculées à l'aide du filtre de Demerliac entre deux stations (*figures V-73 et V-74*), la deuxième compare les moyennes mobiles hebdomadaires (avec un décalage d'un jour) calculées à partir des moyennes journalières, afin d'obtenir un signal plus filtré (*figure V-75*).

La courbe orange représentée sur les *figures V-73 et V-74* est la différence des moyennes journalières de Brest et du fort Boyard. Les zéros des deux jeux de données étant les zéros hydrographiques de Brest (- 3,636 m NGF-IGN69) et de La Pallice (- 3,504 m NGF-IGN69), la différence entre les moyennes journalières doit théoriquement être centrée sur la différence des zéros hydrographique (13,2 cm). C'est le cas sur la *figure V-73a* où l'ensemble des mesures du niveau marin du fort Boyard en 1891 sont de très bonne qualité : le coefficient de corrélation entre Brest et Boyard est de 0,94. L'expérience nous a amené à définir un intervalle à l'extérieur duquel une moyenne journalière peut être considérée comme suspecte : ± 10 cm. En l'occurrence, pour la comparaison Enet-Boyard / Brest, si la différence d'une moyenne journalière est inférieure à 3 cm ou supérieure à 23 cm, c'est que la moyenne d'Enet-Boyard, ou de Brest, est suspecte. La *figure V-73b* illustre bien ce cas : on remarque la présence de

pics négatifs dans la courbe des différences des moyennes qui semblent indiquer des moyennes journalières suspectes au fort Boyard, en 1903. Après une vérification visuelle des données, il apparaît qu'en 1903, le niveau marin n'était plus enregistré lorsqu'il descendait en-dessous de 1,70-1,80 m (cf. *figure V-88*), ce qui signifie que la plupart des basses mers de vive-eau n'étaient pas enregistrées. La corrélation entre Brest et Boyard est donc plus faible en 1903 : coefficient de 0,87.

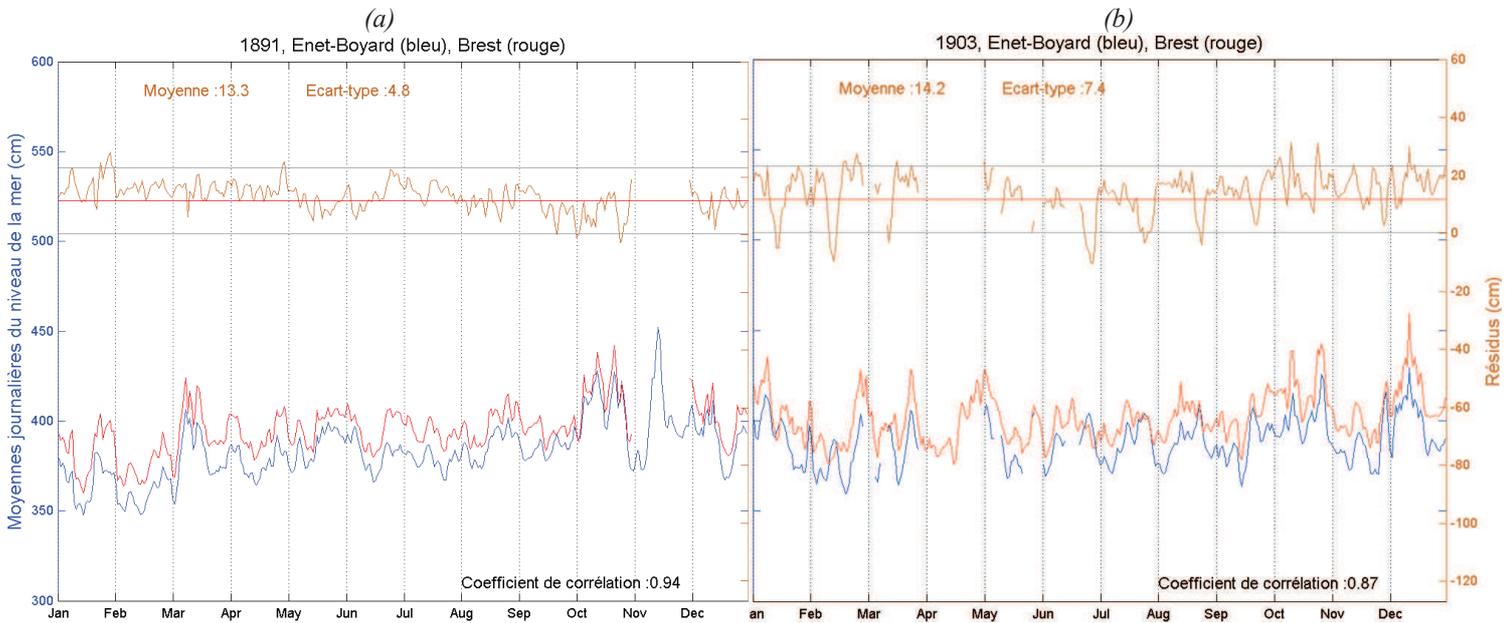


Figure V-73 : Moyennes journalières du niveau marin au fort Boyard (courbe bleue) et à Brest (courbe rouge). La courbe orange correspond à la différence Brest-Boyard et doit être comprise entre 3 et 23 cm (13 ± 10 cm) si les moyennes sont de bonne qualité. C'est le cas sur la figure (a). Sur la figure (b), on remarque des pics négatifs récurrents sur plusieurs mois, qui illustrent le non-enregistrement des basses mers de vive-eau à Boyard en 1903.

Enfin, un premier aperçu de la qualité des mesures de 1908 au fort Boyard (*figure V-74*) : mises à part quelques exceptions entre mi-avril et fin août, l'ensemble des moyennes journalières est de très mauvaise qualité. Le coefficient de corrélation entre Brest et Boyard chute, ici, à 0,39. Ce constat avait déjà été pressenti lors de l'étape de numérisation des mesures, et il est confirmé ici.

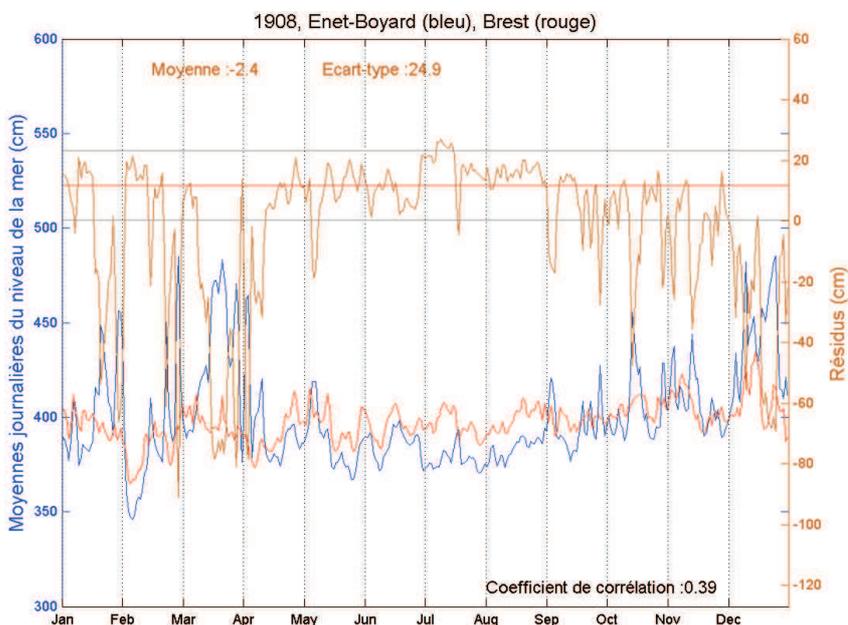


Figure V-74 : Moyennes journalières du niveau marin au fort Boyard (courbe bleue) et à Brest (courbe rouge). La courbe orange correspond à la différence Brest-Boyard et doit être comprise entre 3 et 23 cm (13 ± 10 cm) si les moyennes sont de bonne qualité, ce qui est rarement le cas en 1908.

La *figure V-75* présente un exemple des résultats de la comparaison entre les moyennes mobiles hebdomadaires du fort Enet et de La Rochelle. De même que ci-dessus, les zéros des deux jeux de données étant le zéro hydrographique de La Pallice, la différence entre les moyennes journalières doit théoriquement être centrée sur 0 cm. C'est le cas sur la *figure V-75b* où l'ensemble des mesures du fort Enet et de La Rochelle sont de très bonne qualité : le coefficient de corrélation est de 0,97. En revanche, sur la *figure V-65a*, on constate une anomalie dans les mesures réalisées fin octobre 1865 au fort Enet. L'explication de ces mesures de mauvaise qualité est consignée par l'observateur dans le registre des marées : « Du 17 octobre au 1^{er} novembre, il y eut une forte tempête de vent de Sud au NO. Le temps était orageux, la mer très grosse, et le vent ne venait à tempête que dans les grenasses. La tourelle du marégraphe pendant toute la durée de cette tempête resta pleine d'eau et je craignais à chaque instant que la tourelle s'écroulat dessous mes pieds, car à chaque coup de mer tout tremblait. L'on aurait pu en ce moment comparer le marégraphe du fort Enet à un navire en détresse (en pleine mer). Aussi il est facile de voir que le marégraphe demande beaucoup plus de peine, de soins et de dépenses que les autres qui sont à terre. ». Cet évènement, ponctuel dans l'année 1865, fait descendre le coefficient de corrélation entre Enet et La Rochelle à 0,93. Pour information, l'ensemble des graphiques des comparaisons des moyennes journalières entre Enet-Boyard, La Rochelle et Brest se trouve en annexe électronique.

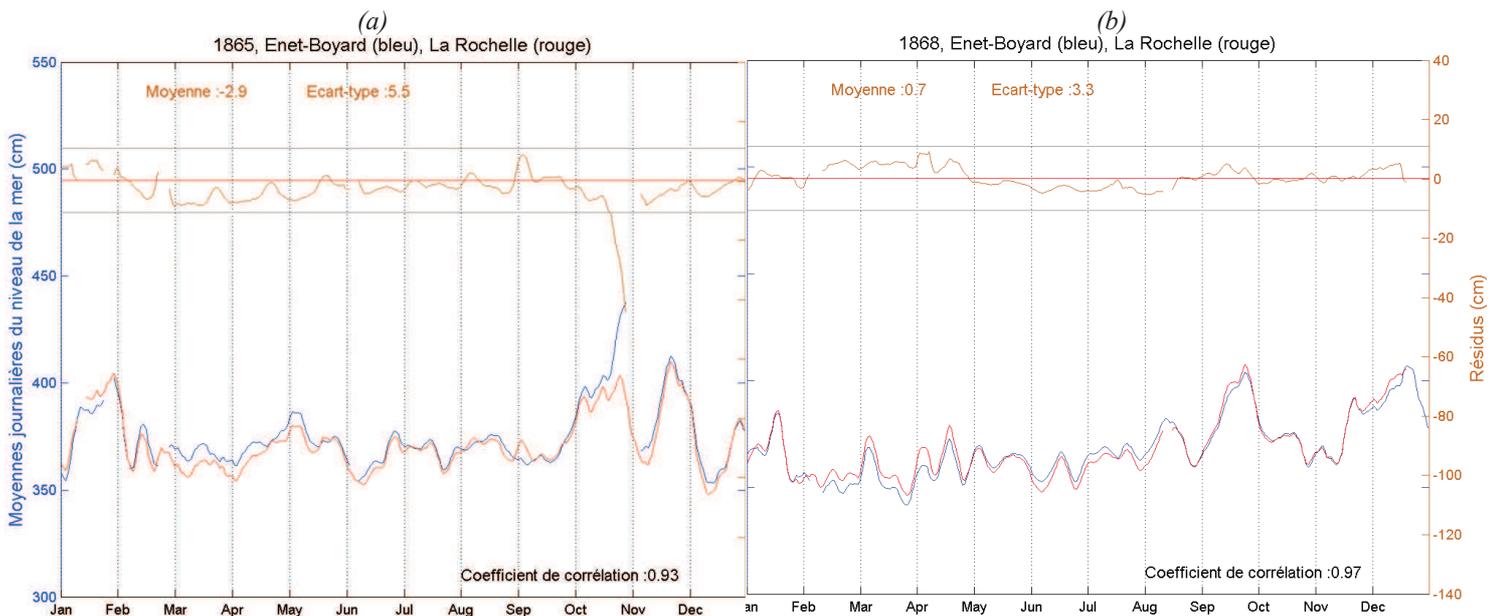


Figure V-75 : Moyennes mobiles hebdomadaires, avec un décalage d'un jour, du niveau marin au fort Enet (courbe bleue) et à La Rochelle (courbe rouge). La courbe orange correspond à la différence La Rochelle-Enet et doit être comprise entre -10 et +10 cm si les moyennes sont de bonne qualité.

• *Comparaison des moyennes mensuelles*

Le PSMSL délivre deux types de données pour chacune des stations répertoriées dans sa base de données : des moyennes mensuelles et annuelles du niveau marin. Dès lors, lorsqu'une étude en rapport avec le niveau marin est réalisée, si les auteurs de l'étude souhaitent effectuer un contrôle qualité par un « *Buddy checking* », ils utiliseront de préférence les moyennes mensuelles. Afin de tester cette méthode,

et d'avoir une première idée de la qualité de nos séries, nous avons réalisé une comparaison des moyennes mensuelles des séries Enet-Boyard, La Rochelle et Brest, sur la période 1859-1909. Nous obtiendrons ainsi une première liste des mois pour lesquels une moyenne est suspecte. Cette fois-ci, plutôt que de réaliser une différence des moyennes, comme lors de la comparaison des moyennes journalières, nous allons étudier la différence d des anomalies des moyennes (méthode utilisée par Raicich [2007]), définie par :

$$d_{ab}(i) = r_a(i) - r_b(i) \quad (5.20)$$

Avec a et b : indices représentant les deux stations comparées ; i : mois de la période étudiée. Ces anomalies sont la différence entre la moyenne du niveau marin sur l'ensemble d'une période donnée M et les moyennes mensuelles m :

$$r_{a,b}(i) = m_{a,b}(i) - M \quad (5.21)$$

Avec m : moyenne mensuelle ; M : moyenne du niveau marin sur une longue période de données.

La *figure V-76a* en illustre un exemple. En soustrayant les anomalies mensuelles de Brest à celles du littoral charentais, on obtient la *figure V-76c* qui est un indicateur de la qualité des deux séries. L'expérience nous a amené à définir le critère $|d| > 5$ cm au-delà duquel une valeur est considérée comme suspecte ; ce seuil est représenté, sur la figure, par une ligne pointillée noire. La valeur de ce critère est la même que celle utilisée par Raicich [2007] pour contrôler la qualité des mesures anciennes (1875-1889 et 1901-1914) de Trieste (Italie). Une dernière information est représentée sur la *figure V-76b*, il s'agit du pourcentage de lacunes dans une moyenne mensuelle. Cette information nous sera utile pour déterminer si une moyenne mensuelle suspecte peut s'expliquer par des lacunes importantes dans les données. A noter que les moyennes mensuelles ont été calculées en respectant les règles du PSMSL, à savoir uniquement si le mois contenait au moins 15 jours de données. Les figures suivantes présentent l'ensemble des résultats de ces comparaisons entre Enet-Boyard et Brest (*figures V-76 et V-77*) d'une part, La Rochelle et Brest (*figure V-78*) d'autre part. A la suite de ces figures, les résultats sont synthétisés dans les *tableaux V-53 et V-54* et discutés

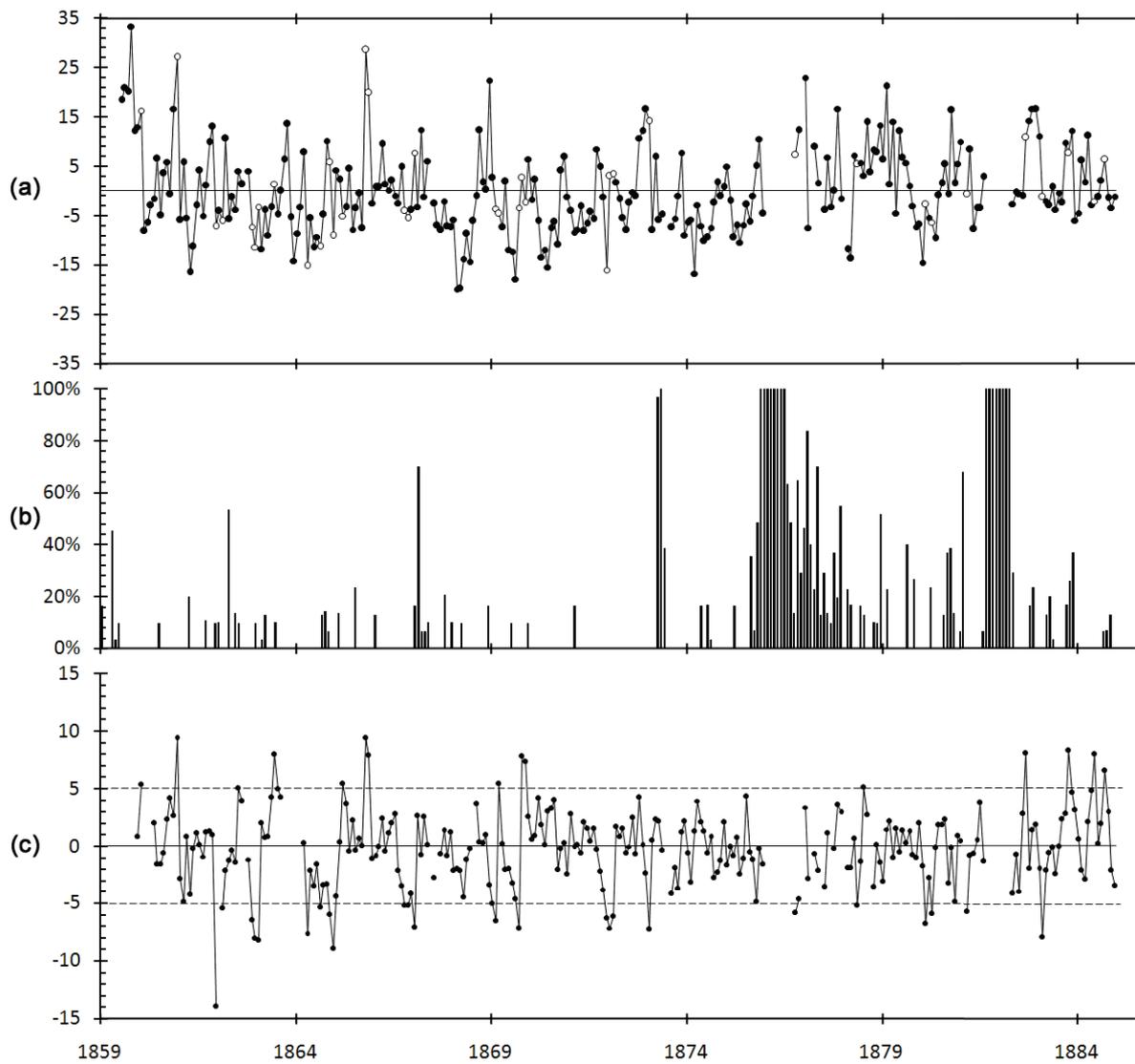


Figure V-76 : (a) Anomalies mensuelles (cm) à Enet-Boyard par rapport au niveau moyen de la mer calculé sur la période 1859-1884 ; les points blancs indiquent une moyenne mensuelle suspecte. (b) Pourcentage de données manquantes par mois pour la série Enet-Boyard. (c) Anomalies mensuelles (cm) d'Enet-Boyard moins Brest ; les lignes pointillées marquent le seuil à partir duquel une moyenne mensuelle est considérée comme suspecte.

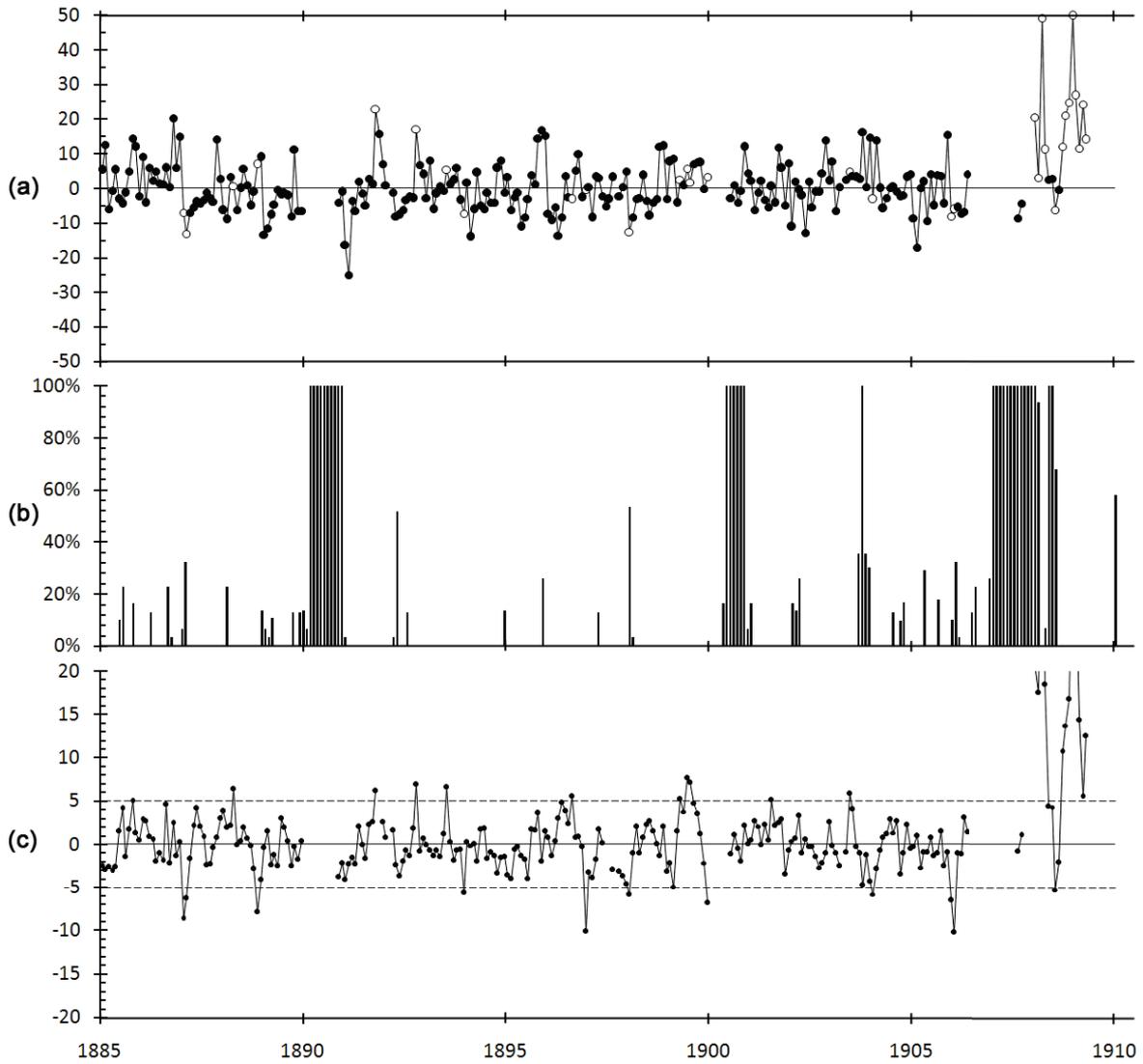


Figure V-77 : (a) Anomalies mensuelles (cm) à Enet-Boyard par rapport au niveau moyen de la mer calculé sur la période 1885-1909 ; les points blancs indiquent une moyenne mensuelle suspecte. (b) Pourcentage de données manquantes par mois pour la série Enet-Boyard. (c) Anomalies mensuelles (cm) d'Enet-Boyard moins Brest ; les lignes pointillées marquent le seuil à partir duquel une moyenne mensuelle est considérée comme suspecte.

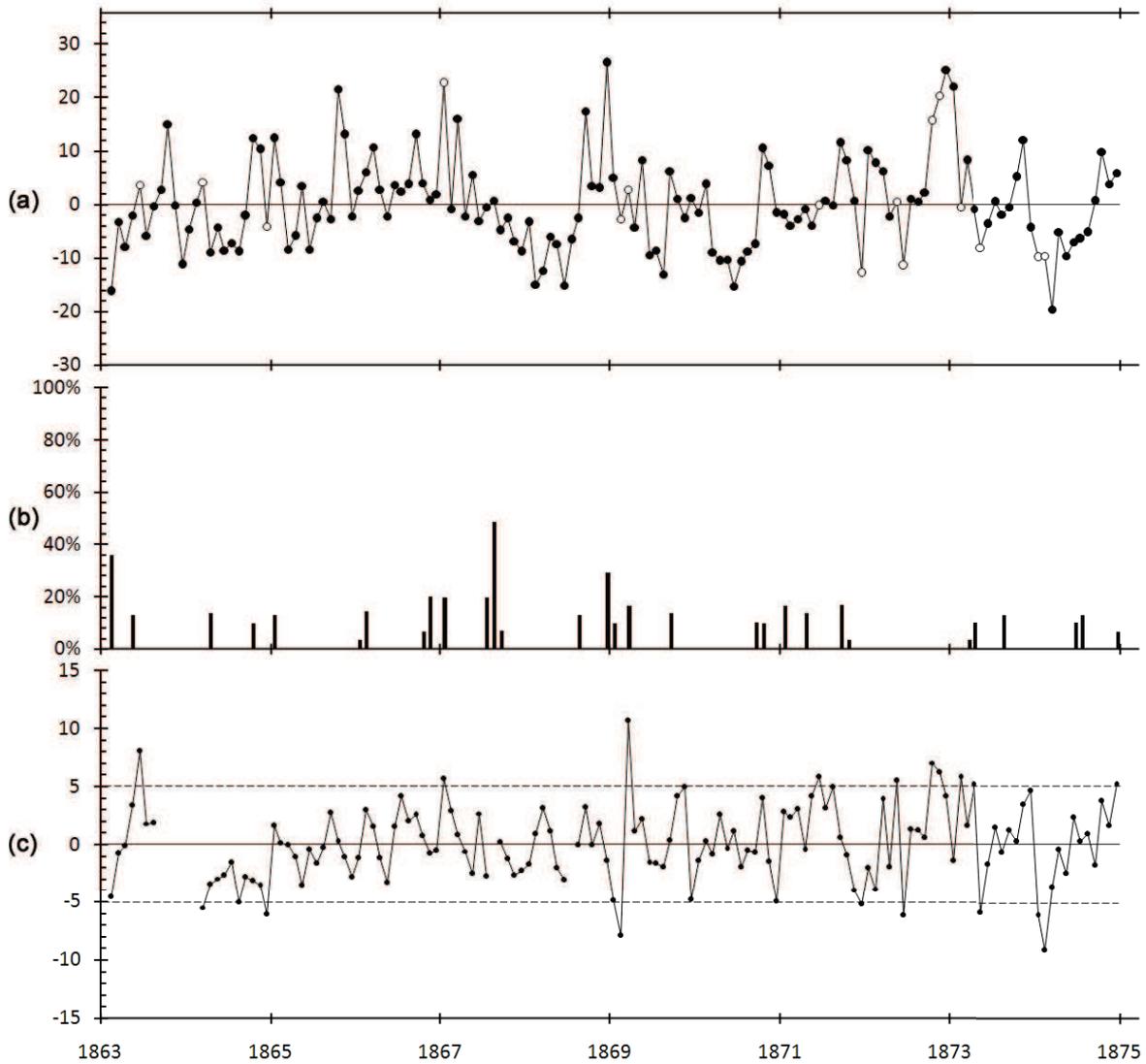


Figure V-78 : (a) Anomalies mensuelles (cm) à La Rochelle par rapport au niveau moyen de la mer calculé sur la période 1863-1874 ; les points blancs indiquent une moyenne mensuelle suspecte. (b) Pourcentage de données manquantes par mois pour la série de La Rochelle. (c) Anomalies mensuelles (cm) de La Rochelle moins Brest ; les lignes pointillées marquent le seuil à partir duquel une moyenne mensuelle est considérée comme suspecte.

Pour faciliter la lecture des graphiques, la série Enet-Boyard a été analysée en deux temps : d’abord la période 1859-1884, puis la période 1885-1909. Une comparaison des anomalies des moyennes mensuelles des séries Enet-Boyard et La Rochelle a également été effectuée sur la période 1863-1874, afin de croiser les résultats déjà obtenus lors des comparaisons avec Brest. Les résultats de ces analyses croisées sont résumés dans le *tableau V-53*. Lors de la comparaison Enet-Boyard / Brest, et en considérant que la série de Brest est de bonne qualité, si le critère $|d| > 5$ cm est détecté alors la moyenne mensuelle d’Enet-Boyard est suspecte. De même lors de la comparaison La Rochelle / Brest. Les mois qui sont dans ce cas sont en noir dans le tableau ci-dessous. En revanche, lors des comparaisons avec Brest, si la moyenne mensuelle du même mois est détectée comme étant suspecte et à Enet-Boyard et à La Rochelle, c’est peut-être tout simplement la moyenne mensuelle de Brest qui est suspecte, et non celles du littoral charentais. Cela peut se vérifier en regardant le résultat de la comparaison Enet-Boyard / La Rochelle : si $|d| < 5$ cm, alors les deux séries sont cohérentes et c’est bien la moyenne de Brest qui est suspecte. Les mois qui sont dans ce cas sont en vert dans le *tableau V-53* : juin 1863, décembre 1864,

février et mars 1869 et décembre 1871. Lorsque les mois sont en rouge, cela signifie que la moyenne d'un mois a été considérée deux fois comme suspecte, lors des deux comparaisons différentes. Cette moyenne est alors très fortement suspectée d'être de mauvaise qualité. Pour Enet-Boyard, sept moyennes mensuelles sont dans ce cas : mars, octobre et novembre 1865, octobre 1866, janvier 1867, septembre 1869 et janvier 1873. Pour la série de La Rochelle, sept moyennes le sont aussi : mars 1864, janvier 1867, juin et novembre 1872, mai 1873, janvier et février 1874. Parfois, le critère $|d| > 5$ cm est atteint pour un mois lors d'une comparaison, et est compris entre 4 et 5 cm lors de l'autre comparaison. Dans ce cas, on peut également suspecter la moyenne d'être de mauvaise qualité, et les mois sont notés en orange : juin 1871 et février 1873 pour la série de La Rochelle. Enfin, lorsque $|d| > 10$ cm, le mois est noté en gras et en italique : décembre 1861 et janvier 1867.

	Enet - Boyard / Brest	La Rochelle / Brest	Enet - Boyard / La Rochelle	
1860	Janvier	x	x	<p>Légende</p> <p>x : données manquantes pour la comparaison</p> <p>- : aucun problème détecté</p> <p>Noir : $|d| > 5$ cm sur une seule comparaison</p> <p>Orange : $|d| > 5$ cm sur une comparaison et > 4 cm sur l'autre</p> <p>Rouge : $|d| > 5$ cm sur au moins deux comparaisons différentes</p> <p>Vert : la moyenne mensuelle suspecte semble être celle de Brest</p> <p>Gras et italique : $|d| > 10$ cm</p>
	Décembre	x	x	
1861	<i>Décembre</i>	x	x	
1862	Février	x	x	
	Novembre	x	x	
	Décembre	x	x	
1863	Janvier	x	x	
	-	-	Février	
	Jun	Jun	-	
1864	x	x	Septembre	
	-	Mars	Mars	
	Avril	-	-	
	Août	-	-	
	Novembre	-	-	
1865	Décembre	Décembre	-	
	-	-	Janvier	
	Mars	-	Mars	
	Octobre	-	Octobre	
1866	Novembre	-	Novembre	
	-	-	Septembre	
	Octobre	-	Octobre	
1867	Novembre	-	-	
	<i>Janvier</i>	<i>Janvier</i>	<i>Janvier</i>	
1868	x	x	Août	
	-	-	Avril	
1869	Février	Février	-	
	Mars	Mars	-	
	Septembre	-	Septembre	
	Octobre	-	-	
	Novembre	-	-	
1870	-	-	Décembre	
	-	-	Mars	
1871	-	-	Juillet	
	-	Jun	-	
1872	Décembre	Décembre	-	
	Janvier	-	-	
	Février	-	-	
	-	Mai	-	
	-	Jun	Jun	
	-	Octobre	-	

	-	Novembre	Novembre
	-	-	Décembre
1873	Janvier	-	Janvier
	-	Février	-
	-	Mai	Mai
1874	-	Janvier	Janvier
	-	Février	Février
	-	-	Mars
	-	-	Octobre

Tableau V-53 : Liste des moyennes mensuelles suspectes détectées dans les séries Enet-Boyard et La Rochelle entre 1859 et 1874. La légende se trouve à droite du tableau.

A partir de 1875, nous ne pouvons plus procéder à une analyse croisée des résultats puisque la série de La Rochelle prend fin en 1874. Les moyennes mensuelles de la série Enet-Boyard, détectées comme suspectes lors de la comparaison avec Brest, sont répertoriées dans le *tableau V-54*. Entre 1875 et 1909, treize moyennes mensuelles ont un critère $|d| > 10$ cm, impliquant que les moyennes sont fortement suspectées d'être de mauvaise qualité : décembre 1896, janvier 1906, de janvier à avril et de septembre à décembre 1908, janvier, février et avril 1909. Au total, 65 moyennes mensuelles sont considérées comme suspectes pour la série Enet-Boyard, dont 13 pour les seules années 1908 et 1909. Ce qui porte à 52 le nombre de valeurs suspectes entre 1859 et 1907, soit environ une moyenne mensuelle suspecte par année, ce qui prouve toute la qualité de la série. En comparaison, Raicich [2007] a détecté 46 moyennes mensuelles suspectes sur 14 années (1875-1889) à Trieste. Pour la série de La Rochelle, c'est 11 moyennes mensuelles qui ont été considérées comme suspectes de 1863 à 1874, soit un peu moins d'une moyenne mensuelle par année. Là aussi, cela prouve la très bonne qualité de la série du niveau marin de La Rochelle.

	Enet - Boyard / Brest		Enet - Boyard / Brest
1876	Octobre	1899	Avril
1878	Mai		Juin
	Juillet		Juillet
1880	Février		Décembre
	Avril	1903	Juin
1881	Mars	1904	Janvier
1882	Septembre	1905	Décembre
1883	Février	1906	<i>Janvier</i>
	Octobre	1908	<i>Janvier</i>
1884	Juin		<i>Février</i>
	Septembre		<i>Mars</i>
1887	Janvier		<i>Avril</i>
	Février		Juillet
1888	Avril		<i>Septembre</i>
	Novembre		<i>Octobre</i>
1891	Octobre		<i>Novembre</i>
1892	Octobre		<i>Décembre</i>
1893	Juillet		1909	Janvier
	Décembre	<i>Février</i>	
1896	Août	Mars	
	<i>Décembre</i>	<i>Avril</i>	
1898	Janvier		

Tableau V-54 : Liste des moyennes mensuelles suspectes détectées dans la série Enet-Boyard entre 1875 et 1909. Les mois en gras et en italique indiquent que $|d| > 10$ cm.

L'ensemble des résultats des comparaisons Enet-Boyard / Brest et La Rochelle / Brest est résumé dans le *tableau V-55*. Les points indiquent que les moyennes mensuelles sont de bonne qualité ; les tirets indiquent que des données sont manquantes pour la comparaison ; les moyennes mensuelles identifiées comme suspectes sont notées L (*Lower*) lorsque que la moyenne suspecte est plus basse que prévue et H (*Higher*) lorsqu'elle est plus haute que prévue.

FORTS ENET ET BOYARD											
J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1859	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	.
1860	H	—	—	—	.	.	.	.	.	.	H
1861	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	L
1862	—	L	.	.	.	.	.	—	.	L	L
1863	L	.	.	.	H	.	.	—	—	—	—
1864	—	—	.	L	.	.	L	.	.	L	L
1865	.	.	H	.	.	.	.	.	H	H	.
1866	.	.	.	.	.	.	.	.	L	L	.
1867	L	.	.	.	—	.	—	.	.	.	.
1868	.	.	.	.	.	—	.	.	.	.	.
1869	.	L	H	.	.	.	.	L	H	H	.
1870	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1871	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	L
1872	L	L	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1873	L	.	.	.	—	—	.	.	.	.	.
1874	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1875	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1876	—	—	—	—	—	—	—	—	L	—	—
1877	.	.	—	.	—	.	.	—	.	.	.
1878	—	.	.	.	L	.	H	.	—	.	.
1879	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1880	.	L	.	L	.	.	.	.	.	.	.
1881	.	—	L	.	.	.	.	—	—	—	—
1882	—	—	—	—	.	.	.	.	H	.	.
1883	.	L	.	.	.	.	.	.	H	.	.
1884	.	.	.	.	H	.	.	H	.	.	.
1885	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1886	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1887	L	L	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1888	.	.	.	H	.	.	.	.	.	L	.
1889	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1890	—	—	—	—	—	—	—	—	—	.	.
1891	.	.	.	.	.	.	.	.	H	—	.
1892	.	—	.	.	.	.	.	.	H	.	.
1893	.	.	.	.	.	H	.	.	.	.	L
1894	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1895	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1896	.	.	.	.	.	.	H	.	.	.	L
1897	.	.	.	.	—	—	.	—	.	.	.
1898	L	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1899	.	.	H	.	H	H	.	.	.	.	L
1900	—	—	—	—	—	.	.	.	.	.	.
1901	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1902	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1903	.	.	.	—	H	.	.	.	.	.	.
1904	L	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1905	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	L
1906	L	.	.	.	—	—	—	—	—	—	—
1907	—	—	—	—	—	—	.	.	—	—	—
1908	H	H	H	H	.	.	L	.	H	H	H
1909	H	H	H	H	—	—	—	—	—	—	—

LA ROCHELLE VIEUX PORT											
J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1863	—	.	.	.	.	H	.	.	—	—	—
1864	—	—	L	.	.	.	.	.	.	.	L
1865	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1866	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1867	H	.	.	.	.	.	.	—	.	.	.
1868	.	.	.	.	.	.	—	.	.	.	.
1869	.	L	H	.	.	.	.	.	.	.	.
1870	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1871	.	.	.	.	.	H	.	.	.	.	L
1872	.	.	.	.	H	L	.	.	.	H	H
1873	.	H	.	.	L	.	.	.	.	.	.
1874	L	L	.	.	.	.	.	.	.	.	.

Tableau V-55 : Récapitulatif des résultats de la comparaison des anomalies des moyennes mensuelles entre Enet-Boyard et Brest (à gauche) et La Rochelle et Brest (à droite). Les points indiquent que les moyennes mensuelles sont de bonne qualité ; les tirets indiquent que des données sont manquantes pour la comparaison ; L = moyenne mensuelle suspecte plus basse que prévue ; H = moyenne mensuelle suspecte plus haute que prévue.

Afin de déterminer s'il existe un effet saisonnier dans l'apparition de moyennes mensuelles suspectes, nous avons compilé l'ensemble des résultats du *tableau V-55* pour les deux séries et nous avons représenté graphiquement le nombre de moyennes mensuelles suspectes par mois, pour la période 1859-1907 (*figure V-79*). Les années 1908 et 1909 n'ont pas été prises en compte car la quasi-totalité de leurs moyennes mensuelles sont suspectes, ce qui biaiserait un éventuel résultat sur un effet saisonnier. En observant la *figure V-79*, on peut noter deux caractéristiques. Premièrement, le nombre de moyennes mensuelles suspectes est presque 2,5 fois plus grand en hiver (de novembre à mars) qu'en été (de mai à septembre). Cela peut facilement s'expliquer, les notes des observateurs retrouvées dans les registres de marée (et disponibles en annexe) font état de nombreux dysfonctionnements du marégraphe lors de tempêtes, en hiver. Tandis qu'en été, peu de dysfonctionnement ont été relevés. Il est donc logique de retrouver une grande partie des moyennes suspectes en hiver. Deuxièmement, on note que les moyennes mensuelles suspectes sont globalement plus basses que prévu en hiver, et plus hautes que prévu en été. Un effet saisonnier est donc bien mis en évidence dans l'apparition de moyennes mensuelles suspectes dans les séries d'Enet-Boyard et La Rochelle.

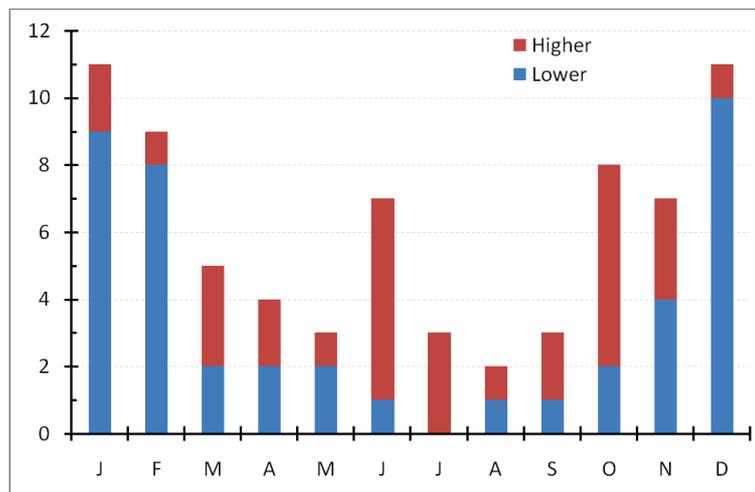


Figure V-79 : Répartition saisonnière des moyennes mensuelles suspectes plus basses (lower) et plus hautes (higher) que prévues, détectées pour les séries d'Enet-Boyard et La Rochelle, entre 1859 et 1909.

On pourrait penser qu'une majorité des moyennes mensuelles est suspecte car elles comportent de nombreuses lacunes dans leurs mesures. Or, il est très difficile de trouver une corrélation entre la présence d'une moyenne mensuelle suspecte et un grand nombre de données manquantes sur les *figures V-76, 77 et 78*. Les moyennes mensuelles suspectes sont donc avant tout provoquées par des erreurs systématiques de mesures, généralement liées à la configuration de l'observatoire : envasement, état de dégradation du puits de tranquillisation, obstruction de l'orifice du puits, etc.

Une autre méthode a été testée pour détecter les moyennes mensuelles suspectes. Comme pour le contrôle qualité des séries de pression atmosphérique, nous avons calculé le coefficient de corrélation mensuel, à partir des moyennes journalières, entre les séries du littoral charentais et Brest (*figure V-80*), et entre la série Enet-Boyard et la série de La Rochelle (*figure V-81*). Les valeurs seuils qui semblent se

définir sont 0,7 pour la comparaison avec Brest et 0,85 pour la comparaison inter-charentaise. Mais, d'une façon générale, les résultats de cette méthode sont plus difficiles à analyser qu'une comparaison des moyennes. Le seuil minimal recommandé par GLOSS [2009] pour ce type d'étude est de 0,7.

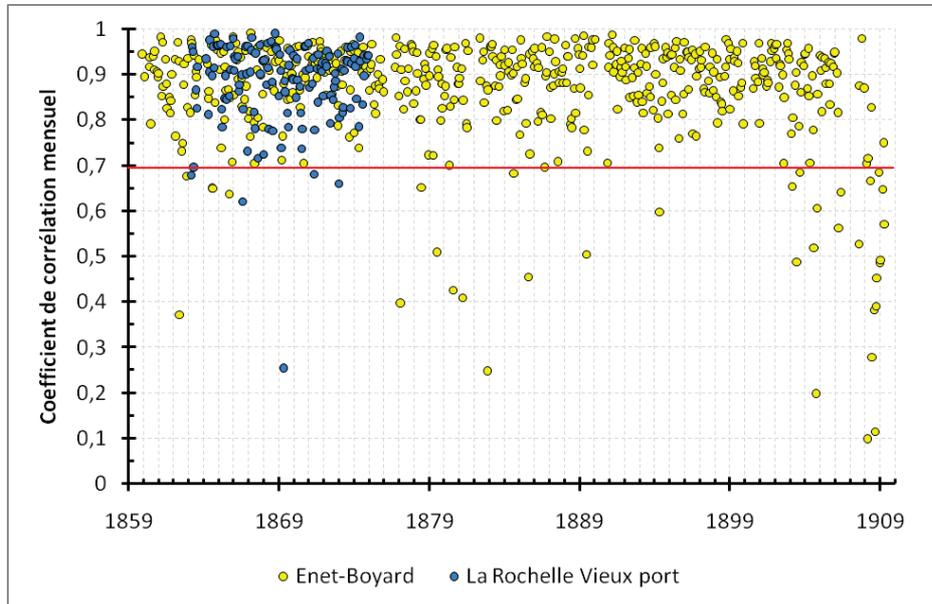


Figure V-80 : Coefficients de corrélation mensuels calculés à partir des moyennes journalières entre Enet-Boyard et Brest (jaune) ; La Rochelle et Brest (bleu)

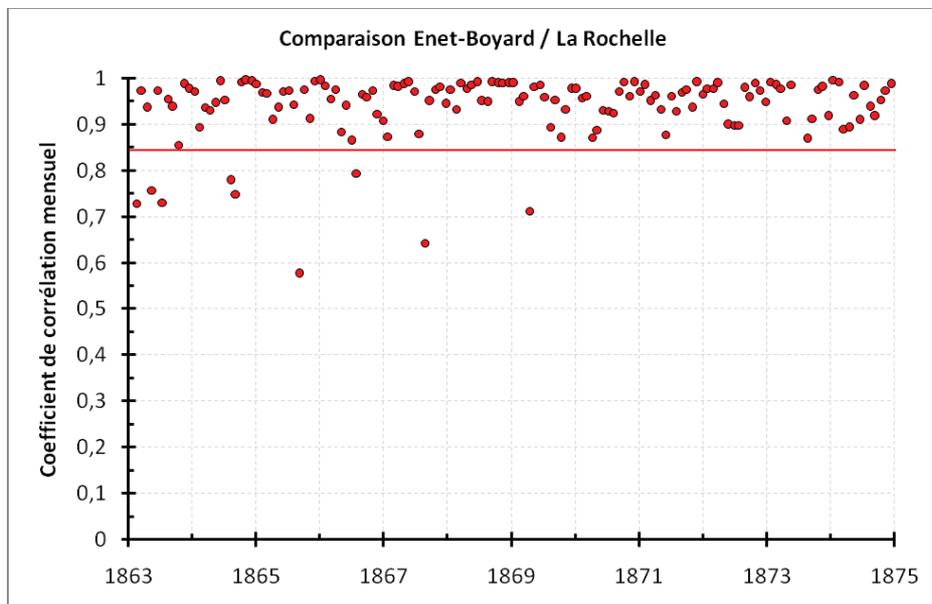


Figure V-81 : Coefficients de corrélation mensuels calculés à partir des moyennes journalières entre Enet-Boyard et La Rochelle.

V.4.5.2.2. Etude de la stabilité des ondes de marée

L'étude de la stabilité des ondes de marée comme contrôle de la qualité d'une série du niveau marin repose sur un principe simple : si la série est de bonne qualité et n'est pas soumise à des modifications environnementales, théoriquement, l'amplitude et la phase des ondes de marée (et en

particulier de M2) sont stables dans le temps. Bien sûr, en réalité, cette stabilité est rare, car il existe souvent des facteurs environnementaux changeants qui influent sur les ondes (*e.g.* morphologie sous-marine, cf. VI.1.1.4. *Evolution à long terme*). Malgré tout, cette méthode reste intéressante et utile pour détecter des anomalies dans les séries. L'évolution de l'amplitude (*figure V-82*) et de la phase (*figure V-83*) de M2 a été calculée pour les séries de fort Enet (bleu), fort Boyard (vert) et La Rochelle (rouge). Ces constantes harmoniques ont été calculées à l'aide d'une analyse harmonique mobile (avec t_tide) : analyse harmonique de 365 jours de mesures, tous les 60 jours.

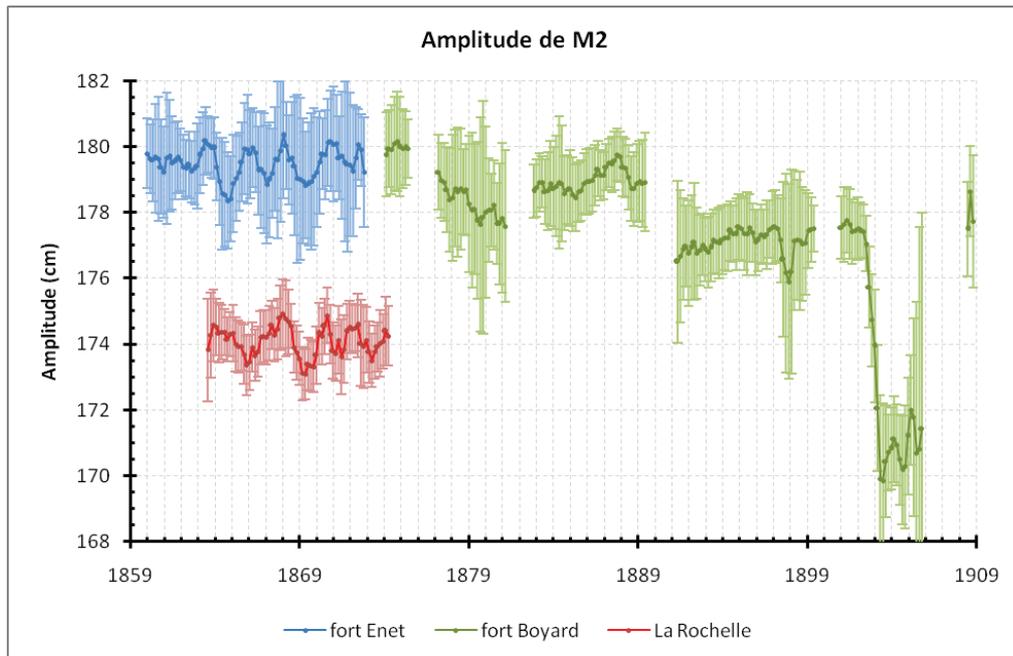


Figure V-82 : Amplitudes et barres d'erreur associées de l'onde M2 pour les séries du fort Enet (bleu), du fort Boyard (vert) et du Vieux port de La Rochelle (rouge) sur la période 1859-1909.

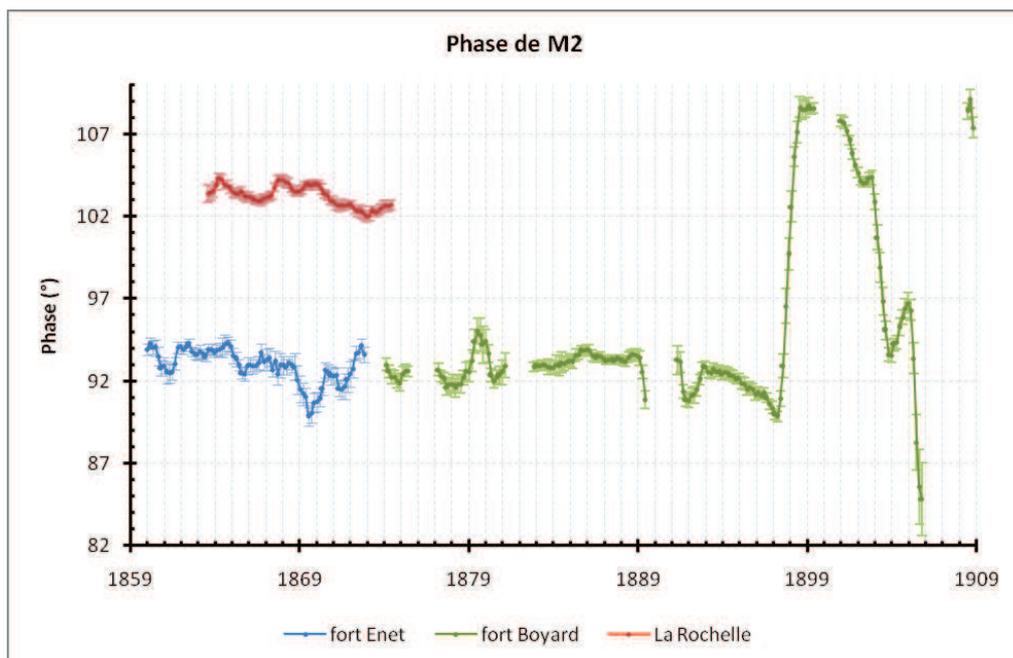


Figure V-83 : Phases et barres d'erreur associées de l'onde M2 pour les séries du fort Enet (bleu), du fort Boyard (vert) et du Vieux port de La Rochelle (rouge) sur la période 1859-1909. Les valeurs des phases de La Rochelle ont été décalées arbitrairement de +10° pour une meilleure lisibilité du graphique.

L'amplitude de l'onde M2 est relativement stable pour la série de La Rochelle et cohérente avec celle des forts Enet et Boyard sur la même période. De même la phase de M2 de La Rochelle est globalement stable, avec toutefois de très légères variations, que nous analyserons ci-après.

L'amplitude de l'onde M2 est stable de 1859 à 1889 pour la série Enet-Boyard, avant de décrocher légèrement d'environ 2 cm de 1890 à novembre 1902. On constate un nouveau décrochage, plus important, d'environ 6 cm de décembre 1902 à mai 1906. Ce changement important dans l'évolution de l'amplitude de M2 s'explique par une erreur systématique de mesure. Comme le montre la *figure V-84*, le niveau marin n'était pas enregistré en dessous de 1,70-1,80 m de décembre 1902 à février 1905 et de novembre 1905 à mai 1906. Les registres de marée indiquent que le puits de tranquillisation du marégraphe était en très mauvais état lors de cette période. En conséquence, le flotteur du marégraphe ne descendait pas en dessous de 1,70-1,80 m, et restait bloqué dans le puits à cette hauteur.

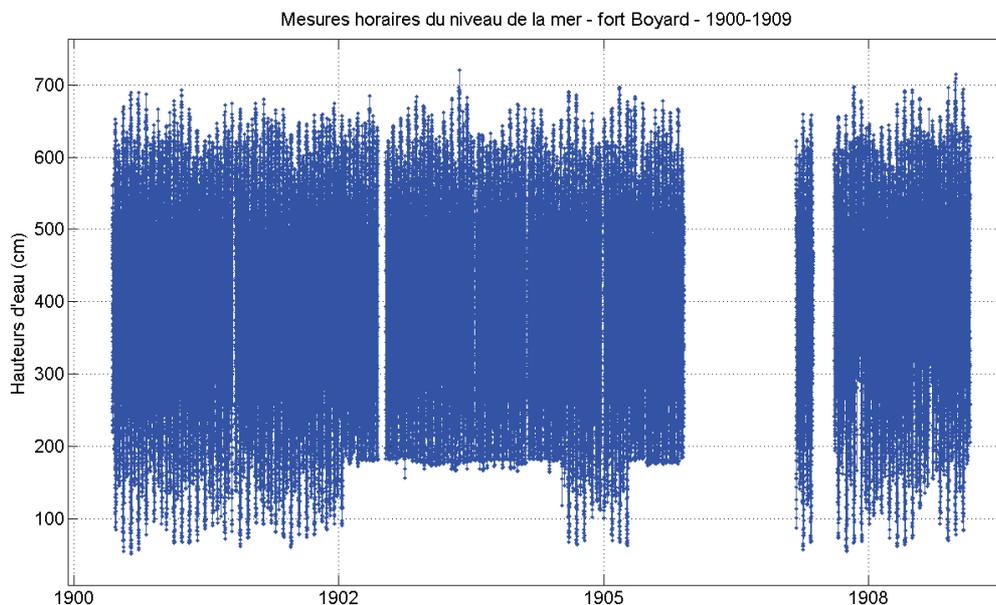


Figure V-84 : Hauteurs horaires du niveau de la mer au fort Boyard, de 1900 à 1909. On constate un non-enregistrement du niveau marin en dessous de 1,70-1,80 m de décembre 1902 à février 1905 et de novembre 1905 à mai 1906.

Comme pour la série de La Rochelle, de 1859 à 1897, la phase de l'onde M2 est globalement stable, avec de légères variations. A partir de 1898, la phase de M2 augmente de plus de 15° (ce qui correspond à un décalage en temps d'environ 31 minutes), puis redescend brusquement à partir de fin 1901. A ce stade du contrôle qualité, nous pouvons émettre l'hypothèse d'un décalage en temps consécutif à un problème d'horloge du marégraphe. Ces variations étant, en effet, trop soudaines et trop importantes pour sembler être l'expression d'un phénomène naturel. L'analyse des résidus en temps, que nous détaillerons un peu plus loin (cf. *V.4.5.2.4. Etude des résidus*), prouve que l'hypothèse avancée est la bonne. En analysant de plus près les variations de la phase de M2, on se rend compte qu'elles suivent les variations des résidus en temps des pleines et basses mers. Les *figures V-85* et *V-86* montrent la parfaite corrélation existante entre l'évolution de la phase de M2 et l'évolution des moyennes annuelles des

résidus en temps pour les séries Enet-Boyard et La Rochelle. Les légères variations détectées dans la phase de M2 sont donc en très grande partie dues à des décalages en temps dans les mesures, autrement dit à des problèmes de réglage de l'horloge des marégraphes, résultat déjà observé par d'autres [e.g. Pugh, 1987 ; Simon, 2007a].

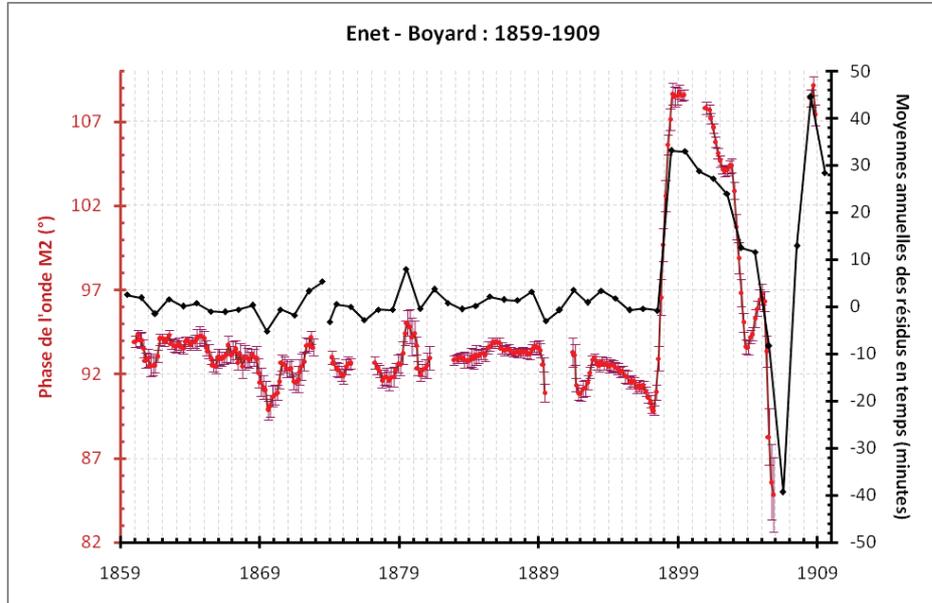


Figure V-85 : Evolution de la phase de l'onde M2 (rouge) et des moyennes annuelles des résidus en temps (noir) pour la série Enet-Boyard (1859-1909). Les résidus sont obtenus à l'aide de prédictions calculées sur la période 1859-1897.

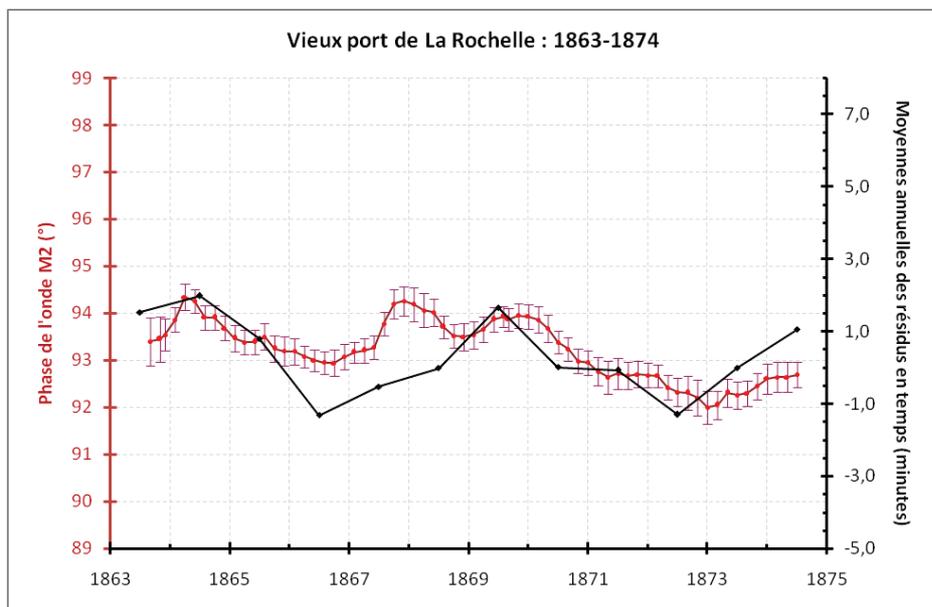


Figure V-86 : Evolution de la phase de l'onde M2 (rouge) et des moyennes annuelles des résidus en temps (noir) pour la série de La Rochelle (1863-1874). Les résidus sont obtenus à l'aide de prédictions calculées sur l'ensemble de la période 1863-1874.

V.4.5.2.3. Etude couplée « niveau marin - pression atmosphérique »

L'étude couplée « niveau marin - pression atmosphérique (rapportée au niveau de la mer) » en tant que contrôle qualité d'une série repose sur la relation du baromètre inverse (cf. VI.3.1. *Baromètre inverse*). En effet, si l'un des deux ou les deux jeux de données (niveau marin et pression) sont de mauvaise qualité, alors les deux séries auront un faible coefficient de corrélation. En revanche, si elles sont de bonne qualité, et si l'effet du baromètre inverse est une bonne représentation de la réponse locale du niveau de la mer aux changements de pression atmosphérique, alors les deux séries seront fortement corrélées et le coefficient de régression linéaire entre les deux séries sera d'environ -1 cm/hPa . Nous avons déjà vérifié la qualité des séries de pression atmosphérique d'Enet-Boyard et La Rochelle et nous savons que celles-ci sont de très bonne qualité (cf. V.3. *Séries de pression atmosphérique*). De plus, comme nous le verrons dans le prochain chapitre, la relation du baromètre inverse est vérifiée pour le littoral charentais et vaut environ $-1,1 \pm 0,3 \text{ cm/hPa}$. L'analyse couplée « niveau marin - pression atmosphérique » peut donc être utilisée pour contrôler la qualité des séries d'Enet-Boyard et La Rochelle, de deux façons différentes :

- en complément des méthodes précédentes : par exemple, en cas de doute sur une moyenne mensuelle, l'analyse couplée de l'évolution du niveau de la mer et de la pression atmosphérique peut donner un complément d'information sur la qualité de celle-ci (*figure V-87*).

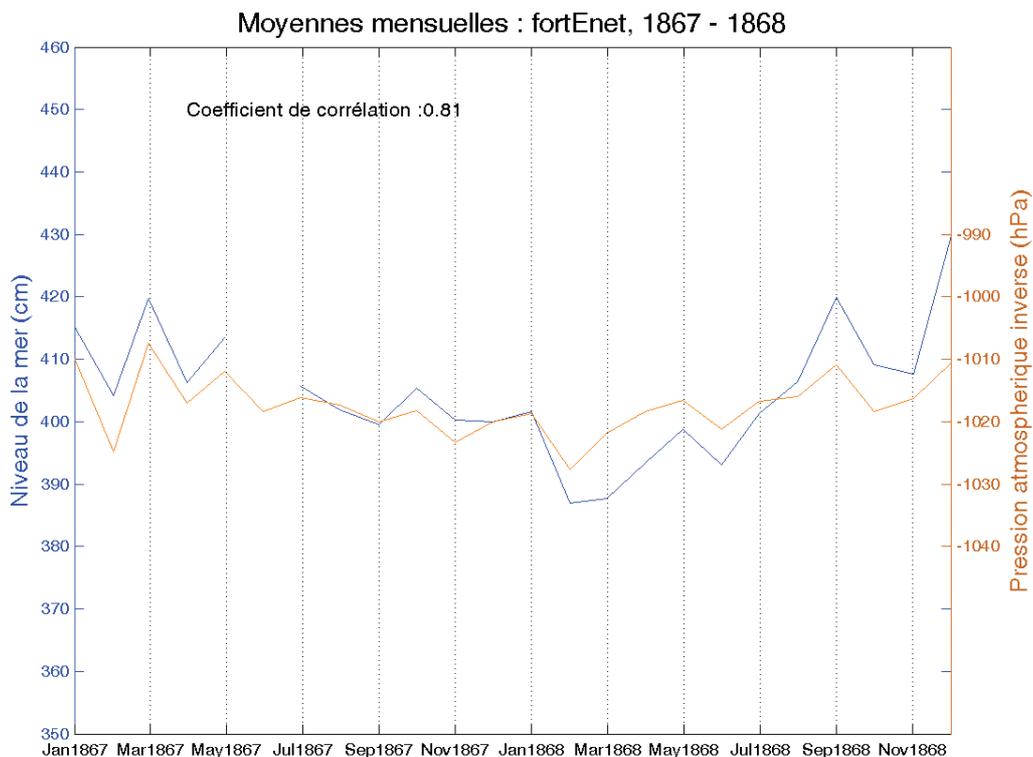


Figure V-87 : Evolution couplée des moyennes mensuelles du niveau marin (bleu) et de la pression atmosphérique inverse (orange), au fort Enet (1867-1868).

- en corrigeant les moyennes journalières (*figure V-88*) et/ou les résidus (observations - prédictions de la marée, *figure V-89*) du niveau marin en retirant la variabilité due à la pression atmosphérique. On constate alors une diminution nette de la variabilité des moyennes journalières et/ou des résidus, permettant ainsi une meilleure lecture et estimation de la qualité des séries. Par exemple, l'écart-type des moyennes journalières est d'environ 14 cm à La Rochelle en 1864, alors qu'il n'est plus que de 8 cm après correction de la pression (*figure V-88*). L'étude complète des résidus corrigés de la pression atmosphérique sera présentée au paragraphe « *V.4.5.2.4. Etude des résidus* ».

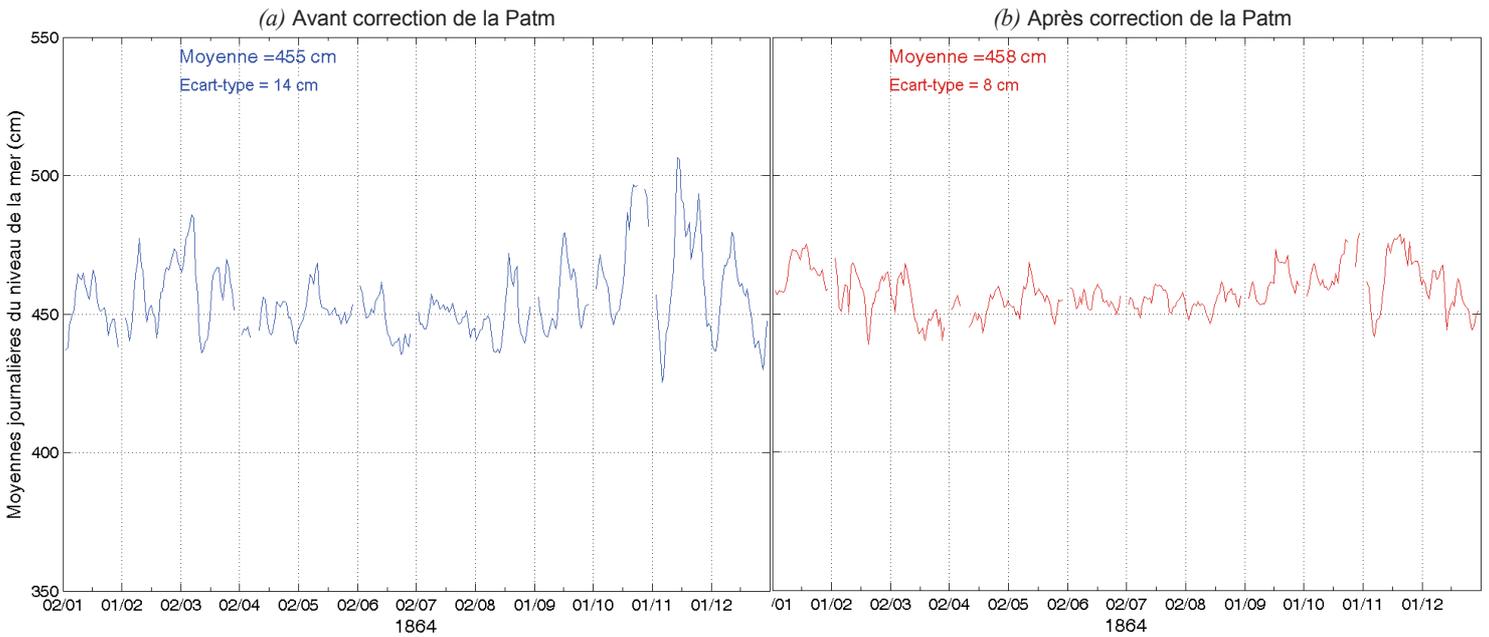


Figure V-88 : La Rochelle Vieux port, 1864 (a) Moyennes journalières du niveau de la mer incluant donc les variations de pression atmosphérique. (b) Moyennes journalières du niveau de la mer corrigées de la pression.

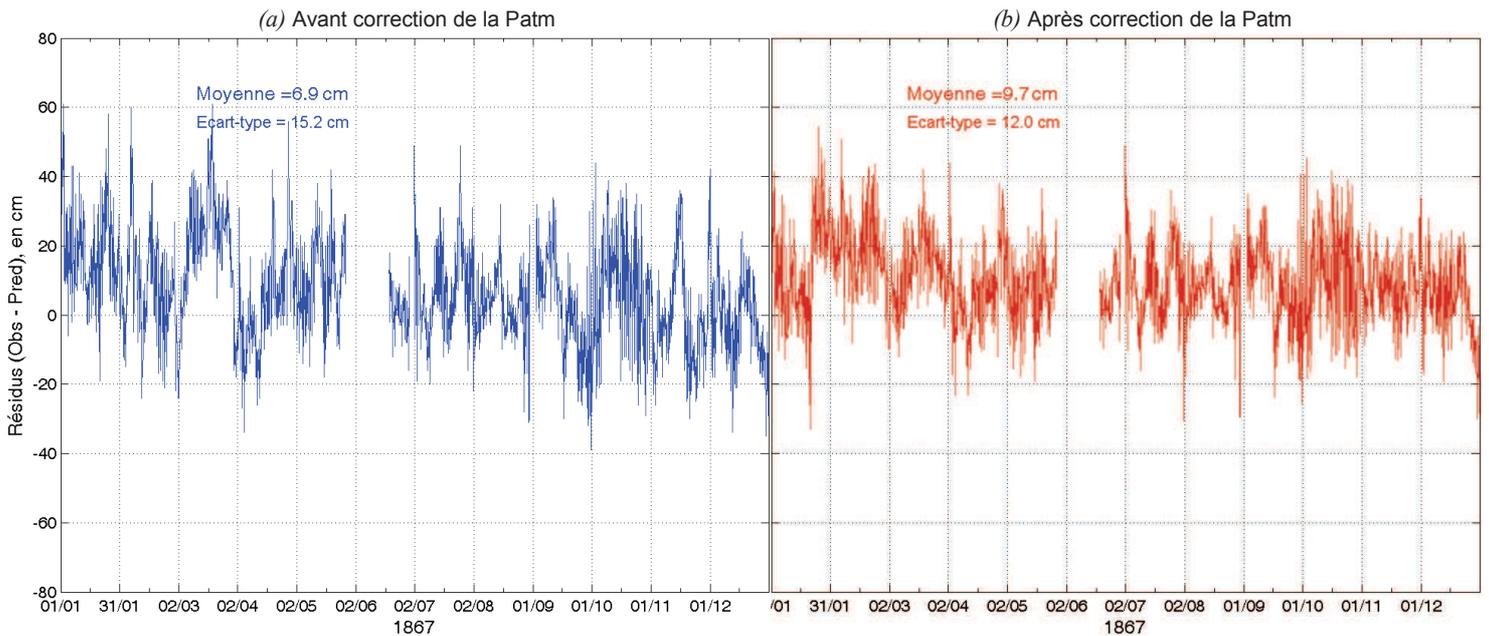


Figure V-89 : Fort Enet, 1867 (a) Résidus horaires du niveau marin incluant les variations de pression atmosphérique. (b) Résidus horaires corrigés de la pression.

Une autre méthode a été testée : nous avons représenté graphiquement les coefficients mensuels du baromètre inverse calculés à partir des moyennes journalières du niveau de la mer et de pression atmosphérique (*figure V-90*). Cette méthode repose sur un principe simple : plus le coefficient est proche de -1,1 cm/hPa et plus les moyennes mensuelles sont de qualité. Mais, ici aussi, les résultats de cette méthode ne sont pas faciles à analyser, comme en témoigne la *figure V-90*, sauf pour quelques moyennes mensuelles de 1908 et 1909, dont les coefficients sont très éloignés de la valeur attendue.

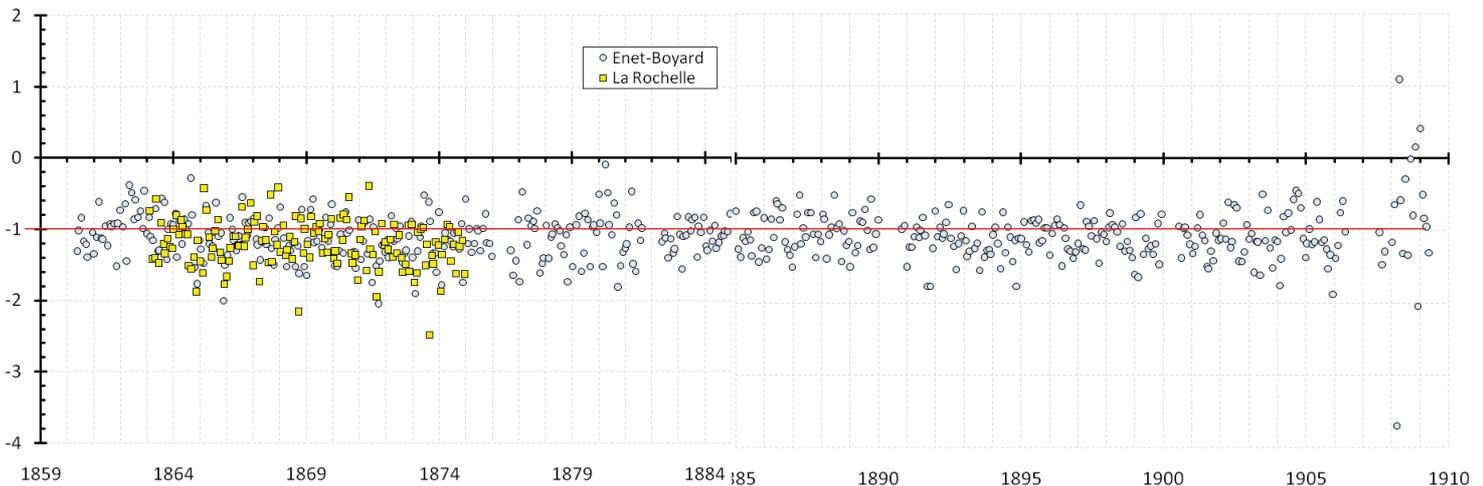


Figure V-90 : Coefficients mensuels du baromètre inverse calculés à partir des moyennes journalières du niveau de la mer et de pression atmosphérique (cm/hPa). Plus le coefficient est proche de -1,1 cm/hPa, plus les moyennes mensuelles sont de qualité.

V.4.5.2.4. Etude des résidus

L'étude des résidus s'est déroulée en trois temps : d'abord l'étude des résidus en hauteur et en temps des pleines et basses mers ; puis l'étude des résidus corrigés de la pression atmosphérique et calculés à partir des hauteurs horaires, enfin le contrôle visuel systématique de l'ensemble des résidus des hauteurs horaires. Pour rappel :

$$\text{Résidus} = \text{Observations} - \text{Prédictions de la marée}$$

- Résidus en hauteur et en temps des pleines et basses mers

L'étude de l'évolution des résidus des pleines et basses mers, en hauteur et en temps va nous permettre de caractériser plus finement la qualité des mesures. Cette étude nous permettra de confirmer d'éventuels problèmes d'horloge du marégraphe, entraperçus lors du contrôle visuel systématique des résidus ; mais également d'éventuels problèmes de mesures de la hauteur d'eau, même si *a priori*, les séries sont globalement de bonne qualité en hauteur, comme nous venons de le voir. Pour réaliser cette étude, nous avons calculé les prédictions de la série Enet-Boyard à partir de la période 1859-1897, et les prédictions de la série du Vieux port de La Rochelle à partir de l'ensemble des données, à savoir la période 1863-1874. Les *figures V-91*, *V-92* et *V-93* présentent les résidus en hauteur et en temps de chacune des pleines et basses mers du fort Enet, de La Rochelle et du fort Boyard.

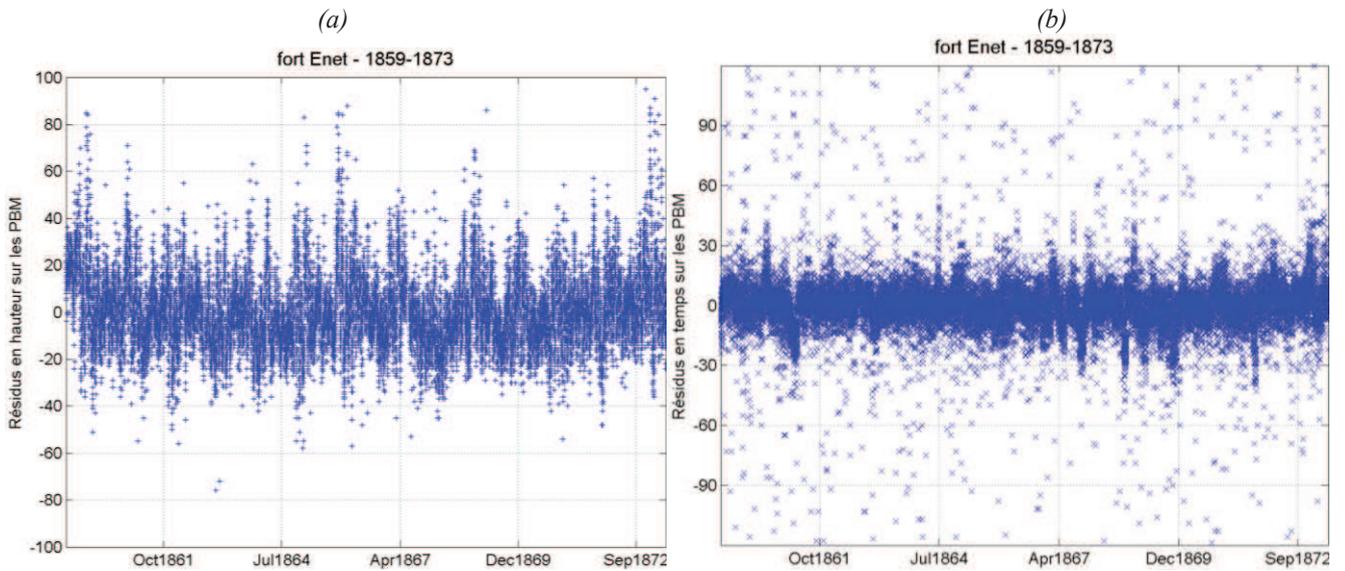


Figure V-91 : Résidus en hauteur (a) et en temps (b) sur les pleines et basses mers pour la série du fort Enet (1859-1909). Les prédictions ont été réalisées à partir des mesures de 1859 à 1897 (Enet-Boyard).

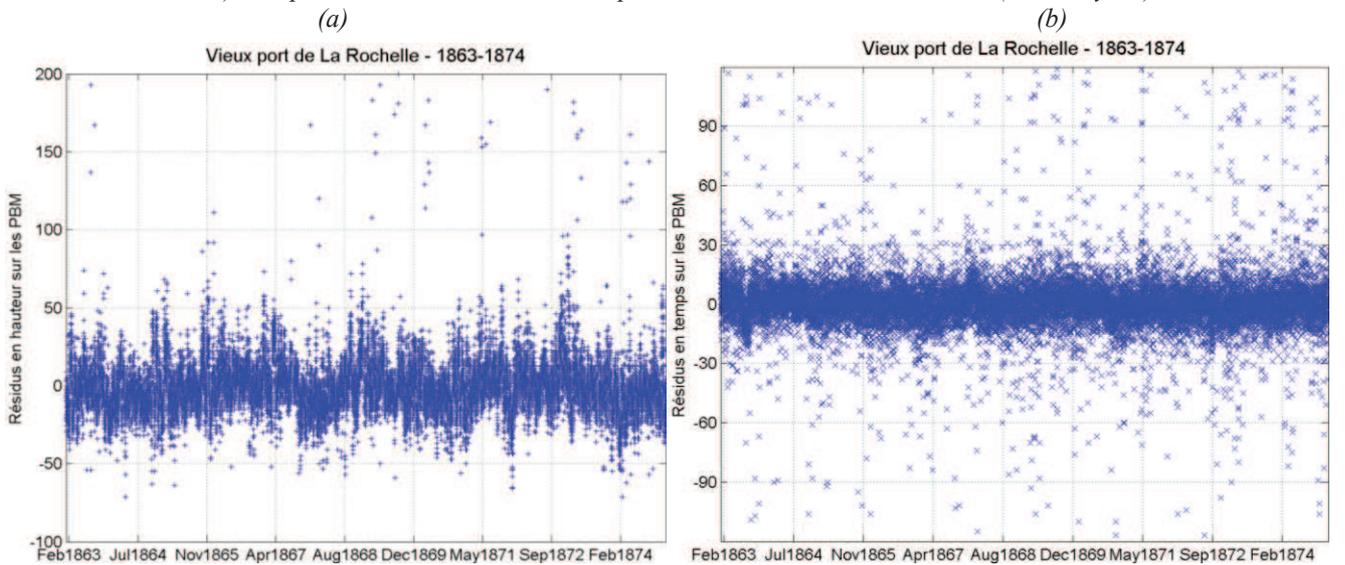


Figure V-92 : Résidus en hauteur (a) et en temps (b) sur les pleines et basses mers pour la série du Vieux port de La Rochelle (1863-1874). Les prédictions ont été réalisées à partir de l'ensemble des mesures.

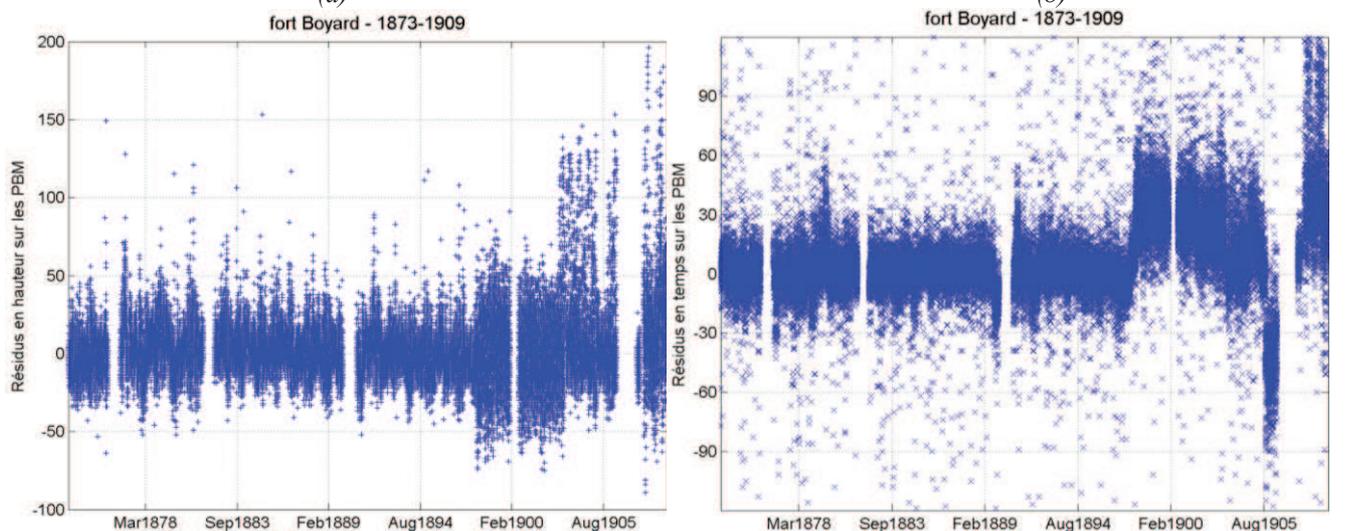


Figure V-93 : Résidus en hauteur (a) et en temps (b) sur les pleines et basses mers pour la série du fort Boyard (1873-1909). Les prédictions ont été réalisées à partir des mesures de 1859 à 1897 (Enet-Boyard).

En observant ces figures, de premier abord, on ne constate aucune anomalie particulière pour les séries du fort Enet et du Vieux port de La Rochelle dans les résidus en hauteur et en temps. Toutefois, on remarque un nombre non négligeable de résidus en temps supérieurs à une heure pour les deux séries. Cela n'est pas dû à une mauvaise qualité des mesures, mais simplement à des difficultés rencontrées lors de l'extraction des pleines et basses mers à partir des hauteurs horaires. En effet, en période de morte-eau, il est fréquent de voir l'étale de pleine mer s'allonger, jusqu'à avoir, parfois, des doubles pleines mers. La valeur extraite de la pleine mer n'est alors pas toujours en phase avec la pleine mer réelle. La série du fort Boyard laisse, elle, apparaître quelques problèmes à partir de 1898, aussi bien sur les résidus en hauteur que les résidus en temps. On peut déjà voir, très clairement, un décalage en temps à partir de 1898, par rapport au début de la série. Afin de pouvoir quantifier ces variations de résidus, nous avons calculé les paramètres statistiques annuels (moyenne, médiane, mode et écart-type) des résidus en hauteur et en temps. Les résultats se trouvent dans les tableaux *V-56* et *V-57*.

	Résidus en Hauteur (cm)				Résidus en Temps (min)				Nombre de valeurs
	Moyenne	Médiane	Mode	Écart-type	Moyenne	Médiane	Mode	Écart-type	
1859	15,6	17	25	17	2,5	3	3	14	662
1860	3,3	2	2	16	1,9	2	0	18	1445
1861	-2,1	-3	-2	14	-1,5	0	0	17	1425
1862	-1,7	-2	-4	13	1,6	1	0	15	1364
1863	-2,2	-3	-3	15	0,1	0	0	14	1417
1864	-4,2	-6	-9	15	0,8	0	0	15	1436
1865	2,0	-1	-2	18	-1,0	-2	-3	15	1387
1866	0,5	-1	-2	14	-1,1	-1	0	13	1414
1867	-0,4	-1	-3	15	-0,6	-1	0	15	1324
1868	-2,9	-4	-4	16	0,3	1	0	15	1414
1869	-1,7	-4	-4	14	-5,2	-4	0	17	1431
1870	-2,1	-3	-1	14	-0,6	0	0	15	1423
1871	-1,2	-1	-3	14	-1,8	-2	-3	15	1417
1872	5,7	5	0	14	3,3	3	0	14	1433
1873	8,0	5	0	20	5,3	3	3	18	600
1873,5	-3,2	-3,5	-1	12	-3,2	-3,5	-1	12	566
1874	-3,6	-5	-5	13	0,5	0	0	15	1412
1875	-1,5	-2	-1	13	-0,04	0	3	14	1333
1876	12,4	13	-6	22	-2,9	-3	-3	15	333
1877	3,0	2	-5	16	-0,6	-1	0	15	1189
1878	2,3	3	6	15	-0,7	-0,5	0	16	1382
1879	5,3	5	7	17	8,0	6	3	17	1340
1880	0,2	-1	-5	15	-0,4	-1	0	13	1351
1881	4,0	3	2	16	3,7	3	0	14	875
1882	7,3	6	4	12	0,8	0	0	13	918
1883	3,1	2	1	14	-0,5	0	0	14	1390
1884	2,4	2	6	12	0,2	0	0	12	1411
1885	3,0	2	0	14	2,1	3	3	13	1393
1886	5,8	4	3	14	1,5	2	0	13	1416
1887	-1,7	-2	-1	12	1,3	1	0	12	1395
1888	2,1	1	0	13	3,2	3	3	11	1399
1889	-1,3	-1	3	13	-3,1	-2	-3	14	1403
1890	-4,7	-4	0	13	-0,7	0	3	15	235
1891	1,3	1	-4	16	3,5	2	0	16	1435
1892	1,2	0	-7	13	0,9	1	0	14	1398
1893	-0,1	0	1	14	3,4	3	0	14	1425
1894	-3,0	-4	-6	12	1,7	1	0	13	1418
1895	-0,6	-2	-3	14	-0,7	-1	0	13	1407
1896	-4,8	-6	-9	14	-0,4	-2	0	15	1443
1897	-2,8	-4	-5	14	-0,8	-3	-6	16	1369
1898	-2,4	-3	-10	24	33,1	32	31	17	1401

1899	3,4	3	4	24	32,9	32	34	18	1404
1900	-2,0	-3	-9	24	28,8	28	26	18	707
1901	-0,4	0	8	23	27,2	26	23	18	1368
1902	-0,04	-1	4	23	23,9	22	25	17	1413
1903	13,7	6	-2	32	12,5	8	6	22	1272
1904	10,1	0	0	32	11,6	9	9	21	1391
1905	2,8	-1	-6	23	-8,3	2	9	32	1377
1906	10,1	-1	-10	36	-39,3	-41	-42	23	501
1906,5	15,3	263	-294	354	204,2	204	172	46	67
1907	-0,4	-4	-8	19	12,9	11	14	20	293
1908	16,9	11	10	41	44,5	39	36	29	1320
1909	26,3	26	35	34	28,3	29	30	25	523

Tableau V-56 : Statistiques annuelles des résidus en hauteur et en temps pour la série Enet-Boyard.

	Résidus en Hauteur (cm)				Résidus en Temps (min)				Nombre de valeurs
	Moyenne	Médiane	Mode	Ecart-type	Moyenne	Médiane	Mode	Ecart-type	
1863	-2,5	-3	-4	18	1,5	1	3	15	1297
1864	-4,9	-6	-9	15	2,0	2	0	13	1417
1865	-0,6	-3	-3	17	0,8	0	0	13	1411
1866	2,7	2	6	14	-1,3	-1	0	12	1401
1867	0,7	0	4	18	-0,5	0	0	13	1363
1868	-1,6	-4	-4	18	-0,02	0	0	13	1396
1869	2,0	0	-2	20	1,7	1	0	17	1430
1870	-3,5	-5	-9	18	0,01	0	0	15	1429
1871	0,5	0	1	19	-0,1	0	0	14	1405
1872	4,8	3	0	16	-1,3	-1	0	14	1432
1873	1,4	-1	-3	21	-0,01	-1	0	17	1437
1874	-6,4	-7	-3	19	1,0	0	0	17	1434

Tableau V-57 : Statistiques annuelles des résidus en hauteur et en temps pour la série de La Rochelle.

D'ores et déjà, nous pouvons dire que les résidus en hauteur sont centrés sur 1 cm pour la série Enet-Boyard et sur 0 cm pour la série de La Rochelle, ce qui démontre le bon recalage des deux séries par rapport à un même zéro. La dispersion des résidus en hauteur est en moyenne de 14 cm à Enet-Boyard et de 18 cm à La Rochelle. Ces résultats sont cohérents avec ceux de Brest : centrés sur 0 cm, dispersion de 14 cm [Pouvreau, 2008]. Les résidus en temps sont centrés sur 1 min pour la série Enet-Boyard et 0 min pour la série de La Rochelle. La dispersion est, elle, de 15 min à Enet-Boyard et de 14 min à La Rochelle. Ces valeurs sont plus élevées que celles enregistrées à Brest (8 min) [Pouvreau, 2008] et Liverpool (10 min) [Woodworth, 1999a], ce qui laisse à penser qu'il y a bien des problèmes d'horloge plus récurrents dans les séries du littoral charentais. Afin de faciliter la lecture de ces résultats, nous les avons représentés graphiquement (*figure V-94*).

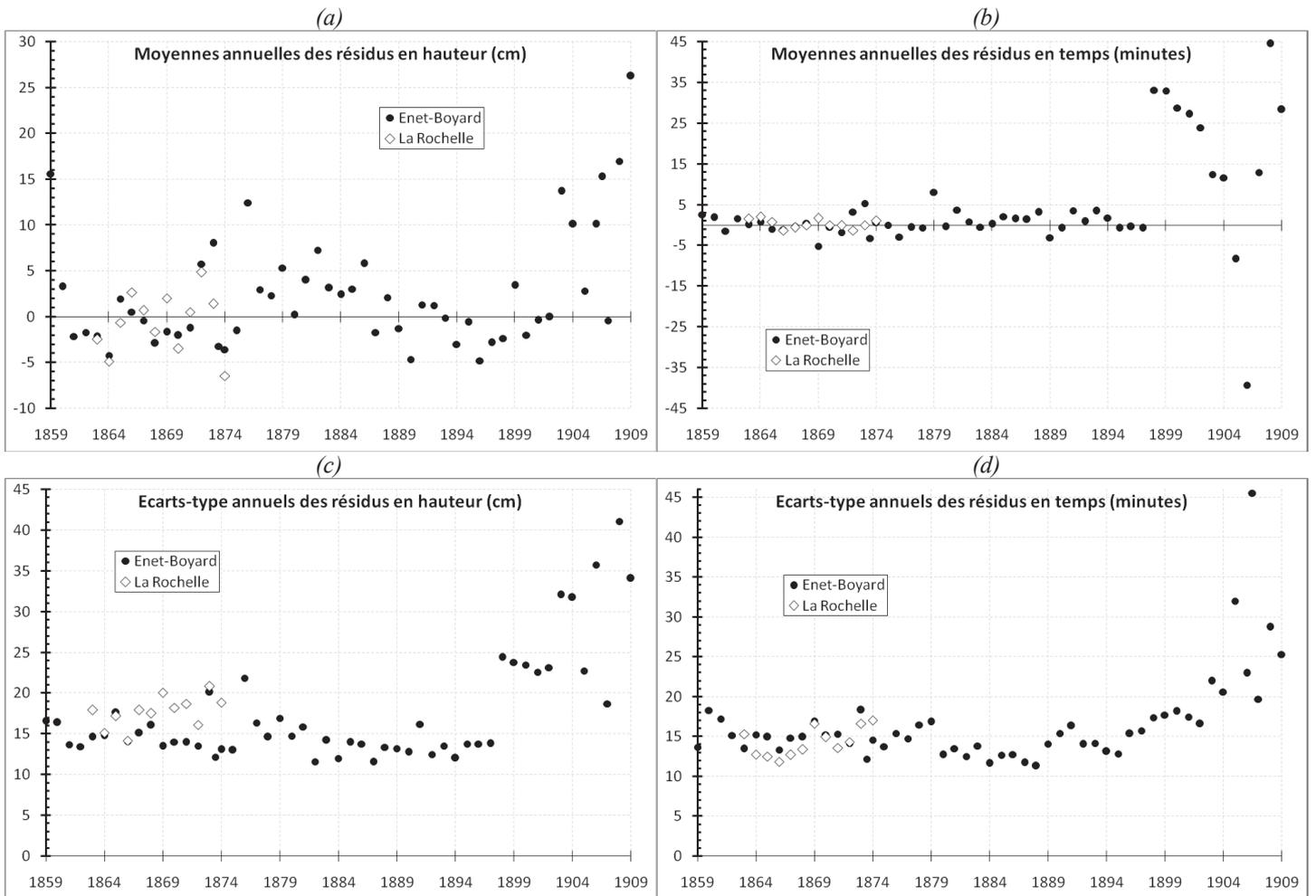


Figure V-94 : Moyennes annuelles des résidus en hauteur (a) et en temps (b) et écarts-types annuels des résidus en hauteur (c) et en temps (d) pour les séries d'Enet-Boyard et La Rochelle (1859-1909).

La figure V-94 confirme bien les problèmes importants de décalage en temps à partir de 1898 au fort Boyard. En effet, il apparaît un décalage d'environ 30 min entre les mesures de 1873-1897 et celles de 1898-1901, ce qui confirme le résultat entrevu lors de l'analyse de l'évolution de la phase de M2 (cf. V.4.5.2.2. *Etude de la stabilité des ondes de marée*). Ce décalage varie ensuite de - 42 min à + 36 min entre 1901 et 1909, sans qu'aucune explication ne soit donnée dans les registres de marée. Le paroxysme est atteint du 14 au 31 mai 1906 avec un décalage d'environ 2h50. Cela peut s'expliquer et se comprendre ; voici la note retrouvée dans le registre des marées de 1907 : « *Nettoyage de l'appareil marégraphique et des instruments scientifiques après désinfection des locaux par suite de très longues maladie suivie de mort de l'observateur Monneraud* ». Cet observateur était en fonction au fort Boyard en 1906 et l'on peut comprendre que son esprit ne soit pas tout entier à son travail. Cependant, cela n'explique pas tout, car sa prise de fonction au fort date de juillet 1905 ; les décalages en temps observés dès 1898 ne sont donc pas de son fait.

Afin de pouvoir poursuivre l'analyse du contrôle qualité par l'étude des résidus, et surtout, en vue de l'exploitation future des données marégraphiques, il est important de corriger ces décalages en temps. L'étude horaire des résidus de la période 1898-1909 nous a permis de dresser la liste des décalages en temps devant être corrigés (tableau V-58).

Année	Période	Correction en temps à appliquer
1898	1 ^{er} janvier (00h) - 1 ^{er} février (12h)	+ 713 min (+ 745 min (12h25) - 32 min)
	1 ^{er} février (13h) - 16 février (12h)	+ 708 min (+ 745 min (12h25) - 37 min)
	16 février (13h) - 16 juin (12h)	+ 713 min (+ 745 min (12h25) - 32 min)
	16 juin (13h) - 1 ^{er} juillet (12h)	+ 730 min (+ 745 min (12h25) - 15 min)
	1 ^{er} juillet (13h) - 1 ^{er} septembre (12h)	+ 713 min (+ 745 min (12h25) - 32 min)
	1 ^{er} septembre (13h) - 16 septembre (12h)	+ 702 min (+ 745 min (12h25) - 43 min)
	16 septembre (13h) - 31 décembre (23h)	+ 713 min (+ 745 min (12h25) - 32 min)
1899	1 ^{er} janvier (00h) - 31 décembre (23h)	+ 713 min (+ 745 min (12h25) - 32 min)
1900	1 ^{er} janvier (00h) - 31 décembre (23h)	+ 720 min (+ 745 min (12h25) - 25 min)
1901	1 ^{er} janvier (00h) - 31 décembre (23h)	+ 720 min (+ 745 min (12h25) - 25 min)
1902	1 ^{er} janvier (00h) - 31 décembre (23h)	+ 720 min (+ 745 min (12h25) - 25 min)
1903	1 ^{er} janvier (00h) - 31 mars	+ 720 min (+ 745 min (12h25) - 25 min)
1904	16 octobre - 1 ^{er} novembre (12h)	- 15 min
	1 ^{er} novembre (13h) - 3 décembre (12h)	- 21 min
	3 décembre (13h) - 31 décembre (23h)	- 9 min
1905	1 ^{er} janvier (00h) - 1 ^{er} janvier (12h)	- 9 min
	1 ^{er} janvier (13h) - 16 mars (12h)	- 19 min
	16 mars (13h) - 1 ^{er} avril (12h)	- 10 min
	1 ^{er} mai (13h) - 1 ^{er} juin (12h)	- 10 min
	1 ^{er} juin (13h) - 16 juin (12h)	- 15 min
	5 août (09h) - 16 août (16h)	+ 7 min
	1 ^{er} septembre (12h) - 9 septembre (13h)	+ 53 min
	9 septembre (14h) - 16 septembre (12h)	+ 79 min
	16 septembre (13h) - 1 ^{er} novembre (12h)	+ 43 min
	1 ^{er} novembre (13h) - 16 novembre (12h)	+ 64 min
	16 novembre (13h) - 16 décembre (12h)	+ 50 min
16 décembre (13h) - 31 décembre	+ 43 min	
1906	1 ^{er} janvier - 10 janvier (13h)	+ 45 min
	10 janvier (14h) - 16 janvier (13h)	+ 55 min
	16 janvier (14h) - 16 avril (02h)	+ 45 min
	16 avril (03h) - 30 avril	+ 40 min
	1 ^{er} mai - 10 mai	+ 45 min
	14 mai - 1 ^{er} juin	+ 172 min
1907	28 - 31 juillet	- 10 min
	2 - 30 septembre	- 10 min
	21 - 31 décembre	+ 711 min (+ 745 min (12h25) - 34 min)
1908	1 ^{er} janvier (00h) - 1 ^{er} janvier (12h)	+ 711 min (+ 745 min (12h25) - 34 min)
	1 ^{er} janvier (13h) - 10 janvier (12h)	+ 720 min (+ 745 min (12h25) - 25 min)
	10 janvier (13h) - 2 février (10h)	+ 711 min (+ 745 min (12h25) - 34 min)
	2 février (11h) - 10 février (18h)	+ 720 min (+ 745 min (12h25) - 25 min)
	10 février (19h) - 16 juillet (12h)	+ 711 min (+ 745 min (12h25) - 34 min)
	16 juillet (13h) - 21 août (16h)	+ 718 min (+ 745 min (12h25) - 27 min)
	21 août (17h) - 16 octobre (12h)	+ 711 min (+ 745 min (12h25) - 34 min)
	16 octobre (13h) - 31 octobre (12h)	+ 702 min (+ 745 min (12h25) - 43 min)
	31 octobre (13h) - 16 novembre (12h)	+ 711 min (+ 745 min (12h25) - 34 min)
	16 novembre (13h) - 16 décembre (12h)	+ 692 min (+ 745 min (12h25) - 53 min)
16 décembre (13h) - 31 décembre	+ 711 min (+ 745 min (12h25) - 34 min)	
1909	1 ^{er} janvier - 15 mai	+ 715 min (+ 745 min (12h25) - 30 min)

Tableau V-58 : Décalages en temps détectés lors de l'analyse des résidus horaires entre 1898 et 1909 au fort Boyard.

L'ensemble des corrections en temps répertoriées dans le *tableau V-58* ont été appliquées aux données marégraphiques de la période 1898-1909. Il est surprenant de constater que de 1898 à mars 1903, ainsi que de décembre 1907 à 1909, il existe un décalage en temps équivalent à un cycle complet de marée (12h25 ou 745 minutes), auquel s'ajoute par la suite des problèmes d'horloge (*figure V-95*). Les périodes au cours desquelles on retrouve ce décalage correspondent exactement à l'arrivée d'un nouvel observateur au fort : l'observateur Fage a débuté son activité début janvier 1898 et a été remplacé en avril 1903 ; l'observateur Bourdin a débuté en décembre 1907 et est resté en place jusqu'en mai 1909.

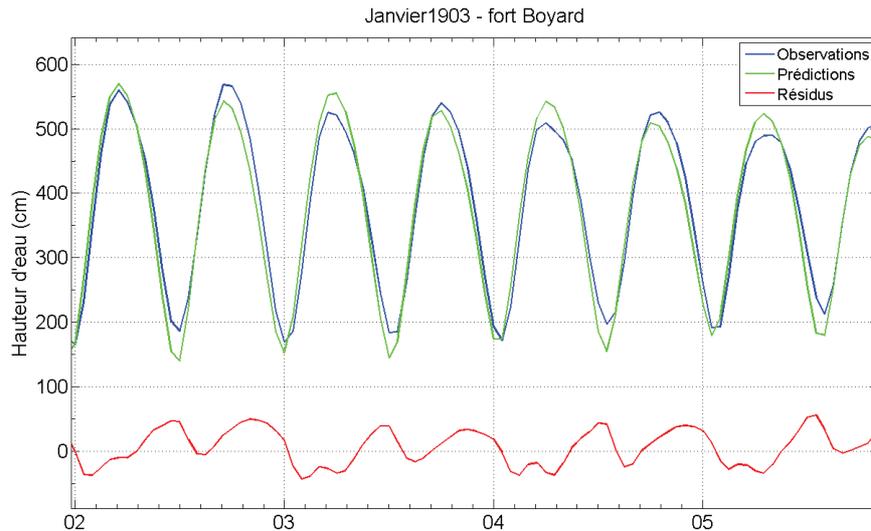


Figure V-95 : Illustration du décalage en temps d'un cycle de marée (12h25) dans les données de janvier 1903.

• Résidus (observations - prédictions de la marée) corrigés de la pression

Comme nous l'avons vu jusqu'ici, les résidus sont un bon indicateur de la qualité des données du niveau marin. Cependant, par définition, les résidus contiennent d'autres signatures, et la plus importante d'entre elles est la signature météorologique. L'influence météorologique est majoritairement une combinaison des effets de la pression atmosphérique et du vent. Ainsi, en retirant l'effet de la pression atmosphérique au signal des résidus, on diminue la part de la variabilité naturelle des résidus, ce qui fait ressortir un peu plus la part liée aux erreurs de mesures (*figure V-96*).

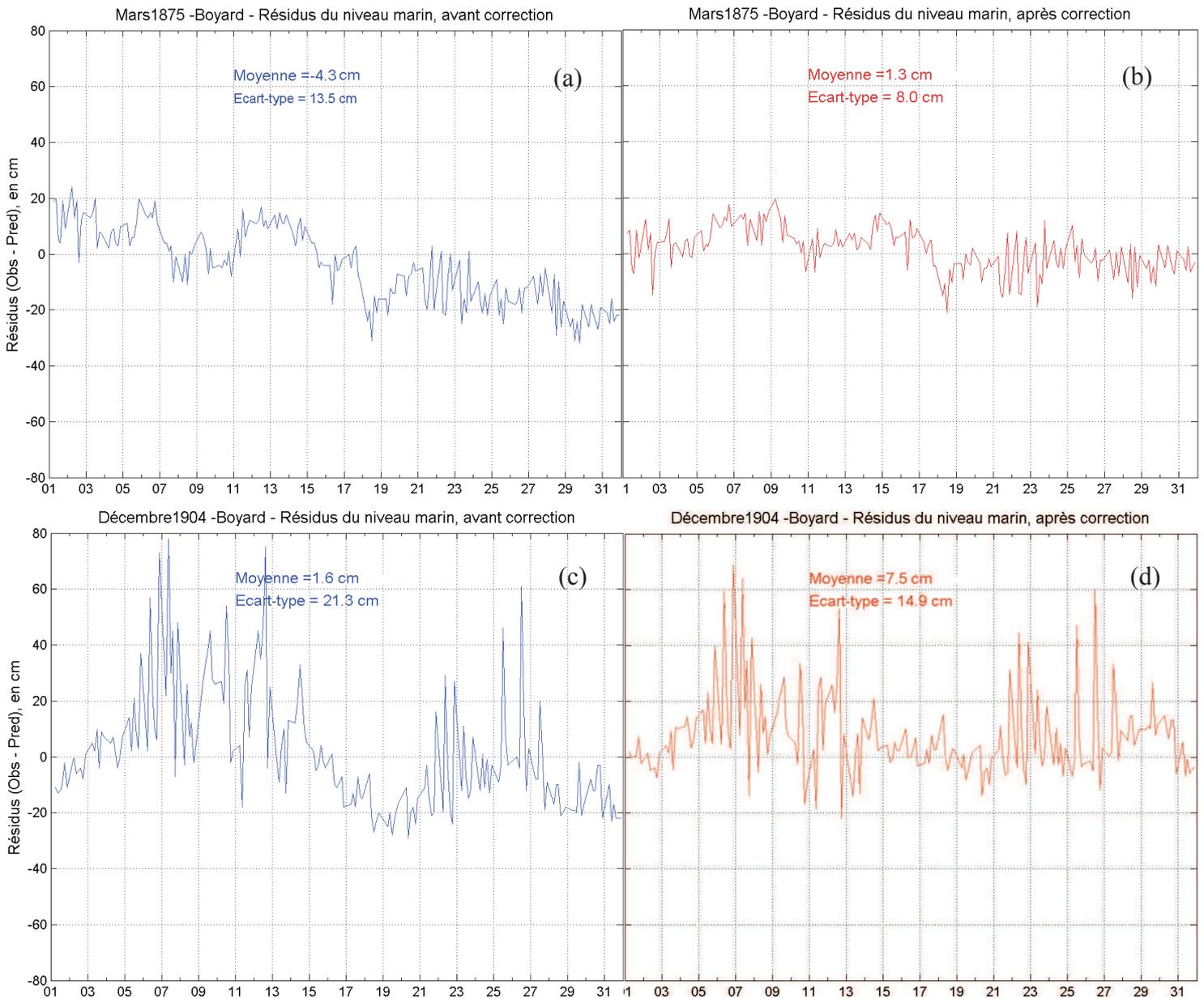


Figure V-96 : Résidus avant et après correction de la pression atmosphérique. Les cas (a) et (b) illustrent des données de bonne qualité, contrairement aux cas (c) et (d) où les pics ne disparaissent pas après correction.

Nous avons donc étudié les écarts-types mensuels des résidus corrigés de la pression atmosphérique, afin d'obtenir un indice de la qualité des mesures marégraphiques, mois par mois. Malgré la correction de la pression atmosphérique, le signal des résidus possède encore la signature de l'effet du vent, ainsi l'écart-type des résidus aura tendance à être plus important en hiver (période de tempêtes) qu'en été (période de beau temps). Il faut donc garder à l'esprit que cet indice de qualité est relatif et ne fait que donner une première idée de la qualité des mesures. Il est, par la suite, indispensable de contrôler visuellement les courbes des observations, prédictions et résidus. Par exemple, un décalage en temps d'une dizaine de minutes entrainera un écart-type des résidus important, sans pour autant que cela remette en cause la qualité des mesures du niveau marin effectuées. En gardant ces aspects à l'esprit, les résultats sont synthétisés dans les *tableaux V-60* et *V-61*. Nous avons réutilisé le code défini par le *tableau V-43*, avec les critères suivants :

Code	Signification	Critère
1	Bonne qualité	Résidu mensuel < 10 cm
2	Probablement bonne	10 cm ≤ Résidu mensuel < 15 cm
3	Probablement mauvaise	15 cm ≤ Résidu mensuel < 20 cm
4	Mauvaise qualité	Résidu mensuel ≥ 20 cm
9	Absence de données	Nombre de valeurs < 15

Tableau V-59 : Code de chiffres et de couleurs qualifiant la qualité mensuelle des résidus du niveau marin.

VIEUX PORT DE LA ROCHELLE

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1863		12	12	10	10	11	10	12	11	10	13	10
1864	8	10	9	9	8	7	7	7	9	12	14	11
1865	14	12	9	7	8	8	6	7	7	13	15	12
1866	12	12	11	9	9	6	8	8	10	9	9	9
1867	13	8	15	9	9	9	11	8	12	9	9	12
1868	14	10	10	10	6	<i>10</i>	8	9	13	10	12	12
1869	11	12	12	9	9	8	6	7	9	13	9	13
1870	14	<i>15</i>	11	8	8	8	8	7	9	11	13	15
1871	13	8	9	11	11	10	<i>11</i>	9	11	11	8	11
1872	11	8	10	<i>17</i>	<i>10</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>12</i>	<i>14</i>	<i>15</i>	<i>19</i>	<i>20</i>
1873	<i>24</i>	<i>21</i>	<i>13</i>	<i>12</i>	<i>11</i>	<i>11</i>	<i>8</i>	<i>15</i>	<i>11</i>	<i>14</i>	<i>14</i>	<i>12</i>
1874	<i>16</i>	<i>18</i>	<i>11</i>	<i>15</i>	<i>12</i>	<i>12</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>13</i>	<i>18</i>	<i>21</i>

Tableau V-60 : Ecart-types mensuels des résidus (à partir des hauteurs horaires) corrigés de la pression atmosphérique pour la série de La Rochelle (1863-1874) Les résidus en gras et italique ne sont pas corrigés de la pression. Le code couleur correspond à l'indice de qualité défini par le tableau V-59.

ENET-BOYARD

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1859							<i>9</i>	<i>12</i>	<i>17</i>	<i>16</i>	<i>17</i>	<i>22</i>
1860	<i>21</i>	<i>14</i>	<i>15</i>	<i>13</i>	7	6	<i>17</i>	12	8	8	<i>16</i>	12
1861	11	15	22	11	6	7	8	6	8	11	12	14
1862	12	9	9	10	9	8	6	8	12	12	9	11
1863	10	8	9	7	8	8	9	9	10	11	12	12
1864	9	8	13	8	8	13	<i>16</i>	8	8	9	15	11
1865	17	15	12	6	8	9	7	6	8	23	17	15
1866	10	15	10	9	8	6	10	9	8	10	15	7
1867	16	19	12	10	12	5	10	<i>11</i>	17	22	8	10
1868	16	10	10	9	9	9	8	7	13	22	12	19
1869	10	15	24	9	9	7	7	15	11	15	20	14
1870	13	<i>15</i>	11	6	9	6	7	8	10	11	14	12
1871	17	8	10	9	8	9	7	9	20	16	9	12
1872	10	15	14	10	6	9	6	9	9	10	14	17
1873	20	14	14	12	9	8	NaN	7	9	10	11	12
1874	8	8	6	8	7	9	12	6	7	10	10	16
1875	10	9	8	7	5	6	6	10	7	9	14	7
1876	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	15	17	20	23
1877	16	20	8	11	10	9	8	9	<i>14</i>	10	16	14
1878	14	13	12	10	<i>12</i>	13	11	9	7	10	10	16
1879	23	23	10	<i>21</i>	7	9	14	15	11	33	15	11
1880	13	9	8	12	8	8	8	9	12	13	14	23
1881	24	12	22	7	10	9	8	9	NaN	NaN	NaN	NaN
1882	NaN	NaN	NaN	NaN	12	10	7	7	10	9	9	9
1883	9	14	8	7	6	6	6	6	11	9	11	9
1884	8	10	9	16	8	6	9	6	7	7	7	11
1885	11	9	14	9	7	5	6	8	13	11	10	9

1886	9	7	9	8	10	7	7	7	7	11	9	11
1887	9	9	8	8	7	6	5	5	9	8	10	10
1888	9	8	13	7	8	6	6	7	6	10	12	11
1889	10	9	11	8	6	8	7	9	17	25	22	15
1890	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	13	11
1891	24	22	11	7	11	9	11	8	7	12	16	12
1892	13	18	18	7	8	7	7	8	7	8	7	9
1893	12	9	8	7	9	6	7	6	7	8	9	10
1894	11	7	7	7	7	7	9	6	9	7	12	11
1895	13	9	10	7	6	8	9	7	6	9	10	8
1896	10	8	9	7	8	10	7	8	11	9	10	15
1897	14	11	12	13	11	11	12	11	11	14	12	16
1898	10	8	7	8	10	9	6	8	7	9	9	13
1899	12	12	8	6	8	7	7	8	6	7	9	11
1900	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	5	8	9	9	9	12
1901	13	8	11	9	7	7	6	7	8	9	9	10
1902	11	8	7	8	7	7	9	9	11	9	11	20
1903	18	22	18	NaN	16	21	19	18	18	15	16	14
1904	18	17	21	20	15	11	15	17	20	20	17	15
1905	20	22	11	8	11	10	8	8	10	11	19	16
1906	16	16	20	23	17	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
1907	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	5	7	8	NaN	NaN	18
1908	47	53	76	43	22	10	14	10	32	35	32	62
1909	42	29	33	19	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN

Tableau V-61 : Ecart-types mensuels des résidus (à partir des hauteurs horaires) corrigés de la pression atmosphérique pour la série Enet-Boyard (1859-1909) Les résidus en gras et italique ne sont pas corrigés de la pression. Le code couleur correspond à l'indice de qualité défini par le tableau V-59.

• *Contrôle visuel systématique des résidus*

Le contrôle visuel systématique des courbes des observations, des prédictions et des résidus, permet de confirmer ou d'infirmer les résultats des contrôles effectués jusqu'à présent. L'ensemble des résultats de ce contrôle est disponible en annexe électronique et est synthétisé dans la partie « V.4.6. Résultats et discussion ». Ci-dessous, quelques exemples caractéristiques des courbes de résidus :

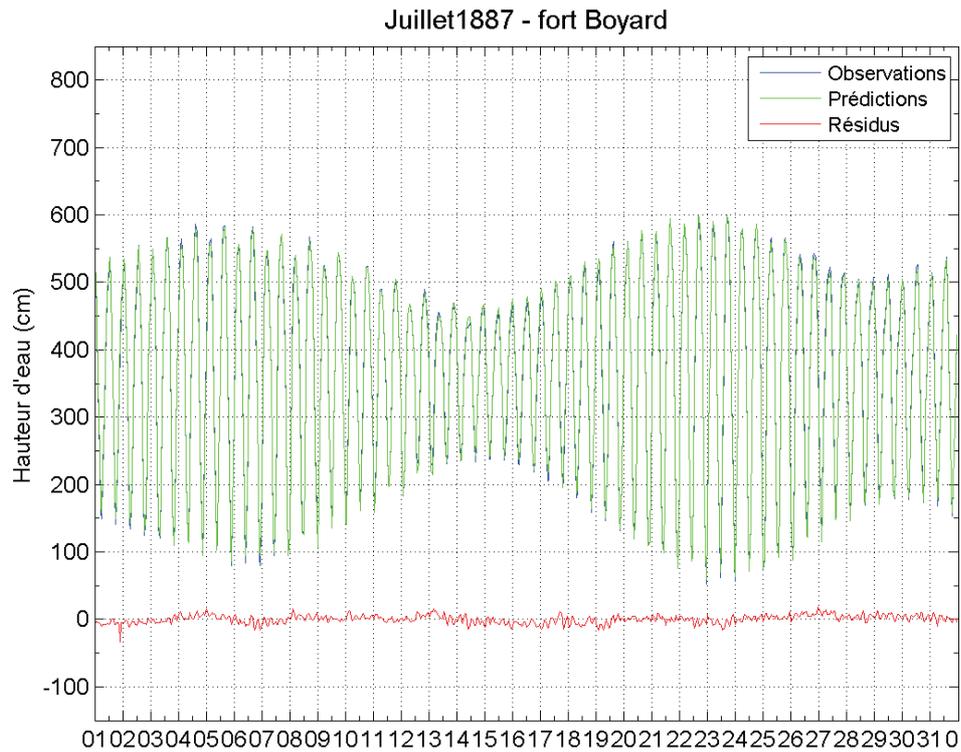


Figure V-97 : Résidus ne présentant aucune anomalie, les observations sont de très bonne qualité.

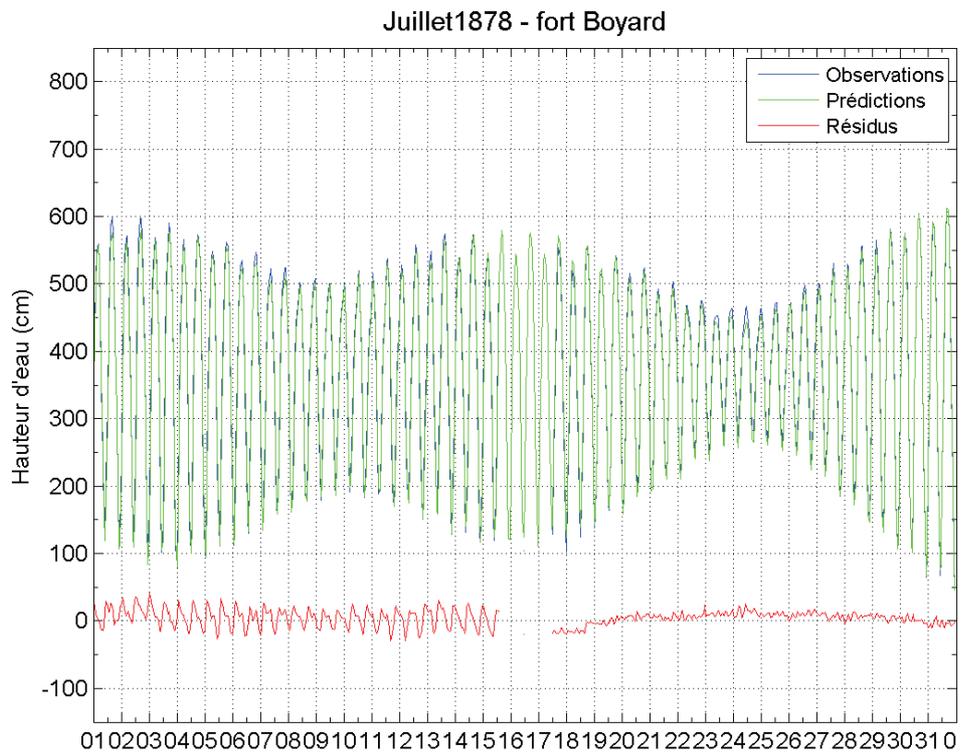


Figure V-98 : Du 1^{er} au 15, la courbe des résidus est typique d'un décalage en temps (problème d'horloge)

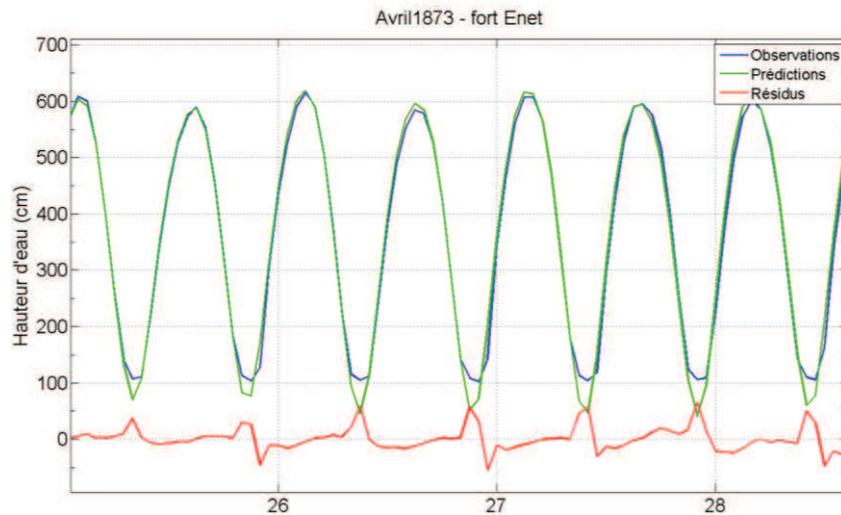


Figure V-99 : Courbe des résidus typique d'un envasement du fond du puits de tranquillisation.

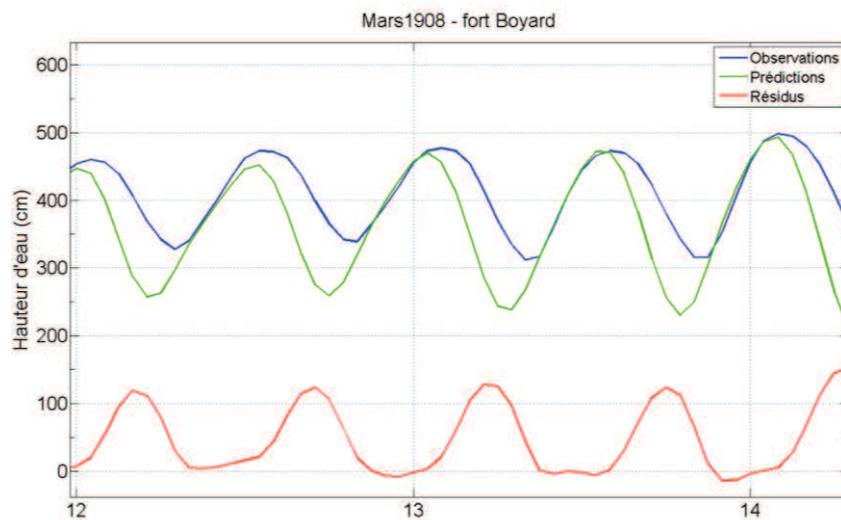


Figure V-100 : Courbe des résidus typique d'un puits de tranquillisation qui se remplit, mais ne se vide que très difficilement.

V.4.5.2.5. Bilan

Le contrôle qualité des lots de mesures enregistrées au fort Enet (1859-1873), au fort Boyard (1873-1909) et au Vieux port de La Rochelle (1863-1874) a été réalisé en utilisant quatre méthodes : la comparaison des moyennes journalières et mensuelles avec une station proche (« *Buddy checking* ») ; l'étude de la stabilité de l'onde de marée M2 ; une étude couplée niveau marin / pression atmosphérique, reposant sur la relation du baromètre inverse ; et enfin, l'étude des résidus en hauteur et en temps à partir des pleines et basses mers et des hauteurs horaires.

- Précision des mesures : $\pm 0,5$ cm en hauteur ; ± 25 sec en temps

- *Problèmes généraux détectés :*

- ⇒ Problèmes d'horloge nombreux et fréquents
- ⇒ Echelles de marée souvent emportées par la mer aux forts Enet et Boyard, empêchant ainsi tout contrôle de la bonne marche du marégraphe
- ⇒ Marégraphes des forts Enet et Boyard soumis à des conditions beaucoup plus difficiles qu'un marégraphe abrité dans un port : action de la houle et du vent entraînant de nombreuses casses et dysfonctionnements. Pour les mêmes raisons, les conditions d'accès au puits de tranquillisation sont très difficiles voire impossibles en période de tempête.
- ⇒ Dérèglement du marégraphe plus rapide aux forts Enet et Boyard, car soumis à de fortes secousses et à une humidité importante

- *Problème détecté au Vieux port de La Rochelle :*

- ⇒ Basses mers de vive-eau régulièrement non enregistrées (envasement du fond du puits)

- *Problème détecté au fort Enet :*

- ⇒ Envasement régulier de la cunette et du puits de tranquillisation

- *Problèmes détectés au fort Boyard :*

- ⇒ Conditions de vie sur le fort si difficiles qu'il devient très compliqué de trouver des observateurs pour s'occuper des mesures marégraphiques
- ⇒ Envasement du puits de tranquillisation à partir de 1899
- ⇒ Démolition partielle du puits à partir de 1900
- ⇒ Non enregistrement du niveau d'eau en dessous de 1,70 - 1,80 m du 13 décembre 1902 au 22 février 1905 et du 10 novembre 1905 au 10 mai 1906
- ⇒ Puits envasé et en partie démoli de décembre 1907 à mai 1909

- *Ecarts-types mensuels des résidus :* cf. tableaux V-60 et 61.

V.4.5.3. Lots de mesures marégraphiques récentes (1941-2011)

V.4.5.3.1. Comparaison avec une station proche ('Buddy checking')

Les lots de mesures récents à contrôler sont les lots du port de La Pallice : 1941-1944, 1967-1980 et 1995-2010, ainsi que le lot de l'île d'Aix : 1973-1974. De la même façon que précédemment, nous allons vérifier la qualité de ces jeux de données par la méthode du « *Buddy checking* » en comparant les moyennes mensuelles de nos séries à celles de Brest. Ainsi, nous pourrions lister l'ensemble des mois pour lesquels une moyenne est suspecte, toujours en utilisant la différence d des anomalies des moyennes mensuelles (cf. *relation 5.20*). Le principe de la méthode est décrit au paragraphe « *V.4.5.2.1. Comparaison avec une station proche ('Buddy checking')* ». Les figures suivantes présentent l'ensemble

des résultats de ces comparaisons entre La Pallice et Brest (*figures V-101, V-102 et V-104*) d'une part, l'île d'Aix et Brest (*figure V-103*) d'autre part. A la suite de ces figures, les résultats sont synthétisés dans les *tableaux V-62 à V-64* et discutés.

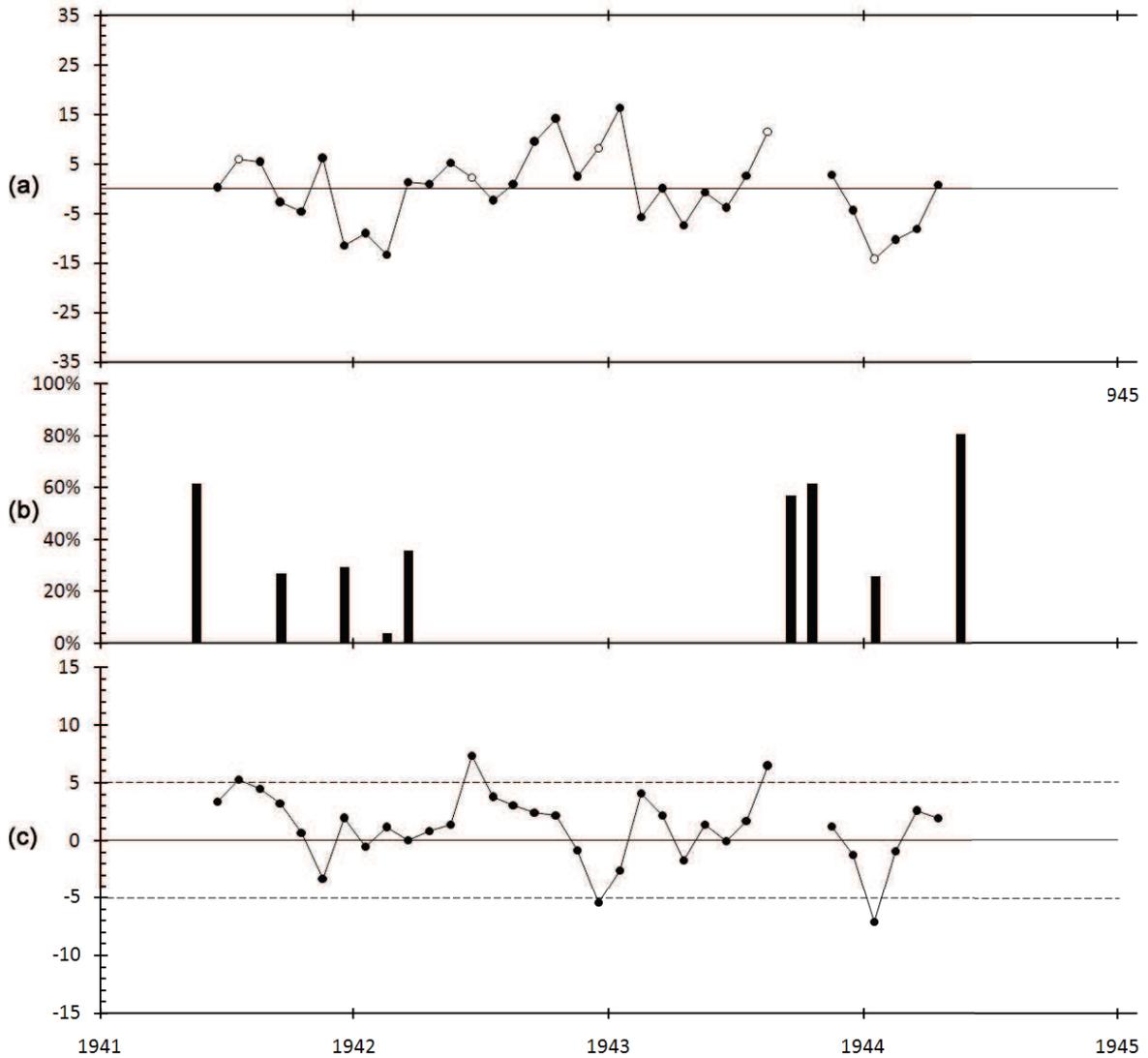


Figure V-101 : (a) Anomalies mensuelles (cm) à La Pallice par rapport au niveau moyen de la mer calculé sur la période 1941-1944 ; les points blancs indiquent une moyenne mensuelle suspecte. (b) Pourcentage de données manquantes par mois pour la série de La Pallice. (c) Anomalies mensuelles (cm) de La Pallice moins Brest ; les lignes pointillées marquent le seuil à partir duquel une moyenne mensuelle est considérée comme suspecte.

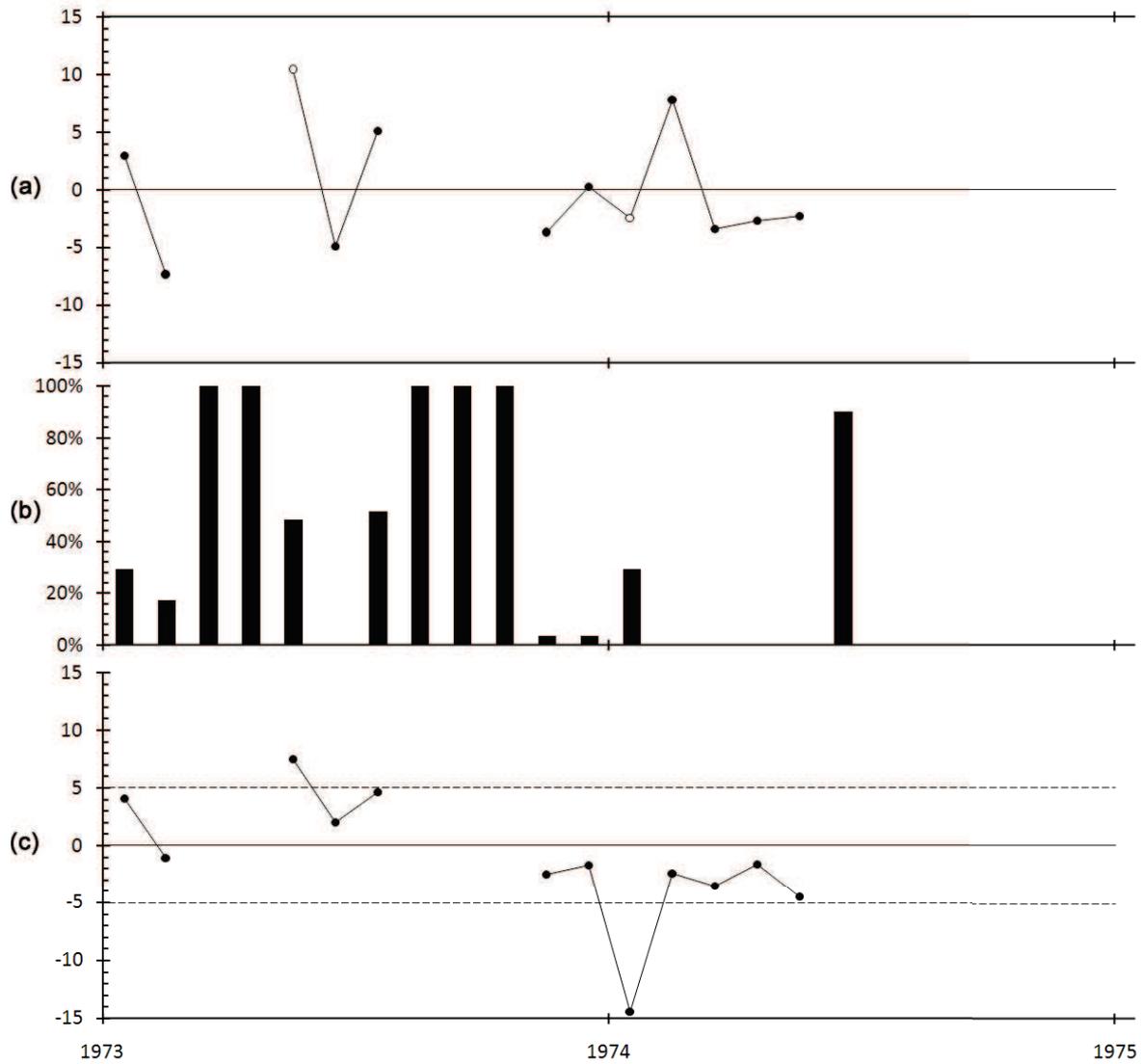


Figure V-102 : (a) Anomalies mensuelles (cm) à l'île d'Aix par rapport au niveau moyen de la mer calculé sur la période 1973-1974 ; les points blancs indiquent une moyenne mensuelle suspecte. (b) Pourcentage de données manquantes par mois pour la série de l'île d'Aix. (c) Anomalies mensuelles (cm) d'Aix moins Brest ; les lignes pointillées marquent le seuil à partir duquel une moyenne mensuelle est considérée comme suspecte.

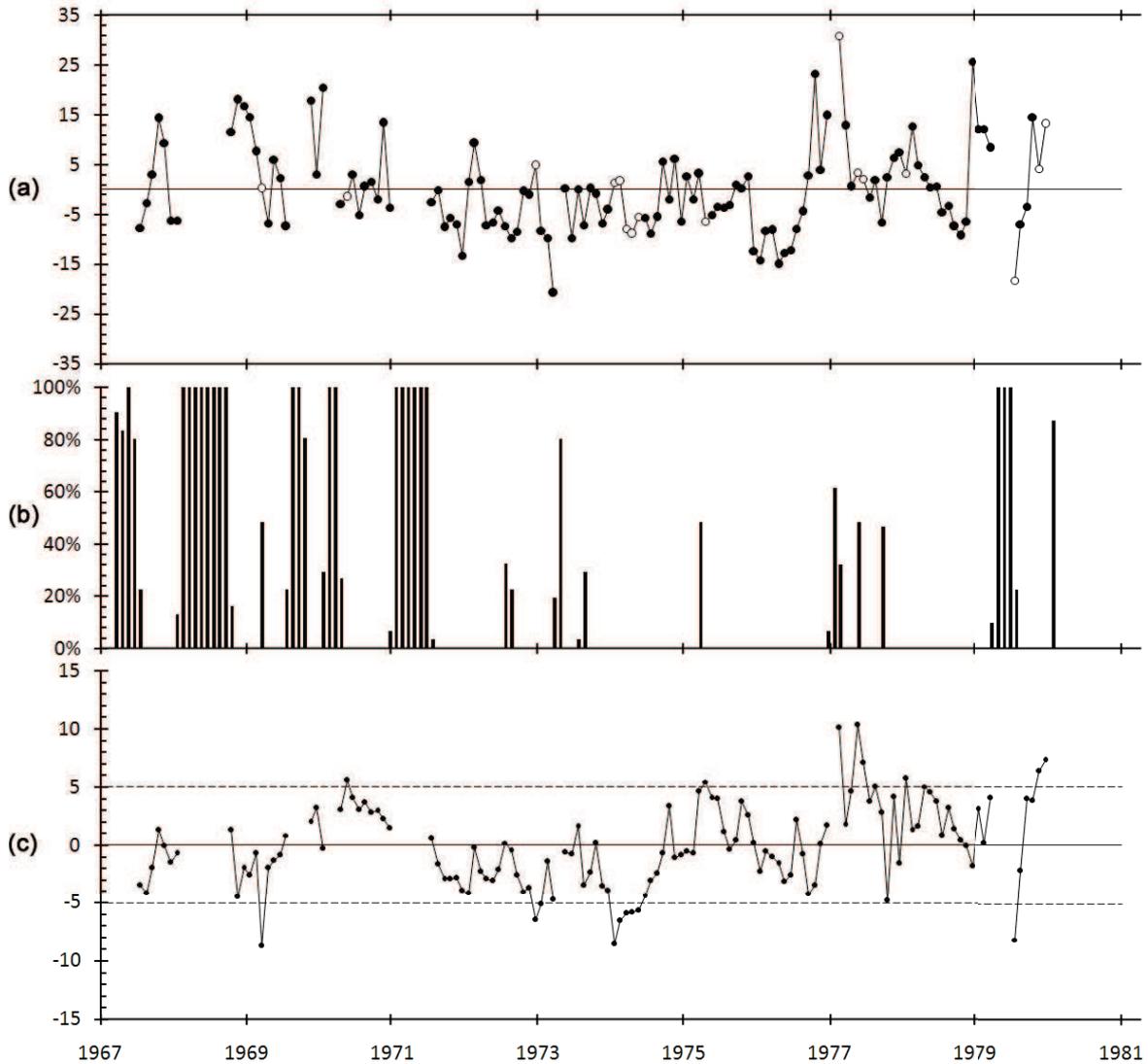


Figure V-103 : (a) Anomalies mensuelles (cm) à La Pallice par rapport au niveau moyen de la mer calculé sur la période 1967-1980 ; les points blancs indiquent une moyenne mensuelle suspecte. (b) Pourcentage de données manquantes par mois pour la série de La Pallice. (c) Anomalies mensuelles (cm) de La Pallice moins Brest ; les lignes pointillées marquent le seuil à partir duquel une moyenne mensuelle est considérée comme suspecte.

	Aix / Brest	La Pallice / Brest	Aix / La Pallice
1973	-	-	Janvier
	Mai	-	Mai
1974	Janvier	Janvier	Janvier
	-	Février	-
	-	Mars	-
	-	Avril	-
	-	Mai	-

Tableau V-62 : Liste des moyennes mensuelles suspectes détectées dans les séries de La Pallice et de l'île d'Aix entre 1973 et 1974. La légende est indiquée dans le tableau V-63 suivant.

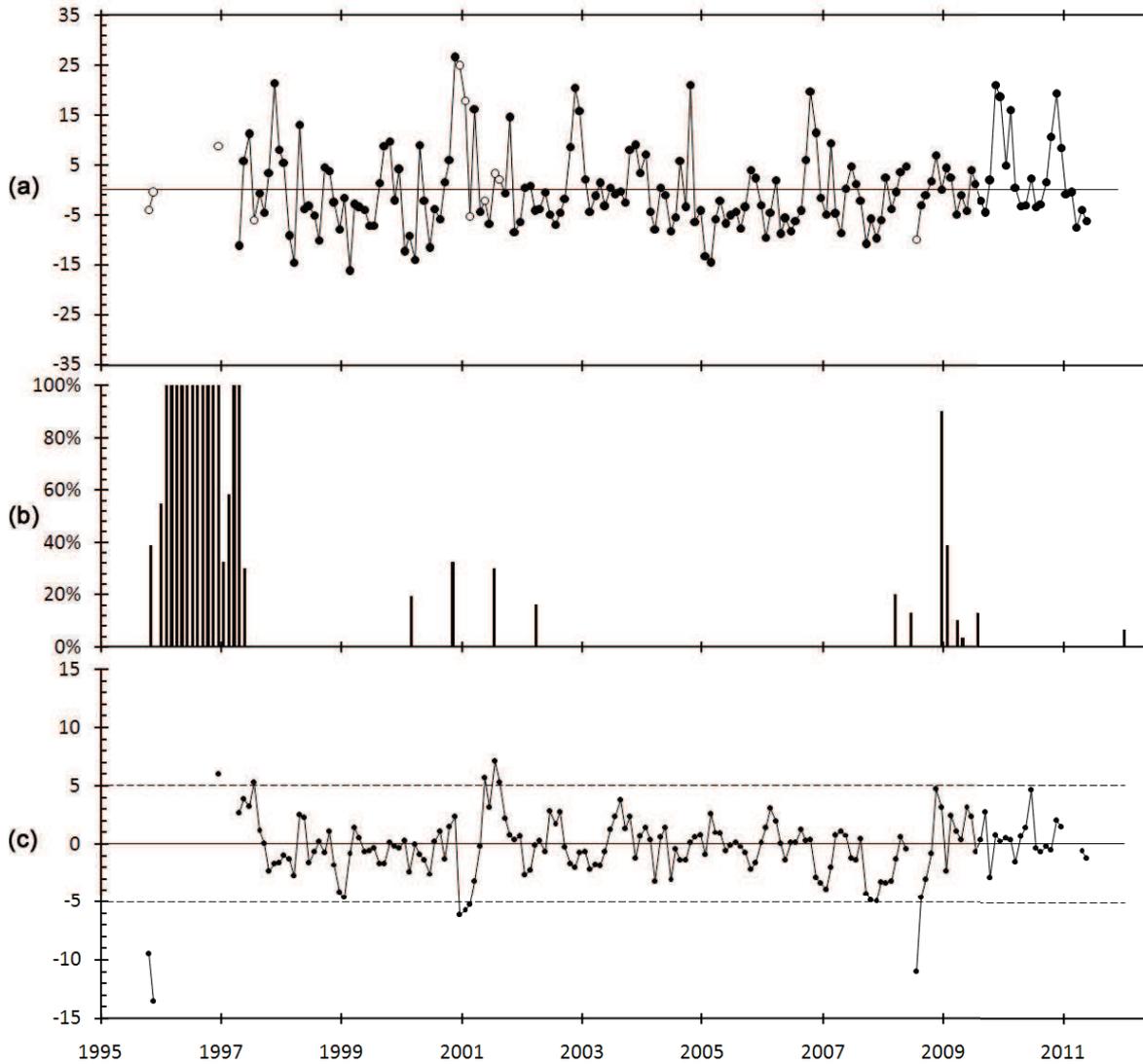


Figure V-104 : (a) Anomalies mensuelles (cm) à La Pallice par rapport au niveau moyen de la mer calculé sur la période 1995-2011 ; les points blancs indiquent une moyenne mensuelle suspecte. (b) Pourcentage de données manquantes par mois pour la série de La Pallice. (c) Anomalies mensuelles (cm) de La Pallice moins Brest ; les lignes pointillées marquent le seuil à partir duquel une moyenne mensuelle est considérée comme suspecte.

Pour faciliter la lecture des graphiques, la série de La Pallice a été analysée en trois temps : d'abord la période 1941-1944, puis la période 1967-1980 et enfin la période 1995-2010. Une comparaison des anomalies des moyennes mensuelles des séries de La Pallice et l'île d'Aix a également été effectuée sur la période 1863-1874, ainsi que des séries de La Pallice et Les Sables d'Olonne sur la période 1995-2010, dans le but de croiser les résultats déjà obtenus lors des comparaisons avec Brest. Les résultats de ces analyses croisées sont résumés dans les *tableaux V-62* et *V-63*. En appliquant les mêmes critères que pour la série Enet-Boyard, nous avons pu détecter plusieurs catégories de moyennes mensuelles suspectes, dont :

- en **Vert** : décembre 1996, octobre 1999, mai, juillet et août 2001 et mai 2004 (La Pallice)
- en **Rouge** : mai 1973 (Aix), janvier 1974 (Aix et La Pallice)
- $|d| > 10$ cm : janvier 1974 (Aix), novembre 1995 et juillet 2008 (La Pallice)

	La Pallice / Brest	La Pallice / Les Sables d'Olonne	Brest / Les Sables d'Olonne	Légende
1995	Octobre	Octobre	-	x : données manquantes pour la comparaison
	<i>Novembre</i>	Novembre	-	
1996	Décembre	-	Décembre (Brest)	
1997	Juillet	-	-	
1999	-	Octobre	Octobre (Les Sables)	- : aucun problème détecté
	-	Avril	-	
2000	Décembre	Décembre	-	Noir : $|d| > 5$ cm sur une seule comparaison
	Janvier	Janvier	-	
2001	Février	Février	-	
	Mai	-	Mai (Brest)	
	Juillet	-	Juillet (Brest)	
2004	Août	-	Août (Brest)	Rouge : $|d| > 5$ cm sur au moins deux comparaisons différentes
	-	Mai	Mai (Les Sables)	
2006	-	Mars	-	
2008	<i>Juillet</i>	Juillet	-	
2010	-	Décembre	-	

Vert : la moyenne mensuelle suspecte semble être celle de Brest ou des Sables d'Olonne

Tableau V-63 : Liste des moyennes mensuelles suspectes détectées dans la série de La Pallice entre 1995 et 2010. Les mois en gras et en italique indiquent que $|d| > 10$ cm.

Pour les périodes 1941-1944, 1967-1972 et 1975-1980, nous n'avons pas pu procéder à une analyse croisée des résultats. Les moyennes mensuelles de la série de La Pallice, détectées comme suspectes lors de la comparaison avec Brest, sont répertoriées dans le *tableau V-64*. Lors de ces périodes, deux moyennes mensuelles ont un critère $|d| > 10$ cm, impliquant que les moyennes sont fortement suspectées d'être de mauvaise qualité : février et mai 1977. Au total, 28 moyennes mensuelles sont considérées comme suspectes pour la série de La Pallice (33 années), soit un peu moins d'une moyenne mensuelle suspecte par année (comme pour La Rochelle Vieux port), ce qui prouve la qualité de la série. Pour la série de l'île d'Aix, 2 moyennes mensuelles ont été considérées comme suspectes, sur 12 disponibles, de 1973 à 1974.

	La Pallice / Brest
1941	Juillet
1942	Juin
	Décembre
1943	Août
1944	Janvier
1969	Mars
1970	Mai
1972	Décembre
1975	Avril
1977	<i>Février</i>
	<i>Mai</i>
	Juin
1978	Janvier
1979	Juillet
	Novembre
	Décembre

Tableau V-64 : Liste des moyennes mensuelles suspectes détectées dans la série de La Pallice entre 1941 et 1980. Les mois en gras et en italique indiquent que $|d| > 10$ cm.

L'ensemble des résultats des comparaisons La Pallice / Brest et Île d'Aix / Brest est résumé dans le *tableau V-65*. Les points indiquent que les moyennes mensuelles sont de bonne qualité ; les tirets indiquent que des données sont manquantes pour la comparaison ; les moyennes mensuelles identifiées comme suspectes sont notées L (*Lower*) lorsque que la moyenne suspecte est plus basse que prévue et H (*Higher*) lorsqu'elle est plus haute que prévue.

	LA PALLICE											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1941	—	—	—	—	—	.	H	.	.	.	.	.
1942	.	.	.	.	.	H	.	.	.	.	.	L
1943	.	.	.	.	.	.	.	H	—	—	.	.
1944	L	.	.	.	—	—	—	—	—	—	—	—
...												
1967	—	—	—	—	—	—	.	.	.	.	.	.
1968	.	—	—	—	—	—	—	—	—	.	.	.
1969	.	.	L	.	.	.	.	—	—	—	.	.
1970	.	—	—	.	H	.	.	.	.	.	.	.
1971	—	—	—	—	—	—	.	.	.	.	.	.
1972	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	L
1973	.	.	.	—	.	.	.	.	.	.	.	.
1974	L	L	L	L	L	.	.	.	.	.	.	.
1975	.	.	.	H	.	.	.	.	.	.	.	.
1976	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1977	—	H	.	.	H	H	.	.	.	.	.	.
1978	H	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1979	.	.	.	—	—	—	L	.	.	.	H	H
1980	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
...												
1995	—	—	—	—	—	—	—	—	—	L	L	—
1996	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	H
1997	—	—	—	.	.	.	H	.	.	.	.	.
1998	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1999	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
2000	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	L
2001	L	L	.	.	H	.	H	H	.	.	.	.
2002	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
2003	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
2004	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
2005	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
2006	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
2007	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
2008	.	.	.	.	.	—	L	.	.	.	.	.
2009	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
2010	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.

	ÎLE D'AIX											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1973	.	.	—	—	H	.	.	—	—	—	.	.
1974	L	.	.	.	.	—	—	—	—	—	—	—

Tableau V-65 : Récapitulatif des résultats de la comparaison des anomalies des moyennes mensuelles entre La Pallice et Brest (à gauche) et l'île d'Aix et Brest (à droite). Les points indiquent que les moyennes mensuelles sont de bonne qualité ; les tirets indiquent que des données sont manquantes pour la comparaison ; L = moyenne mensuelle suspecte plus basse que prévue ; H = moyenne mensuelle suspecte plus haute que prévue.

Après avoir découvert la présence d'un effet saisonnier dans l'apparition de moyennes mensuelles suspectes des séries Enet-Boyard et La Rochelle, nous avons cherché à savoir s'il en était de même pour la série récente de La Pallice. La *figure V-105* représente le nombre de moyennes mensuelles par mois, pour la période 1941-2010. Premier constat, contrairement aux précédents résultats, il ne paraît pas y avoir plus de moyennes suspectes en hiver qu'en été, la répartition étant plutôt équitable. Cela est plutôt logique puisque contrairement aux observatoires anciens, l'observatoire de La Pallice est abrité des tempêtes et le matériel est plus robuste, limitant ainsi l'impact météorologique sur les mesures. Enfin, il semble que l'on retrouve la même conclusion, à savoir que les moyennes mensuelles suspectes sont

globalement plus basses que prévu en hiver, et plus haute que prévu en été. L'analyse de ces résultats doit également prendre en compte le faible nombre de moyennes suspectes, augmentant l'incertitude de l'analyse.

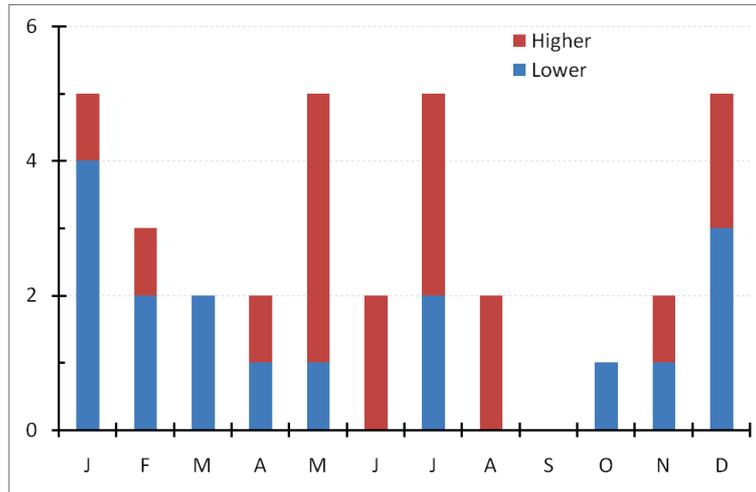


Figure V-105 : Répartition saisonnière des moyennes mensuelles suspectes plus basses (lower) et plus hautes (higher) que prévues, détectées pour les séries de La Pallice et de l'île d'Aix, entre 1941 et 2010.

Une autre méthode a été testée pour détecter les moyennes mensuelles suspectes. Comme pour le contrôle qualité des séries de pression atmosphérique, nous avons calculé le coefficient de corrélation mensuel, à partir des moyennes journalières, entre les séries du littoral charentais (La Pallice et l'île d'Aix) et Brest (figure V-106). Comme précédemment, les valeurs seuils qui semblent se définir sont 0,7 de 1941 à 1980 et 0,8 pour la période la plus récente, qui marque l'avènement des marégraphes côtiers numériques, de plus en plus précis et fiables.

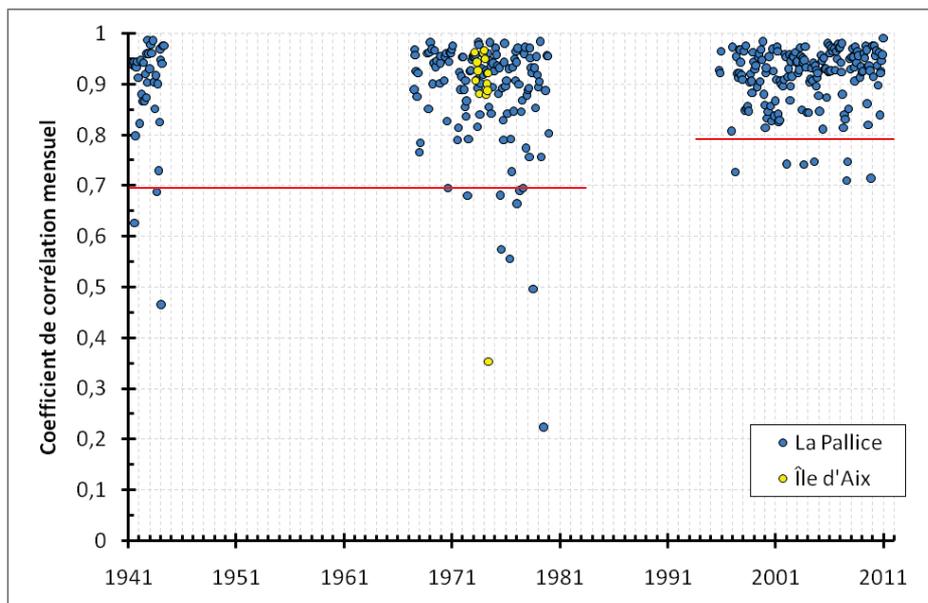


Figure V-106 : Coefficients de corrélation mensuels calculés à partir des moyennes journalières entre La Pallice et Brest (bleu) ; l'île d'Aix et Brest (jaune).

V.4.5.3.2. Etude de la stabilité des ondes de marée

L'évolution de l'amplitude (*figure V-107*) et de la phase (*figure V-108*) de M2 a été calculée pour les séries du port de La Pallice (bleu) et de l'île d'Aix (rouge). Ces constantes harmoniques ont été calculées à l'aide d'une analyse harmonique mobile (avec t_tide) : analyse harmonique de 365 jours de mesures, tous les 60 jours.

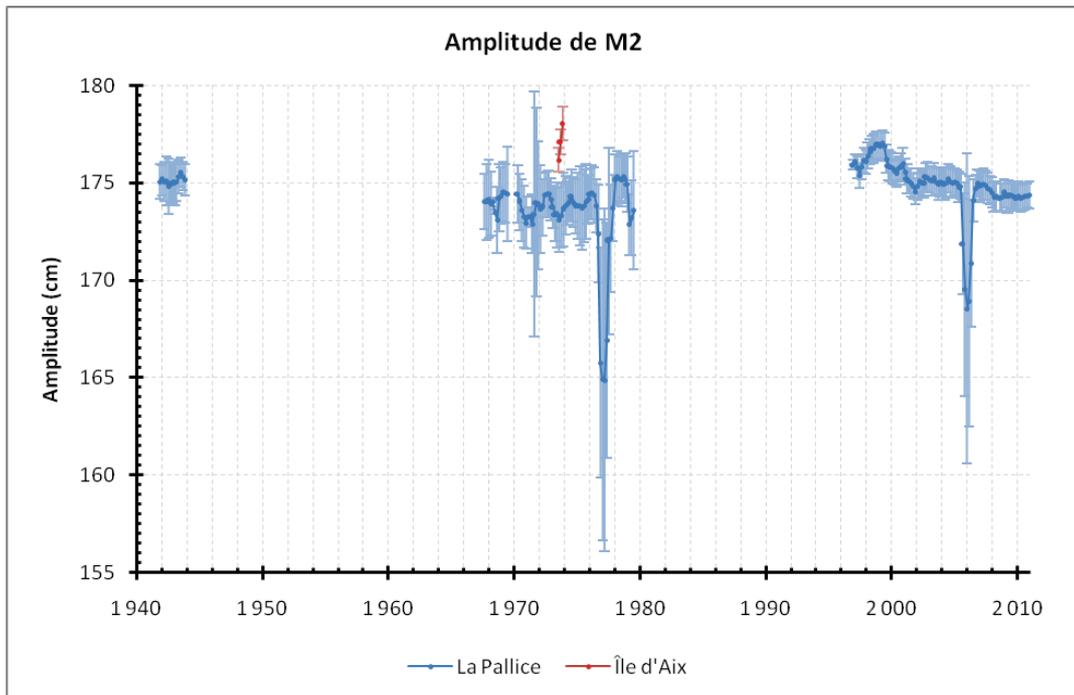


Figure V-107 : Amplitudes et barres d'erreur associées de l'onde M2 pour les séries du port de La Pallice (bleu) et de l'île d'Aix (rouge) sur la période 1941-2011.

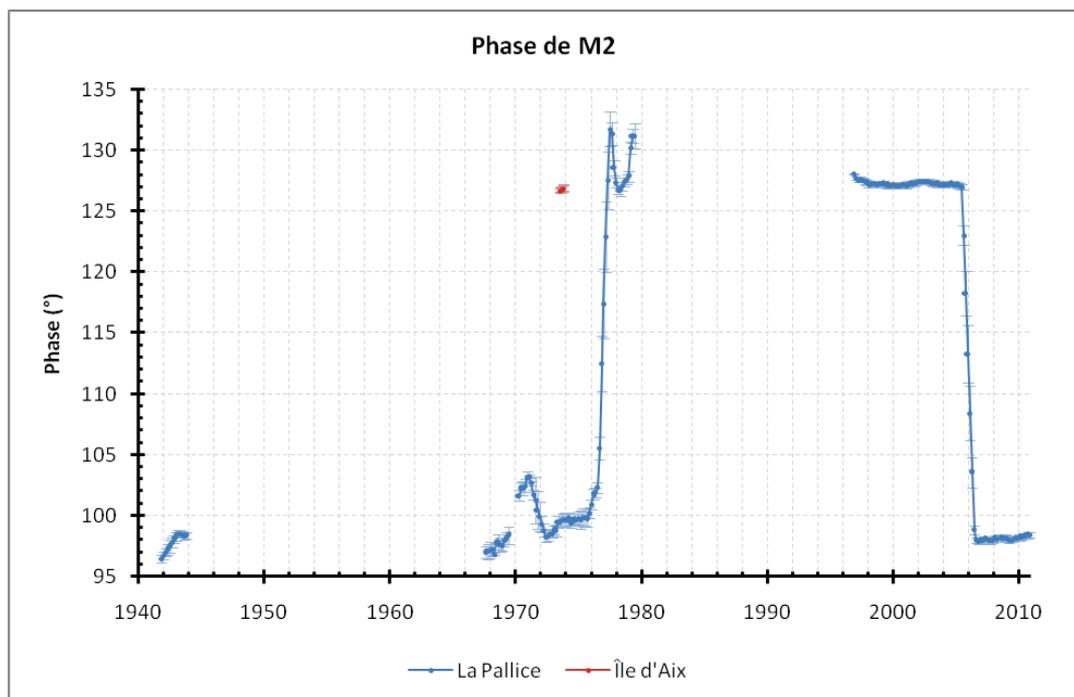


Figure V-108 : Phases et barres d'erreur associées de l'onde M2 pour les séries du port de La Pallice (bleu) et de l'île d'Aix (rouge) sur la période 1941-2011.

L'amplitude de l'onde M2 est globalement stable sur l'ensemble de la période pour la série du port de La Pallice. On note toutefois un décrochage de l'amplitude en 1977 et en 2006, où les valeurs de l'amplitude sont plus basses de 7 à 10 cm. Ce décrochage trouve son explication en étudiant le graphique de l'évolution de la phase de l'onde M2. La figure V-108 montre clairement deux périodes où les valeurs de la phase sont différentes. Cette distinction se dessine très clairement dans la période la plus récente (1996-2011) où la phase vaut 127° de 1996 à 2005 et 98° de 2006 à 2011. Cette différence de 29° correspond à un décalage en temps d'une heure. Ainsi, alors que les données de 2006 à 2011 sont en UTC, les données de 1995 à 2005 sont en TU+1. Il en va de même pour les données de 1977 à 1980 et pour les données de l'île d'Aix de 1973 à 1974.

Les autres variations contenues dans la phase de M2 de 1941 à 1980 sont synonymes, ici aussi, de problèmes de l'horloge du marégraphe. Le passage à une horloge numérique en 1996 élimine ces variations et l'on constate la stabilité de la phase de M2 de 1996 à 2011. L'analyse couplée des variations de phase de l'onde M2 et des résidus en temps (non présentée ici, car elle n'apporte rien de plus que ce qui est déjà présenté) nous a permis de dresser la liste des corrections en temps à apporter aux lots de mesures récents. L'ensemble des corrections répertoriées dans le *tableau V-66* a été appliqué aux données.

Lieu	Période	Correction en temps appliquée
Île d'Aix	9 janvier 1973 - 4 juin 1974	- 1 heure
La Pallice	1 ^{er} janvier 1977 - 5 janvier 1980	- 1 heure
	12 octobre 1995 - 31 décembre 2005	- 1 heure

Tableau V-66 : Décalages en temps détectés lors de l'analyse couplée des variations de la phase de M2 et des résidus en temps entre 1941 et 2011 au port de La Pallice et à l'île d'Aix.

V.4.5.3.3. Bilan

Le contrôle qualité des lots de mesures enregistrées au port de La Pallice (1941-2011) et à l'île d'Aix (1973-2011) a été réalisé en utilisant deux méthodes : la comparaison des moyennes journalières et mensuelles avec une station proche (« *Buddy checking* ») et l'étude de la stabilité de l'onde de marée M2.

- *Problème détecté* :

⇒ Problèmes d'horloge nombreux et fréquents entre 1967 et 1980 au port de La Pallice

- *Ecart-types mensuels des résidus :*

PORT DE LA PALLICE

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1941					13	14	15	15	12	17	16	13
1942	16	18	11	13	14	13	15	11	14	17	18	16
1943	22	20	12	11	11	8	8	9	10	9	14	15
1944	12	12	10	15	9							
...												
1967			10	8	NaN	9	12	9	11	18	24	15
1968	13	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	14	13	20
1969	23	20	11	17	10	17	27	NaN	NaN	7	19	15
1970	19	NaN	NaN	10	14	19	10	14	18	18	20	13
1971	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	14	9	13	42	19	14
1972	21	16	16	14	8	16	8	9	10	11	15	15
1973	14	15	11	18	13	14	13	10	9	20	19	19
1974	16	23	11	10	11	16	8	10	13	13	18	13
1975	20	18	22	17	19	10	13	13	13	14	12	14
1976	14	12	16	15	13	14	13	13	15	15	22	22
1977	23	17	14	56	63	13	13	18	10	16	18	19
1978	20	21	18	13	14	13	10	10	12	12	10	22
1979	16	26	17	NaN	NaN	NaN	37	32	11	15	14	19
1980	29											
...												
1995										13	16	12
1996	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	14
1997	9	NaN	NaN	8	9	8	9	9	7	11	14	16
1998	18	7	15	14	7	8	6	6	14	13	13	17
1999	12	13	13	11	8	12	7	8	14	17	12	17
2000	11	10	12	15	8	7	8	6	9	15	18	14
2001	18	19	10	13	10	6	10	7	6	11	10	12
2002	12	13	12	10	12	10	7	7	8	13	16	16
2003	23	12	10	12	8	6	8	6	8	14	14	14
2004	16	10	9	14	12	8	7	7	7	15	11	12
2005	12	10	10	10	7	8	8	6	8	14	14	20
2006	9	17	13	8	11	9	7	9	9	15	17	22
2007	11	15	15	6	11	9	7	7	8	8	13	13
2008	18	11	16	17	7	7	8	10	12	11	15	16
2009	12	10	6	5	6	6	6	6	6	6	9	10
2010	9	13	9	8	7	7	6	6	6	6	9	8
2011	13	15	11	10	10							

Tableau V-67 : *Ecart-types mensuels des résidus des hauteurs horaires pour la série de La Pallice (1941-2011) Les résidus en gras et italique sont corrigés de la pression atmosphérique.*

ÎLE D'AIX

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1973	12	12	NaN	NaN	10	8	14	NaN	NaN	NaN	11	16
1974	19	19	10	8	11	20						
...												
2011				10	13	11	11	13	13			

Tableau V-68 : *Ecart-types mensuels des résidus des hauteurs horaires pour la série de l'île d'Aix (1973-2011).*

V.4.5.4. *Ecart-types* annuels des résidus (1775-2011)

La dernière méthode utilisée pour quantifier la qualité des différents lots du niveau marin est l'analyse des écart-types annuels des résidus. Avant de calculer les résidus (observations - prédictions de la marée), il est nécessaire de corriger les observations $h_{obs}(i)$ d'une valeur correspondante à la différence entre les moyennes journalières des observations $M_{obs}(j)$ moins les moyennes journalières des prédictions $M_{pre}(j)$:

$$h_{corr}(i) = h_{obs}(i) - (M_{obs}(j) - M_{pre}(j)) \quad (5.22)$$

Avec $h_{corr}(i)$: valeur de l'observation corrigée ; i : hauteur horaire étudiée (de 1 à 8760 ou 8784 sur une année) ; j : jour étudié (de 1 à 365 ou 366 sur une année). Le but de cette correction est de filtrer les variations dont la période est plus longue qu'une journée. Lorsque cette correction est appliquée, les résidus $r(i)$ sont calculés pour chaque valeur observée, puis l'écart-type des résidus $\sigma_r(a)$ est calculé chaque année :

$$r(i) = h_{corr}(i) - h_{pre}(i) \quad (5.23)$$

Avec $h_{pre}(i)$: valeur de la prédiction.

$$\sigma_r(a) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (r_i - \bar{r})^2} \quad (5.24)$$

Avec a : année étudiée ; N : nombre de valeurs par année (8760, ou 8784 si l'année est bissextile) ; \bar{r} : moyenne annuelle des résidus. Cette méthode a l'avantage de pouvoir s'appliquer aux différents types de données dont nous disposons : pleines mers diurnes, pleines et basses mers diurnes, hauteurs horaires diurnes et hauteurs horaires. Ainsi, nous avons un outil nous permettant d'évaluer, avec la même méthode, l'ensemble des lots de mesures du niveau marin du littoral charentais. Les résultats sont présentés sur la *figure V-109*.

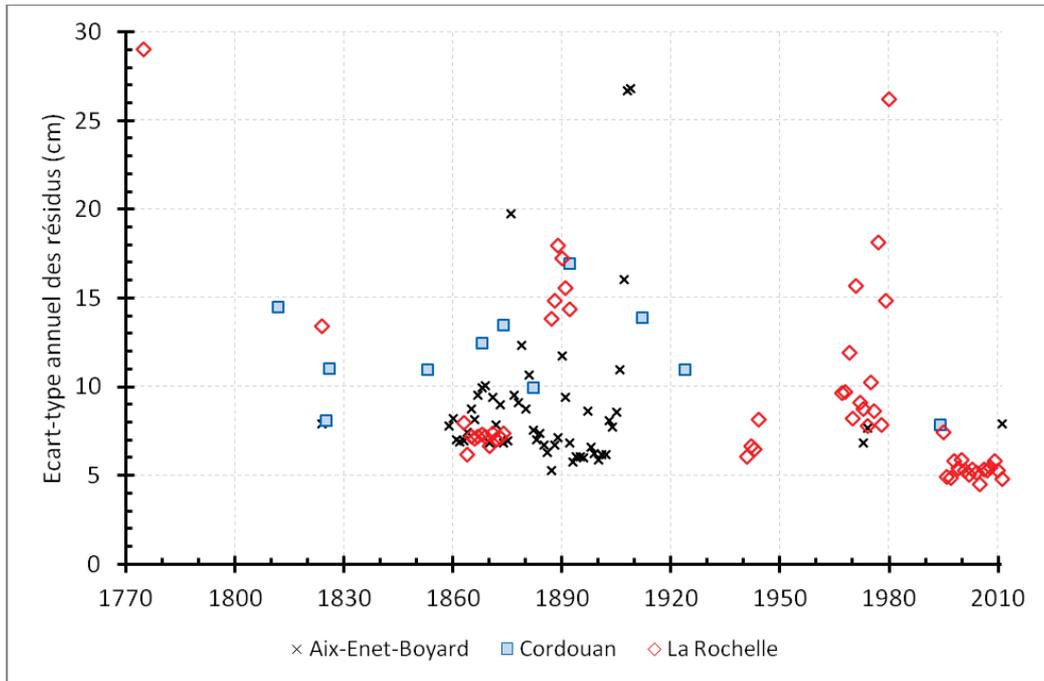


Figure V-109 : Écarts-types annuels des résidus pour l'ensemble des lots de mesures du niveau marin du littoral charentais (1775-2010).

Globalement, la figure V-110 montre que la majorité des écarts-types annuels sont inférieurs à 7,8 cm. La moyenne générale des écarts-types étant en effet de 9,3 cm, la médiane est de 7,8 cm et le mode est de 11 cm. Afin de pouvoir effectuer une analyse plus détaillée de ces écarts-types, nous les avons séparés selon l'instrument de mesures (figure V-111).

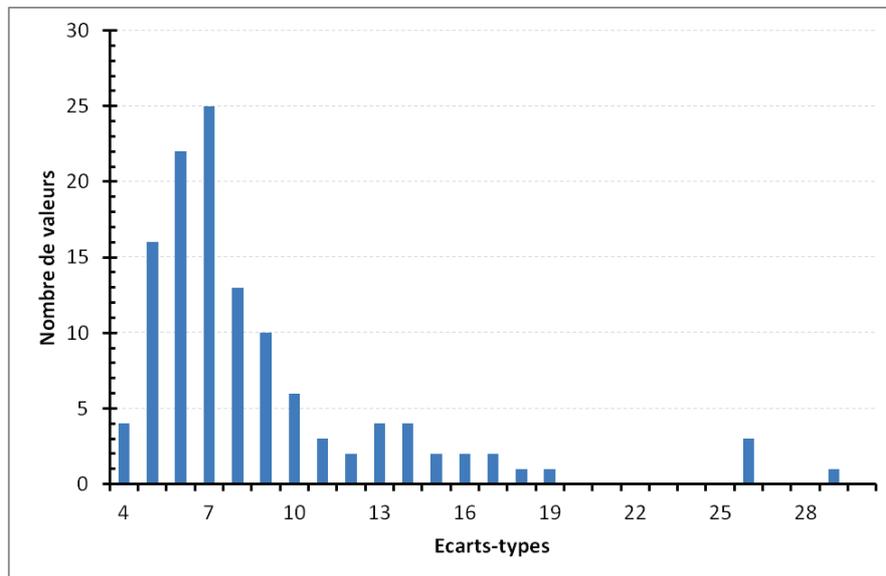


Figure V-110 : Répartition de l'ensemble des valeurs des écarts-types annuels des séries du littoral charentais sur la période 1775-2010.

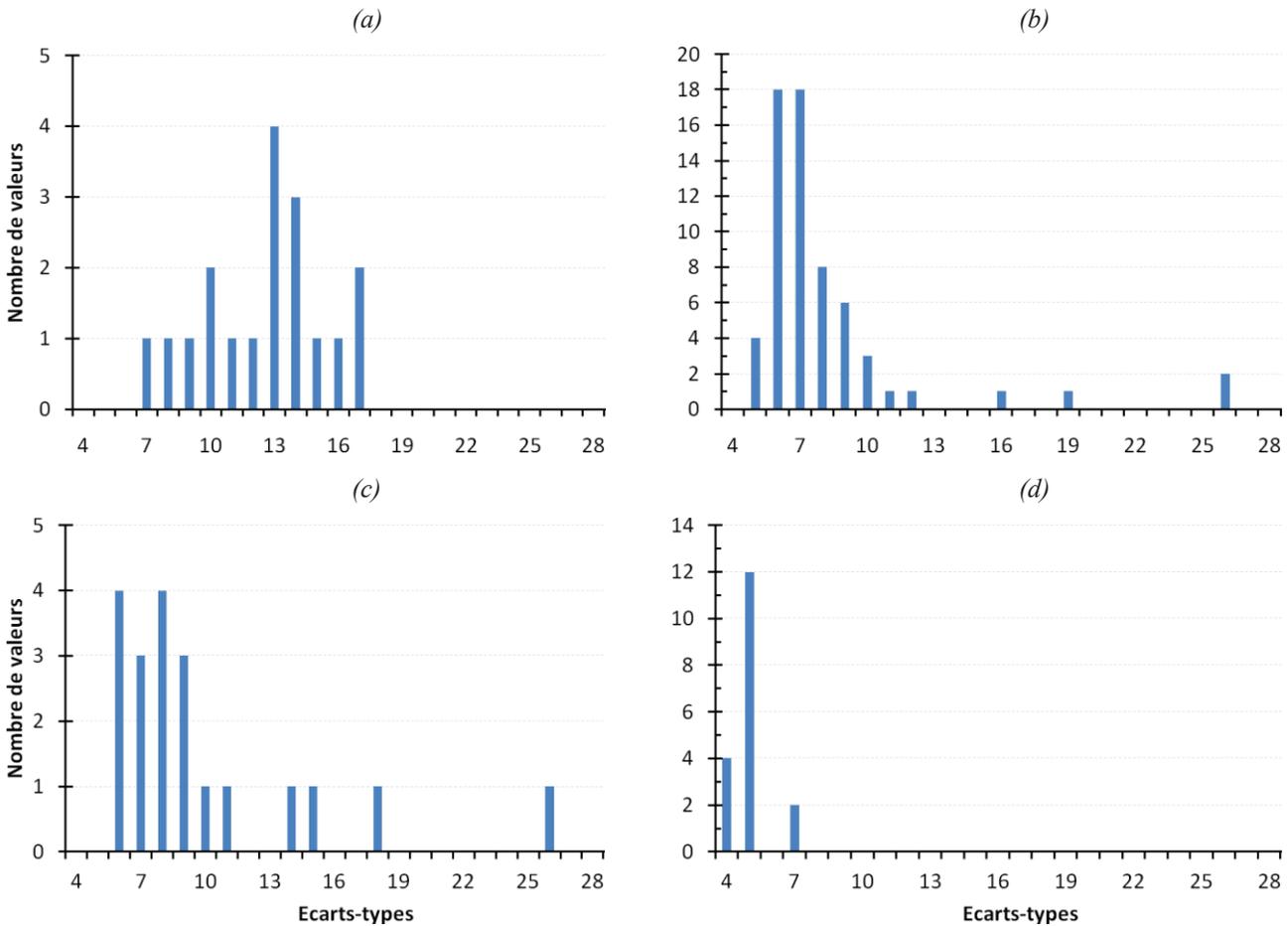


Figure V-111 : Répartition des valeurs des écarts-types annuels : (a) séries mesurées à l'aide d'une échelle de marée (1775-1892) ; (b) série enregistrée à l'aide d'un marégraphe de type Chazallon (1859-1909) ; (c) série enregistrée à l'aide d'un marégraphe à flotteur (1941-1980) ; (d) série enregistrée à l'aide d'un marégraphe côtier numérique (1995-2011).

Les résultats de l'analyse séparée de la figure V-103 sont répertoriés dans le *tableau V-69* ci-dessous.

	Moyenne (cm)	Médiane (cm)
Echelles de marée	14,0	13,9
Marégraphes à flotteur Chazallon	8,6	7,4
Marégraphes à flotteur (20 ^e siècle)	10,4	8,7
MCN	5,5	5,3

Tableau V-69 : Statistiques des écarts-types annuels des séries du littoral charentais, selon le type d'instrument de mesures

L'analyse de ces différents résultats nous montre que, sans surprise, les mesures de moins bonne qualité sont celles effectuées à l'aide d'échelles de marée (la majorité des écarts-types est inférieur à 14 cm). Sauf, bien entendu, si l'on prend en compte les écarts-types annuels de 1908 et 1909 au fort Boyard, dont les écarts-types annuels sont d'environ 27 cm. Constat plus surprenant, mais déjà souligné par Pouvreau [2008] à Brest, les mesures réalisées à l'aide d'un marégraphe à flotteur de type Chazallon sont d'excellente qualité (médiane : 7,4 cm) et même meilleures que celles réalisées après 1940, avec des marégraphes à flotteur plus modernes (médiane : 8,7 cm). Cela souligne l'importance du soin apporté aux

mesures, et l'importance de l'observateur dans le bon déroulement des mesures. En contrôlant régulièrement la bonne marche du marégraphe, l'observateur des marées de l'époque Chazallon assurait ainsi une très bonne qualité aux mesures enregistrées. Enfin, les mesures les plus précises sont les plus récentes, réalisées avec un marégraphe côtier numérique, installé au port de La Pallice depuis moins de 15 ans, et dont la médiane des écarts-types annuel est de 5,3 cm.

V.4.6. Résultats et discussion

A l'issue de ces travaux, trois nouvelles séries du niveau marin viennent enrichir le patrimoine marégraphe français : La Rochelle (1775-2011), Aix-Enet-Boyard (1824-2011) et Cordouan (1812-1994). Le résultat pratique de ce long travail est la production de fichiers numériques, directement utilisables par la communauté scientifique, et disponibles en annexe électronique. Ces fichiers sont répertoriés ci-dessous, par lots de mesures. La nomenclature de ces fichiers est la suivante :

« SL_XX_nomobservatoire_période.dat »

- SL = « *Sea Level* », niveau marin
- XX = niveau de correction
 - ↳ RD = « *Raw Data* », données brutes
 - ↳ C1, C2, etc. = Correction 1, Correction 2, etc. (voir ci-dessous)

Les valeurs et les graphiques des moyennes mensuelles sont également présentés ci-dessous. Pour une lecture plus rapide de la qualité des données, nous avons réutilisé le code de chiffres et de couleur déjà utilisé au cours des contrôles qualité.

SERIE DE LA ROCHELLE (1775-2011)

• Vieux port de La Rochelle (1775-1776)

Quatre fichiers numériques ont été créés :

- SL_RD_LaRochelle_1775-1776.dat → *données brutes, valeurs en pieds et pouces*
- SL_C1_LaRochelle_1775-1776.dat → *valeurs converties en centimètres*
- SL_C2_LaRochelle_1775-1776.dat → *valeurs rapportées au zéro hydrographique actuel de La Pallice*
- SL_C3_LaRochelle_1775-1776.dat → *hypothèse appliquée : - 83 cm à l'ensemble des valeurs*

Aucune valeur de pleine mer n'a été supprimée suite au contrôle qualité. La correction 3 (C3) correspond à l'hypothèse selon laquelle le zéro des mesures avait été mal recalé et se situait en réalité 83 cm plus bas. Moyennes mensuelles des pleines mers calculées à partir du fichier SL_C3_LaRochelle_1775-1776.dat :

	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1775					502,3	507,8	516,0	527,5	549,2	520,5	557,6	520,3
1776	543,9	566,8	527,3	527,4	517,8							

Tableau V-70 : Moyennes mensuelles des pleines mers du Vieux port de La Rochelle (1775-1776) calculées à partir du fichier SL_C3_LaRochelle_1775-1776.dat.

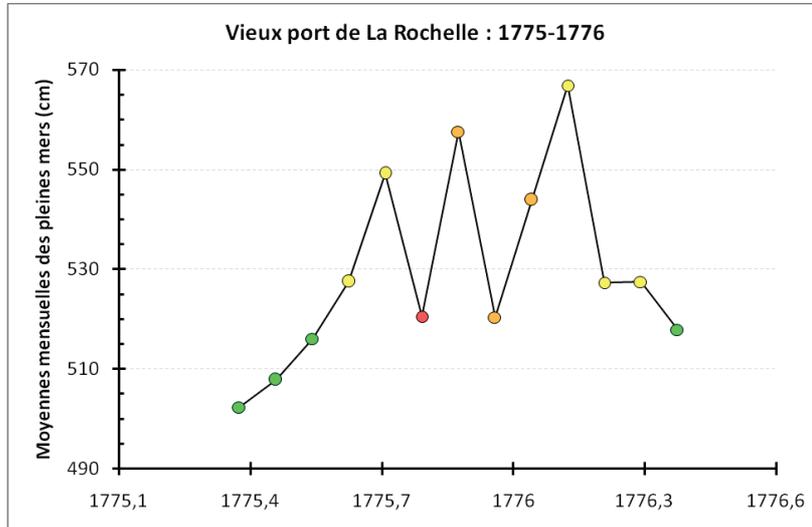


Figure V-112 : Représentation des moyennes mensuelles des pleines mers du Vieux port de La Rochelle (1775-1776) calculées à partir du fichier SL_C3_LaRochelle_1775-1776.dat.

• Vieux port de La Rochelle (1824)

Six fichiers numériques ont été créés :

- SL_RD_LaRochelle_1824.dat → données brutes tous les ¼ d'heure, valeurs en Pieds et pouces
- SL_C1_LaRochelle_1824.dat → valeurs converties en centimètres
- SL_C2_LaRochelle_1824.dat → valeurs rapportées au zéro hydrographique actuel de La Pallice
- SL_C3_LaRochelle_1824.dat → valeurs converties du TSV au TU, échantillonnage horaire, interpolation de 1 ou 2 valeurs manquantes consécutives
- SL_C4_LaRochelle_1824.dat → correction des erreurs de retranscription
- SL_C5_LaRochelle_1824.dat → retrait des valeurs fausses : basses mers de vive-eau

La correction 5 (C5) correspond au retrait des valeurs détectées comme fausses lors du contrôle qualité, à savoir le non-enregistrement des basses mers de vive-eau. Les valeurs supprimées sont répertoriées dans le *tableau V-71* ci-dessous.

Juin	Juillet	Août	Septembre
26 : 08h et 09h	1 ^{er} : 12h et 13h	23 : 08h et 09h	21 : 08h
27 : 09h et 10h	2 : 14h	24 : 09h et 10h	22 : 08h et 09h
28 : 10h et 11h	25 : 08h et 09h	25 : 09h et 10h	23 : 09h et 10h
29 : 11h et 12h	26 : 09h	26 : 10h et 11h	24 : 09h, 10h et 11h
30 : 12h et 13h	27 : 10h et 11h	27 : 11h et 12h	25 : 10h, 11h et 12h
	28 : 11h et 12h	28 : 12h et 13h	26 : 11h et 12h
	29 : 11h et 12h	29 : 13h	27 : 13h
	30 : 12h et 13h		
	31 : 13h et 14h		

Tableau V-71 : Valeurs supprimées dans le fichier SL_C5_LaRochelle_1824.dat.

Moyennes mensuelles (moyennes arithmétiques simples, sans application de filtre) des hauteurs horaires diurnes calculées à partir du fichier SL_C5_LaRochelle_1824.dat :

	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1824						×	389,9	388,9	392,4	×		

Tableau V-72 : Moyennes mensuelles simples des hauteurs horaires diurnes du Vieux port de La Rochelle (1824) calculées à partir du fichier SL_C5_LaRochelle_1824.dat.

• Vieux port de La Rochelle (1863-1874)

Trois fichiers numériques ont été créés :

- SL_RD_LaRochelle_1863-1874.dat → données brutes horaires, valeurs en cm
- SL_C1_LaRochelle_1863-1874.dat → correction des erreurs de retranscription
- SL_C2_LaRochelle_1863-1874.dat → valeurs rapportées au zéro hydrographique actuel de La Pallice, converties du TSV au TU, et interpolation de 1 ou 2 valeurs manquantes consécutives

Aucune valeur n'a été supprimée suite au contrôle qualité. Moyennes mensuelles des hauteurs horaires calculées (avec le filtre de Demerliac) à partir du fichier SL_C2_LaRochelle_1863-1874.dat :

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1863		353,7	366,7	362,1	367,9	373,6	364,2	369,6	372,7	385,0	369,8	358,7
1864	365,3	370,4	374,1	361,1	365,7	361,4	362,7	361,1	367,8	382,4	380,2	365,8
1865	382,3	374,1	361,5	364,0	373,5	361,5	367,3	370,5	367,2	391,5	383,0	367,8
1866	372,5	376,0	380,7	372,7	367,7	373,6	372,4	373,7	383,0	373,9	370,9	371,8
1867	392,6	369,1	386,0	367,7	375,5	366,9	369,5	370,6	365,1	367,3	363,1	361,1
1868	366,6	355,0	357,5	363,9	362,5	354,8	363,3	367,3	387,3	373,4	373,0	396,4
1869	374,9	367,2	372,7	365,6	378,2	360,5	361,3	356,9	376,1	371,0	367,3	371,1
368,4	373,6	360,9	359,4	359,6	354,6	359,2	361,2	362,5	380,4	377,2	368,3	368,4
368,0	366,0	367,2	369,1	366,0	369,7	370,6	369,8	381,4	378,2	370,6	357,1	368,0
1872	380,2	377,6	376,1	367,7	370,5	358,5	371,0	370,5	372,2	385,6	390,3	395,1
1873	392,1	369,4	378,2	369,1	361,8	366,3	370,4	368,1	369,5	375,0	382,0	365,6
1874	360,1	360,3	350,3	364,8	360,3	362,9	363,5	364,7	370,6	379,8	373,8	375,9

Tableau V-73 : Moyennes mensuelles des hauteurs horaires du Vieux port de La Rochelle (1863-1874) calculées à partir du fichier SL_C2_LaRochelle_1863-1874.dat.

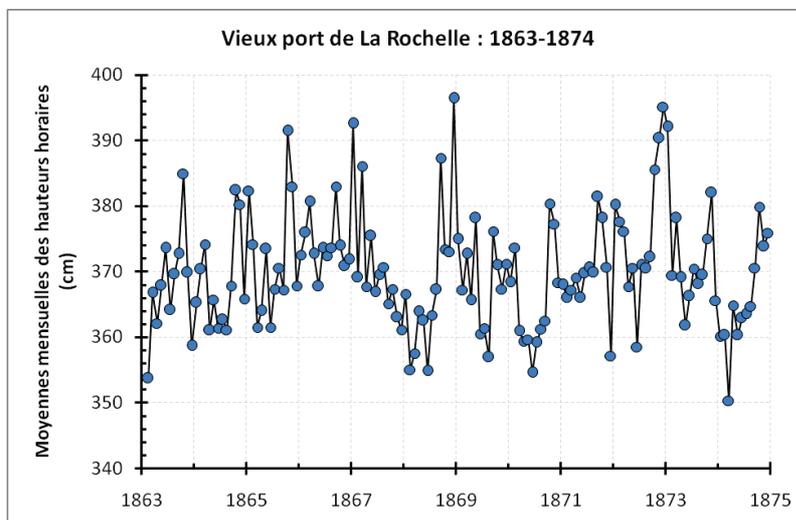


Figure V-113 : Représentation des moyennes mensuelles des hauteurs horaires du Vieux port de La Rochelle (1863-1874) calculées à partir du fichier SL_C2_LaRochelle_1863-1874.dat.

• *Vieux port de La Rochelle (1887-1892) et port de La Pallice (1890-1892)*

Six fichiers numériques ont été créés :

- SL_RD_LaRochelle_1887-1892.dat → données brutes, valeurs en cm et en Temps Solaire Moyen
- SL_C1_LaRochelle_1887-1892.dat → valeurs rapportées au zéro hydrographique actuel de La Pallice
- SL_C2_LaRochelle_1887-1892.dat → - 27 minutes sur l'heure des basses mers (1890 - 31 janvier 1891)
- SL_C3_LaRochelle_1887-1892.dat → - 10,5 cm aux hauteurs des pleines et basses mers (1887-1888)

- SL_RD_LaPallice_1890-1892.dat → données brutes, valeurs en cm et en Temps Solaire Moyen
- SL_C1_LaPallice_1890-1892.dat → valeurs rapportées au zéro hydrographique actuel de La Pallice

Aucune valeur n'a été supprimée suite au contrôle qualité. Moyennes mensuelles des pleines et basses mers calculées à partir du fichier SL_C3_LaRochelle_1887-1892.dat :

		Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1887	PM	535,9	530,3	532,5	530,7	527,6	532,8	530,2	545,5	545,9	546,2	557,7	536,3
	BM	149,2	140,3	147,3	144,5	156,5	141,3	138,9	154,7	153,2	138,8	166,3	152,7
1888	PM	523,8	537,9	551,0	543,3	529,8	530,5	541,0	536,5	542,0	547,8	547,0	544,3
	BM	136,3	150,4	140,2	144,6	148,2	162,9	171,0	172,3	154,6	164,7	140,4	139,9
1889	PM	525,2	530,3	533,6	541,1	537,3	532,7	530,8	540,2	546,9	562,3	541,6	526,8
	BM	131,9	135,4	120,5	137,3	154,2	157,9	159,4	156,4	142,2	166,6	143,6	146,5
1890	PM	526,5	522,6	525,8	539,6	537,5	522,5	533,8	538,7	543,6	559,9	533,6	529,0
	BM	145,4	148,5	139,8	146,9	161,9	155,9	156,6	156,5	138,6	144,4	157,1	151,6
1891	PM	517,5	515,0	532,3	524,5	531,4	528,6	528,7	539,1	543,9	562,9	551,9	530,7
	BM	146,9	136,9	148,0	150,4	166,1	163,3	160,9	169,8	159,8	166,0	159,8	154,9
1892	PM	530,5	534,7	541,8	533,4	523,6	519,1	526,0	531,4	534,2	552,7	542,7	532,8
	BM	153,7	161,8	140,2	152,8	160,2	163,4	167,5	165,5	156,6	175,9	155,9	167,8

Tableau V-74 : Moyennes mensuelles des pleines et basses mers du Vieux port de La Rochelle (1887-1892) calculées à partir du fichier SL_C3_LaRochelle_1887-1892.dat.

Moyennes mensuelles des pleines et basses mers calculées à partir du fichier SL_C1_LaPallice_1890-1892.dat :

		Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1890	PM										538,1	550,3	544,0
	BM										135,3	152,2	154,9
1891	PM	512,5	515,3	538,5	535,3	534,3	523,7	531,7	540,9	543,3	559,2	542,7	528,7
	BM	151,9	127,9	146,6	151,6	161,1	158,3	165,3	168,0	157,3	165,3	169,7	156,6
1892	PM	530,3	540,9	543,4	535,7	524,4	520,2	521,4	527,4	538,5	557,1	529,2	523,2
	BM	143,5	153,3	126,1	147,2	157,7	164,8	163,7	171,7	160,3	175,0	163,5	159,0

Tableau V-75 : Moyennes mensuelles des pleines et basses mers du port de La Pallice (1890-1892) calculées à partir du fichier SL_C1_LaPallice_1890-1892.dat.

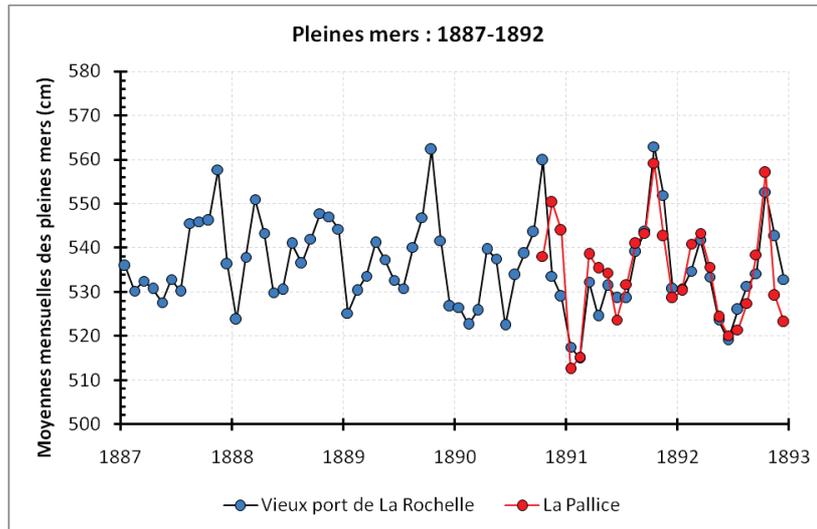


Figure V-114 : Représentation des moyennes mensuelles des pleines mers du Vieux port de La Rochelle (bleu) et du port de La Pallice (rouge) sur la période 1887-1892.

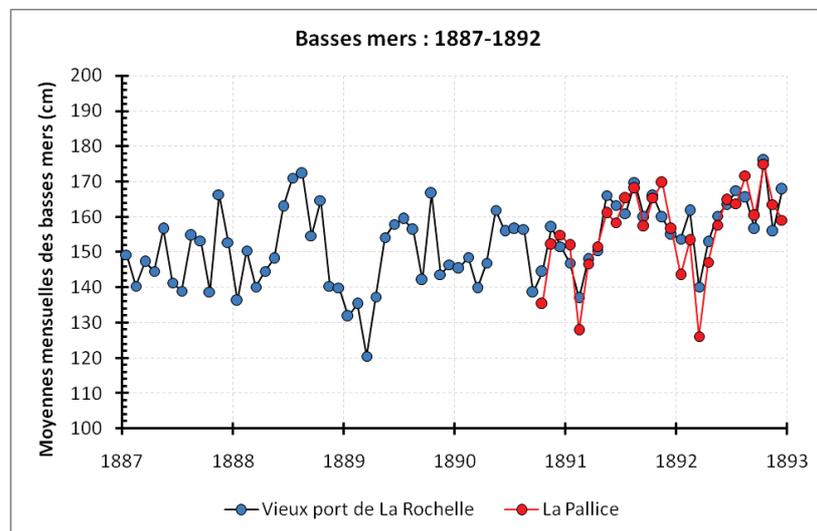


Figure V-115 : Représentation des moyennes mensuelles des basses mers du Vieux port de La Rochelle (bleu) et du port de La Pallice (rouge) sur la période 1887-1892

• Port de La Pallice (1941-2011)

Deux fichiers numériques ont été créés :

- SL_C1_LaPallice_1941-2011.dat → données validées issues de REFMAR
- SL_C2_LaPallice_1941-2011.dat → corrections des sauts, des décalages en temps et des « bugs »

Suite au contrôle qualité, le fichier initial récupéré sur le serveur REFMAR a été corrigé des erreurs détectées :

⇒ *décalage en temps* : il faut décaler de - 1h les données du 1^{er} janvier 1977 au 5 janvier 1980, et de 1996 à 2005 inclus.

⇒ *correction des sauts* : des sauts ont été détectés et corrigés :

- Avril - Décembre 1970 : - 5 cm
- Mars - 4 juillet 1975 (04h) : - 8 cm

- Février - Août 1977 : - 7 cm
- 19 Août 1979 (19h) - 1980 : - 8 cm
- 1995 : + 12 cm
- 26 Novembre 2000 - 25 février 2001 : + 5 cm
- 12 Juillet - 29 septembre 2008 : + 5 cm

⇒ *correction des « bugs »* : des mesures anormales ont été détectées et corrigées :

- 23 Avril 1975, 14h : + 530 cm
- 7 Mai 1975, 12h : + 430 cm
- 23 Juillet 1975, 23h : + 160 cm
- 1^{er} Février 2000, 07h : + 40 cm
- 1^{er} Octobre 2008, 10h : + 120 cm

⇒ *d'autres problèmes ont été détectés, mais non-corrigés* :

- 13 Février 1969 : problème à la pleine mer
- 4 Avril 1977 (09h) - 16 Mai 1977 : problème de calage en temps
- 7 Juillet 1879 - 12 Août 1977 : problème de calage en temps
- 30 Septembre - 11 Octobre 1971 : problème de calage en temps
- 27 Janvier 2006 : problème de décalage des données entre 18h et 22h

Moyennes mensuelles des hauteurs horaires calculées (avec le filtre de Demerliac) à partir du fichier SL_C2_LaPallice_1941-2011.dat :

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1941						377,3	383,1	382,5	374,3	372,6	383,2	365,6
1942	368,0	363,8	378,5	378,2	382,3	379,5	374,7	378,2	386,6	391,2	379,5	385,4
1943	393,5	371,4	377,1	369,7	376,4	373,2	379,9	388,7			379,9	372,7
1944	362,8	366,7	369,1	378,0								
...												
1967							377,2	382,1	387,8	399,1	394,2	378,6
1968	378,6									396,5	402,8	401,7
1969	399,4	392,4	385,0	378,1	390,9	387,2	377,4				402,8	387,9
1970	405,4			377,0	378,3	382,9	374,7	380,4	381,4	377,8	393,2	376,2
1971							382,3	384,7	377,2	379,1	377,9	371,6
1972	386,4	394,1	386,8	377,7	378,2	380,6	377,4	375,0	376,3	384,4	383,7	389,7
1973	376,5	375,0	364,0		385,0	375,1	384,8	377,7	385,0	383,9	378,0	380,7
1974	386,2	386,5	377,0	375,9	379,3	379,2	376,0	379,3	390,5	382,8	391,0	378,5
1975	387,5	382,9	383,0	371,1	372,3	373,4	380,6	381,7	385,8	385,2	387,5	372,5
1976	370,7	376,6	376,7	369,8	372,2	372,7	376,9	380,4	387,7	408,1	388,8	400,3
1977		408,7	390,6	378,4	380,6	379,9	376,2	379,8	374,5	387,3	391,2	392,4
1978	388,1	397,6	389,6	387,3	385,2	385,5	380,3	381,6	377,4	375,5	378,5	410,5
1979	397,0	396,9	392,4				366,6	374,7	373,4	391,4	381,0	390,1
1980												
...												
1995										397,4	400,9	
1996												398,2
1997				378,1	395,3	400,6	383,4	388,8	384,9	392,8	410,9	397,5
1998	394,9	380,1	374,9	402,6	385,6	386,1	384,3	379,4	394,0	393,3	386,8	381,6
1999	387,8	373,1	386,5	385,9	385,4	382,3	382,3	390,8	398,3	399,2	387,2	392,7
2000	377,0	380,3	375,5	398,5	387,3	377,7	385,7	384,1	391,0	395,5	416,8	419,3

2001	412,3	388,7	405,6	385,6	387,3	382,7	392,6	391,6	388,8	403,9	381,0	382,6
2002	390,0	390,3	385,1	385,6	388,9	384,5	382,5	384,9	387,7	398,1	410,0	405,4
2003	391,5	385,2	388,1	390,7	386,1	389,9	388,6	389,2	387,0	397,6	398,3	392,8
2004	396,6	385,1	381,5	389,9	388,4	381,2	383,9	395,3	385,9	410,6	383,1	385,1
2005	376,1	374,8	383,6	387,3	382,5	384,3	385,0	381,7	385,9	393,5	391,6	386,2
2006	379,8	384,8	391,3	380,5	383,7	381,1	383,2	385,1	395,4	409,2	400,8	387,9
2007	384,5	398,8	384,6	380,7	389,7	394,1	390,7	387,3	378,5	383,5	379,6	383,4
2008	391,9	385,6	388,9	393,1	394,2	⊗	384,5	391,3	393,4	391,2	396,4	389,5
2009	393,7	391,9	384,5	388,4	385,3	393,5	390,6	387,3	384,8	391,3	410,5	408,0
2010	394,4	405,4	389,9	386,1	386,4	391,7	385,9	386,6	391,1	400,1	408,9	397,8
2011	388,7	388,9	382,0	385,5	383,3							

Tableau V-76 : Moyennes mensuelles des hauteurs horaires du port de La Pallice (1941-1944) calculées à partir du fichier SL_C2_LaPallice_1941-2011.dat.

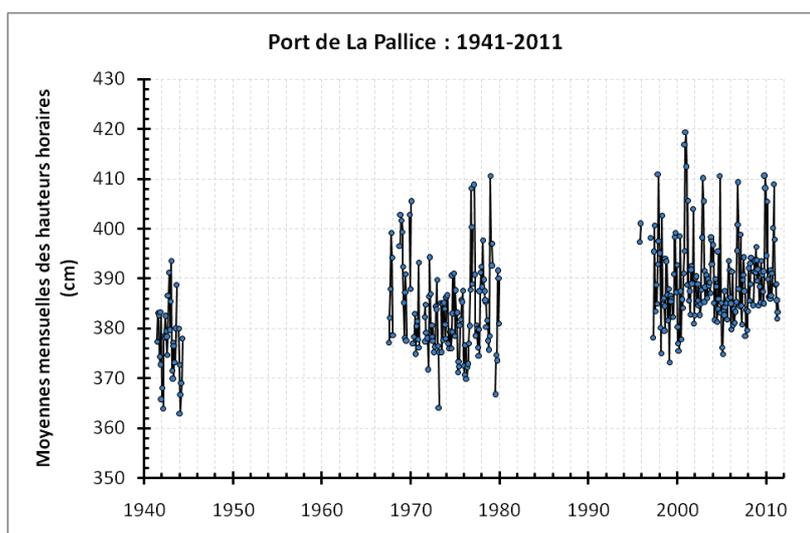


Figure V-116 : Représentation des moyennes mensuelles des hauteurs horaires du port de La Pallice calculées à partir du fichier SL_C2_LaPallice_1941-2011.dat.

SERIE AIX-ENET-BOYARD (1824-2011)

• Île d'Aix (1824)

Cinq fichiers numériques ont été créés :

- SL_RD_IledAix_1824.dat → données brutes tous les $\frac{1}{4}$ d'heure, valeurs en Pieds et pouces
- SL_C1_IledAix_1824.dat → valeurs converties en centimètres et rapportées au zéro de la grande échelle
- SL_C2_IledAix_1824.dat → valeurs rapportées au zéro hydrographique actuel de La Pallice
- SL_C3_IledAix_1824.dat → valeurs converties du TSV au TU, échantillonnage horaire, interpolation de 1 ou 2 valeurs manquantes consécutives
- SL_C4_IledAix_1824.dat → correction des erreurs de retranscription

Moyennes mensuelles (moyennes arithmétiques simples, sans application de filtre) des hauteurs horaires diurnes calculées à partir du fichier SL_C4_IledAix_1824.dat :

	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1824					383,6	382,0	373,0	369,3	374,5			

Tableau V-77 : Moyennes mensuelles simples des hauteurs horaires diurnes du Vieux port de La Rochelle (1824) calculées à partir du fichier SL_C5_LaRochelle_1824.dat.

• Enet-Boyard (1859-1909)

Sept fichiers numériques ont été créés :

- SL_C1_fortEnet_1859-1873.dat → correction des erreurs de retranscription, valeurs en cm
- SL_C1_fortBoyard_1873-1909.dat → correction des erreurs de retranscription, valeurs en cm
- SL_C2_Enet-Boyard_1859-1909.dat → correction des sauts et valeurs rapportées au zéro hydrographique de l'île d'Aix de Delbalat (1858)
- SL_C3_Enet-Boyard_1859-1909.dat → valeurs converties du TSV au TU, et interpolation de 1 ou 2 valeurs manquantes consécutives
- SL_C4_Enet-Boyard_1859-1909.dat → valeurs rapportées au zéro hydrographique actuel de La Pallice
- SL_C5_Enet-Boyard_1859-1909.dat → correction des nombreux décalages en temps entre 1898 et 1909
- SL_C6_Enet-Boyard_1859-1909.dat → retrait des valeurs fausses et/ou aberrantes

La correction 6 (C6) correspond au retrait des valeurs détectées comme fausses lors du contrôle qualité, à savoir le non-enregistrement des basses mers de vive-eau et les problèmes de puits en partie démoli. Les valeurs supprimées sont répertoriées dans le tableau V-78 ci-dessous.

1909	Janvier	Février	Mars	Avril		
	1(12)-8(00), 16(17)-19(3) 21(15-22), 22(17-21), 24(7)-25(13), 26(20)-27(2)	6(17-20), 7(5-12), 8(19-21), 13(20)-14(3), 23(16)-24(23), 25(18-22)	16(19)-31(23)		1(00-15)	
1908	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	
	19(5-23), 21(6)-24(9) 24(20)-25(15) 26(10)-27(4) 29(5)-31(23)	1(00)-2(10) 15(4)-16(10) 23(6)-24(23) 25(22)-26(17) 28(13)-29(23)	1(00-18) 10(20)-15(21) 16(16)-31(10)	3(7)-5(21) 7(7)-12(19)	6(18)-10(6)	
	Juillet	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	
	19(7)-20(00)	2(19)-6(16) 18(22)-20(15) 23(2)-24(9) 28(5)-29(21)	2(21)-3(14) 7(15-20) 13(5)-19(16) 29(17)-31(2)	2(23)-5(8) 11(17)-17(18) 23(13)-24(23)	4(00)-7(10) 8(16-23) 10(4)-15(10) 18(00)-26(23) 30(21)-31(17)	
1907	Décembre : 21(15-21), 25(18)-26(13), 29(00)-30(3)					
1906	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	
	22-28 (BM)	8-14 (BM) 21-26 (BM)	9-16 (BM) 23-27 (BM)	7-14 (BM) 21-25 (BM)	6-10 (BM)	
1905	Janvier	Février	Mars	Novembre	Décembre	
	3-8 (BM) 20-27 (BM)	3-7 (BM) 18-21 (BM)	5-9 (BM)	24-30 (BM)	23-28 (BM)	
1904	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin
	2-8 (BM) 31 (BM)	1-6 (BM) 29 (BM)	1-7 (BM) 16-21 (BM) 29 (BM)	4-5 (BM) 15-19 (BM) 27-30 (BM)	1-3 (BM) 14-19 (BM) 27-31 (BM)	12-19 (BM) 27-30 (BM)
	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
	12-19 (BM)	10-17 (BM) 25-29 (BM)	8-15 (BM)	7-9 (BM)	5-11 (BM)	5-9 (BM) 22-27 (BM)
1903	Janvier	Février	Mars	Mai	Juin	Juillet
	12-18 (BM) 29-31 (BM)	10-17 (BM) 27-28 (BM)	1-4 (BM) 11-17 (BM) 28-31 (BM)	1-3 (BM) 9-15 (BM) 25-31 (BM)	23-30 (BM)	23-30 (BM)
	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	
	8-12 (BM) 21-27 (BM)	6-11 (BM) 19-25 (BM)	5-10 (BM) 18-24 (BM)	4-10 (BM) 17-22 (BM)	3-9 (BM)	
1902	Décembre : 13-20 (BM)					

1876	Décembre : 31(7-11)			
1873	Janvier	Février	Mars	Avril
	28-31 (BM)	1-2 (BM), 26-28 (BM)	1-2 (BM), 27-31 (BM)	1 ^{er} (BM), 25-29 (BM)
1866	Avril : 14-19 (BM)			
1863	Juillet : 1-6 (BM)			

Tableau V-78 : Valeurs supprimées dans le fichier SL_C6_Enet-Boyard_1859-1909.dat. La première valeur indiquée est le numéro du jour dans le mois, les valeurs entre parenthèses correspondent aux heures. Le sigle BM signifie que tous les étales de basse mer ont été supprimés sur la période indiquée.

Les moyennes mensuelles des hauteurs horaires calculées (avec le filtre de Demerliac) à partir du fichier SL_C6_Enet-Boyard_1859-1909.dat sont synthétisées dans le *tableau V-79*. Le code couleur, donnant une indication de la qualité des moyennes, a été recalculé après le retrait des valeurs fausses et/ou aberrantes.

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1859							390,9	393,3	392,5	405,8	384,6	385,4
1860	388,7	364,4	365,9	369,5	370,9	379,0	367,5	376,0	378,3	371,8	389,1	399,6
1861	366,6	378,2	367,0	356,0	361,1	369,5	376,5	367,4	373,7	382,3	385,4	365,3
1862	368,4	366,3	383,1	366,7	371,2	368,7	376,5	373,7	×	376,5	365,1	361,1
1863	369,3	360,7	368,6	363,5	369,1	374,3	369,7	372,5	378,8	386,0	367,1	358,3
1864	363,9	369,2	380,3	357,3	367,0	361,0	363,1	361,1	367,6	382,6	378,2	363,4
1865	376,7	374,7	367,4	369,1	377,0	364,6	368,9	371,9	364,9	401,0	392,3	370,0
1866	373,2	373,3	381,9	377,1	372,6	374,5	371,5	369,9	377,3	368,4	366,9	368,6
1867	380,2	369,3	384,8	371,3	378,5	×	369,9	365,4	364,5	370,3	365,2	365,0
1868	366,6	352,5	352,6	358,6	363,8	358,1	366,3	371,4	384,8	374,2	372,6	394,8
1869	375,1	368,9	367,9	365,0	374,4	360,5	360,2	354,6	369,0	375,1	370,1	378,9
1870	370,8	374,7	366,3	359,0	360,5	357,0	364,8	366,1	361,5	376,6	379,4	371,3
1871	368,4	364,0	364,6	369,3	364,3	365,8	368,3	366,8	381,0	377,4	371,3	356,4
1872	375,5	375,8	374,3	370,8	367,0	364,5	370,1	372,2	371,4	383,1	384,6	389,0
1873	387,8	355,4	377,9	367,9	367,7	×	×	365,0	366,8	371,5	380,2	363,5
1874	366,0	366,6	355,7	369,6	365,4	362,3	363,0	365,0	370,0	374,2	371,3	373,2
1875	377,4	370,5	363,0	365,4	362,0	365,5	369,7	366,2	371,5	377,5	383,0	367,9
1876	×	×	×	×	×	×	×	×	×	379,7	384,7	×
1877	393,9	365,0	×	381,4	374,0	×	368,6	379,3	369,2	372,5	389,1	370,9
1878	×	360,7	358,8	379,6	377,9	378,2	375,5	386,4	376,2	380,7	380,3	385,7
1879	378,8	393,6	373,9	386,5	367,9	384,6	379,2	378,1	373,5	369,4	365,2	365,7
1880	357,9	369,8	367,0	366,1	362,9	371,5	374,0	377,9	371,7	388,9	374,0	378,0
1881	382,4	×	371,8	380,8	364,7	369,0	369,0	375,3	×	×	×	×
1882	×	×	×	×	369,8	372,1	371,9	371,3	383,3	386,7	389,1	389,0
1883	383,5	371,2	370,4	369,6	373,3	368,7	372,0	370,1	382,2	380,0	384,7	366,5
1884	368,0	378,6	374,2	383,6	369,5	370,3	371,2	374,6	378,8	371,0	369,0	371,3
1885	376,0	383,2	364,8	370,0	376,0	367,5	366,1	369,3	375,6	385,0	382,6	368,4
1886	379,9	366,4	376,6	372,9	375,6	372,1	371,9	376,5	371,1	390,9	376,7	385,6
1887	363,7	357,6	363,5	365,2	366,7	366,3	367,4	369,5	367,9	366,7	384,9	373,4
1888	364,3	361,6	373,9	371,2	364,4	370,7	376,3	371,6	365,6	369,6	377,5	379,7
1889	357,2	359,1	362,9	366,1	370,2	368,9	369,4	368,6	362,5	381,9	364,2	364,1
1890	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	366,5	369,6
1891	354,3	345,6	367,1	364,2	372,7	369,2	365,8	373,4	371,7	393,5	386,4	377,7
1892	371,6	×	369,4	362,6	363,0	364,4	367,4	368,4	367,8	387,8	377,5	374,6
1893	367,9	378,8	364,6	369,0	371,3	370,1	376,1	371,7	373,1	376,5	367,2	363,3
1894	372,3	356,6	364,6	375,2	365,7	364,7	369,4	366,6	366,6	376,5	378,7	369,4
1895	374,0	364,5	368,1	369,5	359,5	362,4	367,6	374,4	371,9	385,1	387,4	385,8
1896	363,4	361,3	365,3	357,0	362,4	374,3	368,2	367,5	375,8	380,5	368,0	370,3
1897	371,0	362,2	374,3	373,6	368,4	365,5	367,5	373,9	×	368,4	371,0	375,3
1898	359,0	362,3	367,3	367,8	374,5	367,2	362,6	366,8	367,5	382,5	382,9	367,1
1899	378,5	379,9	366,1	373,1	371,5	376,1	372,5	377,5	377,8	378,5	370,7	374,4
1900	×	×	×	×	×	×	368,0	371,2	366,4	369,9	382,3	375,2

1901	373,0	364,4	369,5	373,1	367,3	365,2	371,3	366,5	381,9	376,8	366,1	377,7
1902	359,7	372,0	370,4	368,6	357,6	372,8	365,4	369,5	369,5	375,2	384,1	372,3
1903	380,1						369,9	370,5				384,0
1904	358,0	380,9					369,8		367,9	368,4	371,6	
1905			374,3	372,5	361,2	374,8	365,6	374,4	374,3	366,1	384,6	358,1
1906	368,3				375,4							
1907								362,0	366,3			
1908	374,9			371,5	367,1	373,7	363,1	370,0				
1909				384,4								

Tableau V-79 : Moyennes mensuelles des hauteurs horaires des forts Enet-Boyard (1859-1909) calculées à partir du fichier SL_C6_Enet-Boyard_1859-1909.dat.

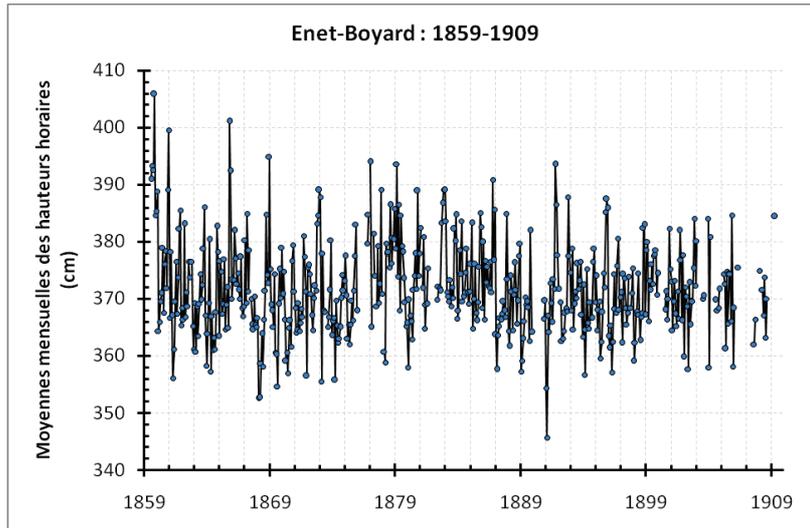


Figure V-117 : Représentation des moyennes mensuelles des hauteurs horaires des forts Enet-Boyard calculées à partir du fichier SL_C6_Enet-Boyard_1859-1909.dat.

• Île d'Aix (1973-2011)

Deux fichiers numériques ont été créés :

- SL_C1_IledAix_1973-2011.dat → données validées issues de REFMAR
- SL_C2_IledAix_1973-2011.dat → corrections des sauts, des décalages en temps et des « bugs », valeurs rapportées au zéro hydrographique actuel de La Pallice

Suite au contrôle qualité, le fichier initial récupéré sur le serveur REFMAR a été corrigé des erreurs détectées :

⇒ décalage en temps : il faut décaler de - 1h les données de 1973 et 1974.

⇒ correction du saut détecté : Mai - Juillet 1973 : - 4 cm

Moyennes mensuelles des hauteurs horaires calculées (avec le filtre de Demerliac) à partir du fichier SL_C2_IledAix_1973-2011.dat :

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1973	380,8	370,0			384,2	368,8					374,0	378,2
1974	375,3	385,6	374,4	375,1	375,5							
...												
2011				381,6	376,9	380,3	382,0	384,4				

Tableau V-80 : Moyennes mensuelles des hauteurs horaires de l'île d'Aix (1973-2011) calculées à partir du fichier SL_C2_IledAix_1973-2011.dat.

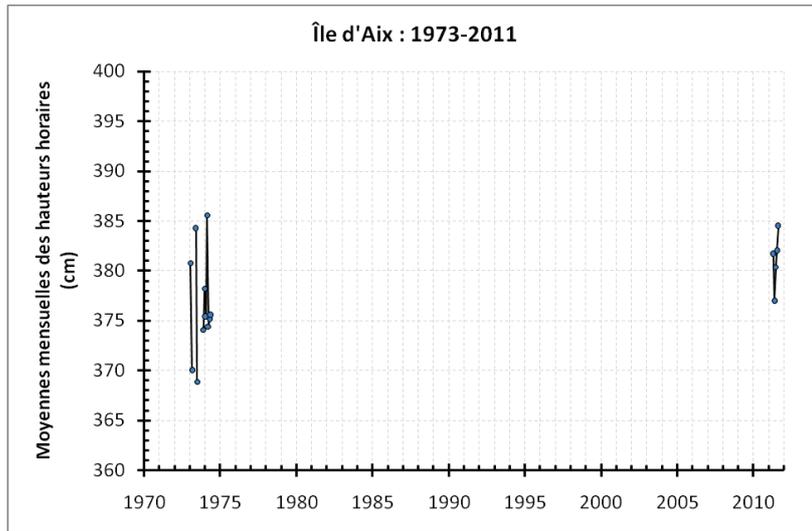


Figure V-118 : Représentation des moyennes mensuelles des hauteurs horaires de l'île d'Aix calculées à partir du fichier SL_C2_IledAix_1973-2011.dat.

SÉRIE DU PHARE DE CORDOUAN (1812-1994)

Deux fichiers numériques ont été créés :

- SL_RD_Cordouan_1812-1994.dat → données brutes
- SL_C1_Cordouan_1812-1994.dat → corrections des sauts, valeurs converties du TSV au TU et rapportées au zéro hydrographique actuel de Cordouan

Le contrôle qualité n'a pas été effectué pour cette série. Moyennes mensuelles (moyennes arithmétiques simples, sans application de filtre, sauf pour 1994) des hauteurs horaires diurnes calculées à partir du fichier SL_C2_Cordouan_1812-1994.dat :

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1812								288,7	306,0	313,3		
1825						306,7	301,5	302,3	297,0			
1853						294,9	⊗	298,0				
1868					278,4	275,0	280,8	291,5	303,5			
1874					280,3	287,0	290,7	292,8	310,6			
1882							284,5	284,5	287,3			
1892					289,8	285,8	290,8	292,8	287,4	306,1		
1912					300,8	307,1	304,3	314,1	306,1	304,8		
1924						291,4	301,1	304,5	309,6	305,7		
1994							299,4	302,5	310,7			

Tableau V-81 : Moyennes mensuelles du niveau marin au phare de Cordouan (1812-1994) calculées à partir du fichier SL_C1_Cordouan_1812-1994.dat.

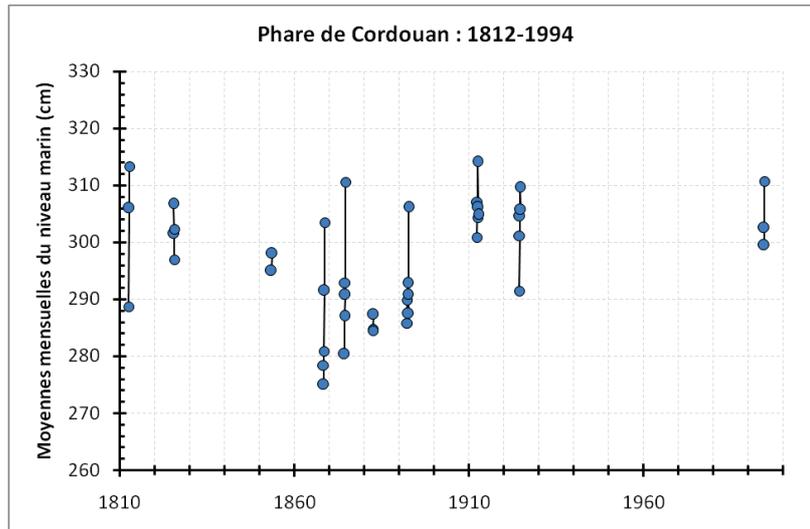


Figure V-119 : Représentation des moyennes mensuelles du phare de Cordouan calculées à partir du fichier *SL_C1_Cordouan_1812-1994.dat*.

CHAPITRE VI - ETUDE DES COMPOSANTES DU NIVEAU DE LA MER

L'objectif de ce chapitre est, à partir de nos trois nouvelles séries du niveau marin (La Rochelle, Aix-Enet-Boyard et Cordouan), de présenter l'étude de l'évolution des différentes composantes du niveau de la mer : ondes de marée (ou composantes harmoniques), niveaux marins moyens et effets météorologiques (niveaux extrêmes et surcotes). Lorsque cela était possible, nous avons comparé les résultats de nos séries à ceux des autres séries marégraphiques françaises disponibles sur le portail REFMAR. Les niveaux marins moyens ont également été replacés dans le contexte européen. Les *figures VI-1* et *VI-2* présentent les répartitions géographique et temporelle de ces séries.

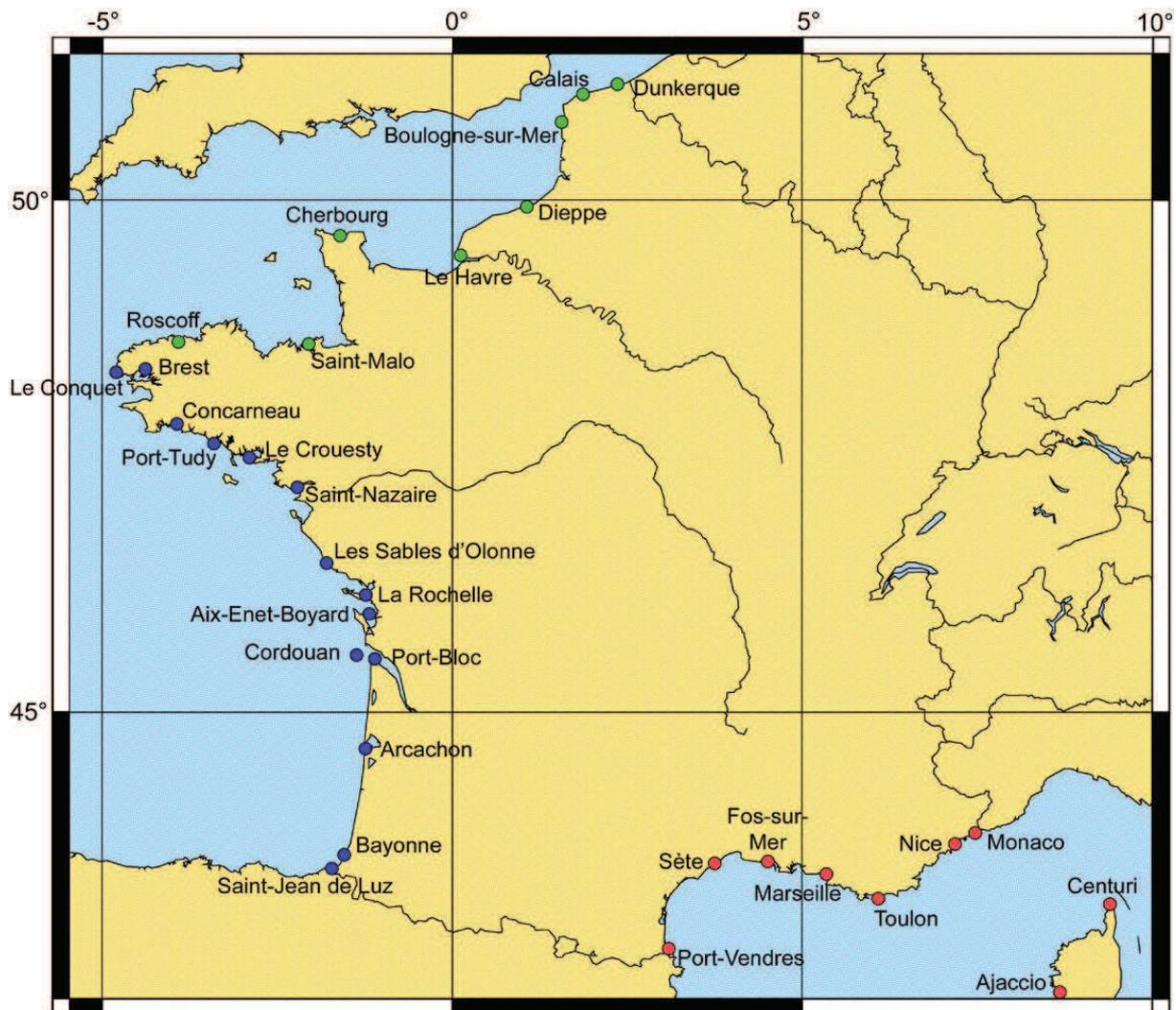


Figure VI-1 : Répartition géographique des séries marégraphiques françaises disponibles sur REFMAR ainsi que des nouvelles séries de Charente-Maritime. Les séries sont regroupées par bassins aux conditions océaniques a priori semblables : Mer du Nord et Manche en vert ; Atlantique en bleu ; Méditerranée en rouge.

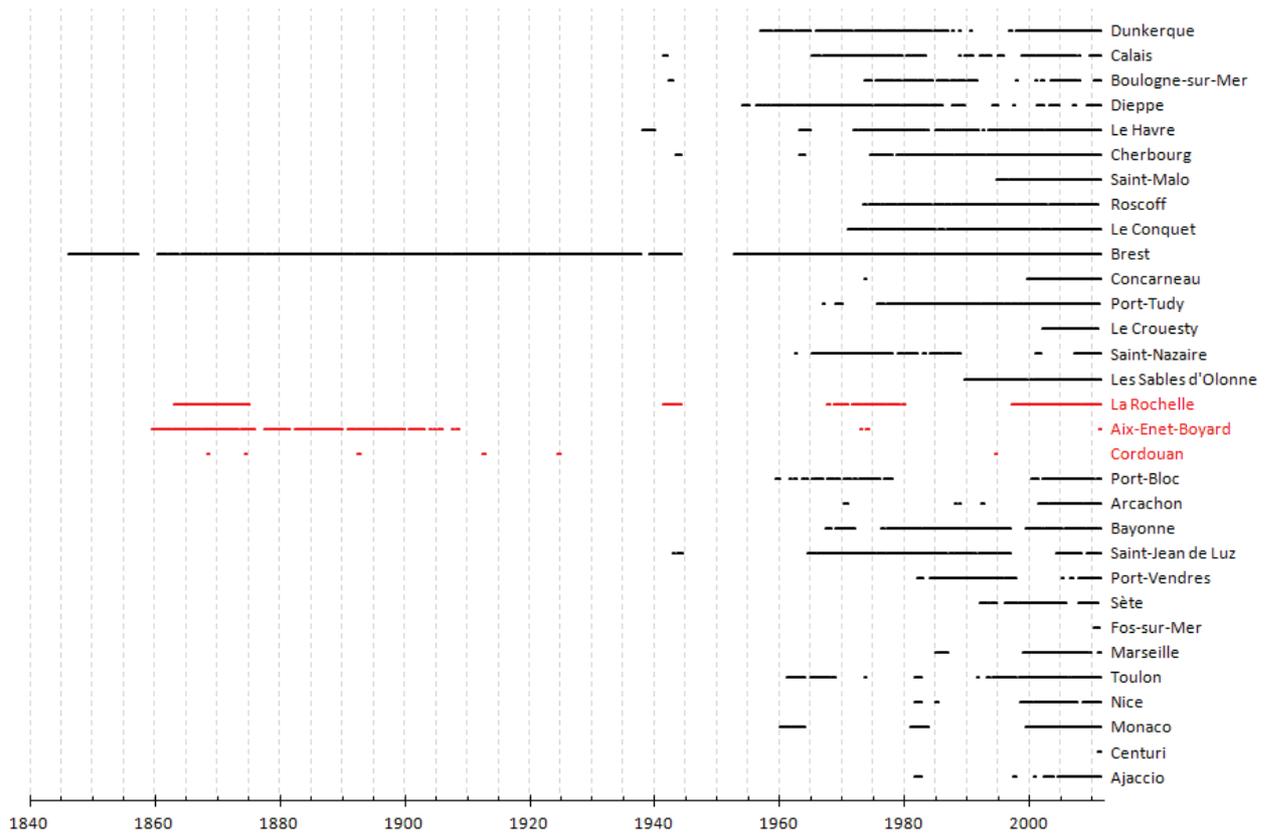


Figure VI-2 : Durée et répartition temporelle des séries marégraphiques françaises (hors DOM-TOM). Pour une meilleure lisibilité du graphique, seules les données postérieures à 1840 sont indiquées. En noir : séries disponibles sur REFMAR (hors Charente-Maritime). En rouge : séries de Charente-Maritime.

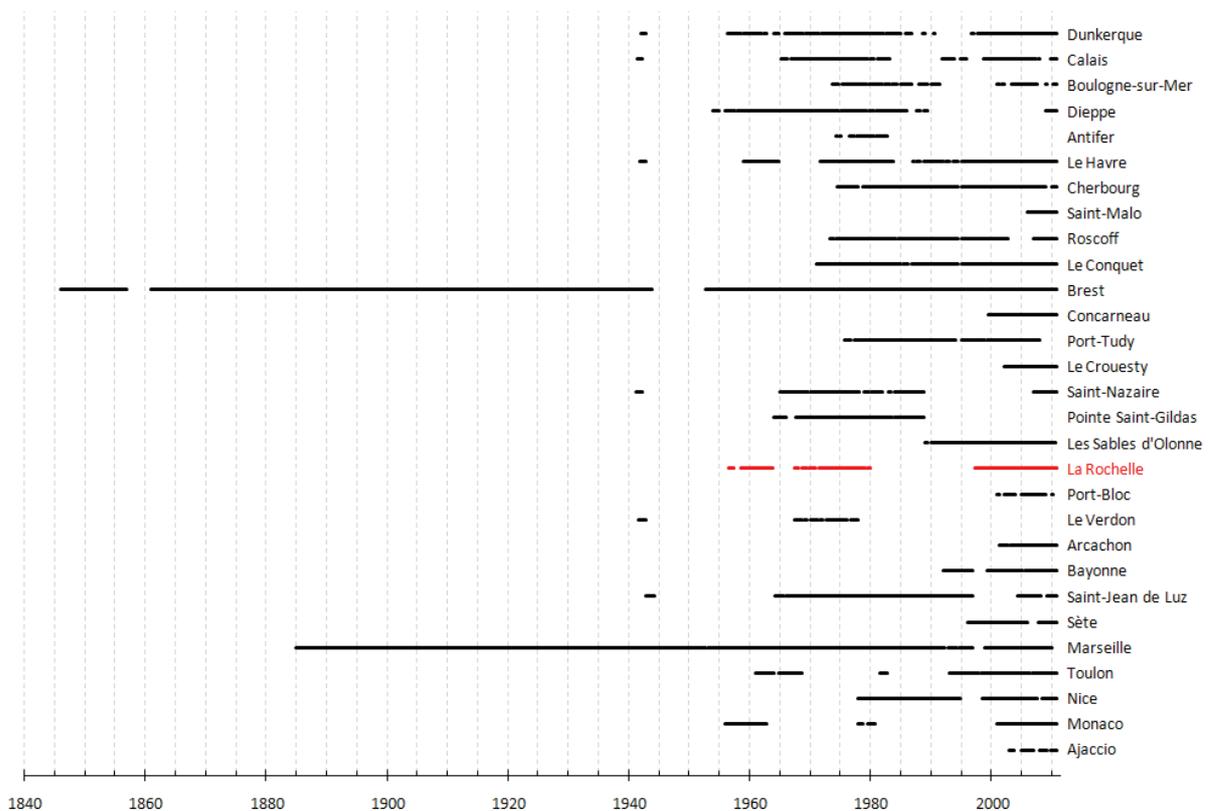


Figure VI-3 : Durée et répartition temporelle des séries marégraphiques françaises disponibles sur le serveur du PSMSL. En rouge : série de Charente-Maritime.

Pour comparaison, la *figure VI-3* présente la répartition temporelle de l'ensemble des séries françaises disponibles sur le serveur mondial du PSMSL (cf. *I.4.3.1.2. PSMSL*). Nous avons choisi d'utiliser la même fenêtre temporelle (1840-2011) pour la comparaison, même si la série de Brest débute en 1807 sur le serveur du PSMSL. Nous avons constaté plusieurs différences entre les moyennes mensuelles disponibles au PSMSL et celles disponibles sur SONEL, à partir des données horaires de REFMAR. Par exemple, nous avons répertorié 25 différences dans les moyennes mensuelles de la série de Brest, entre 1859 et 1909. Parmi ces différences, 15 moyennes mensuelles sont présentes dans la série du PSMSL, alors qu'aucune moyenne mensuelle n'est disponible sur SONEL (pas de données horaires non plus sur REFMAR) : janvier 1862, septembre 1863 à février 1864, août 1867, juillet 1868, septembre 1877, septembre 1878, novembre 1891, juin et juillet 1897, et juin 1907. A l'inverse, 10 moyennes mensuelles sont absentes de la série du PSMSL mais présentes sur SONEL (données horaires également existantes sur REFMAR) : décembre 1859 à janvier 1860, et mai à décembre 1860.

De même, 73 moyennes mensuelles ne sont disponibles que sur le serveur du PSMSL pour la série de La Rochelle entre 1956 et 1963. Cette période correspond à la présence d'un marégraphe à flotteur installé et géré par l'IGN. Le PSMSL précise d'ailleurs que contrairement aux autres moyennes mensuelles de la série, celles-ci ont été fournies par l'IGN. Le PSMSL indique également que les valeurs d'octobre 1962 à avril 1963 sont suspectes, sans en indiquer la raison. Si les données originales ont été conservées, elles le sont probablement dans les archives de l'IGN. Mais l'exploration d'une petite partie de leurs archives marégraphiques, effectuée en 2009, ne nous a pas permis de retrouver les données de la période 1962-1963. N'ayant pas pu effectuer un contrôle qualité rigoureux sur les données horaires de la période 1956-1963, ces moyennes mensuelles ne seront pas prises en compte dans les résultats qui suivent. Cependant, nous savons que les hauteurs horaires de 1956-1957 sont conservées aux archives de l'IGN (caisse SGN 1347), il pourrait donc être intéressant, à l'avenir, de les numériser et de les contrôler afin de les inclure dans notre série inédite de La Rochelle (1775-2011).

La majorité des séries marégraphiques françaises utilisées dans notre étude a au moins 30 ans de données ; ainsi les tendances des composantes du niveau marin pourront être déterminées avec une erreur type de l'ordre de 0,5 mm/an [Douglas, 1991; Shennan & Woodworth, 1992; Tsimplis & Spencer, 1997]. A noter que, pour une distribution gaussienne, une tendance n'est pas considérée comme statistiquement différente de zéro, avec une limite de confiance à 95%, si sa valeur n'est pas au moins égale à deux fois son écart-type.

VI.1. Ondes de marée

VI.1.1. Dans le Pertuis d'Antioche : La Rochelle et Aix-Enet-Boyard

VI.1.1.1. Caractéristiques générales

• La Rochelle

Le spectre de la marée est une représentation objective du signal étudié. Il représente l'amplitude des composantes harmoniques en fonction de la fréquence du signal (ici, la vitesse angulaire, en °/h). La caractéristique principale de ce mode de représentation de la marée est la répartition des raies en groupes distincts, appelés espèces, selon leur fréquence (cf. 1.1.3.1.2. *Astronomie : marées*). L'analyse spectrale consiste à localiser, dans une gamme de fréquences, les amplitudes significatives relatives aux variations temporelles de la marée. Nous l'avons ici appliquée aux données de La Rochelle afin d'identifier les composantes harmoniques de ce site, et constituer ainsi l'identité locale de la marée (figure VI-4). L'analyse spectrale a été réalisée à l'aide de *t_tide* à partir des hauteurs horaires de la période 1997-2011 (choisies en raison de leur qualité).

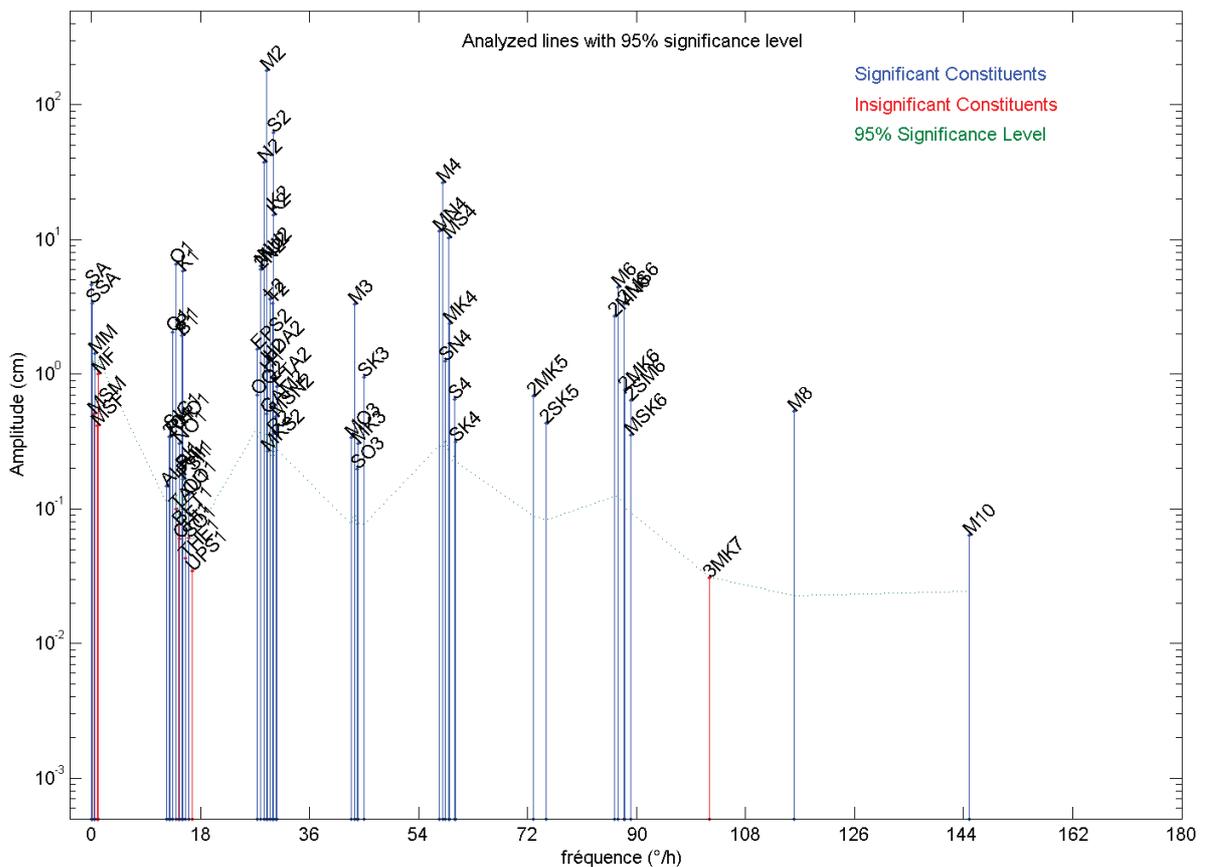


Figure VI-4 : Spectre des composantes harmoniques de la marée du site de La Rochelle, calculé sur la période 1997-2011. L'axe des abscisses représente la fréquence (ici : vitesse angulaire, en °/h). Axe des ordonnées en échelle logarithmique.

Sans surprise, le spectre de La Rochelle est dominé par les espèces semi-diurnes qui forment le groupe de composantes harmoniques ayant les plus fortes amplitudes, avec à sa tête, l'onde M2 (≈ 174 cm). Ce spectre montre l'importance des espèces quart-diurnes et sixième-diurnes, groupes de composantes harmoniques d'interaction, déjà observée par d'autres [Le Cann, 1990; Marcos *et al.*, 2007]. En effet, seules les espèces diurnes, semi-diurnes, et tiers-diurnes représentent la majeure partie de la marée astronomique directement issue des actions de la Lune et du Soleil, les autres groupes étant formés par les interactions des ondes entre elles. Ce phénomène est amplifié dans les zones de faibles profondeurs où les équations de la mécanique des fluides deviennent fortement non-linéaires. Ce qui signifie, ici, que la propagation de la marée dans le pertuis d'Antioche génère un nombre important de composantes d'interaction qui, nous le verrons, joueront un rôle dans l'asymétrie de la marée (cf. VI.1.1.2. *Asymétrie tidale*).

L'analyse harmonique de la marée nous a permis de calculer les constantes harmoniques des composantes détectées lors de l'analyse spectrale. Le *tableau VI-1* regroupe les dix composantes les plus importantes, de par leur amplitude, du Vieux port et du port de La Pallice. Elles représentent environ 70 % de l'amplitude de l'ensemble des ondes de marée de La Rochelle, et peuvent donc être considérées comme représentatives du site.

COMPOSANTES HARMONIQUES (ondes de marée)				VIEUX PORT (1863-1874)		LA PALLICE (1941-2011)	
Symbole	Argument littéral étendu	Vitesse angulaire (°/h)	Période (heure)	Amplitude (cm)	Phase (°)	Amplitude (cm)	Phase (°)
M2	BZZZZZ	28,98410424	12,42 (12h25)	174,2 (34,2%)	93	174,6 (34,3%)	99
S2	BBZZZZ	30,00000000	12,00 (12h00)	62,1 (12,2%)	126	62,9 (12,4%)	132
N2	BYZAZZZ	28,43972956	12,66 (12h40)	35,4 (7,0%)	74	36,2 (7,1%)	80
M4	DZZZZZ	57,96820848	6,21 (6h13)	23,7 (4,7%)	1	24,8 (4,9%)	11
K2	BBZZZZ	30,08213728	11,97 (11h58)	17,3 (3,4%)	125	17,9 (3,5%)	130
MN4	DYZAZZZ	57,42383379	6,27 (6h16)	10,1 (2,0%)	312	10,8 (2,1%)	323
MS4	DBZZZZ	58,98410424	6,10 (6h06)	10,3 (2,0%)	95	10,2 (2,0%)	97
O1	AYZZZZY	13,94303560	25,82 (25h49)	7,3 (1,4%)	325	7,3 (1,4%)	326
NU2	BYBYZZZ	28,51258316	12,63 (12h38)	6,4 (1,3%)	76	6,9 (1,4%)	83
K1	AAZZZZA	15,04106864	23,93 (23h56)	6,3 (1,2%)	73	6,2 (1,2%)	74
Z0	ZZZZZZ	0,00000000	-	370,00 cm		390,92 cm	

Tableau VI-1 : Caractéristiques des dix composantes harmoniques les plus importantes (par leur amplitude) du site de La Rochelle. Z0 représente le niveau moyen. Le pourcentage indiqué entre parenthèses représente la valeur de l'amplitude de l'onde de marée par rapport à la somme totale des amplitudes.

Quelques grandeurs, liées aux composantes harmoniques de la marée, peuvent caractériser un site. Parmi celles-ci, on retrouve :

- Etablissement moyen :
$$E_m = \frac{G_{M2}}{28,984h} \quad (6.1)$$

Avec G_{M2} = phase de l'onde M2 ; l'établissement moyen d'un site représente le retard moyen de la pleine mer semi-diurne réelle par rapport au passage de la lune dans le plan méridien.

$$\text{- Age de la marée semi-diurne : } T_2 = \frac{G_{S2} - G_{M2}}{1,016} \quad (6.2)$$

Avec G_{S2} = phase de l'onde S2 ; les vives-eaux suivent les syzygies avec un retard T_2 appelé âge de la marée semi-diurne.

$$\text{- Age de la marée diurne : } T_1 = \frac{G_{K1} - G_{O1}}{1,098} \quad (6.3)$$

Avec G_{K1} = phase de l'onde K1 ; G_{O1} = phase de l'onde O1 ; les vives-eaux diurnes suivent le passage de la lune à ses tropiques d'un intervalle de temps T_1 appelé âge de la marée diurne.

$$\text{- Type de marée } R \text{ (form factor) : } R = \frac{A_{K1} + A_{O1}}{A_{M2} + A_{S2}} \quad (6.4)$$

Avec A_{XX} = amplitude de l'onde considérée ;

D'après Simon [2007a] :

- si $R < 0,25$ la marée est de type semi-diurne,
- si $0,25 \leq R < 1,5$ le type de la marée est semi-diurne à inégalités diurnes,
- si $1,5 \leq R < 3$ le type est mixte,
- si $R \geq 3$ la marée est de type diurne.

Appliquées au Vieux port et au port de La Pallice, on obtient (ces résultats seront commentés ci-après, en comparaison de ceux obtenus à Aix-Enet-Boyard) :

	Vieux port (1863-1874)	La Pallice (1941-2011)
Etablissement moyen	3,22°/h	3,41°/h
Age de la marée semi-diurne	31h45min	32h21min
Age de la marée diurne	98h00min	97h52min
R	0,06	0,06
Type de marée	semi-diurne	semi-diurne

• Aix-Enet-Boyard

Nous avons également réalisé une analyse spectrale à partir des données de la série Aix-Enet-Boyard afin d'identifier les composantes harmoniques de ce site, et de constituer l'identité locale de la marée (figure VI-5). L'analyse spectrale a été réalisée à l'aide de t_tide à partir des hauteurs horaires de la période 1882-1899 (choisies en raison de leur qualité). Les résultats de l'analyse spectrale d'Aix-Enet-Boyard sont en grande partie statistiquement similaires à ceux de La Rochelle. Le spectre est également dominé par les espèces semi-diurnes (M2 : ≈ 177 cm) et les groupes de composantes harmoniques d'interaction sont, là aussi, importants. Le tableau VI-2 regroupe les dix premières composantes (par leur amplitude) des sites Enet-Boyard et de l'île d'Aix. De même, elles représentent environ 70 % de l'amplitude de l'ensemble des ondes de marée de la rade de l'île d'Aix.

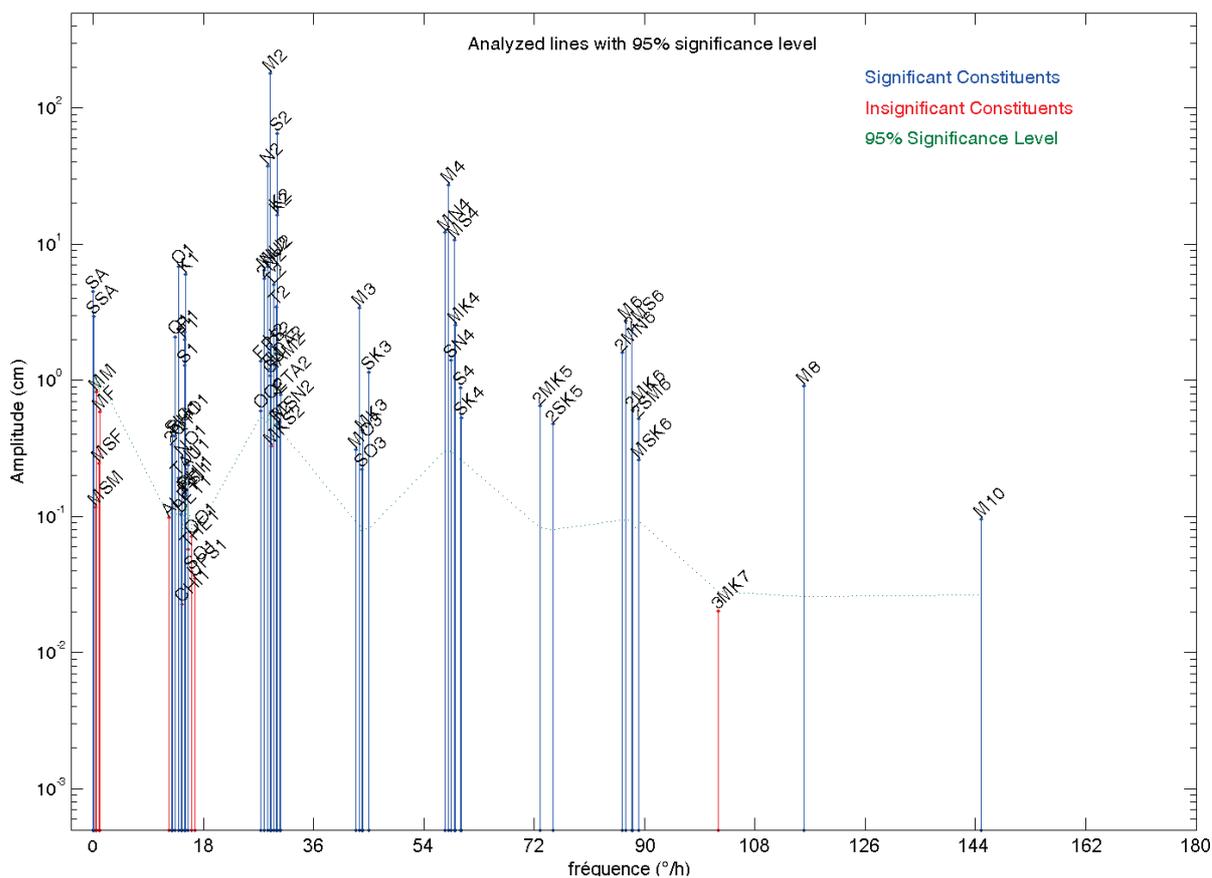


Figure VI-5 : Spectre des composantes harmoniques de la marée du site Aix-Enet-Boyard, calculé sur la période 1882-1899. L'axe des abscisses représente la fréquence (ici : vitesse angulaire, en °/h). Axe des ordonnées en échelle logarithmique.

COMPOSANTES HARMONIQUES (ondes de marée)				ENET-BOYARD (1859-1909)		ÎLE D'AIX (1973-1974)	
Symbole	Argument littéral étendu	Vitesse angulaire (°/h)	Période (heure)	Amplitude (cm)	Phase (°)	Amplitude (cm)	Phase (°)
M2	BZZZZZ	28,98410424	12,42 (12h25)	178,4 (33,9%)	93	176,4 (33,1%)	98
S2	BBZZZZ	30,00000000	12,00 (12h00)	64,7 (12,3%)	125	64,0 (12,0%)	129
N2	BYZAZZ	28,43972956	12,66 (12h40)	37,0 (7,0%)	74	36,7 (6,9%)	79
M4	DZZZZZ	57,96820848	6,21 (6h13)	26,6 (5,1%)	358	25,2 (4,7%)	10
K2	BBZZZZ	30,08213728	11,97 (11h58)	18,4 (3,5%)	122	17,4 (3,3%)	123
MN4	DYZAZZ	57,42383379	6,27 (6h16)	11,8 (2,2%)	311	11,0 (2,1%)	320
MS4	DBZZZZ	58,98410424	6,10 (6h06)	11,0 (2,1%)	86	10,2 (1,9%)	105
O1	AYZZZZ	13,94303560	25,82 (25h49)	7,4 (1,4%)	323	7,6 (1,4%)	324
NU2	BYBYZZ	28,51258316	12,63 (12h38)	6,9 (1,3%)	77	6,5 (1,2%)	83
K1	AAZZZZ	15,04106864	23,93 (23h56)	6,3 (1,2%)	69	6,7 (1,3%)	69
Z0	ZZZZZZ	0,00000000	-	377,31 cm		370,52 cm	

Tableau VI-2 : Caractéristiques des dix composantes harmoniques les plus importantes (par leur amplitude) du site Aix-Enet-Boyard. Z0 représente le niveau moyen. Le pourcentage indiqué entre parenthèses représente la valeur de l'amplitude de l'onde de marée par rapport à la somme totale des amplitudes.

Voici quelques valeurs de grandeurs caractéristiques de la marée des sites Enet-Boyard et de l'île d'Aix :

	Enet-Boyard (1859-1909)	Île d'Aix (1973-1974)
Etablissement moyen	3,20°/h	3,38°/h
Age de la marée semi-diurne	31h41min	31h02min
Age de la marée diurne	97h15min	95h09min
R	0,06	0,06
Type de marée	semi-diurne	semi-diurne

En résumé, les caractéristiques de la marée sont similaires à La Rochelle et Aix-Enet-Boyard. Seule l'amplitude paraît différente, plus prononcée dans la rade de l'île d'Aix. On entrevoit également une possible évolution temporelle de la marée. Par exemple, les valeurs de l'établissement moyen de la marée du Vieux port (3,22°/h) et d'Enet-Boyard (3,20°/h), sont proches au 19^e siècle et légèrement plus élevées au 20^e siècle : 3,41°/h au port de La Pallice et 3,38°/h à l'île d'Aix. Les études qui suivent permettront d'étudier plus en détail une éventuelle évolution des composantes de la marée. Enfin, pour comparaison, nous avons calculé les amplitudes et les phases de l'onde M2 sur trois littoraux français : Mer du Nord/Manche, Atlantique et Méditerranée (*figure VI-6*). On observe que les petites différences constatées sur les amplitudes ne sont pas grandes comparées aux valeurs de l'amplitude de M2 aux autres stations de la façade atlantique française.

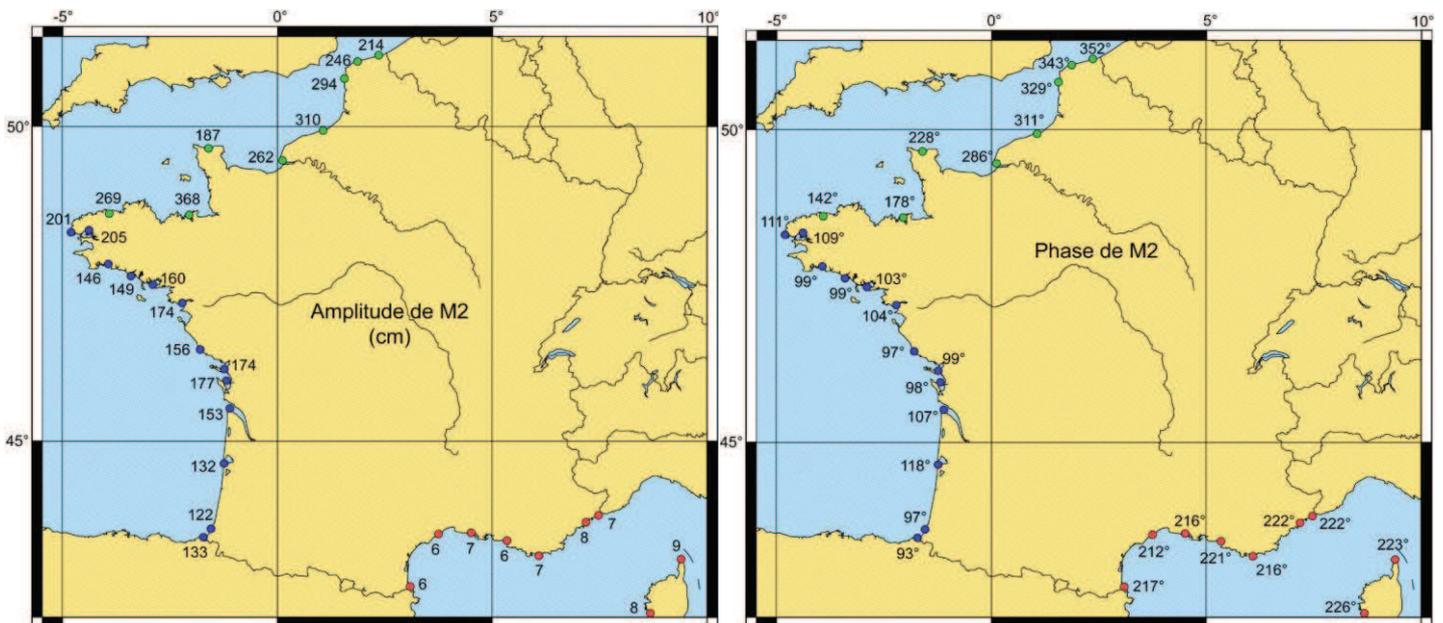


Figure VI-6 : Valeurs caractéristiques des amplitudes et des phases de l'onde M2 sur les littoraux français.

VI.1.1.2. Asymétrie tidale

Nous l'avons vu, les profondeurs sont faibles dans les pertuis charentais, en comparaison de la zone au large (cf. III.2.2. *Géomorphologie du pertuis d'Antioche*). En pénétrant dans les pertuis, la forme de l'onde de marée va se modifier progressivement : d'allure sinusoïdale, elle va se transformer en une courbe asymétrique [Nicolle & Karpytchev, 2007]. La cause principale de cette asymétrie est la formation de composantes harmoniques d'interaction, résultant d'une combinaison des composantes harmoniques principales et se propageant indépendamment d'elles [Aubrey & Speer, 1985; Parker, 1991; Friedrichs & Madsen, 1992; Ranasinghe & Pattiaratchi, 2000; Simon, 2007a]. L'analyse spectrale des sites de La Rochelle et d'Aix-Enet-Boyard nous a montré l'importance de certaines de ces composantes d'interaction quart-diurnes : M4 (amplitude ≈ 25 cm), MN4 (≈ 11 cm) et MS4 (≈ 10 cm). Ces trois ondes représentent à elles seules une amplitude d'environ 46 cm (soit 9% du total des amplitudes des composantes), et vont jouer un rôle important dans l'apparition de l'asymétrie tidale.

L'onde M2 (amplitude ≈ 175 cm) étant ici la composante semi-diurne principale et M4 (≈ 25 cm) la composante quart-diurne la plus importante, plusieurs études [Speer & Aubrey, 1985; Pugh, 1987; Friedrichs & Aubrey, 1988; Speer *et al.*, 1991] proposent d'étudier simplement le ratio de l'amplitude de M4 sur M2 pour avoir une indication de l'ampleur de l'asymétrie tidale générée. De même, l'étude de la différence de phase entre M2 et M4 doit permettre de déterminer le sens de l'asymétrie (domination du montant ou du perdant en fonction de leur durée). Les équations proposées sont les suivantes :

$$\text{Ampleur de l'asymétrie :} \quad \frac{A_{M4}}{A_{M2}} \quad (6.5)$$

$$\text{Sens de l'asymétrie (différence de phases) :} \quad 2.G_{M2} - G_{M4} \quad (6.6)$$

L'hypothèse posée pour justifier cette restriction à M2 et M4 est que les principales caractéristiques de l'asymétrie tidale dans un environnement fortement non-linéaire peuvent être représentées par la comparaison des ondes M2 et M4 ; les autres composantes quart-diurnes (et notamment MN4 et MS4) ne faisant que renforcer l'asymétrie tidale générée par M2 et M4. En partant de cette hypothèse, Pugh [1987] propose quatre catégories d'asymétrie tidale, en fonction de la valeur de la différence de phase, et en considérant que $4.A_{M4} = A_{M2}$. Nous avons remarqué qu'une erreur s'était introduite dans la figure publiée par Pugh, présentant ces quatre catégories. Il y a en effet inversion entre les figures 7:2 (a) et 7:2 (c), page 234 de son livre : la figure 7:2 (a) correspond en réalité au cas « $2G_{M2} - G_{M4} = 90^\circ$ » et la figure 7:2 (c) correspond elle au cas « $2G_{M2} - G_{M4} = -90^\circ$ » (G étant ici la phase de la composante harmonique). Pour une meilleure compréhension, nous avons donc reproduit la figure de Pugh, en la corrigeant de l'erreur détectée (*figure VI-7*).

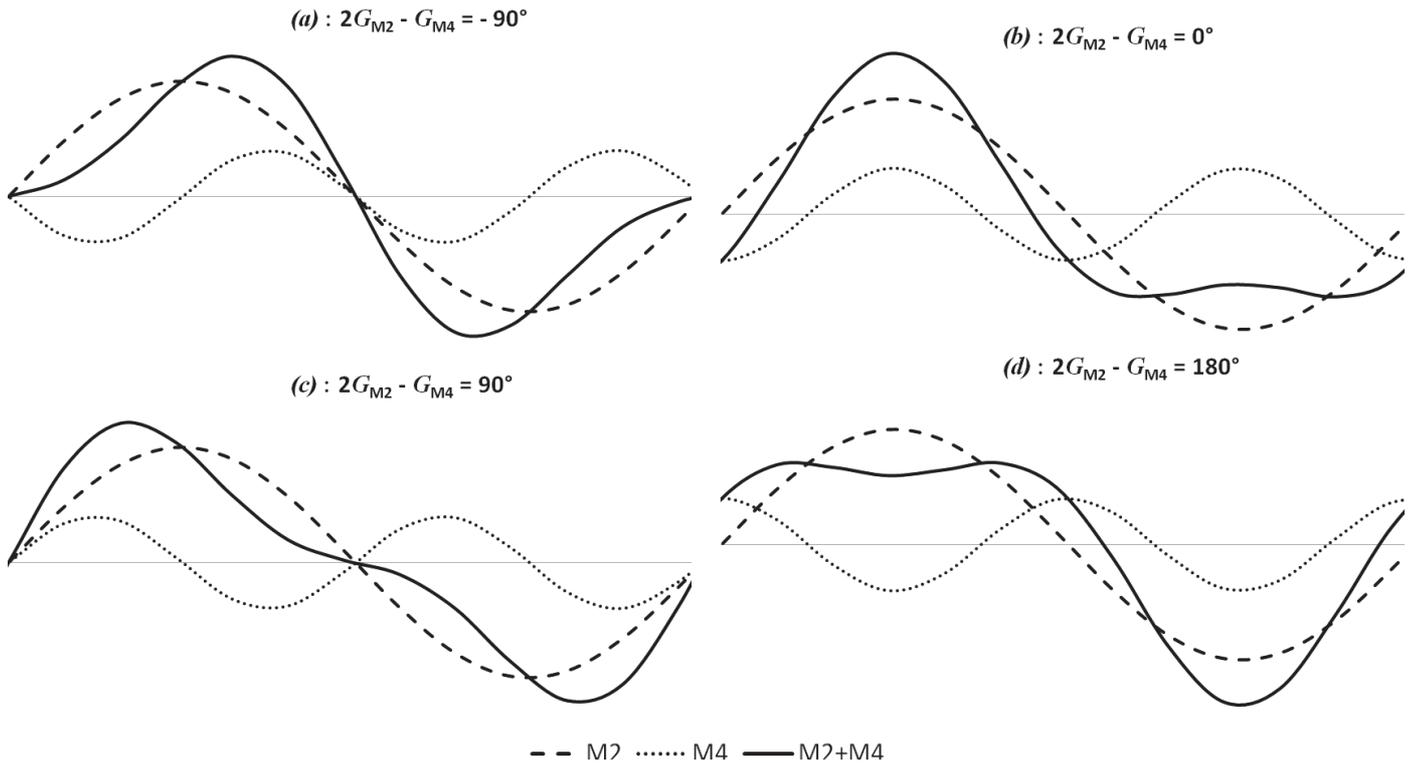


Figure VI-7 : Exemple montrant comment la courbe du niveau marin (représentée ici par M_2+M_4) peut être contrôlée par la relation entre les phases des composantes M_2 et M_4 (avec $4.A_{M_4} = A_{M_2}$). D'après Pugh [1987].

D'après la *figure VI-7* :

- si $2.G_{M_2} - G_{M_4} = -90^\circ \Rightarrow$ la durée du montant est grande par rapport à la durée du perdant (perdant rapide), la pleine mer est retardée et surélevée, et la basse mer est en avance et abaissée.
- si $2.G_{M_2} - G_{M_4} = 0^\circ \Rightarrow$ pleine mer surélevée et création d'un phénomène de double basse mer.
- si $2.G_{M_2} - G_{M_4} = +90^\circ \Rightarrow$ la durée du montant est petite par rapport à la durée du perdant (montant rapide), la pleine mer est en avance et surélevée, et la basse mer est retardée et abaissée.
- si $2.G_{M_2} - G_{M_4} = +180^\circ \Rightarrow$ création d'un phénomène de double pleine mer et basse mer abaissée.

Pugh [1987] précise aussi qu'une double pleine mer ne peut avoir lieu si $4.A_{M_4} < A_{M_2}$. De façon plus globale, les études s'accordent pour dire que le montant est plus court et rapide lorsque la différence $2.G_{M_2} - G_{M_4}$ est comprise entre 0° et 180° , tandis qu'à l'inverse, si elle est comprise entre 180° et 360° (ou -180° et 0°), c'est le perdant qui est plus court et plus rapide. Si la différence est égale à 180° , alors les durées du montant et du perdant seront identiques [Aubrey & Speer, 1985; Friedrichs & Aubrey, 1994].

Dans le pertuis d'Antioche, les valeurs des paramètres de l'asymétrie tidale sont (cf. *V.4.4.1.3. Autres*) :

$$\text{Ampleur de l'asymétrie :} \quad 0,14 < \frac{A_{M_4}}{A_{M_2}} < 0,15$$

$$\text{Sens de l'asymétrie :} \quad 185 < 2.G_{M_2} - G_{M_4} < 188$$

Si l'on regarde seulement la différence de phase entre M2 et M4, le résultat montre que les phases de M2 et M4 sont compatibles avec l'apparition d'une double pleine mer dans le pertuis d'Antioche. Mais la deuxième condition à l'apparition de ce phénomène n'est pas respectée, puisqu'ici $1,4.A_{M4} = A_{M2}$. Le sens de l'asymétrie indique que le pertuis d'Antioche semble très légèrement dominé par le perdant, qui est un peu plus rapide que le montant. Pour une meilleure lisibilité des résultats, nous avons redessiné la figure de Pugh [1987] à l'aide des valeurs de l'asymétrie du pertuis d'Antioche (*figure VI-8*).

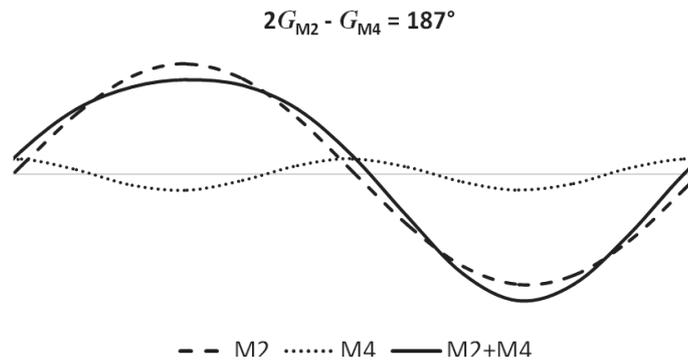
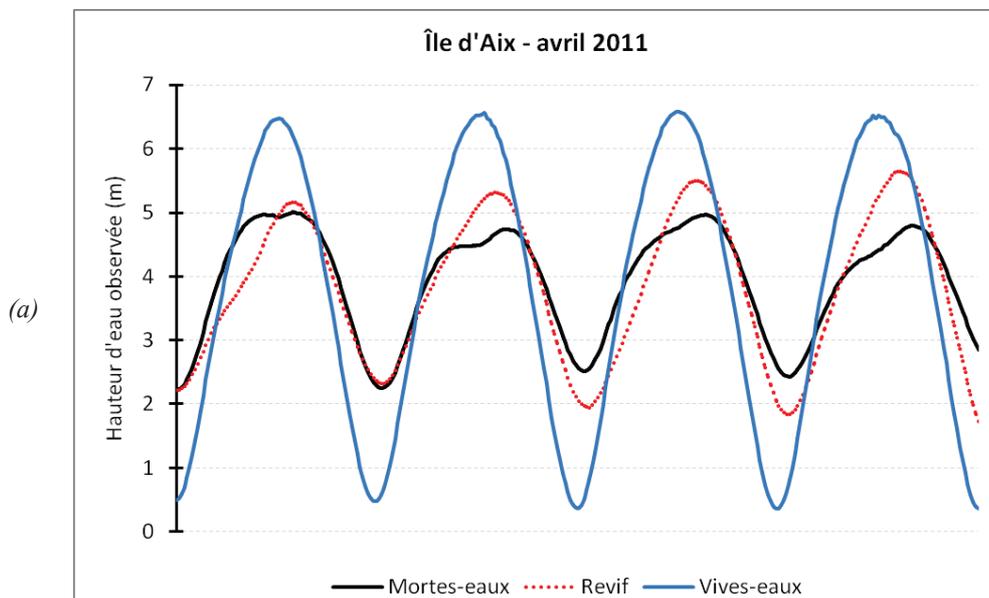


Figure VI-8 : Représentation de l'effet de l'onde M4 sur l'onde M2 appliquée au pertuis d'Antioche (avec $1,4.A_{M4} = A_{M2}$).

Sur la *figure VI-8*, la courbe résultante M2+M4 ne montre effectivement pas de double pleine mer ni d'asymétrie visible à l'œil nu. Toutefois, il existe bel et bien une légère asymétrie, puisque dans ce cas de figure, la durée du montant est de 6h22 et celle du perdant de 6h03. En ne tenant compte que des harmoniques M2 et M4, les résultats théoriques du pertuis d'Antioche sont donc conformes aux modèles établis dans la littérature scientifique. Cependant, les observations du niveau de la mer enregistrées dans le pertuis d'Antioche montrent des résultats différents de la théorie. La *figure VI-9* présente les courbes de hauteur d'eau enregistrées à l'île d'Aix en avril 2011, à des périodes caractéristiques de la marée : mortes-eaux, revif, vives-eaux et déchet.



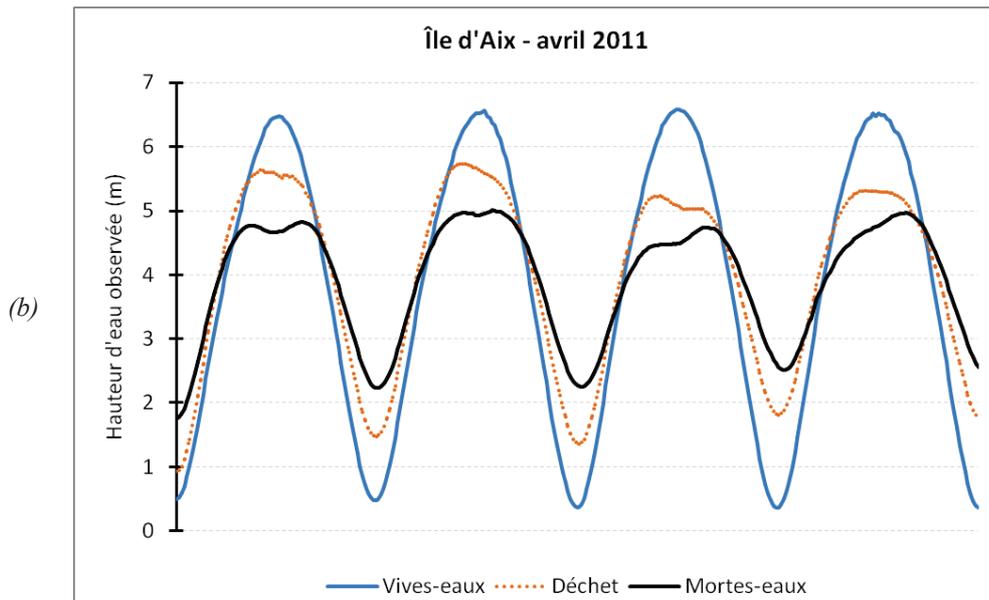


Figure VI-9 : Hauteurs d'eau observées à l'île d'Aix en avril 2011 (source : REFMAR) à des moments caractéristiques de la marée : (a) des mortes-eaux aux vives-eaux ; (b) des vives-eaux aux mortes-eaux.

On observe, sur la *figure VI-9*, une particularité : une inversion de l'asymétrie tidale, autrement dit une alternance de la domination du montant et du perdant. En effet, la période du revif est dominée par le perdant (durée montant > durée perdant) alors que la période du déchet est, elle, dominée par le montant (durée montant < durée perdant), l'inversion s'effectuant au moment de la vive-eau et, d'après les observations, plusieurs heures (jusqu'à 48 heures) avant le moment de la morte-eau. Ce résultat reste cohérent avec le résultat précédent indiquant une très légère domination du perdant dans les pertuis. En effet, sur un cycle complet de mortes-eaux / vives-eaux, on observe en moyenne 6 jours de domination du montant pour 8 jours de domination du perdant. Le Hir *et al.* [2000] avaient déjà observé une inversion au niveau de la vasière de Brouage (au sud du bassin de Marennes-Oléron), mais uniquement sur quinze jours d'observations.

Ici, l'observation de l'inversion de l'asymétrie tidale a été observée sur l'ensemble de nos données, aussi bien à La Rochelle que dans la rade de l'île d'Aix. On remarque aussi, sur la *figure VI-9*, la présence de deux doubles pleines mers. Autant de caractéristiques de l'asymétrie tidale qui n'avaient pas été prévues par l'étude théorique des seules composantes M2 et M4. L'observation des hauteurs d'eau enregistrées nous a montré que l'asymétrie variait avec les différentes phases du cycle mortes-eaux / vives-eaux. Ce cycle étant la résultante de l'attraction gravitationnelle de la lune et du soleil sur les masses d'eau terrestres, nous avons donc ajouté la composante semi-diurne solaire S2 à notre analyse (*figure VI-10*), afin de tenter de recréer l'inversion de l'asymétrie observée. Les résultats sont détaillés sur la *figure VI-11*.

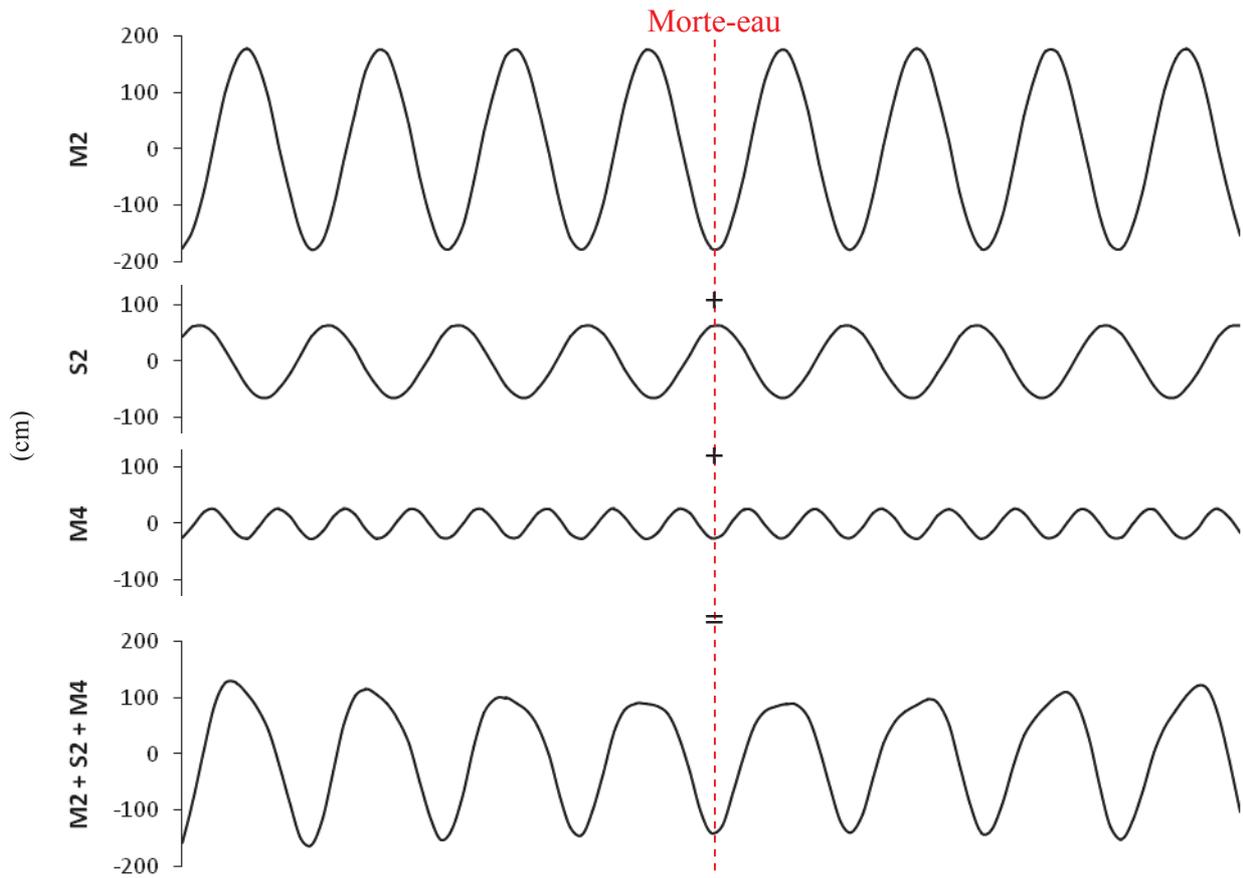
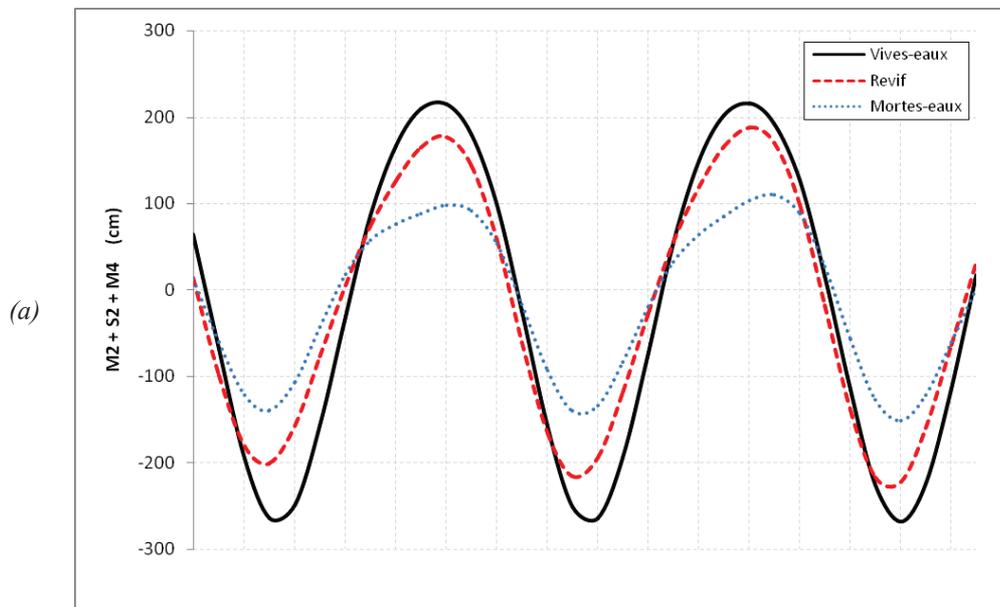


Figure VI-10 : Caractérisation de l'inversion de l'asymétrie tidale théorique en période de mortes-eaux à partir des composantes harmoniques M_2 , S_2 et M_4 du pertuis d'Antioche.



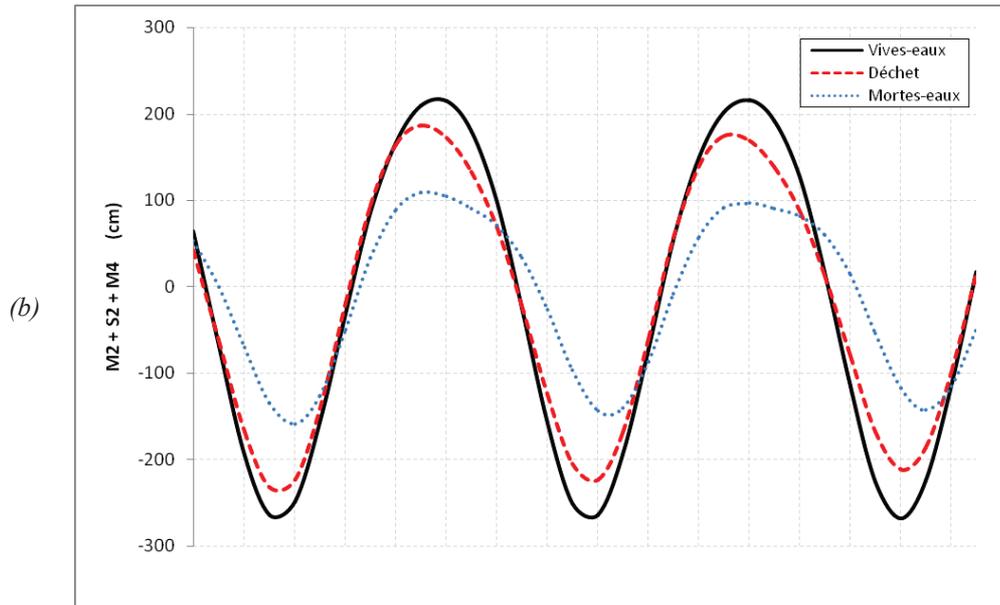


Figure VI-11 : Caractérisation détaillée de l'asymétrie tidale théorique à partir des composantes harmoniques M2, S2 et M4 du pertuis d'Antioche : (a) des mortes-eaux aux vives-eaux ; (b) des vives-eaux aux mortes-eaux.

Les figures VI-10 et VI-11 montrent un résultat probant en ce qui concerne l'inversion de l'asymétrie tidale. Les courbes de la figure VI-10 sont centrées sur la période de mortes-eaux et l'on constate d'abord une domination du montant (du déchet à la morte-eau), puis une domination du perdant (de la morte-eau au revif). Ce résultat est confirmé en détail sur la figure VI-11, où l'on observe une domination du montant lors du déchet et une domination du perdant lors du revif. L'inversion observée (dans nos enregistrements) est expliquée (théoriquement) en ajoutant la composante S2, cependant, ces résultats ne sont pas encore satisfaisants car l'inversion observée dans nos données se déroule en amont du moment de la morte-eau. Après avoir étudié l'association des ondes M2, S2 et M4, il est logique de s'intéresser à la composante d'interaction entre M2 (lunaire) et S2 (solaire) : MS4. La figure VI-12 a été réalisée en reprenant les éléments de la figure VI-10 puis en y ajoutant la composante MS4.

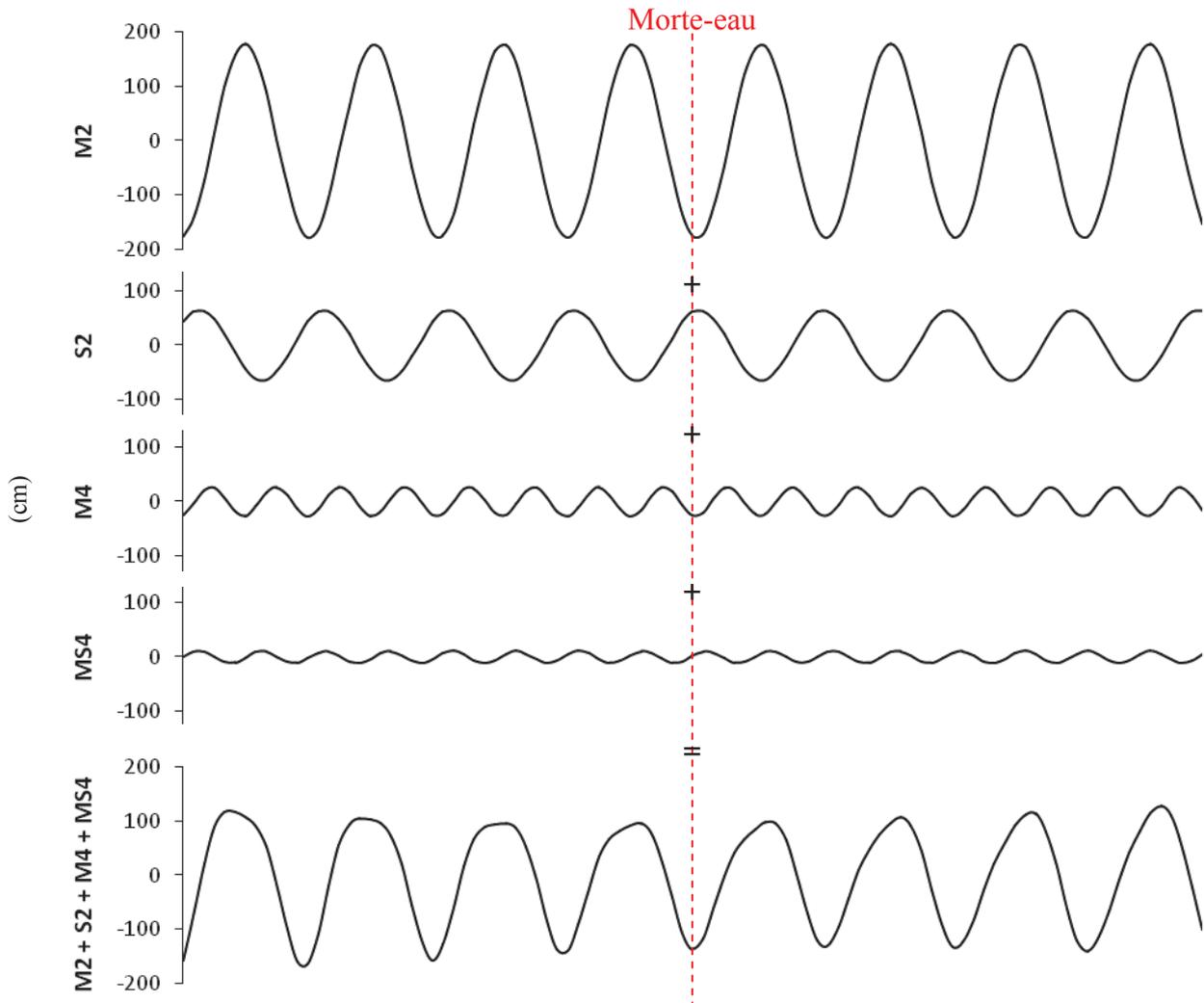


Figure VI-12 : Caractérisation de l'inversion de l'asymétrie tidale théorique en période de mortes-eaux à partir des composantes harmoniques M2, S2, M4 et MS4 du pertuis d'Antioche.

Cette fois-ci, le résultat obtenu correspond bien aux observations réalisées. On observe d'abord une domination du montant, puis l'inversion de l'asymétrie s'effectue environ 24h avant le moment de la morte-eau. Commence alors la domination du perdant, qui paraît plus prononcée que celle du montant. Les pertuis charentais paraissent donc plus complexes que d'autres environnements tidaux et il est nécessaire de prendre en compte d'autres composantes harmoniques (en plus de M2 et M4) pour pouvoir reproduire correctement l'asymétrie tidale observée. Woodworth *et al.* [2005] avaient déjà souligné l'importance de prendre en compte les ondes diurnes en certains lieux. D'après Speer *et al.* [1991], le sens de l'asymétrie produit par les composantes quart-diurnes peut être évalué en comparant l'évolution temporelle de leurs différences de phases (figure VI-13) :

$$\begin{aligned}
 & \text{- pour M4 : } 2.G_{M2} - G_{M4} \\
 & \text{- pour MN4 : } (G_{M2} + G_{N2}) - G_{MN4}
 \end{aligned} \tag{6.7}$$

$$\text{- pour MS4 : } (G_{M2} + G_{S2}) - G_{MS4} \tag{6.8}$$

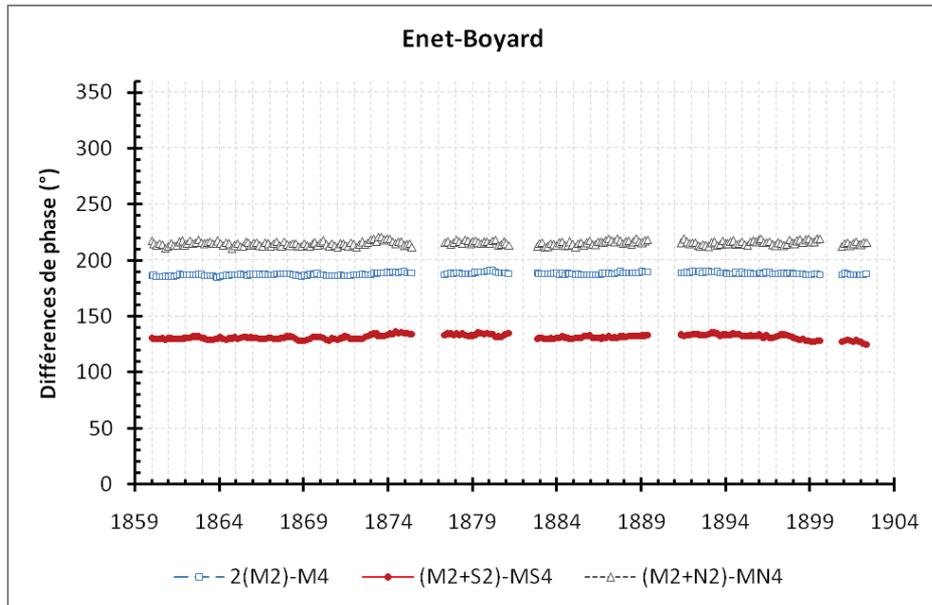


Figure VI-13 : Evolution des différences de phase pour M4 (carré bleu), MS4 (rond rouge) et MN4 (triangle gris) entre 1859 et 1902 (série marégraphique d'Enet-Boyard). L'échelle des ordonnées s'étend volontairement de 0 à 360°, l'objectif ici est de savoir si les trois courbes sont confondues ou non. Les équations utilisées pour tracer les courbes sont les équations (6.6), (6.7) et (6.8).

Théoriquement, si le sens de l'asymétrie engendré par les composantes quart-diurnes est identique, alors les valeurs des différences de phase de M4, MN4 et MS2 (suivant les relations ci-dessus) doivent être similaires et leurs courbes doivent être confondues. Ce qui n'est pas le cas ici. On constate notamment un écart important entre M4 et MS4 (environ 60°), ce qui signifie que chacune de ces composantes engendre une asymétrie différente à la marée. L'écart entre M4 et MN4 est plus faible (environ 25°), et nous n'avons pas détecté d'influence majeure de la composante MN4 sur l'onde de marée, hormis une légère atténuation de l'asymétrie tidale.

Après avoir caractérisé l'asymétrie tidale dans les pertuis charentais, nous avons cherché à connaître son évolution au cours du temps. L'asymétrie est-elle restée inchangée depuis 1824 ou, au contraire a-t-elle évolué, et si tel est le cas, dans quel sens ?

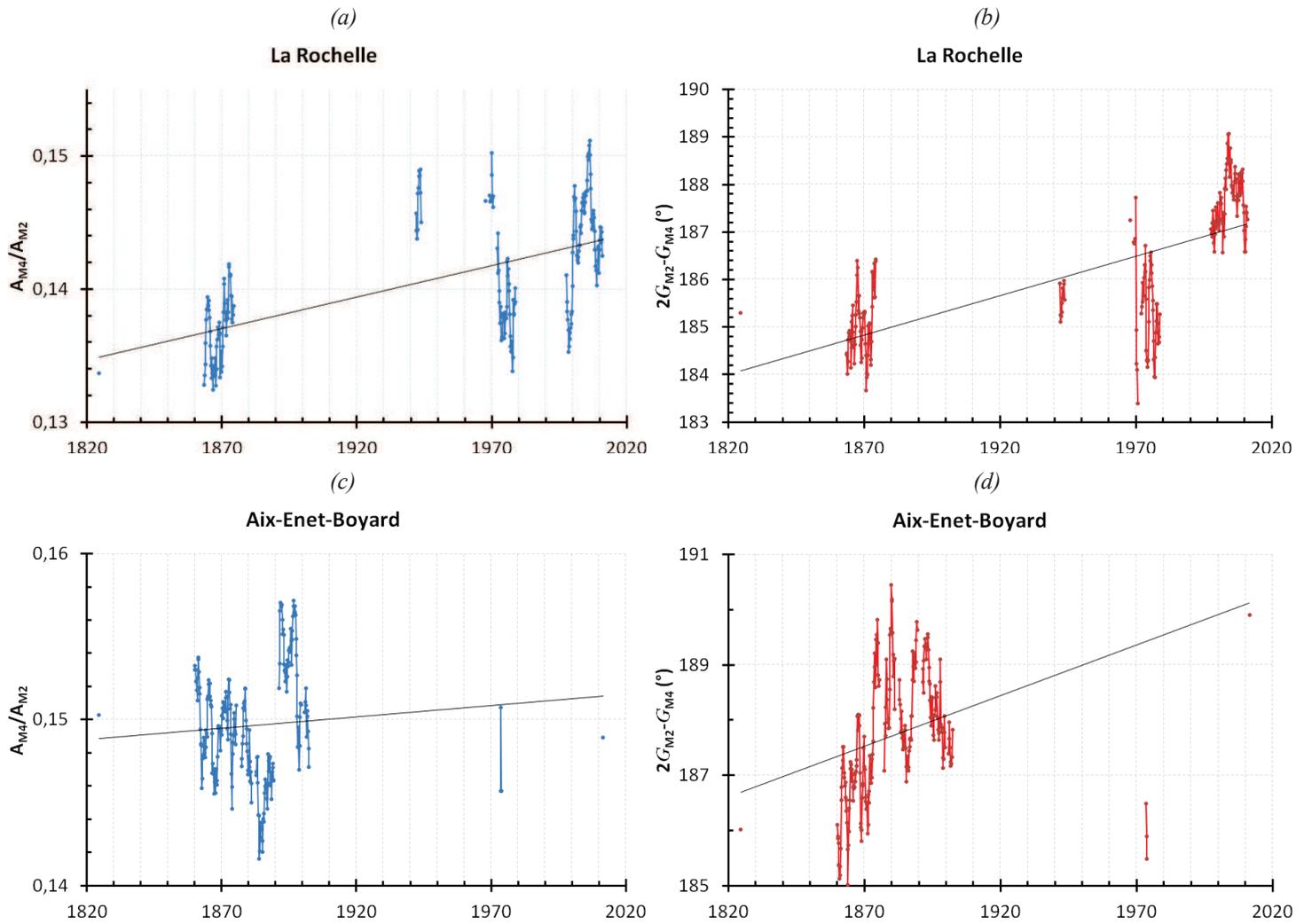


Figure VI-14 : Evolution des paramètres de l'asymétrie tidale dans le pertuis d'Antioche, de 1824 à 2010. (a) et (c) : ratio des amplitudes M_4 et M_2 ; (b) et (d) : différences de phase entre M_4 et M_2 .

Le tableau VI-3 résume les tendances et écarts-types associés de l'asymétrie tidale sur la période 1824-2010 pour les sites de La Rochelle et d'Aix-Enet-Boyard.

	A_{M4} / A_{M2}		$2 \cdot G_{M2} - G_{M4}$	
	Tendance (an^{-1})	Ecart-type (an^{-1})	Tendance ($^{\circ}/\text{an}$)	Ecart-type ($^{\circ}/\text{an}$)
La Rochelle	+0,00005	0,00001	+0,016	0,003
Aix-Enet-Boyard	0,00000	0,00002	+0,014	0,006

Tableau VI-3 : Tendances et écarts-types associés de l'asymétrie tidale sur la période 1824-2010 pour les sites de La Rochelle et d'Aix-Enet-Boyard.

Les deux sites (La Rochelle et Aix-Enet-Boyard) ont une tendance significative similaire concernant les différences de phase. L'augmentation de ces différences est comprise entre $+0,014^{\circ}/\text{an}$ et $+0,016^{\circ}/\text{an}$, ce qui signifie qu'elles s'éloignent de plus en plus de la valeur seuil de 180° . Autrement dit, la légère domination du perdant est de plus en plus prononcée dans le pertuis d'Antioche. La tendance sur le ratio A_{M4} / A_{M2} est significativement positive à La Rochelle, ce qui confirme la tendance à une asymétrie de plus en plus prononcée. En revanche, la tendance à Aix-Enet-Boyard n'est pas

statistiquement différente de zéro, ce qui peut aisément se comprendre au regard du faible nombre de points en dehors de la période 1859-1902. De plus, on semble apercevoir un comportement inverse entre 1859 et 1902 entre le rapport d'amplitude et la différence de phase. Afin de pouvoir observer ce phénomène plus en détail, la *figure VI-15* est centrée sur la période 1859-1902 pour le site Aix-Enet-Boyard, et, à titre de comparaison, pour le site de Brest.

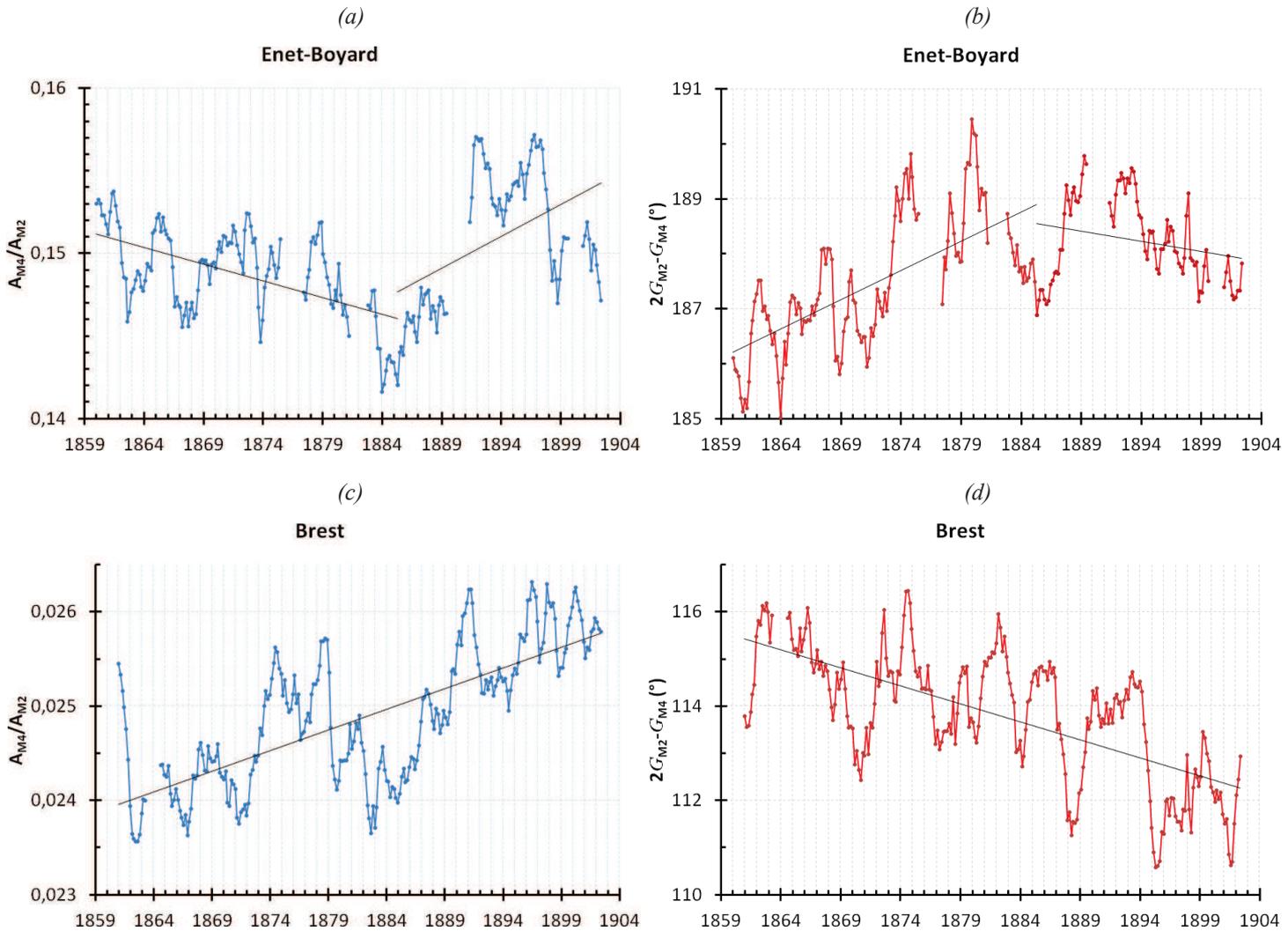


Figure VI-15 : Evolution des paramètres de l'asymétrie tidale à Aix-Enet-Boyard et à Brest, de 1859 à 1902. (a) et (c) : ratio des amplitudes M4 et M2 ; (b) et (d) : différences de phase entre M4 et M2.

Le *tableau VI-4* résume les tendances et écarts-types associés de l'asymétrie tidale sur la période 1859-1902 pour les sites d'Aix-Enet-Boyard et de Brest.

		A_{M4} / A_{M2}		$2.G_{M2} - G_{M4}$	
		Tendance (an ⁻¹)	Ecart-type (an ⁻¹)	Tendance (°/an)	Ecart-type (°/an)
Aix-Enet-Boyard	1859-1885	-0,00021	0,00006	+0,09	0,02
	1885-1902	+0,0005	0,0002	-0,02	0,04
Brest	1859-1902	+0,000045	0,000007	-0,08	0,01

Tableau VI-4 : Tendances et écarts-types associés de l'asymétrie tidale sur la période 1859-1902 pour les sites d'Aix-Enet-Boyard et de Brest.

Hormis la tendance de la différence de phase entre 1885 et 1902 à Aix-Enet-Boyard, toutes les tendances calculées sont statistiquement significatives. Le comportement inverse soupçonné précédemment est confirmé ici, à une échelle de temps plus courte : le rapport des amplitudes et la différence de phase évoluent à l'inverse l'une de l'autre. Ce qui semblerait signifier que lorsque le sens de l'asymétrie évolue en faveur du perdant (c'est-à-dire, lorsque le perdant est de plus en plus dominant), l'amplitude de l'asymétrie diminue. Et inversement, moins le perdant domine et plus l'amplitude de l'asymétrie augmente. Notons également que les tendances entre Aix-Enet-Boyard et Brest ne sont pas corrélées, montrant bien l'effet local de l'asymétrie tidale. Dernier point à remarquer, le point d'inversion de la tendance à Aix-Enet-Boyard se situe aux alentours de l'année 1885. Sans avoir d'hypothèse explicative, il est intéressant de noter que l'année 1885 est également le moment défini par Pouvreau *et al.* [2006] pour l'inversion de la tendance de l'amplitude de la composante M2 à Brest.

Globalement donc, l'asymétrie tidale a tendance à augmenter dans le pertuis d'Antioche, aussi bien en amplitude, que dans sa prédominance du perdant. D'après Pugh [1987], il existe trois raisons principales à l'apparition d'une asymétrie :

- la profondeur diminuant, l'amplitude des ondes devient une part importante de la profondeur totale d'eau dans les zones peu profondes. L'onde de marée se déforme alors en conséquence de la relation :

$$c = \sqrt{g(H + h)} \quad (6.9)$$

Où c est la célérité de l'onde, g l'accélération de la pesanteur, H la profondeur moyenne du lieu et h la hauteur de l'onde (fonction du temps et de moyenne nulle). Ainsi, le sommet de l'onde avance plus vite que le creux.

- les forts courants qui se développent dans les eaux peu profondes sont freinés par l'effet du frottement sur le fond. Ce phénomène est un processus de dissipation d'énergie tidale qui réduit l'amplitude des ondes.

- la topographie a une forte influence : les lignes de côtes irrégulières et les variations de bathymétrie créent des courants de marée complexes.

La géométrie des lieux a donc une importance forte dans le développement de l'asymétrie tidale, comme l'ont également montré Huang *et al.* [2008] (étude appliquée à Okatee Creek, Etats-Unis) et Picado *et al.* [2010] (baie Ria de Aveiro, Portugal). Et inversement, car en créant une asymétrie entre le montant et le perdant, on crée également une asymétrie des courants de flot et de jusant. Les transports sédimentaires associés seront donc eux aussi modifiés, générant des modifications morphologiques, qui à leur tour, auront une conséquence sur l'asymétrie tidale. Dans notre cas, les pertuis charentais sont caractérisés par une évolution rapide de leur morphologie : de 1824 à nos jours, Bertin [2005] a observé une accrétion importante au niveau des estrans et une érosion du fond des chenaux. Nos résultats sont cohérents avec cette observation, car une augmentation de domination du perdant se traduit généralement par une sédimentation au niveau des estrans et une érosion du fond des chenaux [Speer & Aubrey, 1985].

VI.1.1.3. Cycle nodal

La marée subit une modulation cyclique de période de 18,61 ans, appelée cycle nodal (cf. *I.1.3.1.2. Astronomie : marées*). Ce cycle correspondant à la période du Saros et est la composante nodale de la marée (plus grande période de l'ensemble des composantes). Il est souvent difficile, voire impossible, de calculer directement les constantes harmoniques de cette composante par une analyse harmonique, si la durée de la série du niveau marin est inférieure à la période du Saros. En toute rigueur, l'idéal serait d'utiliser une série contenant au moins 18,61 ans d'observations. Mais même dans ce cas, les résultats obtenus peuvent être suspects : par exemple, l'amplitude du cycle nodal à Brest est de 0,64 cm selon l'analyse harmonique effectuée avec *mas* sur plus de 150 années de mesures, et elle est de 1,96 cm à Aix-Enet-Boyard selon la même analyse réalisée avec 46 années d'observations. C'est pourquoi nous utilisons ici une méthode indirecte pour estimer l'amplitude du cycle nodal : le calcul des écarts-types annuels des observations du niveau marin [*e.g.* Araújo, 2005].

Ainsi, nous avons calculé les écarts-types de l'ensemble des hauteurs horaires, par année, de nos deux séries de Charente-Maritime (La Rochelle et Enet-Boyard), mais également des séries du littoral atlantique et de la Mer du Nord/Manche pour comparaison. Les résultats sont présentés sous la forme de graphiques (*figures VI-16 et VI-17*). On observe que les écarts-types annuels ont bien une modulation cyclique d'une période identique à celle du Saros. Puis nous avons estimé graphiquement l'amplitude du cycle nodal en divisant par deux la hauteur pic à pic de cette modulation. Enfin, le calcul du coefficient de corrélation linéaire nous permet d'estimer la tendance du cycle nodal. Les résultats sont synthétisés dans le *tableau VI-5*. A noter que les tendances n'ont été calculées que si le nombre de points d'un graphique était au minimum de 37, soit deux fois la période du cycle nodal.

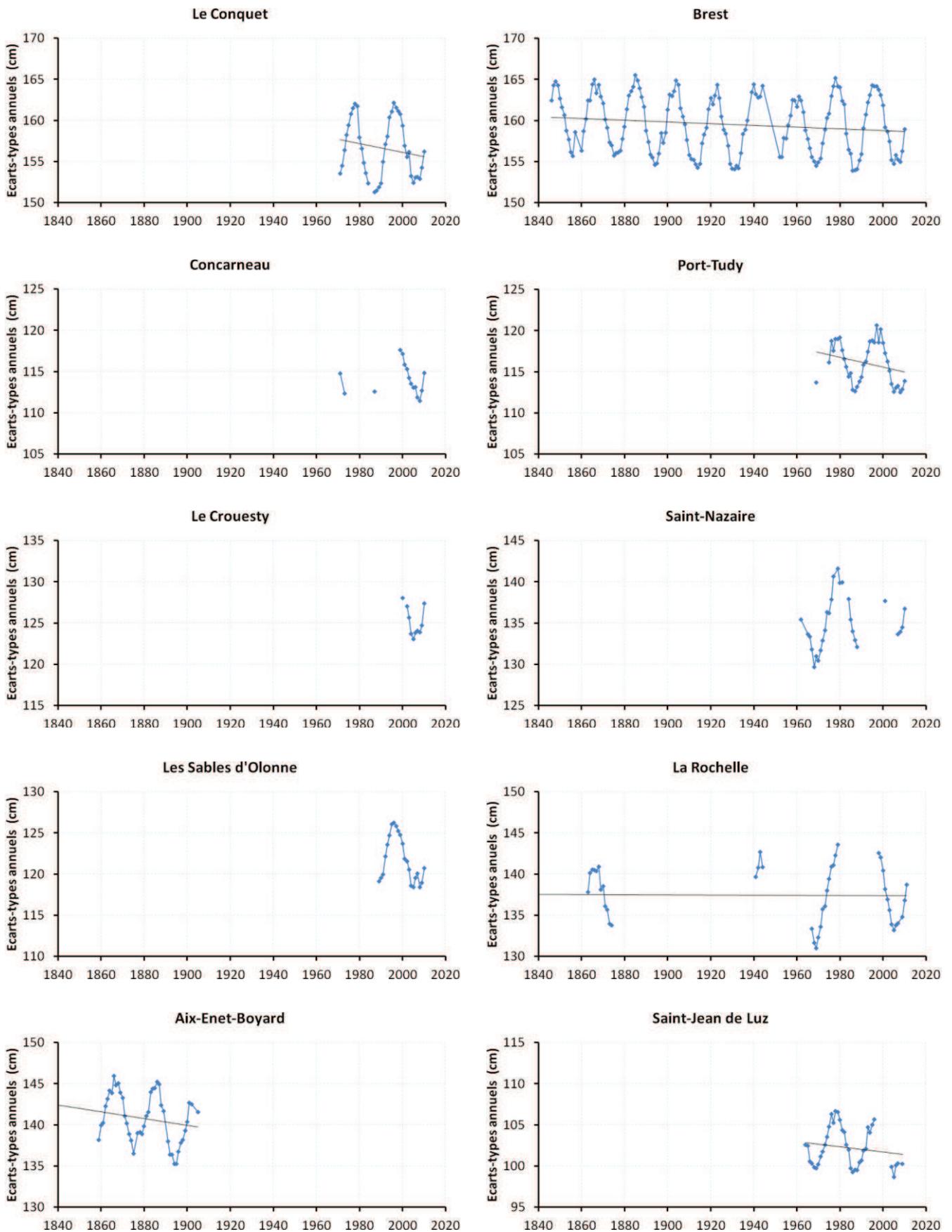


Figure VI-16 : Ecart-types annuels de l'ensemble des hauteurs horaires pour les séries du littoral atlantique.

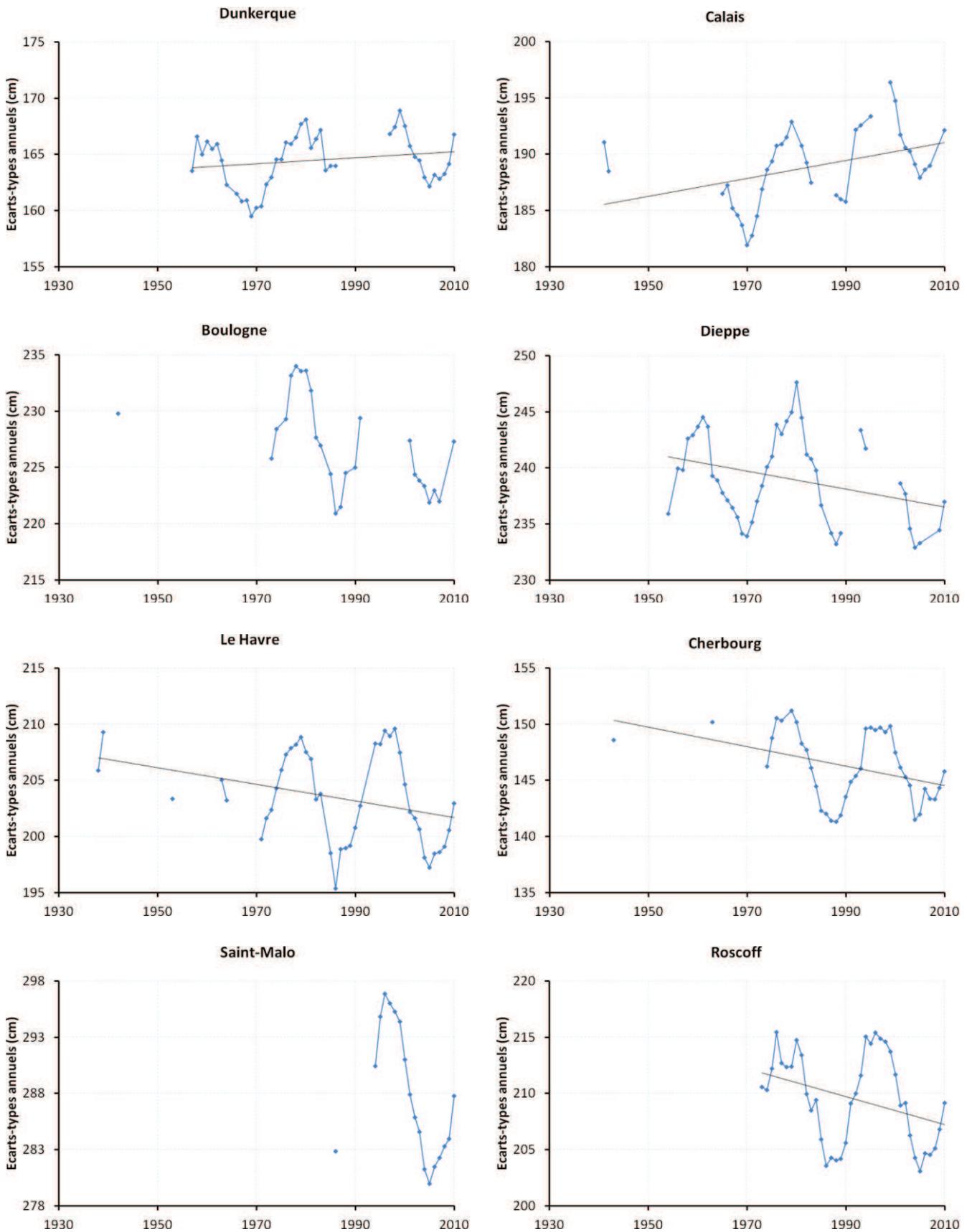


Figure VI-17 : Ecart-types annuels de l'ensemble des hauteurs horaires : séries de la Mer du Nord/Manche.

Période	Amplitude ($\pm 0,5$ cm)	Tendance (mm/an)	Nombre de valeurs	Nb valeurs / Durée de la série
---------	------------------------------	---------------------	----------------------	--------------------------------------

Littoral atlantique :					
Le Conquet	1971-2010	5 cm	$- 0,5 \pm 0,5$	38	0,95
Brest	1846-2010	5 cm	$- 0,12 \pm 0,06$	155	0,94
Concarneau	1971-2010	—	—	15	0,38
Port-Tudy	1969-2010	4 cm	$- 0,6 \pm 0,4$	37	0,88
Le Croesty	2000-2010	—	—	10	0,91
Saint-Nazaire	1962-2010	5,5 cm	—	27	0,55
Les Sables d'Olonne	1989-2010	4 cm	—	22	1,00
La Rochelle	1824-2010	5 cm	$- 0,1 \pm 0,9$	43	0,23
Aix-Enet-Boyard	1824-1905	5 cm	$- 0,4 \pm 0,3$	44	0,54
Saint-Jean de Luz	1964-2010	3,5 cm	$- 0,3 \pm 0,3$	38	0,83

Mer du Nord / Manche :					
Dunkerque	1957-2010	4,5 cm	$+ 0,3 \pm 0,2$	43	0,80
Calais	1941-2010	5,5 cm	$+ 0,8 \pm 0,3$	36	0,51
Boulogne	1942-2010	6,5 cm	—	25	0,36
Dieppe	1954-2010	5,5 cm	$- 0,8 \pm 0,4$	43	0,75
Le Havre	1938-2010	6 cm	$- 0,7 \pm 0,3$	42	0,58
Cherbourg	1943-2010	5 cm	$- 0,9 \pm 0,3$	38	0,56
Saint-Malo	1986-2010	8,5 cm	—	18	0,72
Roscoff	1973-2010	6 cm	$- 1,2 \pm 0,6$	38	1,00

Tableau VI-5 : Amplitudes estimées et tendances du cycle nodal sur le littoral atlantique et sur la Mer du Nord/Manche ; — : nombre de valeurs insuffisant pour déterminer l'amplitude du cycle, ou la tendance. Le critère minimal de 37 années (soit 2 cycles nodaux) a été retenu pour calculer une tendance.

L'amplitude estimée du cycle nodal sur les deux sites du littoral chatentais est identique, de l'ordre de 5 cm. Ces résultats sont cohérents avec les amplitudes estimées pour les autres stations du littoral atlantique français, où l'amplitude est comprise entre 3,5 et 5,5 cm et les stations françaises de la Mer du Nord/Manche, où l'amplitude varie de 4,5 à 8,5 cm (à Saint-Malo). Les résultats sont également comparables à ceux de Woodworth [1999a] (Liverpool : 5 cm) et Araújo [2005] (Brest : 4,8 cm et Le Havre : 5,2 cm). De même, Shaw & Tsimplis [2010] ont modélisé l'amplitude du cycle nodal et ont trouvé des valeurs de l'ordre de $5,2 \pm 0,2$ cm pour Saint-Jean de Luz et de $5,1 \pm 0,3$ cm pour Santander. Pour analyser les tendances calculées, nous séparerons nos séries selon la côte étudiée : littoral atlantique et Mer du Nord/Manche. Mis à part la longue série de Brest (155 valeurs annuelles) pour laquelle l'écart-type est de 0,06 mm/an, les écarts-types des séries du littoral atlantique sont compris entre 0,3 et 0,5 mm/an, ce qui est conforme à nos attentes pour des séries contenant de 37 à 44 valeurs annuelles. Seule la série de La Rochelle présente un écart-type plus élevé, de 0,9 mm/an, ce qui s'explique par le faible nombre de valeurs annuelles (43) en comparaison de la période étudiée (1824-2010), soit un ratio de 0,23 valeur par année sur l'ensemble de la période. Mis à part Brest, aucune des tendances calculées sur le littoral atlantique n'est statistiquement différente de 0 mm/an (limite de confiance à 95%), même si toutes semblent indiquer une tendance négative, quelque soit la période étudiée. Pour Brest, la tendance du cycle nodal est à une diminution de l'ordre de $-0,12 \pm 0,06$ mm/an. Cela confirme la tendance générale à la baisse, aperçue sur les autres séries. Concernant les séries de la Mer du Nord/Manche, l'écart-type est compris entre 0,2 et 0,4 mm/an, sauf pour Roscoff où il est de 0,6 mm/an. Hormis Dunkerque pour

laquelle la tendance n'est pas significativement différente de 0 mm/an, toutes les autres tendances sont statistiquement significatives. La tendance du cycle nodal est à une diminution comprise entre -0,7 et -1,2 mm/an de Dieppe à Roscoff, tandis qu'on observe une augmentation de la tendance à Calais ($+0,8 \pm 0,3$ mm/an.).

VI.1.1.4. Evolution à long terme

De nombreuses études se sont focalisées, au cours des dernières décennies, sur la question de l'évolution du niveau marin moyen (MSL) ou des niveaux extrêmes [e.g. Church & White, 2011; Woodworth *et al.*, 2011a]. Mais pour une meilleure estimation des risques d'inondation à la côte, il est nécessaire de prendre également en compte l'évolution des plus hautes pleines mers, et donc l'évolution de l'amplitude de la marée [Jay, 2009]. L'évolution des ondes de marée étant lente en comparaison de celle du niveau marin moyen, elles sont souvent considérées comme stationnaires et significativement stables pour les prochaines décennies [Woodworth, 2010]. Mais est-ce vraiment le cas ? Il est vrai que la question de l'évolution des ondes de marée peut être difficile à traiter en raison de sa faible variation. En effet, les ondes de marée principales sont la résultante des forces d'attraction gravitationnelle de la lune et du soleil, dont les mouvements sont extrêmement réguliers et stables. L'amplitude de la marée dépend alors de la réponse des bassins océaniques à ces forçages astronomiques, et évolue en fonction des changements de la forme de ces bassins, dont le processus est très lent à l'échelle géologique. Mais d'autres facteurs peuvent également faire varier l'amplitude de la marée, comme nous le verrons ci-dessous : par exemple, modification anthropique de la morphologie des fonds (dragage, construction de digues, etc.) ou modification des procédures de mesures.

Il est donc possible de déceler de petites variations dans les composantes harmoniques de la marée, à condition de disposer d'enregistrements marégraphiques couvrant de longues périodes. La question de cette période n'est d'ailleurs pas très bien définie, et varie selon les études. Woodworth [2010] utilise des séries contenant au moins 30 ans de mesures, Jay [2009] estime qu'il est nécessaire d'utiliser des séries supérieures à 40-50 ans pour définir des tendances significatives, alors que Araújo *et al.* [2008] utilise moins de 20 ans et que la majorité des études est réalisée avec des séries dont la durée est proche ou supérieure au siècle [Cartwright, 1971; Cartwright, 1972; Godin, 1992; Pugh, 2004; Pouvreau *et al.*, 2006].

Les premières études réalisées se sont concentrées sur des sites en particulier. C'est ainsi que Cartwright [1971] a détecté une variation de l'amplitude des ondes semi-diurnes de moins de 2% entre 1761 et 1961 à l'île de Sainte-Hélène. De même, dans la baie de Fundy (St John, au Canada), Godin [1992] a remarqué une augmentation de l'amplitude de l'onde M2 d'environ 4% par siècle, ainsi qu'une diminution de celle de S2. A Newlyn (sud-ouest de l'Angleterre), Araújo *et al.* [2001] ont détecté une

augmentation de l'amplitude de l'onde M2 de $0,20 \pm 0,04$ mm/an entre 1915 et 2000, qu'ils attribuent à un changement dans les procédures de mesure marégraphique. Cette augmentation est confirmée par Pouvreau *et al.* [2006] qui ont déterminé une augmentation de $0,21 \pm 0,04$ mm/an entre 1916 et 2001. Entre 1842 et 1979, l'amplitude de la marée à Castletown et Courtown (Irlande) a augmenté d'un peu moins de 2%, tandis que les variations de phase n'excèdent pas le degré [Pugh, 2004]. Plus récemment, dans la baie Ria de Aveiro (Portugal), Araújo *et al.* [2008] ont détecté une augmentation de l'amplitude de M2 de 0,245 m entre 1987 et 2004, ainsi qu'une diminution de la phase de $17,41^\circ$, principalement dues à la modification de la bathymétrie du chenal de marée. A noter que les auteurs précisent également qu'un facteur anthropique a aussi un impact non négligeable sur ce changement : le dragage du chenal. Enfin, dans la zone côtière de Mokpo (Corée du Sud), Kang *et al.*, [2009] ont mesuré une augmentation des amplitudes des ondes M2 (+23 cm) et S2 (+9 cm) entre 1960 et 2006, attribuée à la construction successive de trois digues.

Le cas de Brest a, lui, été plusieurs fois examiné. Cartwright [1972] a d'abord observé une diminution de l'amplitude de l'onde M2, de l'ordre de 1% par siècle, à partir de données comprises entre 1864 et 1936, ainsi que des données de 1711 à 1716 et 1960. Puis Araújo [2005] a confirmé cette tendance à une diminution de l'amplitude de l'onde M2, mais moins importante, d'environ 0,4% par siècle (à partir des données de 1860 à 2000). Enfin, Pouvreau *et al.* [2006] ont montré que la diminution de l'amplitude de l'onde M2 n'était que temporaire, de 1885 à 1960, et ils observent une augmentation de 1846 à 1885 ainsi que de 1960 à 2005, suggérant la présence possible d'un cycle de période 141 ans. Cependant, les auteurs précisent qu'aucune explication concluante n'a pu être apportée pour justifier un tel cycle, et qu'il faut être très prudent quant à la détermination d'un cycle de 141 ans, à partir de (seulement) 160 ans de données. Ce dernier article montre à quel point il peut être difficile de tirer des conclusions sur une tendance de l'évolution des ondes de marée.

Suite aux premières constatations des variations des composantes harmoniques sur plusieurs sites répartis dans le monde, plusieurs auteurs ont proposé un regard plus global sur ces évolutions. Ray [2009] a réalisé une analyse sur les enregistrements marégraphiques du 20^e siècle de la côte est de l'Amérique du Nord et observe une diminution générale notable de l'amplitude de l'onde S2 entre 1935 et 2005, de l'ordre de 10% par siècle. Jay [2009] a effectué un travail similaire sur la côte ouest de l'Amérique du Nord et conclut à une augmentation de l'amplitude des ondes M2 et K1 de l'ordre de 2,2% par siècle. Dernièrement, Woodworth [2010] a dressé une carte mondiale des variations d'amplitudes et de phases des composantes harmoniques M2, S2, K1 et O1. Ses résultats montrent que l'évolution des ondes n'est pas confinée à quelques stations ou baies, mais est bel et bien un phénomène observé sur l'ensemble des océans. Il précise aussi que, dans la plupart des cas, ces évolutions ne sont pas comprises et méritent encore d'être étudiées.

Nos données couvrant une période de 188 ans (1824-2011), nous avons cherché à savoir si une tendance pouvait apparaître sur le littoral charentais. Afin de déterminer les tendances et écarts-types associés des composantes harmoniques M2, S2, N2, M4, O1 et K1 pour les sites de La Rochelle et d'Aix-Enet-Boyard, nous avons réalisé une analyse harmonique mobile sur une fenêtre d'un an (365 jours), avec un décalage de 60 jours. Le critère pour réaliser une analyse harmonique est le même que celui utilisé par Woodworth [2010] : il faut au moins 75% d'observations horaires sur la fenêtre de 365 jours. Ray [2009] utilise un autre critère : au moins 7000 observations horaires par année (soit 80%). Les résultats sont synthétisés dans les *tableaux VI-6 et VI-7*. Pour alléger la lecture, nous n'avons représenté graphiquement que l'évolution des ondes M2 et M4 (*figures VI-18 et VI-19*). Les autres graphiques se trouvent en annexe.

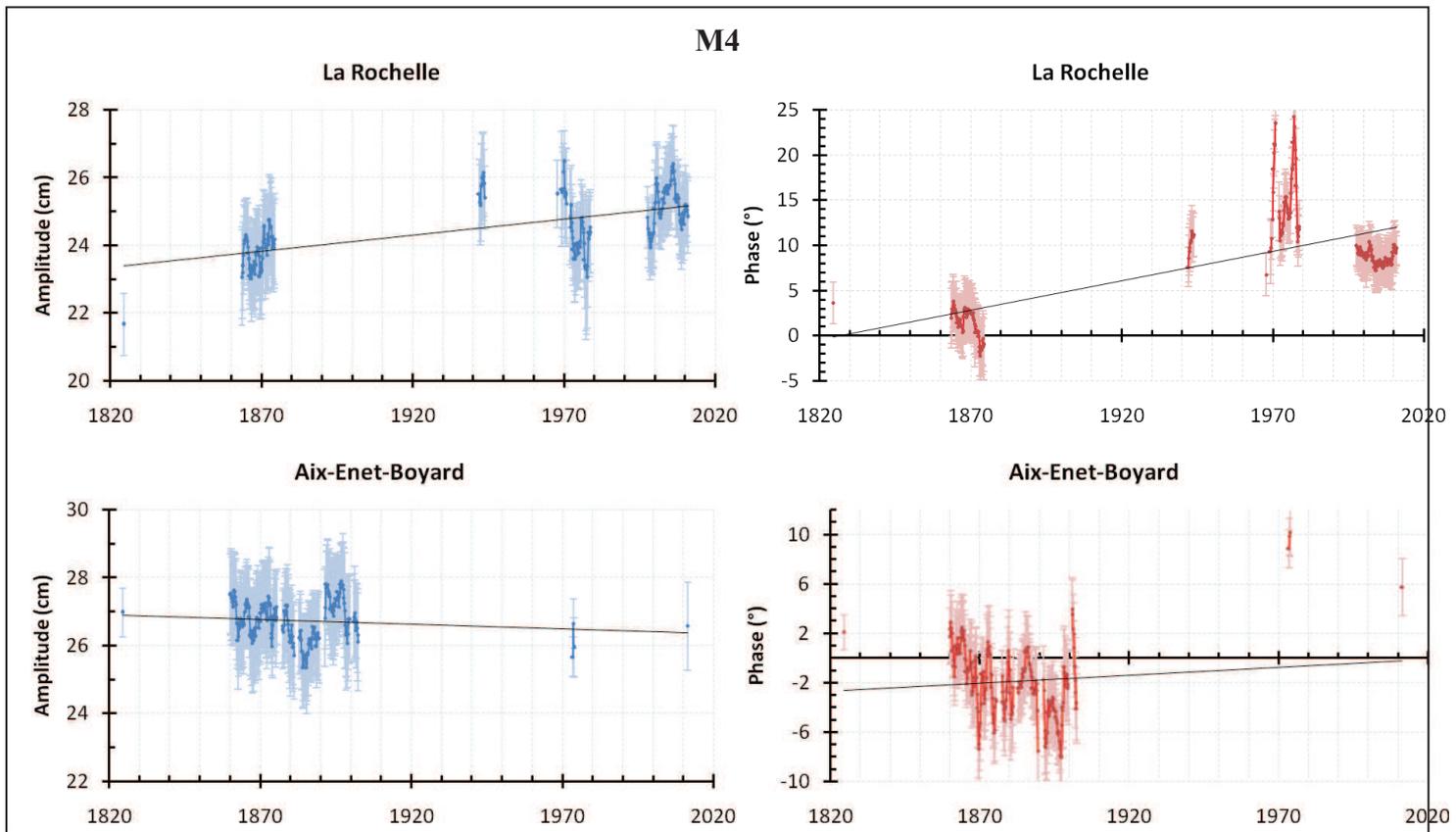


Figure VI-18 : Evolution temporelle de l'amplitude et de la phase de l'onde M4 sur le littoral charentais (1824-2011).

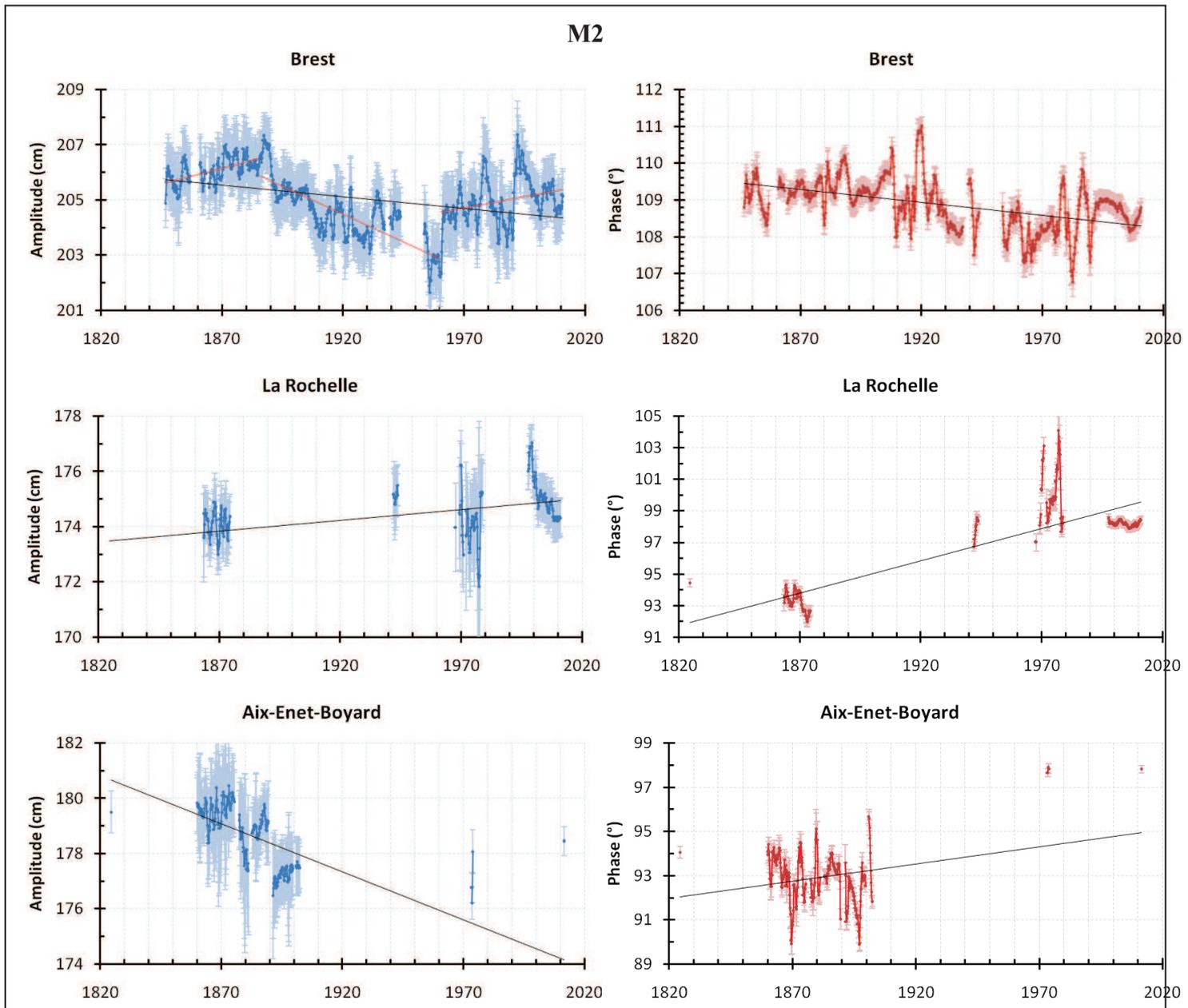


Figure VI-19 : Evolution temporelle de l'amplitude et de la phase de l'onde M2 à Brest, La Rochelle et Aix-Enet-Boyard (1824-2011).

	Tendance de l'amplitude (mm/an)			Tendance de la phase (°/an)		
	La Rochelle	Aix-Enet-Boyard	Brest	La Rochelle	Aix-Enet-Boyard	Brest
M2	+0,16 ± 0,06	-0,17 ± 0,05	-0,08 ± 0,02	+0,039 ± 0,005	+0,026 ± 0,007	-0,007 ± 0,001
S2	+0,04 ± 0,01	-0,12 ± 0,04		+0,046 ± 0,003	+0,039 ± 0,009	
N2	+0,09 ± 0,01	-0,03 ± 0,02		+0,039 ± 0,005	+0,026 ± 0,009	
M4	+0,11 ± 0,02	-0,03 ± 0,03		+0,06 ± 0,01	+0,04 ± 0,02	
O1	-0,08 ± 0,04	-0,06 ± 0,03		+0,007 ± 0,005	0,00 ± 0,02	
K1	-0,10 ± 0,04	+0,01 ± 0,02		-0,01 ± 0,01	-0,03 ± 0,02	

Tableau VI-6 : Tendances de l'amplitude et de la phase des ondes M2, S2, N2, M4, O1 et K1 à La Rochelle et Aix-Enet-Boyard (1824-2011) ; et Brest (1846-2011).

	Tendance de l'amplitude (% par siècle)		
	La Rochelle	Aix-Enet-Boyard	Brest
M2	+0,9 ± 0,3	-1,0 ± 0,3	-0,4 ± 0,1
S2	+0,6 ± 0,2	-1,9 ± 0,6	
N2	+2,5 ± 0,3	-0,8 ± 0,5	
M4	+4,6 ± 0,8	-1 ± 1	
O1	-11 ± 5	-8 ± 4	
K1	-16 ± 6	+2 ± 3	

Tableau VI-7 : Tendances de l'amplitude (% par siècle) des ondes M2, S2, N2, M4, O1 et K1 à La Rochelle et Aix-Enet-Boyard (1824-2011) ; et Brest (1846-2011).

Pour comparaison, les évolutions de l'amplitude et de la phase de M2 au port de Brest ont également été ajoutées à la *figure VI-19*. Premier constat, la variabilité de la phase est importante sur les trois sites jusqu'aux années 1990. Ce qui signifie que l'évolution de la phase est grandement bruitée par les erreurs de mesure dues aux dérives de l'horloge du marégraphe. On peut même estimer que l'évolution observée de la phase entre 1846 et 1993 (Brest) / 1997 (La Rochelle) est essentiellement contrôlée par les dérives de l'horloge du marégraphe ; une dérive d'une minute entraînant un écart de phase de l'ordre de 0,48°. Pour confirmer cette hypothèse, la *figure VI-20* présente l'évolution couplée des moyennes annuelles des résidus en temps et de la phase de M2 à Enet-Boyard, avant la correction des décalages en temps. Afin de faciliter la comparaison, les moyennes ont été normalisées selon l'équation :

$$X_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma_x} \quad (6.10)$$

Avec X : variable étudiée normalisée ; x : variable étudiée (ici, résidus en temps ou phase de M2) ; \bar{x} : moyenne de la variable x ; σ_x : écart-type de la variable x .

On remarque d'ailleurs que la variabilité de la phase diminue considérablement à partir de 1997 à La Rochelle et 1993 à Brest (années de l'installation de marégraphes côtiers numériques). L'étude de l'évolution de la phase ne peut donc se faire que de deux façons : soit à partir des données récentes mesurées à l'aide d'un MCN, dont l'horloge ne dérive pas ou extrêmement peu, soit à partir des données anciennes, corrigées des dérives d'horloge. La *figure VI-21* présente l'évolution des moyennes annuelles de la phase de l'onde M2 à Enet-Boyard avant et après la correction des dérives d'horloge. On constate que la tendance corrigée (-0,039°/an) est le double de celle avant correction (-0,02°/an).

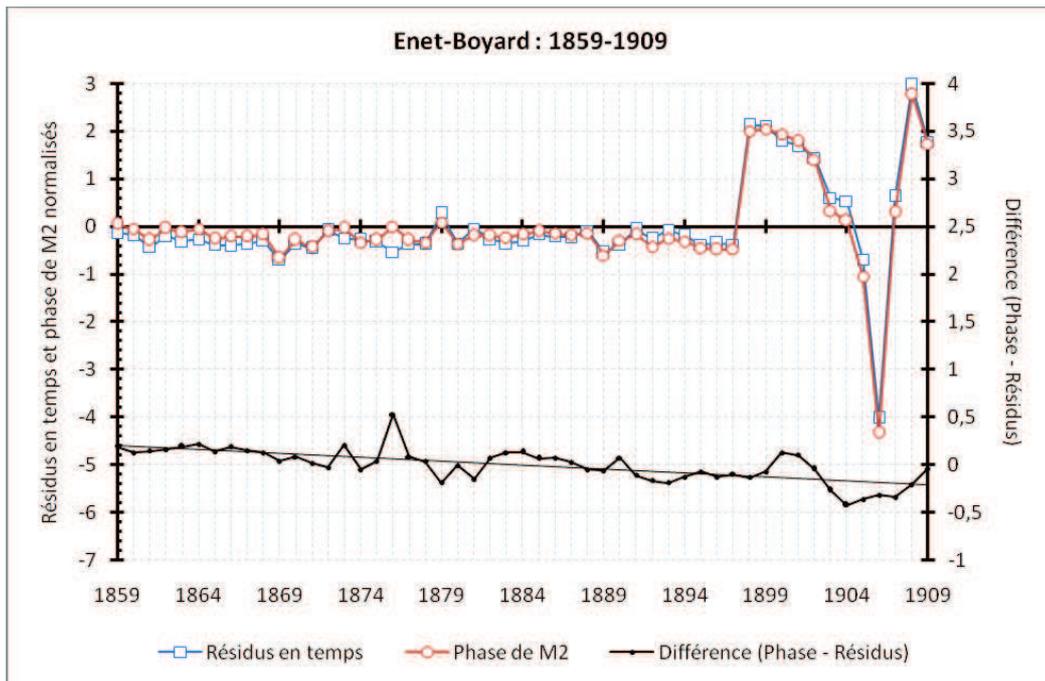


Figure VI-20 : Evolution couplée des moyennes annuelles normalisées des résidus en temps et des phases de l'onde M2 à Enet-Boyard (1859-1909), avant correction des décalages en temps de la série.

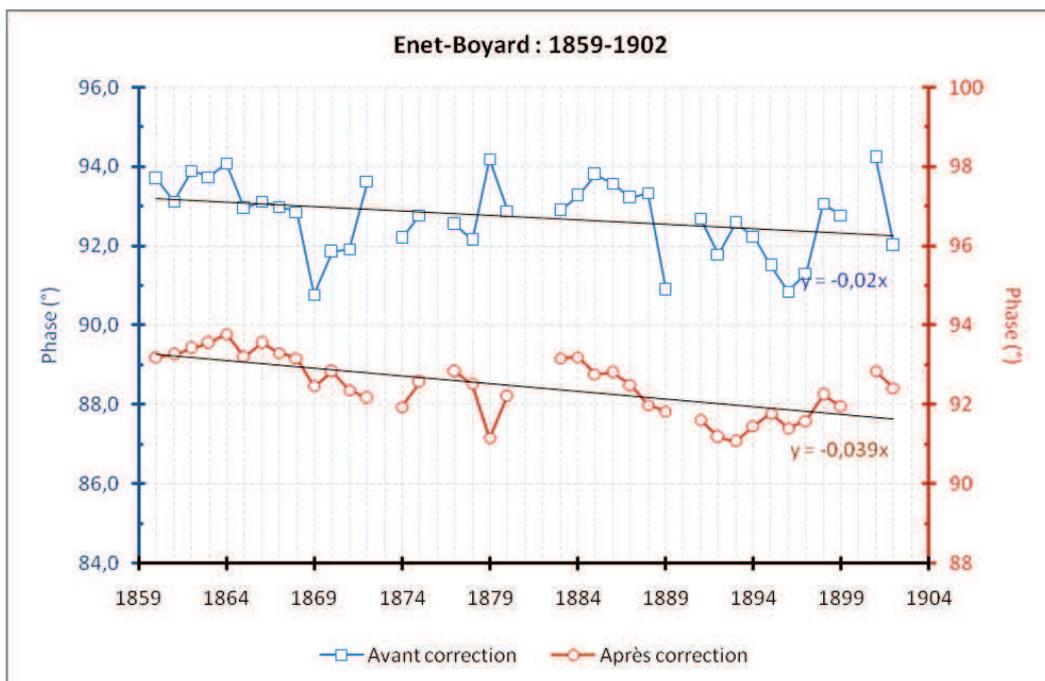


Figure VI-21 : Evolution de la phase de l'onde M2 à Enet-Boyard avant (bleu) et après (rouge) correction des dérives de l'horloge du marégraphe. La correction a été effectuée à partir des moyennes annuelles des résidus en temps.

Afin d'étudier l'évolution de la phase des composantes harmoniques plus en détail, nous avons appliqué cette correction aux données d'Enet-Boyard. Les résultats sont présentés sur la figure VI-22 et synthétisés dans le tableau VI-8.

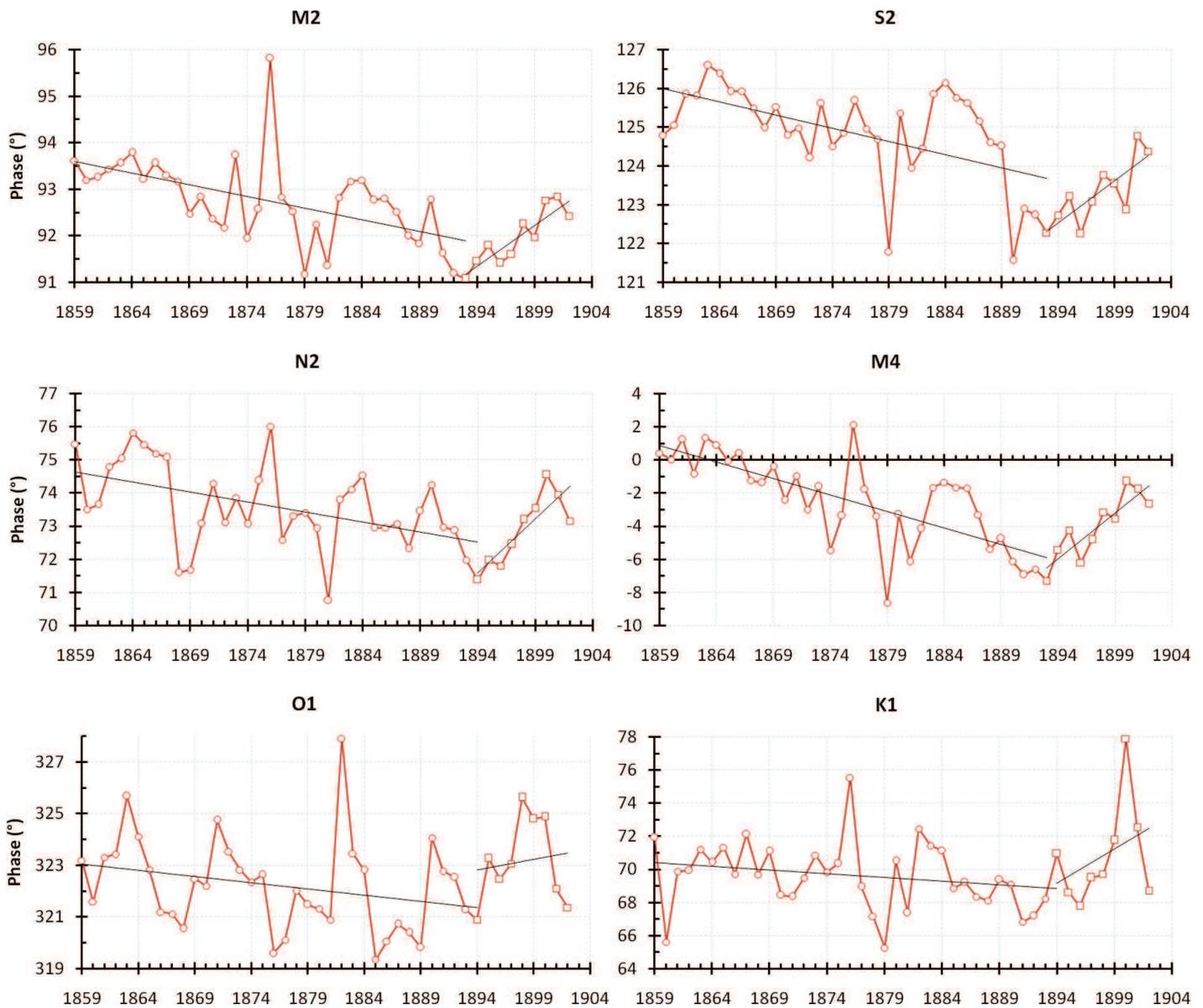


Figure VI-22 : Evolution de la phase corrigée des dérives de l'horloge du marégraphe à Enet-Boyard pour les composantes harmoniques M2, S2, N2, M4, O1 et K1. Un point d'inflexion semble apparaître entre 1890 et 1896.

	Tendance de la phase (°/an)		
	1859-1902	1859-1894	1894-1902
M2	-0,039 ± 0,009	-0,05 ± 0,01	+0,18 ± 0,03
S2	-0,06 ± 0,01	-0,07 ± 0,02	+0,22 ± 0,06
N2	-0,04 ± 0,01	-0,06 ± 0,02	+0,33 ± 0,08
M4	-0,12 ± 0,03	-0,20 ± 0,03	+0,6 ± 0,1
O1	0,00 ± 0,02	-0,05 ± 0,03	+0,1 ± 0,2
K1	0,00 ± 0,03	-0,05 ± 0,03	+0,4 ± 0,4

Tableau VI-8 : Tendances de l'évolution des phases des ondes corrigées des problèmes d'horloge pour la série Enet-Boyard (1859-1902).

Mises à part les composantes diurnes (O1 et K1) pour qui les tendances ne sont statistiquement pas différentes de zéro, l'ensemble des tendances calculées sont significatives. On constate, pour les composantes M2, S2, N2 et M4, une diminution significative de la phase de 1859 à 1894 et une augmentation significative de 1894 à 1902. Rien ne nous permet de justifier une telle inversion de la tendance en 1894 à partir de la simple étude du contexte des mesures (registres de marée).

D'une façon plus générale, revenons aux résultats précédents, ceux des *figures VI-18 et VI-19*. Malgré la variabilité importante de la phase, le fait d'avoir des données sur une longue période (188 ans) permet de pouvoir malgré tout tirer une tendance. On observe, à La Rochelle et Aix-Enet-Boyard, une augmentation significative de la phase des ondes semi-diurnes M2, S2 et N2, ainsi que de M4. Cette augmentation est d'environ $3,9^\circ$ par siècle à La Rochelle et $2,6^\circ$ par siècle à Aix-Enet-Boyard pour l'onde M2. A l'inverse, on note une diminution significative de la phase de M2 de l'ordre de $0,7^\circ$ par siècle à Brest.

Concernant l'évolution de l'amplitude, toutes les tendances calculées pour le site de La Rochelle sont significatives. A Aix-Enet-Boyard, les tendances des ondes N2, M4 et K1 ne sont statistiquement pas différentes de zéro. A Brest, on retrouve bien le cycle détecté par Pouvreau *et al.* [2006] (courbe linéaire rouge sur la *figure VI-19*), ainsi que la diminution globale de l'amplitude de l'onde M2 calculée par Araújo [2005] : $-0,4\%$ par siècle. Les tendances des ondes semi-diurnes paraissent significativement différentes entre La Rochelle et Aix-Enet-Boyard, ce qui est surprenant. On observe, pour M2, une augmentation de $0,9\%$ par siècle à La Rochelle, et une diminution de 1% par siècle à Aix-Enet-Boyard. Cela est dû à l'échantillonnage de nos données. Même si la période couverte est identique, la répartition des données pendant cette période est très différente entre les deux sites. Or, nous l'avons vu à Brest, la valeur tendance de l'onde M2 dépend fortement des données utilisées. Pour une meilleure compréhension des tendances calculées, nous avons comparé l'évolution de l'onde M2 à Enet-Boyard et à Brest sur la période 1859-1902 (*figure VI-23 et tableau VI-9*).

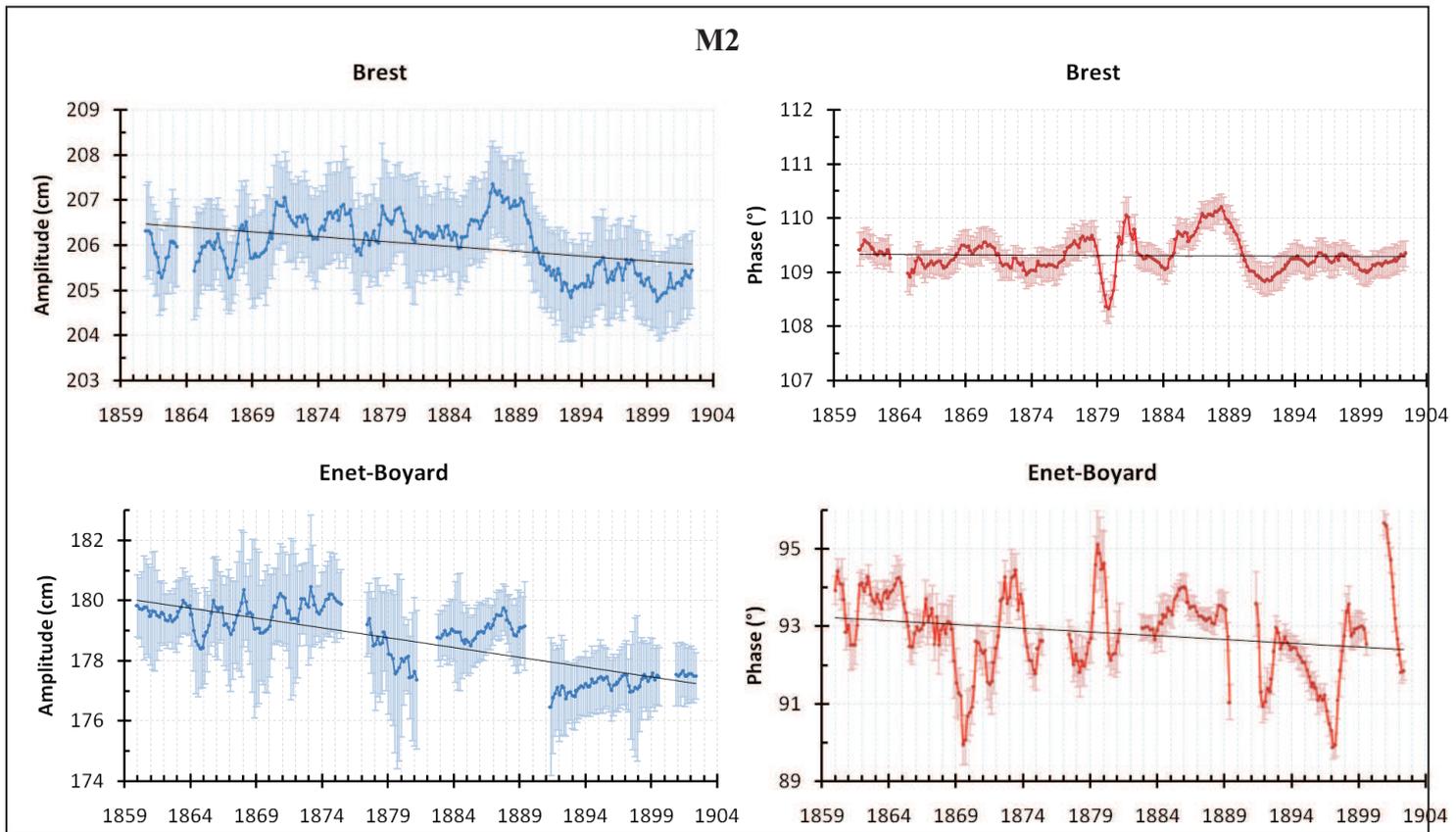


Figure VI-23 : Evolution temporelle de l'amplitude et de la phase de l'onde M2 à Brest et Enet-Boyard (1859-1902).

	Tendance de l'amplitude (mm/an)		Tendance de la phase (°/an)	
	Aix-Enet-Boyard	Brest	Aix-Enet-Boyard	Brest
M2	-0,65 ± 0,08	-0,24 ± 0,07	-0,02 ± 0,01	-0,001 ± 0,004
S2	-0,20 ± 0,06		-0,04 ± 0,02	
N2	-0,11 ± 0,05		-0,02 ± 0,02	
M4	+0,01 ± 0,07		-0,08 ± 0,03	
O1	-0,03 ± 0,03		0,00 ± 0,02	
K1	0,00 ± 0,03		+0,01 ± 0,02	

Tableau VI-9 : Tendances de l'amplitude et de la phase des ondes M2, S2, N2, M4, O1 et K1 à Enet-Boyard et M2 à Brest (1859-1902).

On constate que les tendances calculées pour l'évolution de la phase ne sont pas statistiquement différentes de zéro à Brest et à Enet-Boyard. On note toutefois la plus forte variabilité de la phase à Enet-Boyard, liée aux fréquentes dérives de l'horloge du marégraphe. Concernant l'évolution de l'amplitude, elle est cohérente entre Brest et Enet-Boyard sur la période 1859-1902. On remarque aussi que le « saut » de l'amplitude de M2 à Enet-Boyard après 1890, que l'on pouvait suspecter d'être lié à une erreur systématique de mesure, est également observé à Brest, ce qui élimine de fait cette hypothèse d'une erreur de mesure. Nous l'avons vu, le calcul des tendances à partir de nos jeux de données incomplets sur la période 1824-2011 est difficilement exploitable pour le littoral charentais. A défaut de pouvoir exploiter directement les tendances calculées, nous pouvons comparer l'évolution de l'amplitude normalisée de

l'onde M2 entre Brest et Enet-Boyard sur la période 1859-1902 (figure VI-24a) et entre Brest, La Rochelle et Enet-Boyard sur la période 1863-1874 (figure VI-24b).

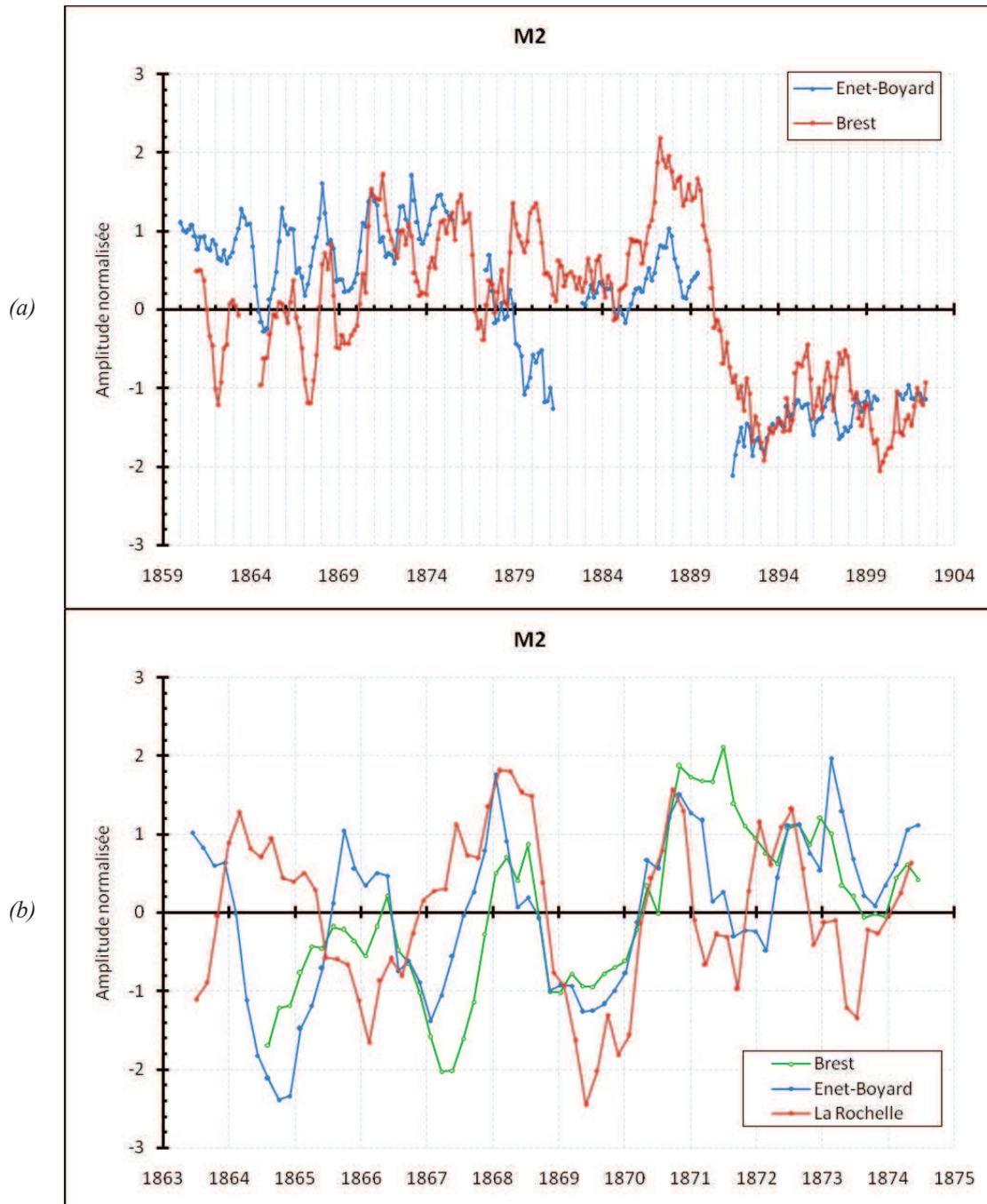


Figure VI-24 : (a) Evolution de l'amplitude normalisée de l'onde M2 : (a) entre Brest et Enet-Boyard (1859-1902) ; (b) entre Brest, La Rochelle et Enet-Boyard (1863-1874).

Premièrement, on observe que les variations de l'amplitude de l'onde M2 sont cohérentes entre Brest et Enet-Boyard. La seule différence notable se situe entre 1877 et 1881 où l'amplitude augmente à Brest, tandis qu'elle diminue à Enet-Boyard. Deuxièmement, on constate que l'évolution de l'amplitude à La Rochelle est cohérente avec celles de Brest et Enet-Boyard sur la période 1867-1874. Curieusement, l'amplitude de l'onde M2 à La Rochelle est anti-corrélée à celle d'Enet-Boyard sur la période 1863-1867.

En conclusion nous venons de voir que, malgré la grande période couverte par nos jeux de données (188 ans), la durée effective des mesures est trop courte pour pouvoir tirer des conclusions sur une tendance de l'amplitude des composantes harmoniques. Cependant, il semble que l'amplitude des composantes semi-diurnes, M2 en tête, suit les mêmes variations qu'à Brest. En revanche, les tendances calculées sur la phase ont l'air exploitables et indiquent, notamment, une augmentation significative de la phase de l'onde M2 dans le pertuis d'Antioche, comprise entre 2,6% et 4% par siècle.

VI.1.2. Au phare de Cordouan

Afin de caractériser la marée au phare de Cordouan, une analyse spectrale a été appliquée, à l'aide de *t_tide*, aux données de l'année 1994, seule année pour laquelle nous disposons de hauteurs horaires en continu nuits et jours. (*figure VI-25*).

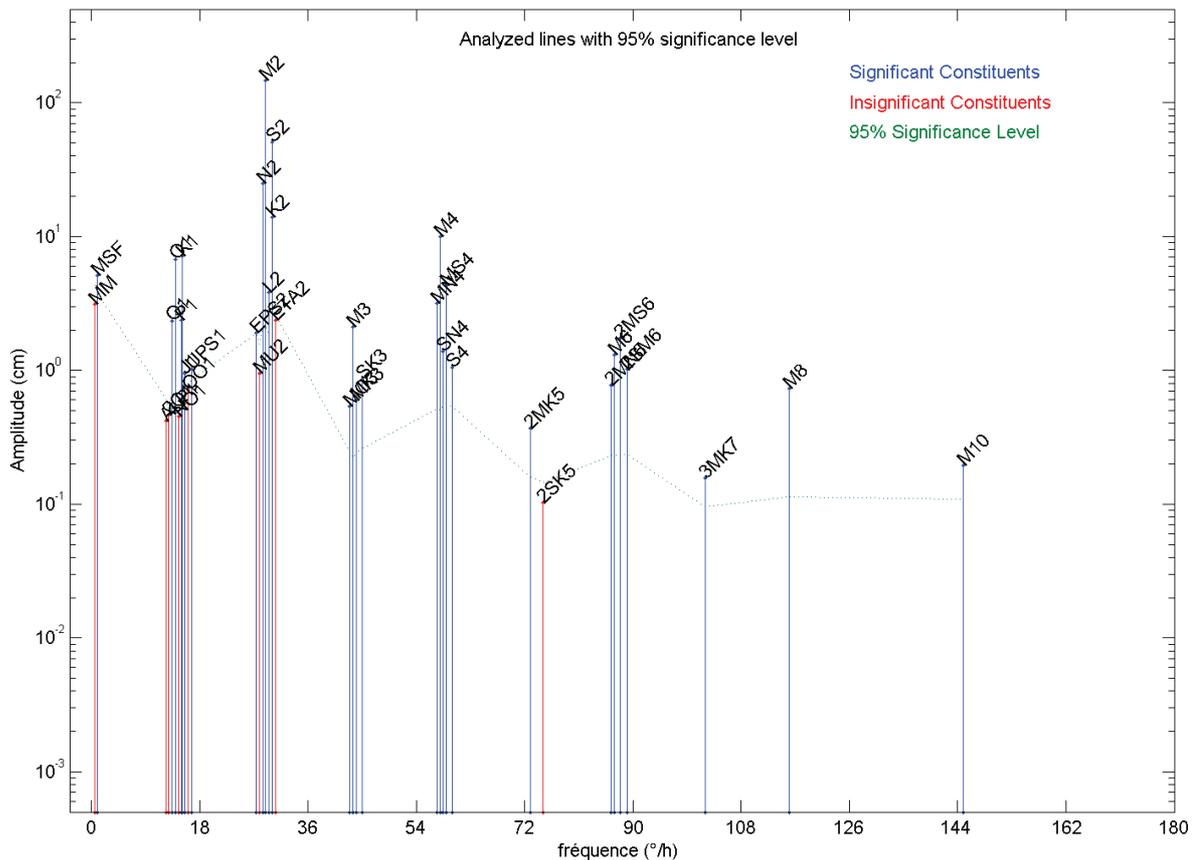


Figure VI-25 : Spectre des composantes harmoniques de la marée du phare de Cordouan, calculé pour l'année 1994. L'axe des abscisses représente la fréquence (ici : vitesse angulaire, en °/h). Axe des ordonnées en échelle logarithmique.

Le spectre de Cordouan est lui aussi fortement dominé par les espèces semi-diurnes qui forment le groupe de composantes harmoniques ayant les plus fortes amplitudes, M2 représentant à elle seule environ 45% de l'amplitude de la marée. Contrairement aux sites du pertuis d'Antioche, les espèces d'interaction (quart-diurnes et sixième-diurnes) sont moins importantes, tandis que les espèces diurnes

sont, elles, plus importantes. L'analyse harmonique de la marée nous a permis de calculer les constantes harmoniques des composantes détectées lors de l'analyse spectrale. Le *tableau VI-10* regroupe les dix composantes les plus importantes, de par leur amplitude, de Cordouan. Elles représentent environ 82 % du total des amplitudes des ondes de marée, et peuvent donc être considérées comme représentatives du site.

COMPOSANTES HARMONIQUES (ondes de marée)				CORDOUAN (1994)	
Symbole	Argument littéral étendu	Vitesse angulaire (°/h)	Période (heure)	Amplitude (cm)	Phase (°)
M2	BZZZZZ	28,98410424	12,42 (12h25)	146,3 (44,6%)	130
S2	BBXZZZ	30,00000000	12,00 (12h00)	48,9 (14,9%)	167
N2	BYZAZZ	28,43972956	12,66 (12h40)	30,2 (9,2%)	104
M4	DZZZZZ	57,96820848	6,21 (6h13)	9,7 (3,0%)	49
K1	AAZZZA	15,04106864	23,93 (23h56)	6,9 (2,1%)	83
O1	AYZZZY	13,94303560	25,82 (25h49)	6,7 (2,1%)	334
Mf	ZBZZZZ	1,08874937	327,86 (13j15h51)	6,0 (1,8%)	177
L2 2MN2	BAZYZZ	29,52847892	12,19 (12h12)	5,1 (1,6%)	129
MS4	DBXZZZ	58,98410424	6,10 (6h06)	4,0 (1,2%)	135
MN4	DYZAZZ	57,42383379	6,27 (6h16)	3,9 (1,2%)	359
Z0	ZZZZZZ	0,00000000	-	310,60 cm	

Tableau VI-10 : Caractéristiques des dix composantes harmoniques les plus importantes (par leur amplitude) du phare de Cordouan. Z0 représente le niveau moyen. Le pourcentage indiqué entre parenthèses représente la valeur de l'amplitude de l'onde de marée par rapport à la somme totale des amplitudes.

Voici quelques valeurs de grandeurs caractéristiques de la marée au phare de Cordouan :

- Etablissement moyen : $E_m = 4,49$ °/h
- Age de la marée semi-diurne : $T_2 = 36\text{h}25\text{min}$
- Age de la marée diurne : $T_1 = 99\text{h}16\text{min}$
- $R = 0,07 \Rightarrow$ marée de type semi-diurne

La *figure VI-26* présente l'évolution de l'amplitude et de la phase des ondes M2 et M4 au phare de Cordouan, de 1812 à 1994. L'étude des tendances des composantes harmoniques de Cordouan porte également sur les ondes S2, N2, O1 et K1, dont les résultats sont synthétisés dans le *tableau VI-11*.

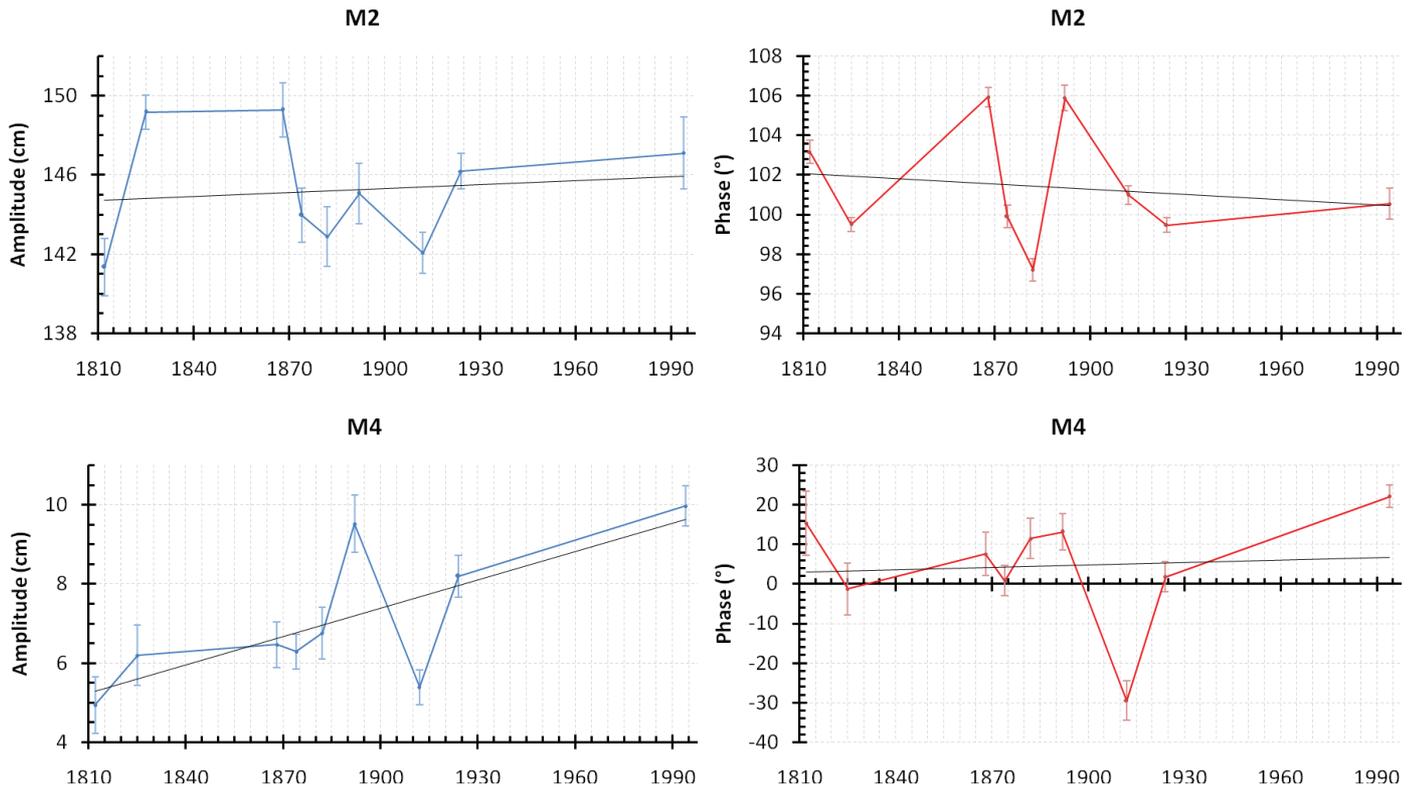


Figure VI-26 : Evolution temporelle de l'amplitude et de la phase des ondes M2 et M4 à Cordouan (1812-1994).

	Tendance de l'amplitude (mm/an)	Tendance de la phase (°/an)
M2	$+0,1 \pm 0,2$	$-0,1 \pm 0,2$
S2	$+0,6 \pm 0,5$	$+0,3 \pm 0,5$
N2	$-0,3 \pm 0,2$	$-0,4 \pm 0,3$
M4	$+0,24 \pm 0,08$	0 ± 1
O1	$-0,3 \pm 0,2$	$+1 \pm 5$
K1	$-1,1 \pm 0,7$	-5 ± 3

Tableau VI-11 : Tendances de l'amplitude et de la phase des ondes M2, S2, N2, M4, O1 et K1 au phare de Cordouan (1812-1994).

Parmi toutes les tendances calculées, seule la tendance de l'amplitude de l'onde M4 est statistiquement différente de zéro. On observe une augmentation significative de l'ordre de $+0,24 \pm 0,08$ mm/an, soit environ $25 \pm 8\%$ par siècle. Cette valeur paraît très importante et il est possible que le faible nombre de points utilisés pour calculer la régression linéaire soit à l'origine de cette tendance (trop ?) élevée. On le voit ici, aucune conclusion ne peut être tirée sur l'évolution des composantes harmoniques à partir de ces seules données. Mais il serait intéressant, à l'avenir, de compléter ces lots de mesures avec les données marégraphiques de la période 1950-2011, afin de réaliser une étude sur le possible impact des variations du débit de la Gironde sur l'évolution des composantes harmoniques. D'autant plus qu'aux mesures de Cordouan, pourrait s'ajouter les mesures réalisées à Royan, Talmont et Mortagne (situés dans la Gironde, cf. figure IV-79).

VI.2. Niveaux marins moyens

Nous l'avons vu au chapitre II, il existe une forte variabilité spatiale et temporelle du niveau marin. Dans ce contexte se pose alors la question de la tendance du niveau de la mer sur le littoral charentais. Pour répondre à cette question, nous étudierons différents niveaux moyens, définis au chapitre I (cf. I.2. Niveaux moyens) : le niveau moyen de la mer (*mean sea level*, MSL), le niveau moyen de pleine mer (*mean high water*, MHW), le niveau moyen de basse mer (*mean low water*, MLW) et le niveau moyen de mi-marée (*mean tide level*, MTL).

VI.2.1. La Rochelle : 1775 - 2011

VI.2.1.1. Tendance du niveau moyen de la mer

La *figure VI-27* présente l'évolution des niveaux moyens journaliers, mensuels et annuels calculés selon les règles du PSMSL pour le site de La Rochelle (cf. I.2. Niveaux moyens). Le calcul de la moyenne journalière étant effectué à l'aide du filtre de Demerliac (cf. I.2.1.1. Niveau moyen journalier) qui nécessite l'utilisation d'enregistrements journaliers complets (diurne et nocturne), les lots de mesures de 1775-1776, 1824 et 1887-1892 ne peuvent pas être utilisés ici. Ils le seront au paragraphe suivant (cf. VI.2.1.2. Tendances des niveaux moyens de la marée). Les tendances et écarts-types associés sont synthétisés dans le *tableau VI-12*. Entre 1863 et 2010, on constate une augmentation significative générale du MSL de $+1,41 \pm 0,09$ mm/an. En fonction des données disponibles, nous avons cherché à déterminer si cette tendance est linéaire, ou si l'élévation du MSL s'accélère. En séparant les données en deux périodes selon l'allure visuelle de la courbe (*figure VI-27b*), on observe une augmentation de l'ordre de $+1,1 \pm 0,2$ mm/an de 1863 à 1973, et de $+2,6 \pm 0,4$ mm/an de 1973 à 2010. Afin de quantifier cette accélération, nous avons calculé le terme de la régression quadratique réalisée sur les moyennes annuelles de 1863 à 2010 : l'accélération de l'élévation du niveau marin à La Rochelle est de l'ordre de $0,007$ mm/an² depuis 1863. Les valeurs obtenues sont cohérentes avec celles de la littérature et seront commentées ci-après, en relation avec le contexte français (cf VI.2.4. Comparaison à d'autres séries françaises).

La Rochelle (MSL)		
	Tendance (mm/an)	Ecart-type (mm/an)
1863 - 2010	+ 1,41	0,09
1863 - 1973	+ 1,1	0,2
1973 - 2010	+ 2,6	0,4

Tableau VI-12 : Tendances et écarts-types associés du niveau moyen de la mer (MSL) à La Rochelle.

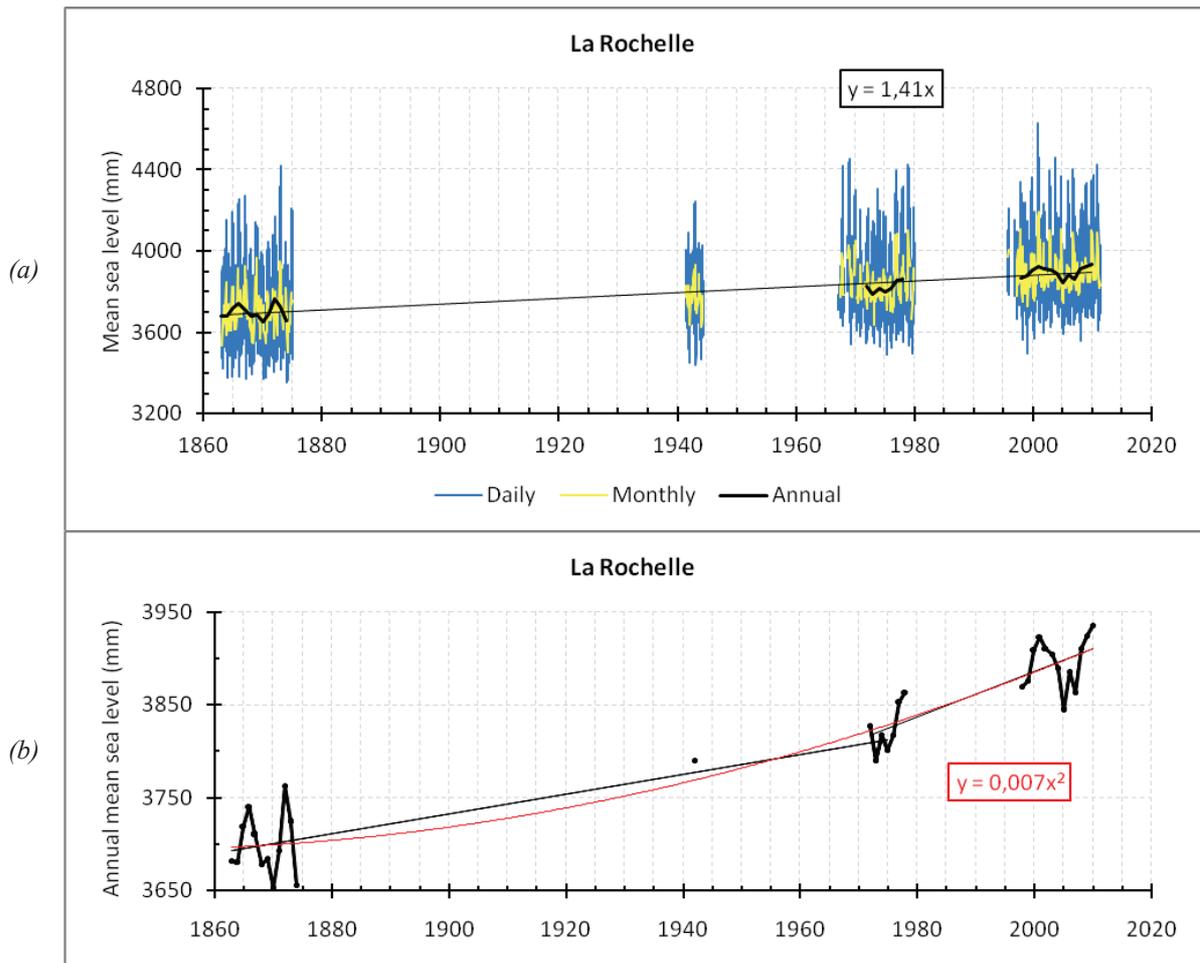


Figure VI-27 : La Rochelle, 1863-2011 : (a) évolution des niveaux marins moyens journaliers (bleu), mensuels (jaune) et annuels (noir) ; (b) : gros plan sur le niveau moyen annuel.

VI.2.1.2. Tendances des niveaux moyens de la marée

Le niveau moyen de la mer (MSL) est la grandeur la plus utilisée pour quantifier les variations à long terme du niveau marin, mais malheureusement, il ne peut pas être calculé pour l'ensemble des données de La Rochelle. En effet, le calcul du MSL nécessite des observations en continu (diurnes et nocturnes), ce qui n'est pas le cas des lots de mesures de 1775-1776, 1824 et 1887-1892. Il existe alors d'autres moyens de quantifier l'élévation à long terme du niveau marin, en calculant des niveaux moyens adaptés : le niveau moyen de pleine mer (MHW), le niveau moyen de basse mer (MLW) et le niveau moyen de mi-marée (MTL). Les figures VI-28 et VI-29 présentent l'évolution de ces différents niveaux moyens pour le site de La Rochelle. Les tendances et écarts-types associés sont synthétisés dans le tableau VI-13.

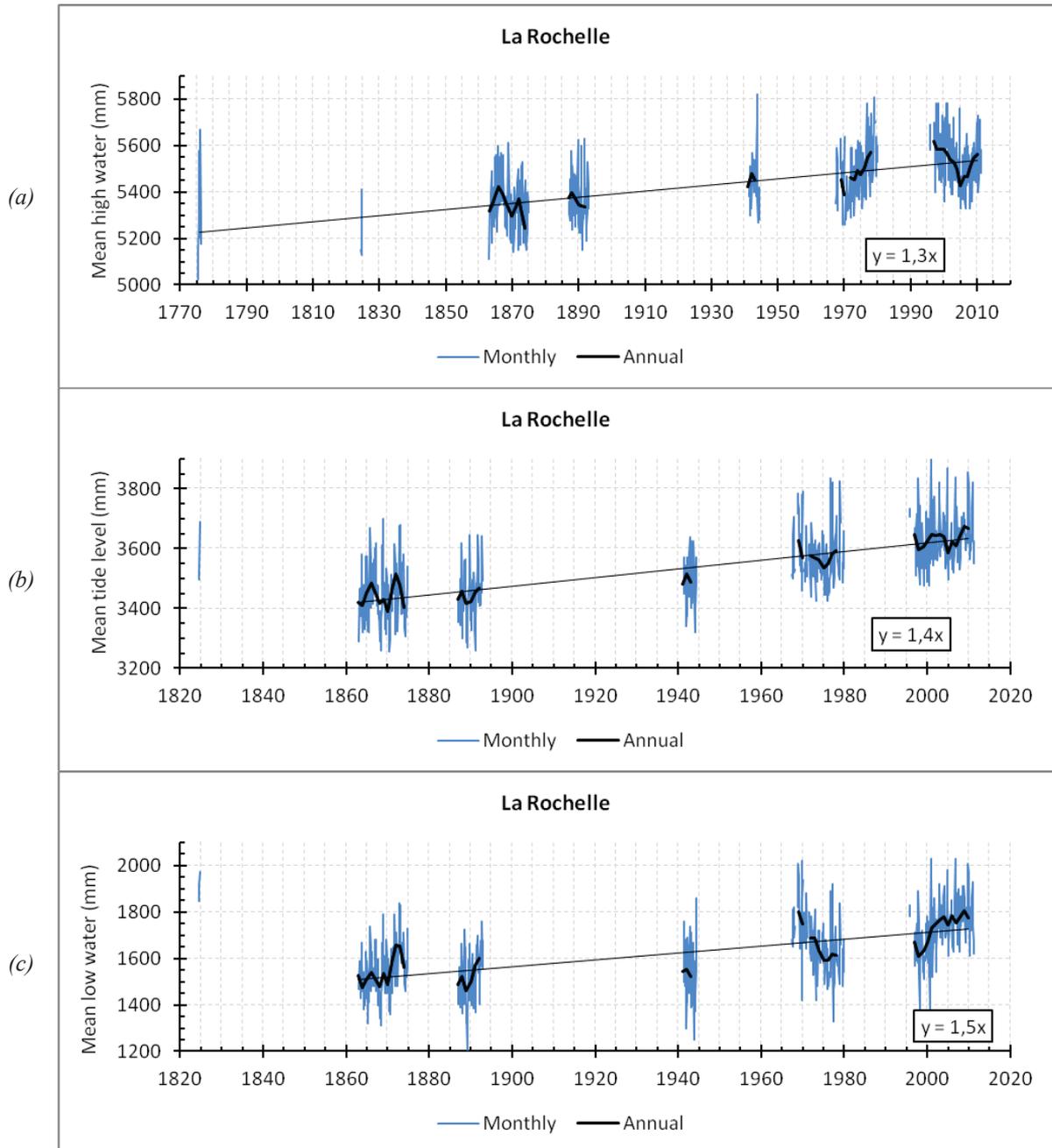
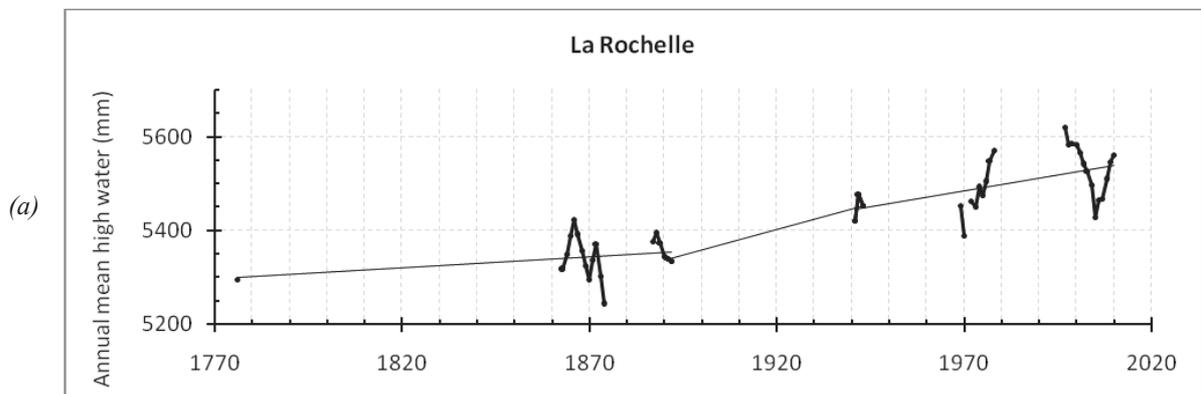


Figure VI-28 : La Rochelle, (a) 1775-2011 : évolution du MHW mensuel (bleu) et annuel (noir) ; 1824-2011 : évolution du (b) MTL et (c) MLW mensuel (bleu) et annuel (noir).



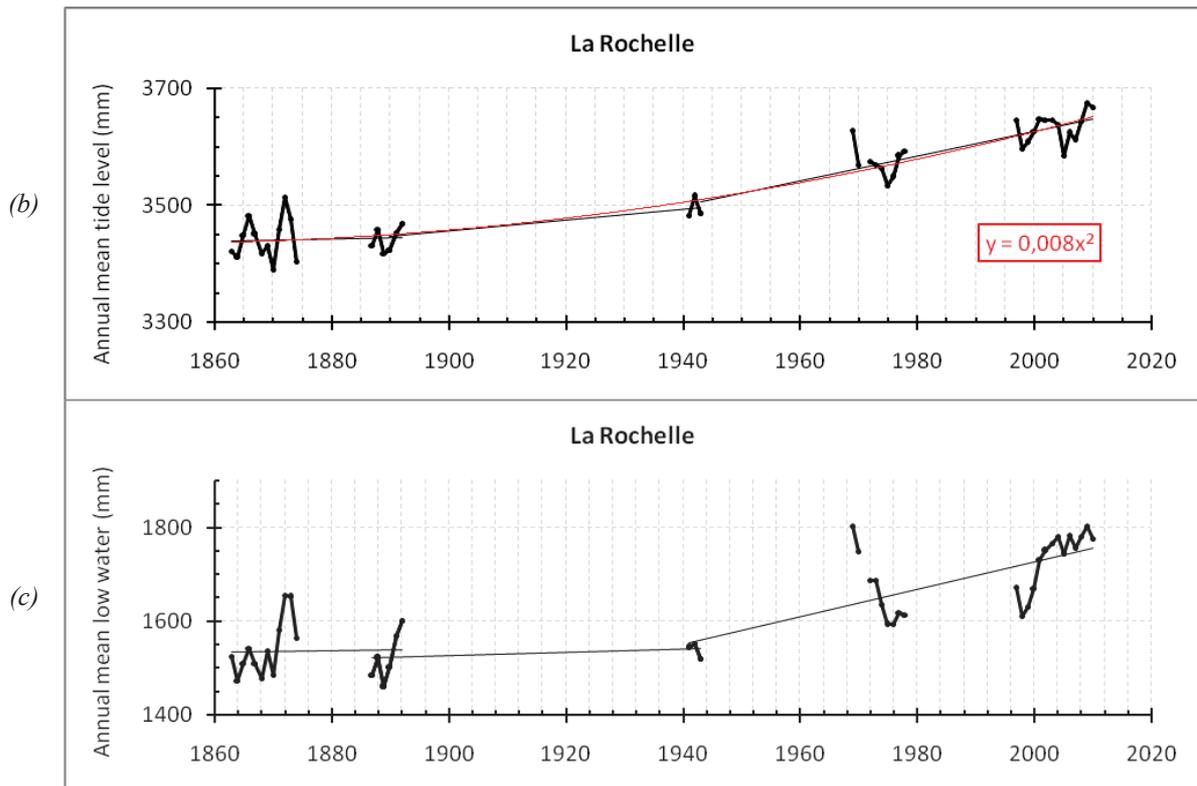


Figure VI-29 : La Rochelle, (a) 1775-2011 : évolution et tendances du MHW annuel ; 1824-2011 : évolution et tendances du (b) MTL et (c) MLW annuel.

La Rochelle : tendances et écarts-types (mm/an)			
	MHW	MTL	MLW
1776 - 2010	$+ 1,3 \pm 0,1$		
1863 - 2010	$+ 1,4 \pm 0,1$	$+ 1,4 \pm 0,1$	$+ 1,5 \pm 0,2$
1776 - 1890	$+ 0,5 \pm 0,4$		
1863 - 1890		$+ 0,2 \pm 0,7$	$+ 0,2 \pm 1,4$
1890 - 1941	$+ 1,7 \pm 0,4$	$+ 1,0 \pm 0,3$	$+ 0,4 \pm 0,6$
1941 - 2010	$+ 1,4 \pm 0,5$	$+ 2,1 \pm 0,2$	$+ 2,9 \pm 0,6$

Tableau VI-13 : Tendances et écarts-types des niveaux moyens de la marée (MHW, MTL et MLW) à La Rochelle.

Le MHW permet de prendre en compte le lot de mesures le plus ancien, à savoir celui de 1775-1776, qui ne contient que des hauteurs de pleines mers. Mais les variations annuelles des MHW et MLW sont influencées par les variations du cycle nodal de 18,61 ans. Dès lors, il devient nécessaire de posséder un nombre de valeurs annuelles couvrant une très grande période pour estimer une tendance fiable, sans que celle-ci ne soit biaisée par la présence de ce cycle. Les MHW peuvent répondre à ce critère car, en dépit d'un nombre de mesures peu important, la période couverte est, elle, très grande : 236 ans (1775-2010). La tendance du MHW calculée est alors de $+1,3 \pm 0,1$ mm/an, en cohérence avec la tendance du MSL. La tendance du MLW est difficile à analyser en raison de la présence du cycle nodal. De plus, certaines valeurs du MLW de la période 1863-1874 peuvent s'avérer incorrectes en raison du non-enregistrement des basses mers de vives-eaux détecté parfois (cf. V.4.5.2.5. Bilan).

Les tendances du MTL sont, elles, correctement exploitables et cohérentes avec celles du MSL. On observe une augmentation significative générale du MTL de $+1,4 \pm 0,1$ mm/an entre 1863 et 2010. En détaillant par période, on constate que la tendance du niveau moyen de mi-marée n'est pas statistiquement différente de 0 mm/an entre 1863 et 1890. Une première augmentation est ensuite mesurée entre 1890 et 1941, de l'ordre de $+1,0 \pm 0,3$ mm/an, avant une élévation plus rapide lors de la période récente, de 1941 à 2010 : $+2,1 \pm 0,2$ mm/an. Afin de quantifier l'accélération de l'élévation du MTL, nous avons calculé le terme de la régression quadratique réalisée sur les moyennes de 1863 à 2010 : l'accélération est de l'ordre de $0,008$ mm/an² depuis 1863, en cohérence avec celle calculée à partir des valeurs du MSL.

VI.2.1.3. Combinaison MSL-MTL

Nous venons de le voir, la grandeur la plus couramment utilisée pour quantifier les variations à long terme du niveau marin est le MSL, pour laquelle un grand nombre de données ne peut être utilisé. Le MTL utilisant ces données, on peut se poser la question d'une combinaison de ces deux grandeurs afin d'obtenir une estimation plus fine de la tendance du niveau marin. Dans les lieux où il existe une asymétrie tidale, les valeurs du MSL et du MTL sont différentes (*e.g.* 2,3 cm à Brest [Wöppelmann *et al.*, 2006] ; 4,5 cm à Liverpool au Royaume-Uni [Woodworth, 1999a] ; 9 cm à Cuxhaven en Allemagne Wahl *et al.* [2010]). Elles seraient égales si le signal de la marée était parfaitement symétrique, c'est-à-dire si la durée du montant était parfaitement égale à la durée du perdant. La différence entre MSL et MTL peut être estimée au moyen de la formule suivante [Pugh, 1987] :

$$MTL - MSL = A_{M4} \cdot \cos(2 \cdot G_{M2} - G_{M4}) \quad (6.11)$$

D'après cette relation et à partir des valeurs du *tableau VI-1*, la différence entre MTL et MSL serait de 24,1 cm à La Rochelle. D'après la comparaison directe réalisée entre les moyennes mensuelles des observations horaires et les moyennes mensuelles des pleines et basses mers, la différence observée entre MTL et MSL à La Rochelle est de 26,0 cm. L'estimation calculée à l'aide de la formule de Pugh est donc plutôt correcte et proche de l'observation. En adoptant la valeur de 26,0 cm, nous pouvons convertir les valeurs des MTL en MSL, afin d'augmenter le nombre de points utilisé pour calculer la tendance générale du niveau de la mer (*figure VI-30*).

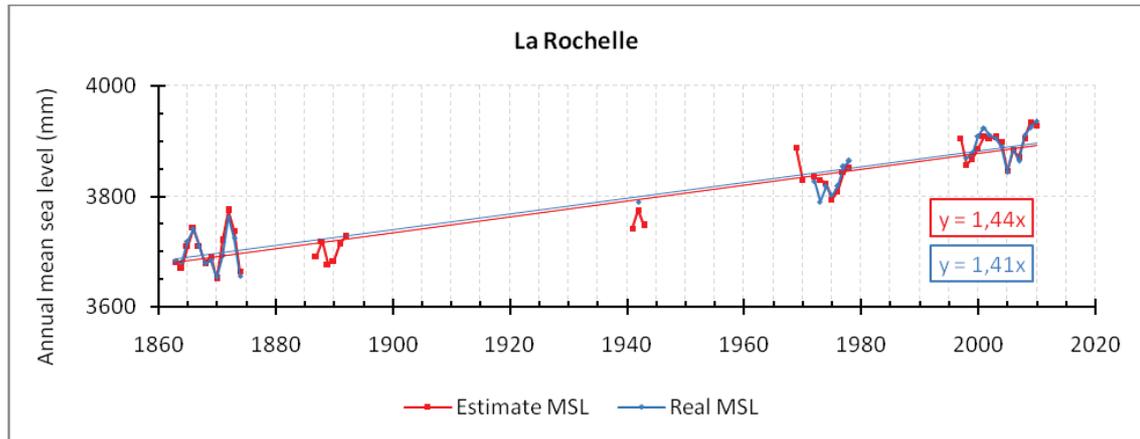


Figure VI-30 : Evolution du MSL (bleu) et du MSL obtenu à partir des valeurs du MTL (rouge) à La Rochelle (1863-2010).

Comme le montre la *figure VI-30*, il n'existe pas de grande différence entre le MSL et le MSL obtenu à partir du MTL. La différence entre les moyennes annuelles du MSL et dérivées du MTL varie de -39 à +23 mm. Quant aux tendances calculées, elles sont ici identiques, aux écarts-types près :

Tendance MSL : $+1,41 \pm 0,09$ mm/an

Accélération : $0,007$ mm/an²

Tendance MSL dérivé du MTL : $+1,44 \pm 0,08$ mm/an

Accélération : $0,008$ mm/an²

Cela peut signifier plusieurs choses : soit le nombre de points ajouté n'est pas suffisamment important pour modifier significativement la tendance ; soit la méthode fonctionne bien à La Rochelle et il est logique de retrouver la même tendance quelle que soit la méthode utilisée ; soit ces deux arguments sont valables simultanément.

Wahl *et al.* [2010], confrontés à un problème similaire (coexistence de valeurs de MSL et MTL sur la côte allemande) ont développé une autre méthode pour relier valeurs de MTL et MSL. Ils proposent d'utiliser la relation suivante :

$$MSL(t) = MTR(t) \cdot (0,5 - k) + MTL(t) \quad (6.12)$$

k est le facteur k moyen estimé à partir des moyennes mensuelles de telle sorte que :

$$k(t) = \frac{MHW(t) - MSL(t)}{MTR(t)} \quad (6.13)$$

où $MSL(t)$ est la moyenne du niveau marin, $MTR(t)$ est la moyenne du marnage moyen, $MHW(t)$ est la moyenne de pleine mer et $MTL(t)$ est la moyenne du niveau moyen de mi-marée. Si k est égal à 0,5 alors le signal de la marée est symétrique et la valeur du MSL est égale à celle du MTL. Les auteurs expliquent qu'avant de calculer des valeurs de MSL avec cette méthode, il est important de vérifier que le facteur k est un paramètre stationnaire. Si celui-ci ne l'est pas, Wahl *et al.* [2010] préconisent alors de déterminer le polynôme d'ordre 1 ou supérieur régissant les variations du facteur k . Ce facteur étant ensuite remplacé par $k(t)$ dans la formule 6.12. Nous avons appliqué cette méthode aux données de La Rochelle. La *figure VI-31* présente les variations du facteur k . Afin de s'affranchir des effets saisonniers, une moyenne mobile sur une fenêtre d'un an, avec décalage mensuel, a été calculée.

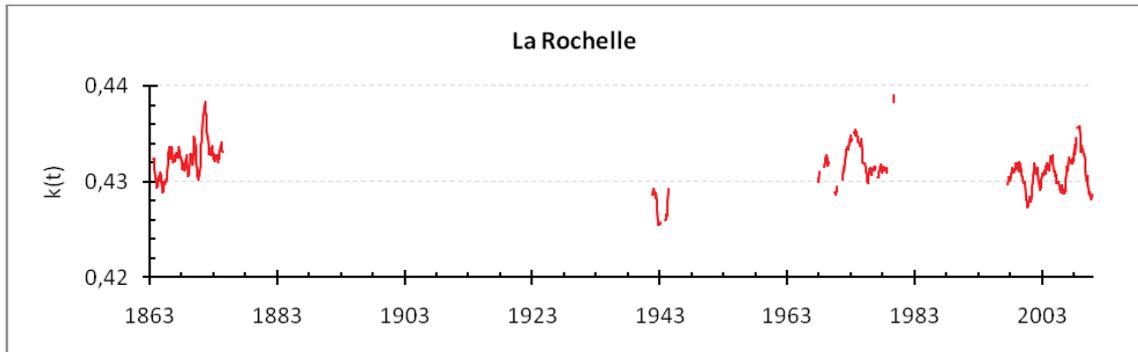


Figure VI-31 : Moyennes mobiles (fenêtre : 1 an) du facteur k mensuel à La Rochelle.

Comme le montre la figure VI-31, le facteur k ne paraît pas stationnaire, ici, il varie entre 0,415 et 0,466. Cette non-stationnarité a été confirmée en réalisant un test de Kolmogorov-Smirnov, le même que celui utilisé par Wahl *et al.* De plus, il ne semble pas suivre une variation que l'on pourrait modéliser par un polynôme. Nous avons malgré tout essayé d'appliquer la relation de Wahl *et al.* à nos données, à l'aide d'un facteur k moyen de 0,431, et le résultat est plutôt correct (figure VI-32). La différence entre les moyennes mensuelles réelles et déduites varie de -139 à +63 mm. Quant aux tendances calculées, elles sont ici aussi identiques, aux écarts-types près :

Tendance MSL réel : $+1,41 \pm 0,09$ mm/an	Accélération : $0,007$ mm/an ²
Tendance MSL déduite : $+1,42 \pm 0,08$ mm/an	Accélération : $0,008$ mm/an ²

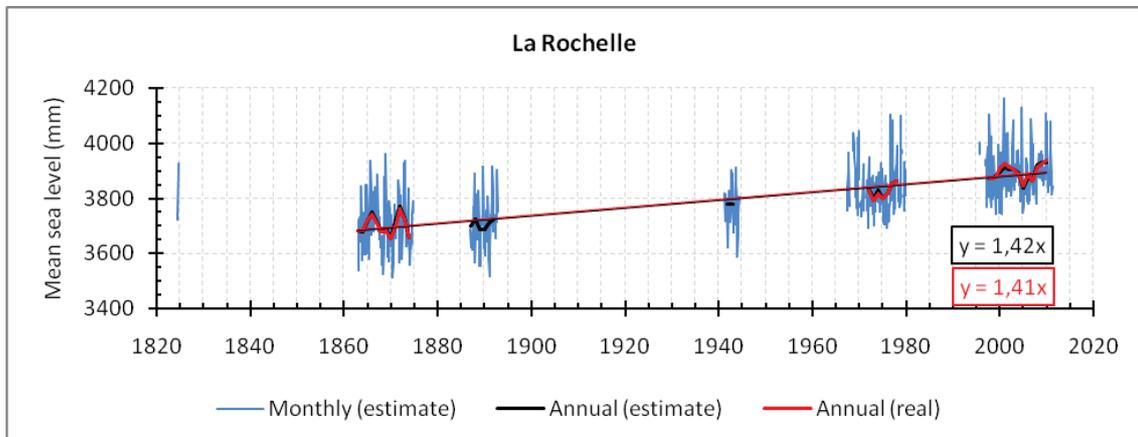


Figure VI-32 : Comparaison des niveaux marins moyens (MSL) réels et dérivés du MTL à La Rochelle.

VI.2.2. Aix-Enet-Boyard : 1824 - 2011

VI.2.2.1. Tendence du niveau moyen de la mer

La figure VI-33 présente l'évolution des niveaux moyens journaliers, mensuels et annuels calculés selon les règles du PSMSL (cf. I.2. Niveaux moyens) pour le site Aix-Enet-Boyard. Les tendances et écarts-types associés sont synthétisés dans le tableau VI-14. Entre 1860 et 1902, on constate que la

tendance du niveau marin est stable, la valeur calculée n'étant pas statistiquement différente de 0 mm/an : $-0,2 \pm 0,4$ mm/an. N'ayant pas assez de données pour calculer une moyenne annuelle postérieure à 1902, nous ne pouvons évaluer une potentielle augmentation du niveau marin au 20^e siècle, cependant, nous pouvons remarquer la stabilité du niveau de la mer entre 1860 et 1902. Plus précisément, il semble que le niveau soit stable jusqu'aux alentours de 1890, année à partir de laquelle on détecte une légère tendance à l'élévation du niveau marin ($+2,0 \pm 1,6$ mm/an) même si la tendance calculée n'est pas statistiquement différente de zéro.

Aix-Enet-Boyard (MSL)		
	Tendance (mm/an)	Ecart-type (mm/an)
1860 - 1902	- 0,2	0,4
1860 - 1889	+ 0,2	0,7
1889 - 1902	+ 2,0	1,6

Tableau VI-14 : Tendances et écarts-types du niveau moyen de la mer (MSL) à Aix-Enet-Boyard.

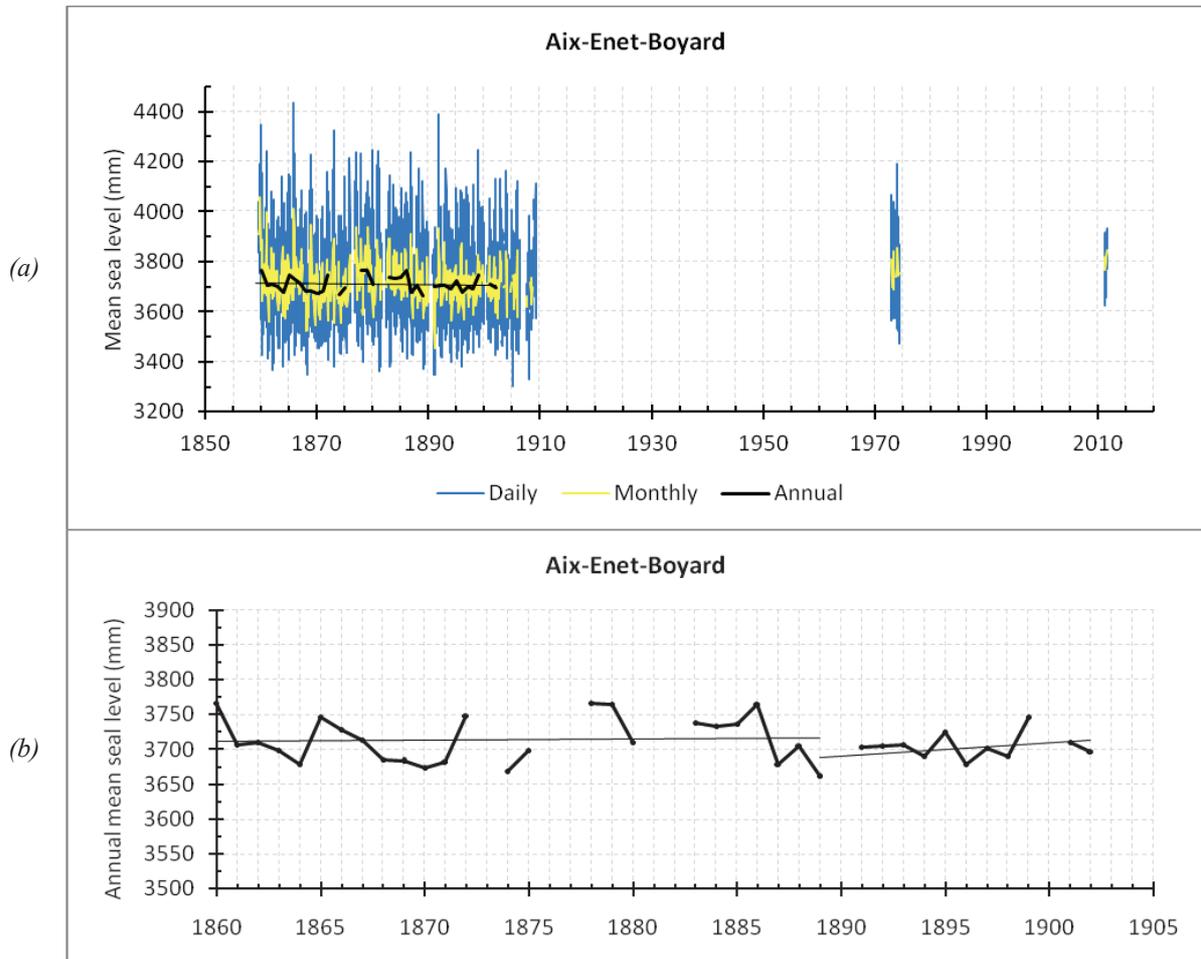


Figure VI-33 : Aix-Enet-Boyard, (a) 1859-2011 : évolution des niveaux marins moyens journaliers (bleu), mensuels (jaune) et annuels (noir) ; (b) : 1860-1902 : gros plan sur le niveau moyen annuel.

VI.2.2.2. Tendances des niveaux moyens de la marée

Afin d'intégrer des mesures plus modernes, et notamment le lot de mesures de 1973-1974, nous avons également calculé les niveaux moyens de la marée. En effet, le calcul des niveaux moyens journaliers à l'aide d'un filtre ainsi que le calcul des moyennes annuelles respectant les règles du PSMSL empêchait d'avoir une valeur annuelle pour cette période. L'étude des niveaux moyens de la marée permet de surmonter cette limite. Les figures VI-34 et VI-35 présentent l'évolution des différents niveaux moyens de la marée pour le site d'Aix-Enet-Boyard. Les tendances et écarts-types associés sont synthétisés dans le tableau VI-15.

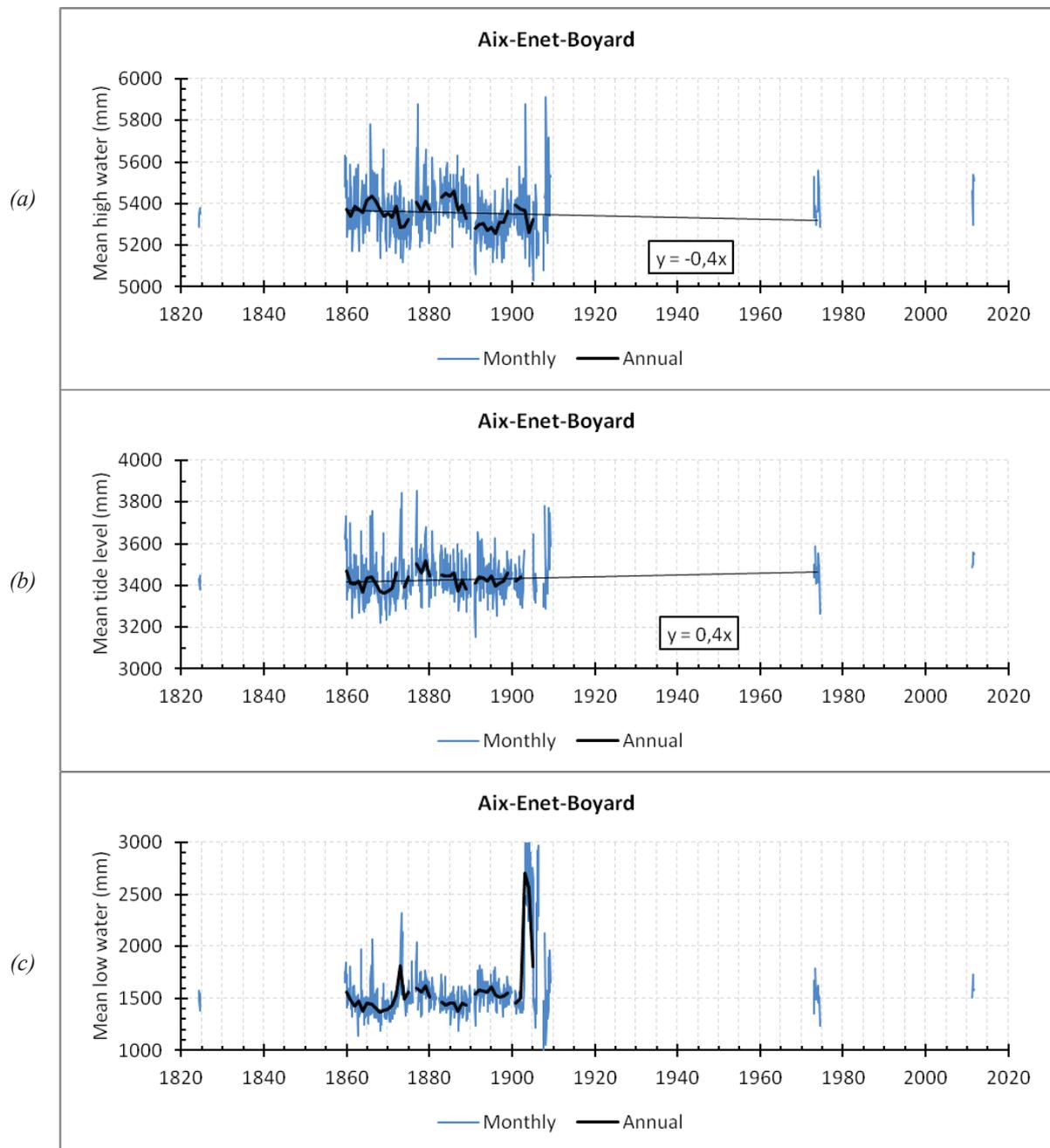


Figure VI-34 : Aix-Enet-Boyard, 1824-2011 : évolution du (a) MHW, (b) MTL et (c) MLW mensuel (bleu) et annuel (noir).

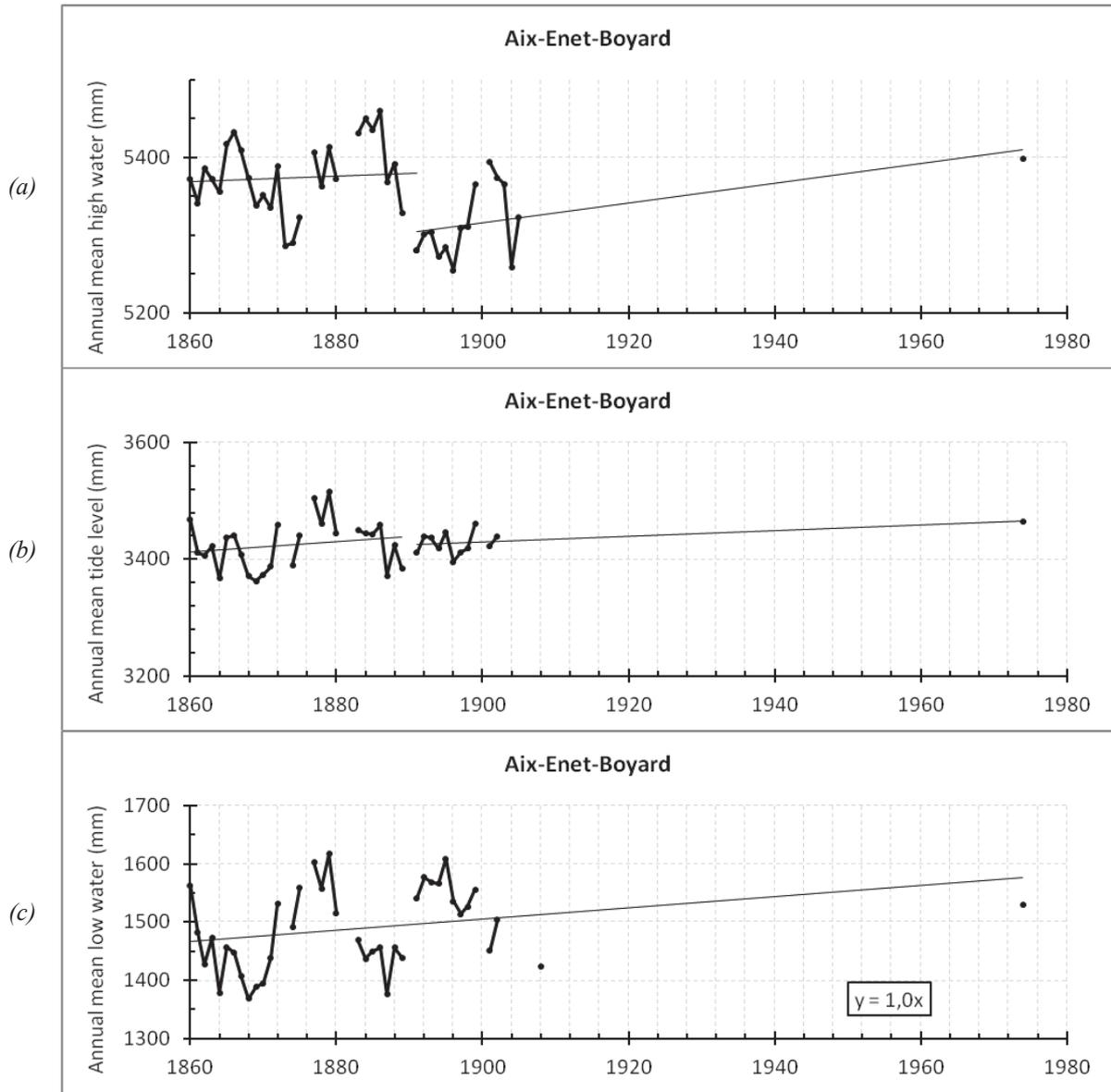


Figure VI-35 : Aix-Enet-Boyard, 1860-1974 : évolution et tendances du (a) MHW, (b) MTL et (c) MLW annuel.

Aix-Enet-Boyard : tendances et écarts-types (mm/an)			
	MHW	MTL	MLW
1860 - 1974	- 0,4 ± 0,4	+ 0,4 ± 0,3	+ 1,0 ± 0,6
1860 - 1889	0 ± 1	+ 0,9 ± 0,9	
1891 - 1974	+ 1,3 ± 0,6	+ 0,5 ± 0,2	

Tableau VI-15 : Tendances et écarts-types des niveaux moyens de la marée (MHW, MTL et MLW) à La Rochelle.

Comme à La Rochelle, on constate que les variations des MHW et MLW sont influencées par le cycle nodal. Ici, seulement deux cycles nodaux apparaissent, de ce fait, le nombre de points utilisés pour le calcul d'une tendance est ici trop faible pour que les tendances calculées soient pleinement exploitables. A noter que les valeurs du MLW de fin 1902 à 1906 (figure VI-34) sont biaisées car elles correspondent à la période où les basses mers de vives-eaux n'étaient plus enregistrées (cf. V.4.5.2.2. Etude de la stabilité des ondes de marée). Concernant l'évolution du MTL, le niveau moyen de mi-marée

est lui aussi stable entre 1860 et 1890, comme le MSL. On détecte également une très légère augmentation du niveau après 1890 : $+0,5 \pm 0,2$ mm/an.

VI.2.2.3. Combinaison MSL-MTL

Comme pour La Rochelle, nous avons également cherché à combiner les valeurs de MTL à celles du MSL. La différence entre MTL et MSL, estimée à partir de la relation de Pugh [1987] à l'aide des valeurs du *tableau VI-2*, serait de 25,7 cm à Aix-Enet-Boyard. D'après la comparaison directe réalisée entre les moyennes mensuelles des observations horaires et les moyennes mensuelles des pleines et basses mers, la différence observée entre MTL et MSL est de 28,6 cm. Là aussi, l'estimation calculée à l'aide de la formule de Pugh est plutôt correcte et proche de l'observation.

En adoptant la valeur de 28,6 cm, nous avons converti les valeurs des MTL en MSL, afin d'augmenter le nombre de points utilisé pour calculer la tendance générale du niveau de la mer (*figure VI-36*). Malheureusement, cette méthode ne nous permet pas de récupérer suffisamment de points (seulement 2, en 1877 et en 1974) pour tirer une tendance fiable. La tendance calculée est de $+0,4 \pm 0,3$ mm/an, soit pas statistiquement différente de 0 mm/an.

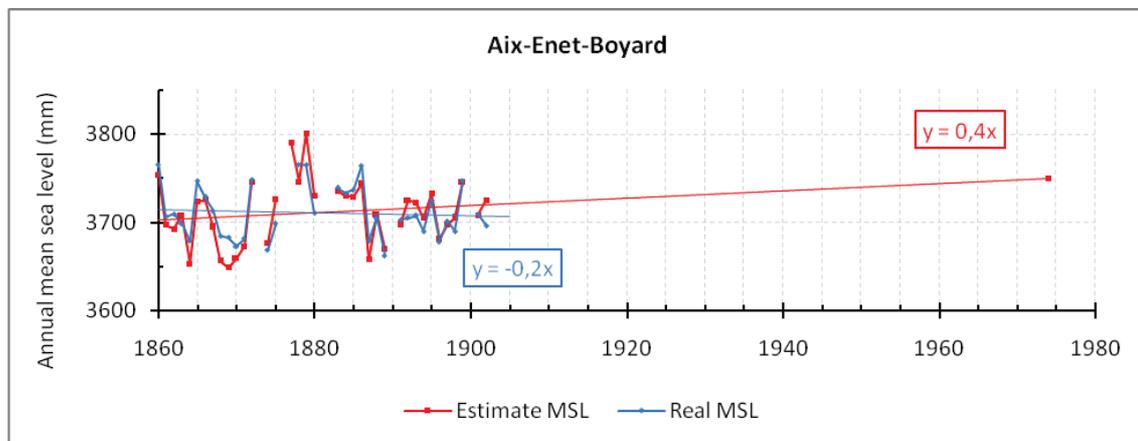


Figure VI-36 : Evolution du MSL (bleu) et du MSL obtenu à partir des valeurs du MTL (rouge) à Aix-Enet-Boyard (1860-1974).

La méthode de Wahl *et al.* [2010] ne donnera pas de meilleur résultat ici, puisque le nombre de valeurs postérieures à 1902 est trop faible. Toutefois, par soucis de comparaison, nous vous présentons la variation du facteur k pour le site Aix-Enet-Boyard (*figure VI-37*). Ici non plus, celui-ci n'est pas stationnaire, il varie entre 0,404 et 0,449. Cette non-stationnarité a également été confirmée en réalisant un test de Kolmogorov-Smirnov, le même que celui utilisé par Wahl *et al.* Le facteur k moyen est de 0,425.

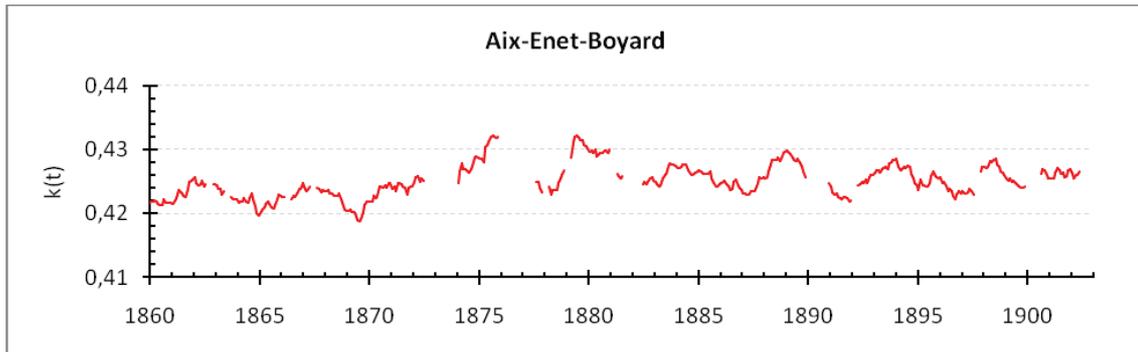


Figure VI-37 : Moyennes mobiles (fenêtre : 1 an) du facteur k mensuel à Aix-Enet-Boyard.

VI.2.3. Phare de Cordouan : 1812 - 1994

La figure VI-38 présente l'évolution des niveaux moyens journaliers, mensuels et annuels au phare de Cordouan. Les niveaux ont été calculés avec des moyennes arithmétiques simples, sans utilisation de filtres car, mis à part le lot de mesures de 1994, toutes les mesures sont des mesures diurnes. Les tendances et écarts-types associés sont synthétisés dans le tableau VI-16. Entre 1812 et 1994, la tendance du niveau marin n'est pas statistiquement différente de 0 mm/an. On semble cependant distinguer deux périodes distinctes : de 1812 à 1882, le niveau moyen diminue significativement de $-2,9 \pm 0,4$ mm/an ; de 1882 à 1994, le niveau moyen semble augmenter de l'ordre de $+1,3 \pm 0,9$ mm/an. Au-delà des chiffres, la figure VI-38 montre bien le très faible nombre de points utilisé pour le calcul de la tendance. C'est pourquoi les chiffres indiqués doivent être pris avec beaucoup de précaution et sont très probablement plus le reflet d'un manque de données plutôt que d'une réelle augmentation ou diminution du niveau marin. En conséquence, il nous est impossible de conclure sur la variation du niveau marin au phare de Cordouan, par manque de données. La numérisation des données de la période 1950-2010 aiderait sûrement à améliorer la confiance accordée à un calcul de tendance au phare de Cordouan.

	Cordouan (MSL)	
	Tendance (mm/an)	Écart-type (mm/an)
1812 - 1994	+ 0,2	0,5
1812 - 1882	- 2,9	0,4
1882 - 1994	+ 1,3	0,9

Tableau VI-16 : Tendances et écarts-types du niveau moyen de la mer (MSL) au phare de Cordouan.

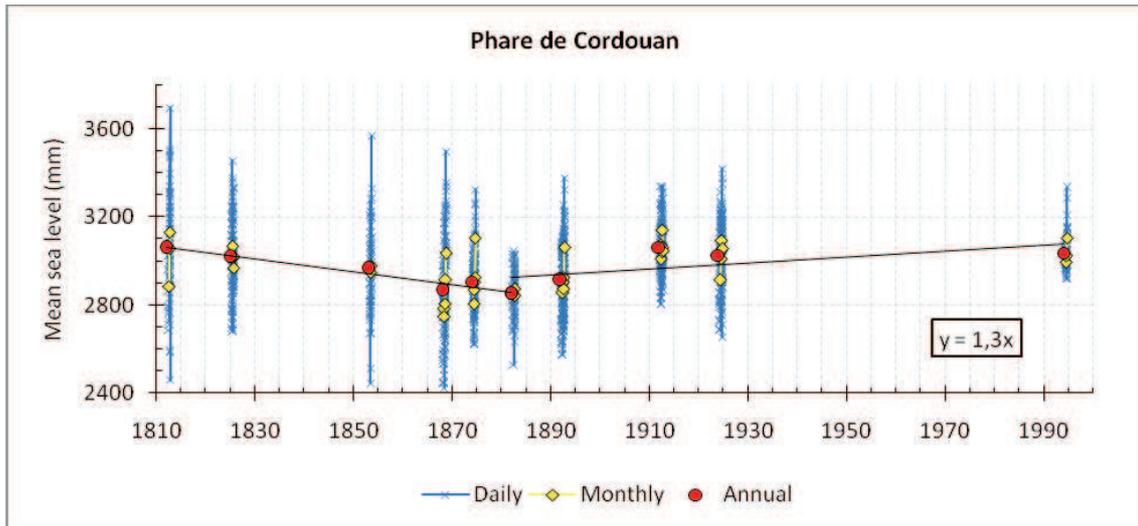


Figure VI-38 : Evolution des niveaux marins moyens journaliers (bleu), mensuels (jaune) et annuels (rouge) à Cordouan (1812-1994).

VI.2.4. Comparaison à des séries françaises et européennes

Afin de mieux appréhender les tendances calculées à La Rochelle et Aix-Enet-Boyard, il nous a semblé intéressant de les comparer à des séries marégraphiques françaises et à quelques séries de la côte atlantique européenne. Pour cela, nous avons calculé, avec nos propres programmes, les tendances du niveau marin moyen (MSL) pour chacune des stations françaises répertoriées sur le portail REFMAR (à noter que nos résultats sont quasiment identiques à ceux diffusés par SONEL). Pour comparaison, nous avons également calculé les tendances à partir des moyennes annuelles diffusées par le PSMSL qui, nous le verrons, diffèrent parfois. L'ensemble des stations françaises étudiées est répertoriée dans le *tableau VI-17*, qui indique également le code attribué à chaque station pour cette étude.

1	Dunkerque	8	Roscoff	15	Les Sables d'Olonne	22	Port-Vendres
2	Calais	9	Le Conquet	16	La Rochelle	23	Sète
3	Boulogne-sur-mer	10	Brest	17	Aix-Enet-Boyard	24	Marseille
4	Dieppe	11	Concarneau	18	Port-Bloc	25	Toulon
5	Le Havre	12	Port Tudy	19	Arcachon	26	Nice
6	Cherbourg	13	Le Crouesty	20	Bayonne	27	Monaco
7	Saint-Malo	14	Saint-Nazaire	21	Saint-Jean de Luz	28	Ajaccio

Tableau VI-17 : Liste des stations françaises étudiées. Le chiffre à gauche du nom des stations correspond au code utilisé sur la figure VI-38 pour désigner une série.

Les niveaux moyens annuels de chacune des séries répertoriées dans le *tableau VI-17* sont représentés sur la *figure VI-39*. Les tendances et écarts-types associés sont également indiqués sur la figure.

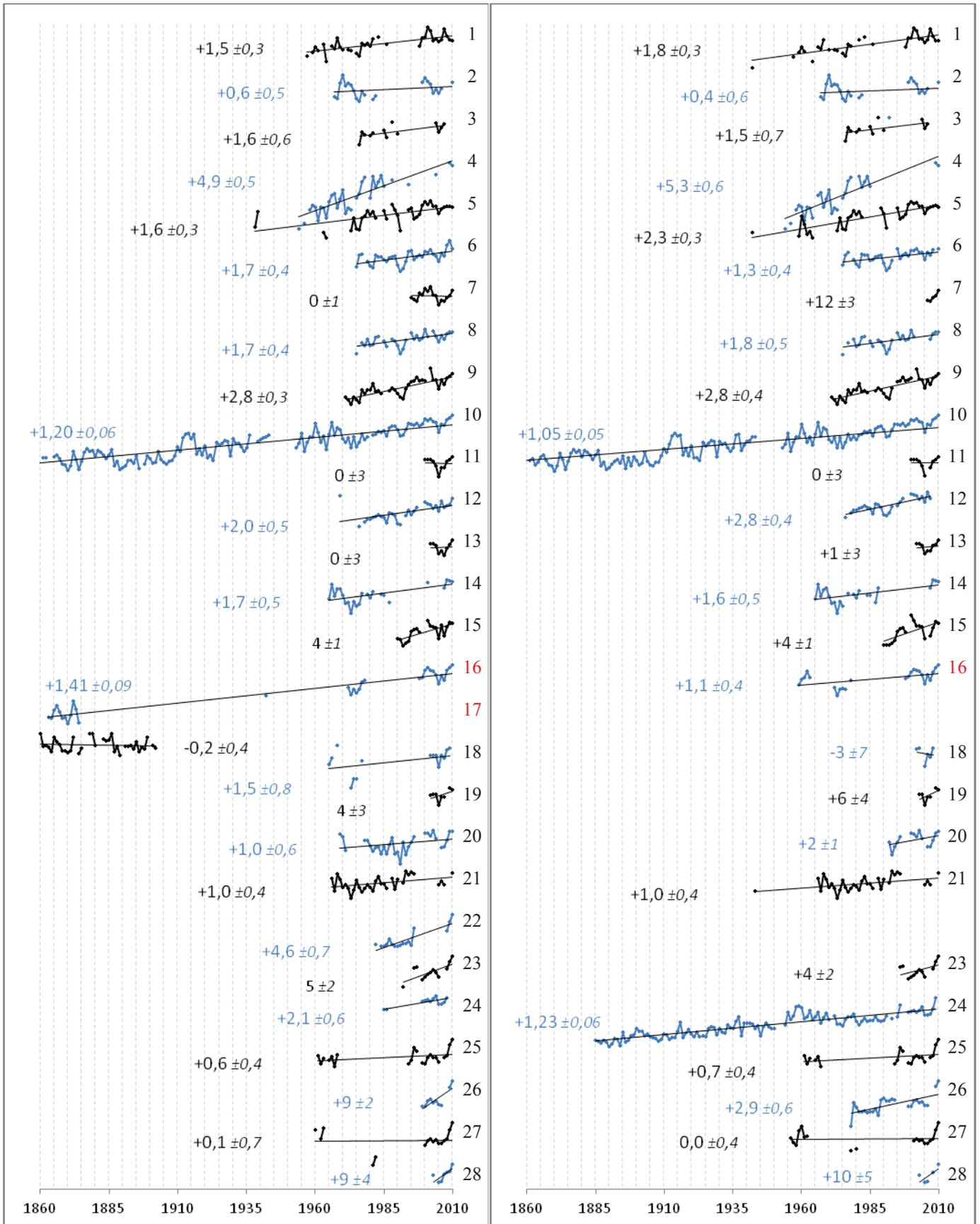


Figure VI-39 : Tendances et niveaux moyens annuels des stations françaises répertoriées sur le portail REFMAR (à gauche) et sur le site du PSMSL (à droite). L'origine de chaque série a été décalée arbitrairement. Les stations 16 et 17 (rouge) correspondent respectivement à La Rochelle et Aix-Enet-Boyard.

Tout d'abord, comme nous l'avons déjà remarqué lors de la comparaison de la durée des séries de REFMAR et du PSMSL (cf. figures VI-2 et VI-3), il existe de nombreuses différences entre les tendances calculées à partir des données de REFMAR et celles du PSMSL. Cependant, ces différences sont parfois faibles (non significatives à 95%) : les tendances calculées sont souvent identiques si l'on prend en compte l'écart-type associé. Quelques stations ont des tendances significativement différentes : Le Havre, Saint-Malo, Brest, Port-Tudy, Marseille et Nice. Pour Saint-Malo et Nice, cela est dû au très faible nombre de valeurs. Pour Brest et Marseille, la raison est très simple, la période prise en compte n'est pas la même. Les niveaux moyens annuels débutent en 1846 à Brest et 1985 à Marseille sur REFMAR alors qu'ils débutent en 1806 (Brest) et 1885 (Marseille) sur le serveur du PSMSL. Pour les stations de Port-Tudy et Le Havre, il semblerait que ce soit l'ajout d'une ou deux valeurs annuelles sur les séries issues de REFMAR par rapport au PSMSL qui suffit à changer significativement la tendance. Les périodes étudiées étant très différentes d'une série à l'autre, nous avons regroupé les tendances des séries par période dans le *tableau VI-18*.

	1970-2010			1993-2010		
	Période réelle	REFMAR	PSMSL	Période réelle	REFMAR	PSMSL
Dunkerque	1970-2010	+1,7 ± 0,4	+1,7 ± 0,4	-	-	-
Calais	1970-2010	+0,6 ± 0,5	+0,4 ± 0,6	1992-2010	-	+6,3 ± 3,3
Boulogne-sur-mer	1976-2007	+1,6 ± 0,6	+1,5 ± 0,7	-	-	-
Dieppe	1970-2010	+4,3 ± 0,9	+5 ± 1	1994-2010	+6,2 ± 1,1	-
Le Havre	1973-2010	+2,2 ± 0,5	+2,3 ± 0,4	1994-2010	+1,7 ± 1,2	-
Cherbourg	1975-2010	+1,7 ± 0,4	+1,3 ± 0,4	1993-2010	+2,3 ± 1,1	+1,4 ± 0,9
Saint-Malo	-	-	-	-	-	-
Roscoff	1975-2010	+1,7 ± 0,4	+1,8 ± 0,5	1993-2010	+0,9 ± 0,9	+1,3 ± 0,8
Le Conquet	1971-2010	+2,8 ± 0,3	+2,8 ± 0,4	1993-2010	+1,6 ± 1,0	+1,4 ± 1,1
Brest	1970-2010	+2,8 ± 0,3	+2,9 ± 0,3	1993-2010	+1,7 ± 0,9	+1,8 ± 0,9
Concarneau	-	-	-	-	-	-
Port Tudy	1976-2010	+2,9 ± 0,3	+2,8 ± 0,4	1993-2010	+2,8 ± 0,8	+3,0 ± 1,2
Le Crouesty	-	-	-	-	-	-
Saint-Nazaire	1970-2010	+2,7 ± 0,4	+2,6 ± 0,4	-	-	-
Les Sables d'Olonne	-	-	-	1993-2010	+3,1 ± 1,3	+2,7 ± 1,6
La Rochelle	1972-2010	+2,5 ± 0,4	+2,4 ± 0,4	-	-	-
Aix-Enet-Boyard	-	-	-	-	-	-
Port-Bloc	1968-2010	+2,1 ± 0,9	-	-	-	-
Arcachon	-	-	-	-	-	-
Bayonne	1970-2010	+1,5 ± 0,6	-	1993-2010	+2,7 ± 1,6	+2,6 ± 1,6
Saint-Jean de Luz	1970-2010	+1,6 ± 0,4	+1,6 ± 0,4	1993-2010	-2,4 ± 1,3	-2,4 ± 1,3
Port-Vendres	-	-	-	1993-2010	+6,1 ± 1,7	-
Sète	-	-	-	1992-2010	+4,8 ± 1,6	-
Marseille	1966-2009	-	+1,3 ± 0,3	-	-	+2,2 ± 1,3
Toulon	1966-2010	+0,8 ± 0,6	+1,1 ± 0,7	1994-2010	+3,0 ± 1,7	+3,1 ± 1,7
Nice	-	-	-	1993-2010	-	+3,6 ± 2,0
Monaco	1962-2010	-	+0,9 ± 0,7	-	-	-
Ajaccio	-	-	-	-	-	-

Tableau VI-18 : Tendances des niveaux marins annuels des stations françaises de 1970 à 2010 et de 1993 à 2010 (période altimétrique). Comparaison entre données issues de REFMAR et du PSMSL.

Cette fois-ci, sur la période 1970-2010, la tendance calculée pour chaque site est la même (à l'écart-type près) que ce soit à partir des données de REFMAR ou du PSMSL. Nous avons également

calculé les tendances sur la période 1993-2010, période qui correspond aux mesures du niveau de la mer par altimétrie radar. Les tendances calculées ne montrent pas forcément de cohérence géographique (par exemple : $+2,7 \pm 1,6$ mm/an à Bayonne et $-2,4 \pm 1,3$ mm/an à Saint-Jean-de-Luz, villes situées à environ 40 km l'une de l'autre), ce qui peut s'expliquer par une variabilité interannuelle suffisamment importante pour influencer les tendances à long-terme du niveau marin. De plus, il n'est pas possible d'effectuer une comparaison directe avec les tendances obtenues par altimétrie, car les séries que nous avons utilisé intègrent des paramètres qui sont corrigés lors du calcul d'une tendance par altimétrie (par exemple : baromètre inverse, signal saisonnier, rebond postglaciaire). Afin d'avoir une plus grande lisibilité des résultats exploitables, nous avons reporté les tendances calculées sur la période 1970-2010 sur une carte géographique du littoral français (*figure VI-40*).

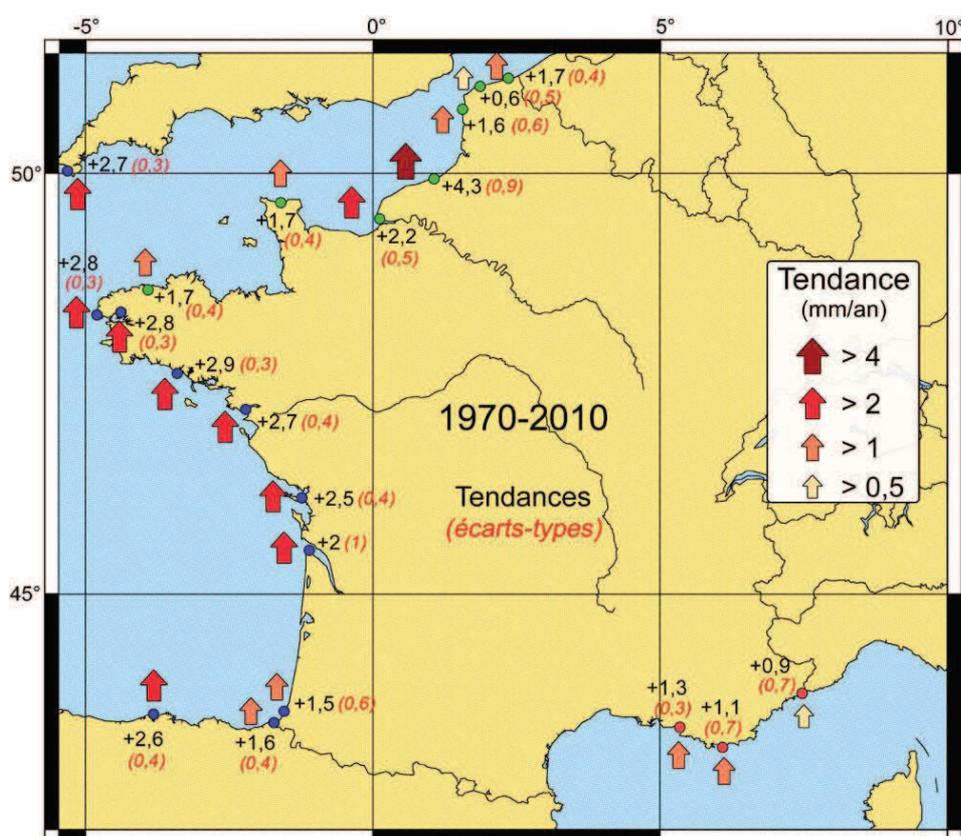


Figure VI-40 : Tendances et écarts-types (entre parenthèses) des stations françaises, de Newlyn (Royaume-Uni) et de Santander (Espagne) sur la période 1970-2010 issues de nos calculs à partir des données issues de REFMAR (stations françaises de la Manche/Mer du Nord et de l'Atlantique) et à partir des données du PSMSL (stations françaises méditerranéennes, Santander et Newlyn). Le code couleur des flèches est repris de celui du PSMSL.

La *figure VI-40* nous montre une remarquable cohérence des tendances du niveau marin sur la façade atlantique française. L'élévation la plus forte s'est produite au nord du littoral atlantique, en Bretagne avec une augmentation du niveau de la mer de l'ordre de 2,8 mm/an (pour comparaison, la tendance à Newlyn, au Royaume-Uni est de +2,7 mm/an). On observe ensuite une atténuation de cette élévation au fur et à mesure que l'on se déplace vers le sud : +2,7 mm/an à Saint-Nazaire (Loire-Atlantique), +2,5 mm/an à La Rochelle (Charente-Maritime), +2 mm/an à Port-Bloc (Gironde) et +1,6 mm/an à l'extrémité sud du littoral atlantique français, dans le Pays Basque. La tendance calculée à

La Rochelle est donc parfaitement cohérente avec celles des stations alentours, et avec celle de Santander (Espagne) : +2,6 mm/an. De même, en Méditerranée, les trois stations françaises possédant assez de données pour estimer une tendance (à partir des données du PSMSL) sont cohérentes entre elles. La période commune est un peu plus large ici : 1966-2009. On constate une élévation du niveau marin moins importante que sur la façade atlantique : +1,3 mm/an à Marseille, +1,1 mm/an à Toulon et +0,9 mm/an à Monaco. Ces résultats sont cohérents avec ceux de Marcos & Tsimplis [2007], qui expliquent que la différence entre les tendances des stations méditerranéennes et de la côte atlantique européenne est en partie expliquée par une contribution différente de la pression atmosphérique et des effets stériques.

Les tendances calculées pour les stations de la Mer du Nord/Manche sont un peu plus disparates. La tendance globale qui semble se dégager serait une élévation du niveau marin de l'ordre de +1,7 mm/an, de Roscoff à Dunkerque, mais quelques stations affichent des valeurs significativement différentes : Calais et Dieppe. A Calais, la tendance n'est pas significativement différente de 0 mm/an. Il existe un manque de données important entre 1983 et 1998, mais ce n'est, *a priori*, pas une raison suffisante pour expliquer cette tendance. On remarque en effet, sur la *figure VI-39*, des niveaux annuels anormalement élevés au début des années 70, qui peuvent expliquer l'aplanissement de la tendance. A noter que le PSMSL précise que la qualité des données de 1984 à 1992 est faible, ce qui est peut-être aussi le cas des données du début des années 70. A Dieppe, c'est l'inverse qui se produit, la tendance du niveau marin est anormalement élevée : $+4,3 \pm 0,9$ mm/an. D'après les informations disponibles sur le site du PSMSL, ce serait un affaissement local qui serait à l'origine de l'accentuation de l'élévation relative du niveau marin à Dieppe.

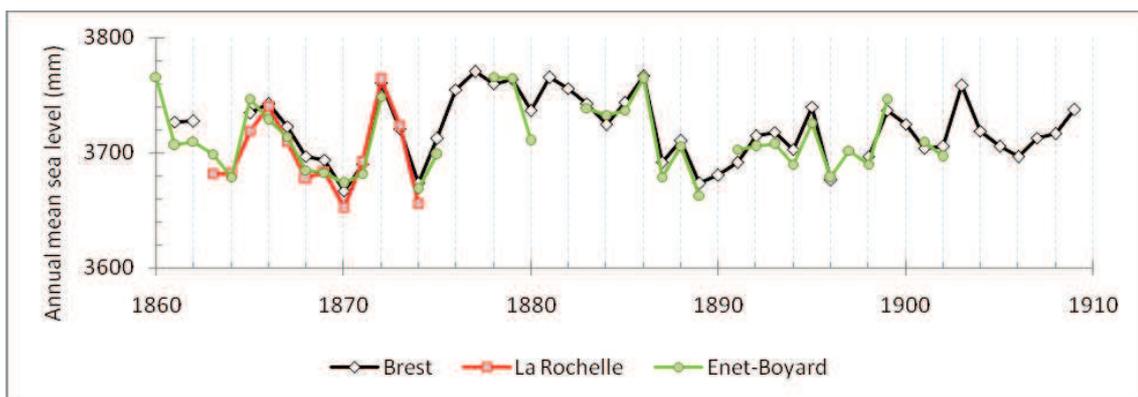


Figure VI-41 : Niveaux moyens marins annuels à Brest (source : REFMAR), La Rochelle et Aix-Enet-Boyard (1860-1910). L'origine de la série de Brest a été décalée arbitrairement pour une meilleure comparaison.

Après avoir vérifié la cohérence des données récentes de La Rochelle, intéressons-nous maintenant aux mesures anciennes, du 19^e siècle. La *figure VI-41* présente l'évolution des niveaux moyens annuels à Brest, La Rochelle et Aix-Enet-Boyard sur la période 1860-1910. On observe une remarquable cohérence entre les trois séries, prouvant ainsi toute la qualité des nouvelles séries de Charente-Maritime, et la variation conjointe des niveaux moyens annuels de Brest et du littoral

charentais. Nous avons ensuite calculé les tendances des trois séries, ainsi que de Liverpool pour comparaison, sur des périodes communes. Ces tendances sont très cohérentes entre elles :

1863-2010 :

- Brest : $+1,31 \pm 0,07$ mm/an
- La Rochelle : $+1,41 \pm 0,09$ mm/an
- Liverpool (Royaume-Uni) : $+1,43 \pm 0,14$ mm/an (1863-2007)

1860-1902 :

- Aix-Enet-Boyard : $-0,2 \pm 0,4$ mm/an
- Brest : $-0,4 \pm 0,4$ mm/an
- Liverpool (Royaume-Uni) : $0,7 \pm 0,9$ mm/an (1860-1901)

VI.3. Effets météorologiques

VI.3.1. Baromètre inverse

L'effet du baromètre inverse est une représentation de la réponse locale du niveau de la mer aux changements de pression atmosphérique [Ponte, 1994; Wunsch & Stammer, 1997]. Si le niveau de la pression atmosphérique augmente, alors le niveau de la mer diminue et inversement. En théorie, une variation de la pression de 1 hPa génère exactement une diminution du niveau marin de 1 cm, ce qui signifie que le coefficient du baromètre inverse correspond à -1 cm/hPa. En réalité, il est rare que la réponse du niveau marin aux changements de pression soit identique à cette valeur, la réponse locale du niveau de la mer dépendant également des effets du vent. Nous avons cherché à savoir si la relation du baromètre inverse est vérifiée sur le littoral charentais, ainsi qu'à Brest, à l'aide de nos trois séries inédites de pression atmosphérique et de niveau marin. Les *figures VI-42* et *VI-43* présentent la relation entre les moyennes annuelles, mensuelles et journalières du niveau marin (MSL) et de la pression atmosphérique rapportée au niveau de la mer (*mean sea level pressure*, MSLP).

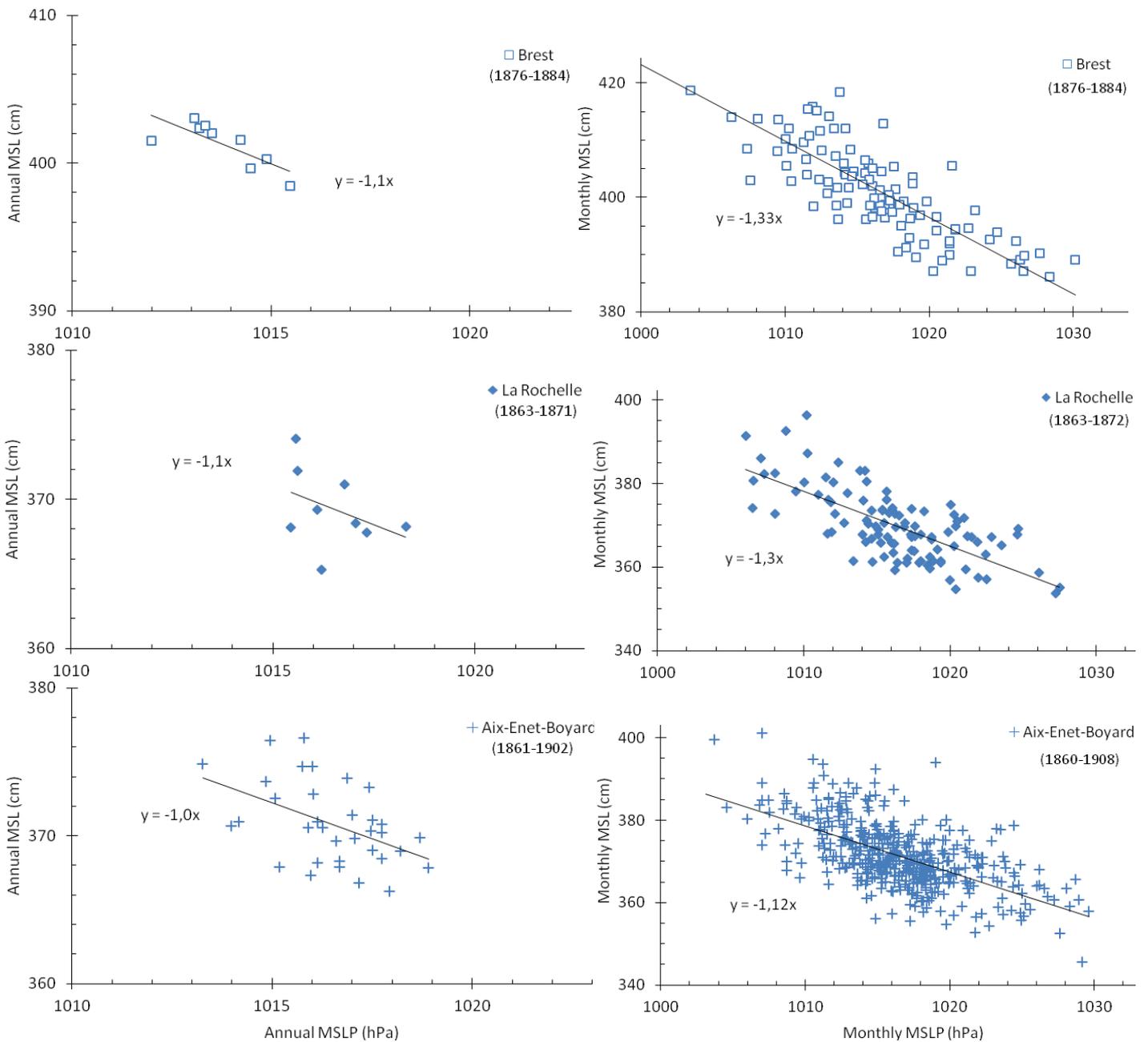


Figure VI-42 : Moyennes annuelles (à gauche) et mensuelles (à droite) du niveau marin (MSL) en fonction de la pression atmosphérique (MSLP) à Brest, La Rochelle et Aix-Enet-Boyard. Le coefficient du baromètre inverse correspond au coefficient de corrélation de la droite de régression linéaire.

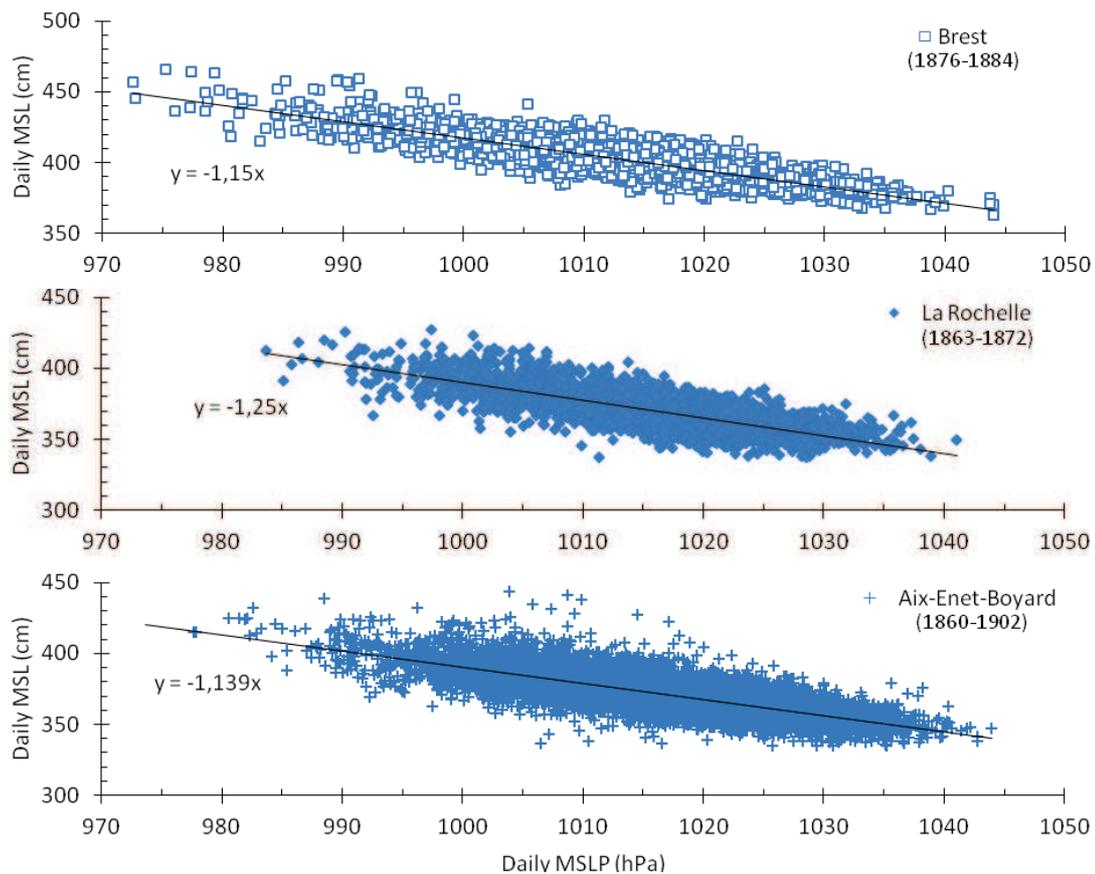


Figure VI-43 : Moyennes journalières du niveau marin (MSL) en fonction de la pression atmosphérique (MSLP) à Brest, La Rochelle et Aix-Enet-Boyard. Le coefficient du baromètre inverse correspond au coefficient de corrélation de la droite de régression linéaire.

Les graphiques ont été réalisés avec l'ensemble des données communes de nos séries inédites, de 1876 à 1884 (9 ans) pour Brest, de 1863 à 1872 (10 ans) pour La Rochelle et de 1860 à 1902 ou 1908 (43 ou 49 ans) pour Aix-Enet-Boyard. Afin de comparer les résultats (*tableau VI-19*), les coefficients ont été déterminés à partir des moyennes journalières, mensuelles et annuelles. Statistiquement, plus le nombre de points utilisés pour le calcul du coefficient est grand, plus l'écart-type est petit, ce qu'on aperçoit dans les résultats. Scientifiquement, les trois types de moyennes peuvent être utilisés pour le calcul, car la relation du baromètre inverse est valable aux trois échelles de temps (journalières, mensuelles et annuelles) [Pugh, 2004]. Les résultats montrent que la relation du baromètre inverse est vérifiée sur les trois sites. Les coefficients déterminés à partir des moyennes annuelles sont identiques, de l'ordre de -1,1 cm/hPa, chiffre que nous retiendrons pour caractériser la relation du baromètre inverse sur le littoral charentais.

	Coefficient du baromètre inverse (cm/hPa) calculé à partir des moyennes ...		
	Journalières	Mensuelles	Annuelles
Brest	-1,15 ± 0,01	-1,33 ± 0,09	-1,1 ± 0,3
La Rochelle	-1,25 ± 0,02	-1,3 ± 0,1	-1,1 ± 0,9
Aix-Enet-Boyard	-1,139 ± 0,009	-1,12 ± 0,07	-1,0 ± 0,3

Tableau VI-19 : Coefficients du baromètre inverse à partir des moyennes journalières, mensuelles et annuelles à Brest, La Rochelle et Aix-Enet-Boyard.

VI.3.2. Niveaux extrêmes

Les niveaux marins extrêmes sont les niveaux les plus hauts qui peuvent être atteints par la mer, de manière exceptionnelle [Pineau-Guillou, 2008]. La connaissance de ces niveaux est primordiale pour de nombreuses applications : dimensionnement d'ouvrages côtiers, aménagement du littoral, plan de prévention des risques, lutte contre les inondations, délimitation du domaine public maritime, etc. En France, un document est mis à la disposition des usagers, regroupant l'ensemble des statistiques des niveaux marins extrêmes du littoral atlantique et de la Manche [Simon, 2008].

La question de la tendance des niveaux extrêmes est donc très importante pour évaluer les risques de submersions marines. C'est pourquoi de nombreuses études s'intéressent aux changements des valeurs des niveaux extrêmes atteints et de leur fréquence sur les côtes françaises [Pirazzoli & Tomasin, 2007; Ullmann *et al.*, 2007; Letetrel *et al.*, 2010], européennes [Araújo, 2005; Marcos *et al.*, 2009; Ullmann & Monbaliu, 2009; Haigh *et al.*, 2010] et mondiales [Woodworth & Blackman, 2004; Menéndez & Woodworth, 2010].

Dans la récente synthèse réalisée par Woodworth *et al.* [2011a], il apparaît que les taux d'augmentation des niveaux marins extrêmes sont globalement similaires à ceux des niveaux moyens de la mer. Cependant, lorsque l'on étudie la variation des niveaux extrêmes corrigés des variations du niveau moyen de la mer, on observe une diminution de leurs tendances dans la plupart des cas. Ce résultat tend à montrer que la plupart des cas d'augmentation des niveaux extrêmes est en fait dû à l'augmentation du niveau moyen de la mer. Pirazzoli *et al.* [2000; 2006] étaient déjà arrivés à la même conclusion pour les stations françaises du littoral atlantique et de la Manche. En effet, ils ne constatent aucune augmentation du risque de submersion en ne prenant en compte que les récentes évolutions climatiques (vent et pression atmosphérique), mais le risque réel augmente à long terme en tenant compte de l'élévation du niveau marin.

Il existe plusieurs méthodes d'analyse des niveaux extrêmes. Le lecteur intéressé trouvera une description de ces méthodes dans l'article de Woodworth & Blackman [2002] par exemple. Parmi ces méthodes, on trouve, entre autres, l'analyse des hauteurs d'eau maximales annuelles, des résidus (observations - prédictions de la marée) maximaux annuels, des résidus de pleine mer maximaux annuels, des résidus de la pleine mer maximale annuelle et des centiles annuels. Pour débiter la courte analyse des niveaux extrêmes sur le littoral charentais, nous nous intéressons en premier lieu à la variabilité des hauteurs d'eau maximales annuelles. Cette méthode est en effet la plus simple à utiliser et permet une première approche de l'évolution des niveaux extrêmes. Cependant, nous verrons qu'elle possède des inconvénients que nous contournerons par la suite par l'analyse des centiles annuels. Pour chacune des années de nos deux séries (La Rochelle et Aix-Enet-Boyard), les hauteurs maximales et minimales

atteintes par la mer sont sélectionnées à partir des données horaires. Les résultats sont présentés sur les figures VI-44 et VI-45 et synthétisés dans le tableau VI-20.

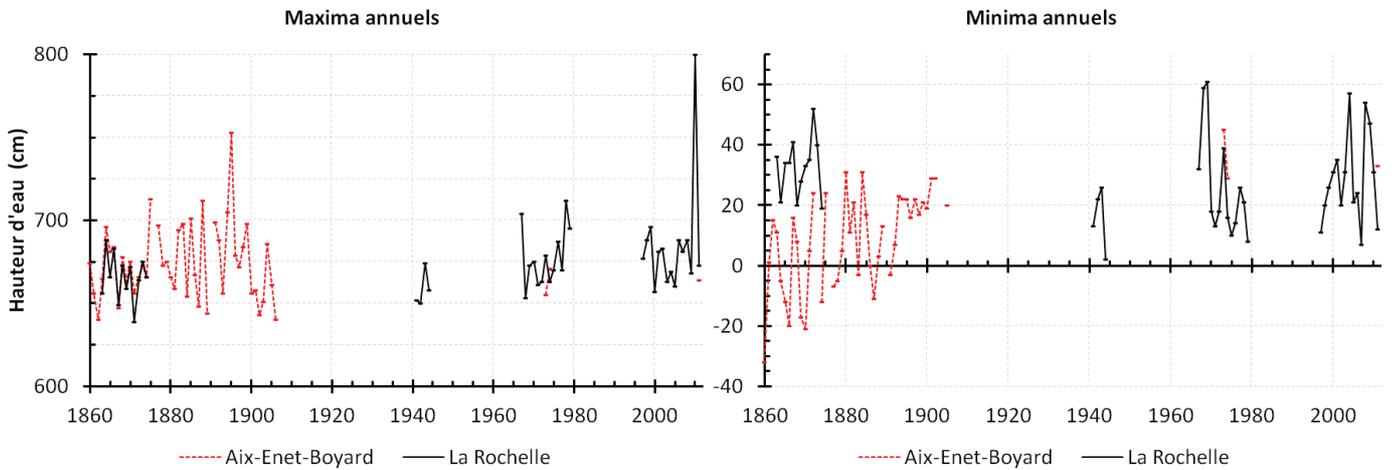
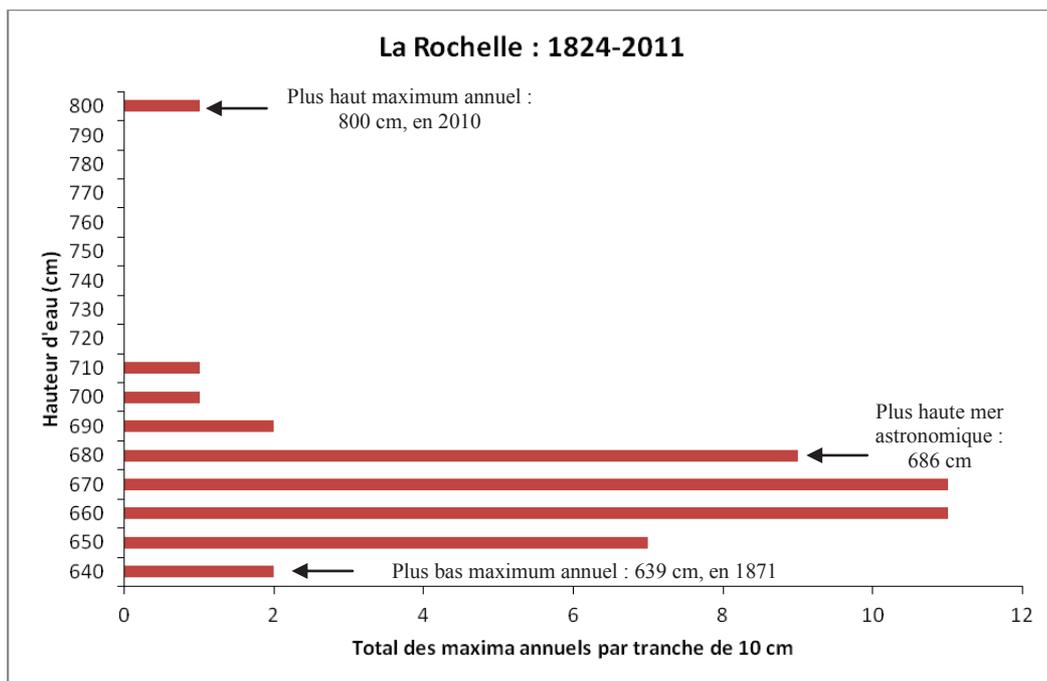


Figure VI-44 : Evolution des maxima et minima annuels du niveau marin à Aix-Enet-Boyard (rouge) et La Rochelle (noir) de 1860 à 2011 (par rapport au zéro hydrographique actuel de La Pallice).

	Tendances	
	Maxima annuels	Minima annuels
La Rochelle	+1,4 ±0,6 mm/an	-0,4 ±0,4 mm/an
Aix-Enet-Boyard	-1 ±1 mm/an	+3,1 ±0,7 mm/an

Tableau VI-20 : Tendances des maxima et minima annuels du niveau marin à Aix-Enet-Boyard et La Rochelle de 1860 à 2011.



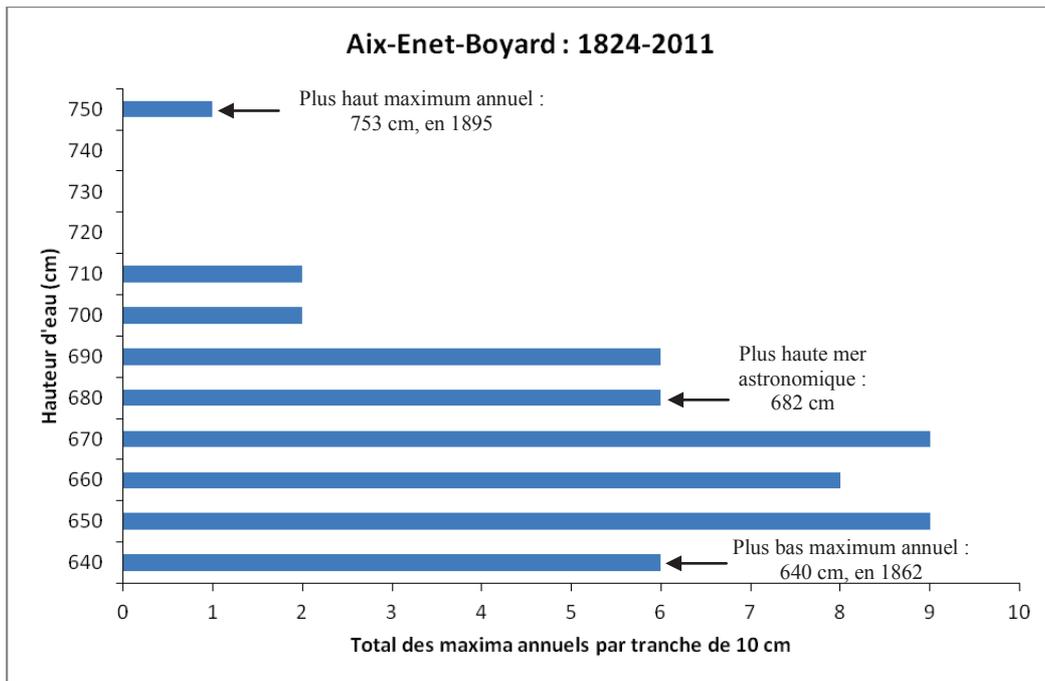


Figure VI-45 : Répartition des maxima annuels par tranche de 10 cm, et comparaison au niveau de plus haute mer astronomique.

Les tendances calculées pour les maxima et les minima montrent des résultats différents. Les tendances des maxima à Aix-Enet-Boyard et des minima à La Rochelle ne sont pas statistiquement différentes de zéro. En revanche, on observe une augmentation significative des maxima à La Rochelle ($+1,4 \pm 0,6$ mm/an) et des minima à Aix-Enet-Boyard ($+3,1 \pm 0,7$ mm/an). Mais ces tendances ne sont pas une bonne représentation de la variabilité naturelle des niveaux extrêmes, car elles sont fortement dépendantes d'événements ponctuels ou d'erreurs de mesures. C'est d'ailleurs la cause de ces tendances significativement positives. Le niveau d'eau atteint à La Rochelle lors de la tempête Xynthia (800 cm) en 2010 est plus élevé de 90 cm que ceux des autres années (attention, le nombre d'années étudié ici n'excède pas 40 ans, de 1863 à 2011) et provoque statistiquement une augmentation de la tendance sur la période considérée. De même, les minima annuels de 1902 à 1906 à Aix-Enet-Boyard sont faussés par le mauvais fonctionnement du puits de tranquillisation et le non-enregistrement des basses mers de vives-eaux (cf. V.4.5.2.2. *Etude de la stabilité des ondes de marée*). Cette première approche ne peut donc représenter correctement les variations des niveaux extrêmes. Nous allons donc utiliser une deuxième approche, l'analyse des centiles annuels.

Les centiles (en anglais : *percentile*) correspondent à des valeurs qui divisent un ensemble d'observations en cent parties égales. Le rang centile correspond à la proportion des valeurs d'une distribution inférieure ou égale à une valeur déterminée. Nous étudierons également les centiles réduits du niveau marin, c'est-à-dire les centiles corrigés de la valeur médiane (50^e centile), pour chaque année. De cette façon, nous retirons la variabilité du niveau moyen de la mer, pour ne conserver que la variabilité des niveaux extrêmes [e.g. Woodworth & Blackman, 2004]. Seuls les graphiques de l'évolution des centiles réduits sont représentés ici (figure VI-46), mais l'ensemble des résultats (centiles et centiles réduits) sur les tendances est présenté dans le tableau VI-21.

Centiles annuels : tendances (mm/an)				
	Simples		Réduits	
	La Rochelle	Aix-Enet-Boyard	La Rochelle	Aix-Enet-Boyard
99,9 ^e	+1,0 ±0,3	-0,4 ±0,6	-0,4 ±0,3	-0,9 ±0,6
99 ^e	+1,2 ±0,2	+0,1 ±0,4	-0,3 ±0,2	-0,4 ±0,3
95 ^e	+1,2 ±0,1	+0,3 ±0,3	-0,2 ±0,1	-0,2 ±0,2
50 ^e	+1,4 ±0,1	+0,5 ±0,2	-	-
5 ^e	+1,4 ±0,2	+1,2 ±0,4	0,0 ±0,2	+0,7 ±0,3
1 ^{er}	-0,3 ±0,3	+1,4 ±0,4	-1,7 ±0,3	+0,9 ±0,3
0,1 ^e	-1,0 ±0,4	+1,7 ±0,5	-2,5 ±0,4	+1,2 ±0,5

Tableau VI-21 : Tendances des centiles simples et réduits à La Rochelle et Aix-Enet-Boyard.

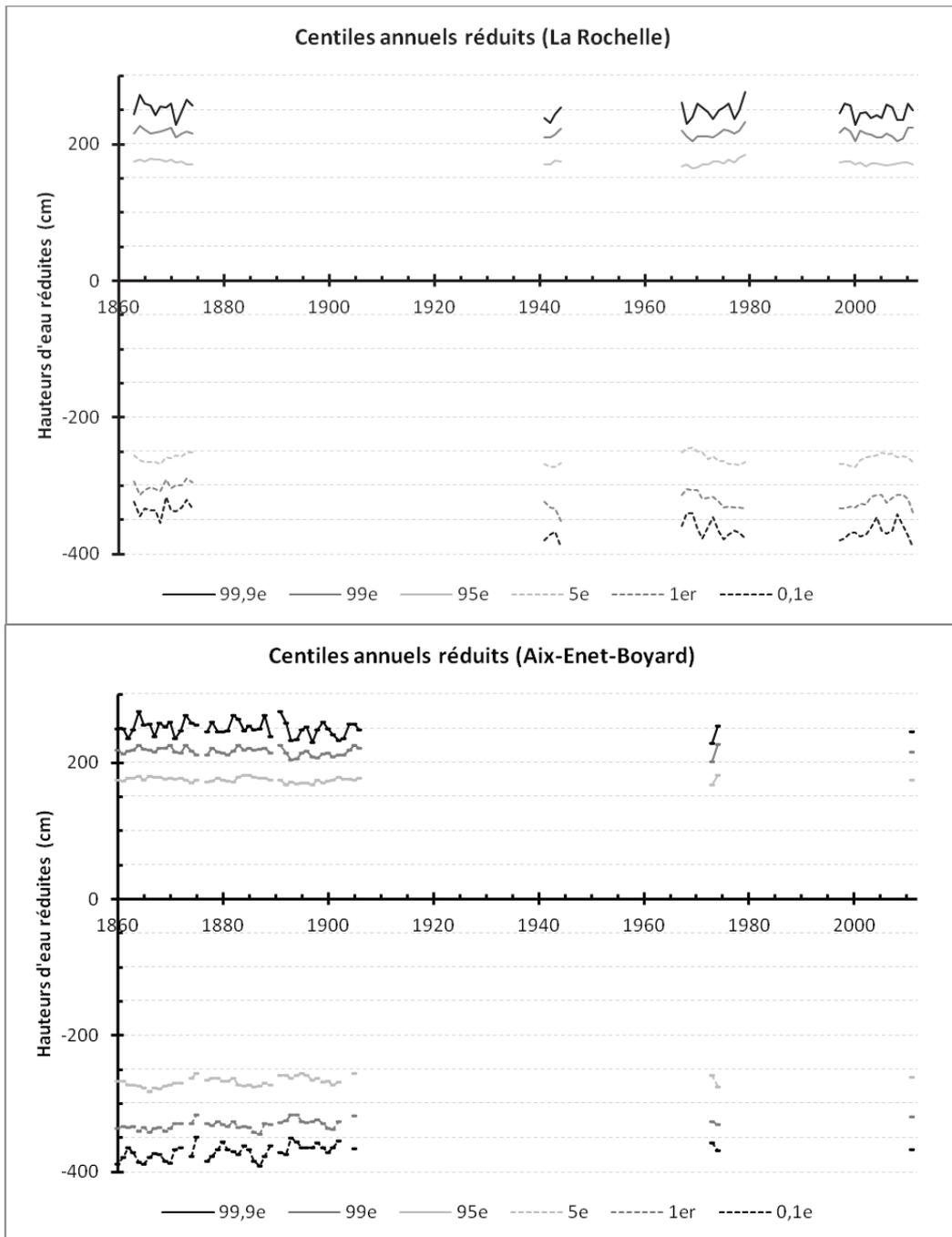


Figure VI-46 : Evolution des centiles annuels réduits à La Rochelle et Aix-Enet-Boyard (1860-2011).

Les tendances des 95^e, 99^e et 99,9^e centiles annuels simples à Aix-Enet-Boyard ne sont pas statistiquement différentes de zéro. En revanche, on note une augmentation significative des 5^e, 1^{er} et 0,1^e centiles, ce qui signifie que les niveaux extrêmes bas sont de plus en plus élevés dans la rade de l'île d'Aix. En revanche, à La Rochelle, les résultats sont plus contrastés. Les tendances des 95^e, 99^e et 99,9^e centiles annuels simples sont toutes significativement positives, tout comme celle du 5^e centile. On constate d'ailleurs que les valeurs observées sont très proches, voire identiques, à l'augmentation du niveau moyen de la mer observée à La Rochelle ($+1,41 \pm 0,09$ mm/an), représentée ici par le 50^e centile. A noter également que les plus basses hauteurs d'eau (0,1^e centile) ont une tendance à la baisse.

Nous venons de le voir, les tendances des niveaux extrêmes, déduites de l'analyse des centiles simples, sont cohérentes avec les tendances du niveau moyen de la mer, comme cela a déjà été démontré dans la littérature. L'analyse des centiles réduits nous permettra de se faire une idée plus précise de la variabilité propre aux niveaux extrêmes. A La Rochelle, comme dans la rade de l'île d'Aix, la tendance des plus hauts niveaux extrêmes (95^e, 99^e et 99,9^e) n'est pas statistiquement différente de zéro, signifiant que ces niveaux sont stables, voire en très légère diminution. Ces résultats sont cohérents avec ceux de Pirazzoli *et al.* [2000; 2006]. Par contre, les tendances des plus bas niveaux extrêmes (5^e, 1^{er} et 0,1^e) montrent des résultats opposés sur les deux sites : nette diminution à La Rochelle et nette augmentation dans la rade de l'île d'Aix. Faut-il y voir une variabilité naturelle ou une conséquence des conditions de mesure ? La question mérite d'être posée au vu des données et des résultats. On sait qu'il y a eu des problèmes fréquents d'envasement au Vieux port de La Rochelle, lors des mesures des hauteurs d'eau de 1863 à 1874. Il est probable que ce phénomène soit à l'origine de la diminution relative observée des plus bas niveaux extrêmes de ce port. Quant à la rade de l'île d'Aix, le faible nombre de points entre 1906 et 2011 incite à la prudence quant à la tendance calculée, d'autant plus que, comme à La Rochelle, des problèmes liés au puits de tranquillisation sont venus entacher d'erreurs les mesures réalisées au début du 20^e siècle au fort Boyard.

VI.3.3. Surcotes

L'analyse des niveaux extrêmes est parfois couplée à celle des surcotes. En effet, un niveau extrême peut être atteint lors d'une conjonction de plusieurs événements : marée de vives-eaux (proche de l'équinoxe), vent fort poussant la mer vers la côte, dépression atmosphérique, etc., et provoquer une submersion marine importante. Lors de ces événements, il est important de connaître la surcote atteinte, c'est-à-dire la différence de hauteur entre le niveau d'eau observé et le niveau d'eau prédit. Cette différence est appelée surcote lorsque le niveau observé est supérieur aux prédictions, et décote dans le cas contraire [Pineau-Guillou, 2008]. Les surcotes de pleine mer sont généralement inférieures à 30 cm sur le littoral charentais (comme 93% des surcotes de pleine mer enregistrées entre 1859 et 1909 à Enet-Boyard, *figures VI-47 et VI-48*), mais peuvent atteindre des niveaux beaucoup plus importants (surcote de pleine mer de 163 cm enregistrée le 6 mars 1885 au fort Boyard, *figure VI-50*).

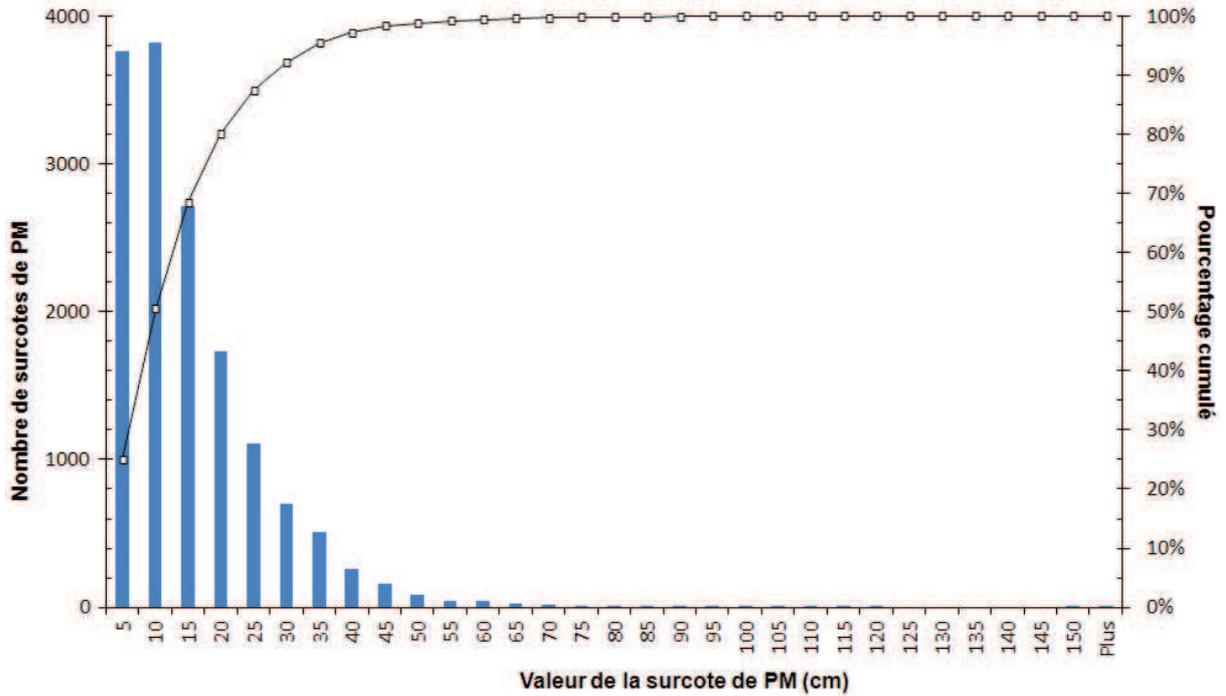


Figure VI-47 : Histogramme des surcotes de pleine mer enregistrées dans la rade de l'île d'Aix de 1859 à 1909, classées selon leur valeur.

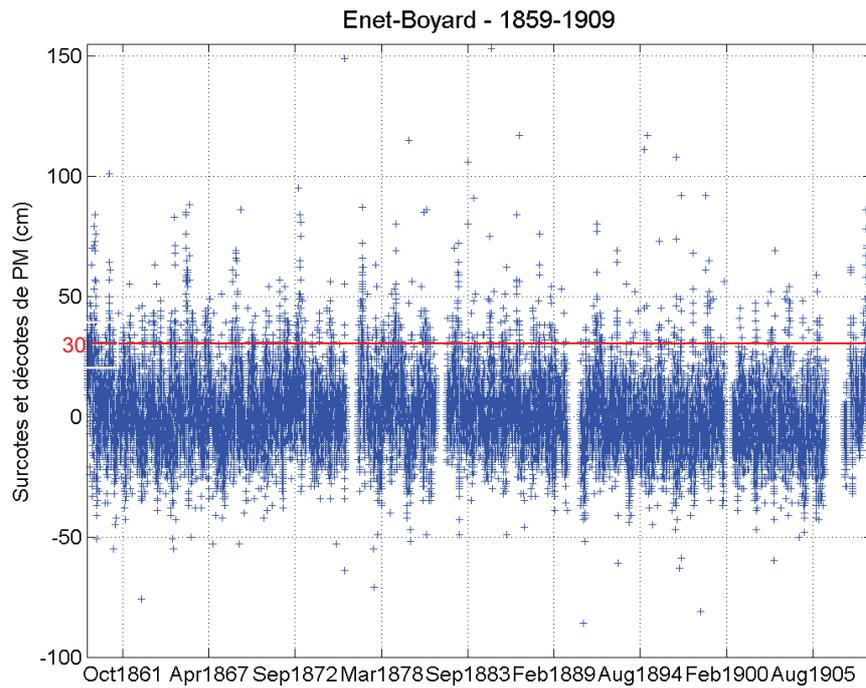


Figure VI-48 : Surcotes et décotes de pleine mer enregistrées dans la rade de l'île d'Aix, de 1859 à 1909.

L'apparition de surcotes étant intimement liée aux conditions météorologiques, il n'est pas anormal de constater (figure VI-49) que la plupart des surcotes surviennent lors de la période hivernale, d'octobre à mars.

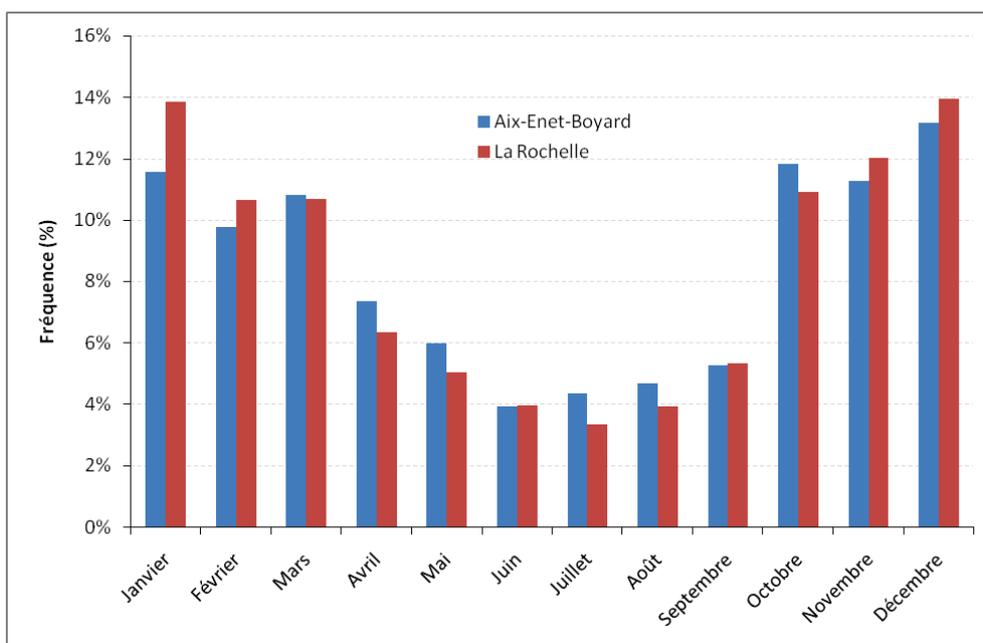


Figure VI-49 : Répartition mensuelle des surcotes supérieures ou égales à 20 cm sur le littoral charentais.

Les trois tableaux suivants présentent successivement, pour chacun des deux sites, les dix plus grandes surcotes horaires observées, les dix plus grandes surcotes de pleine mer observées, ainsi que les dix plus grandes hauteurs d'eau atteintes, de 1859 à 2011.

Aix-Enet-Boyard					La Rochelle				
Date			Surcote	Hauteur	Date			Surcote	Hauteur
1875	11 nov.	03h	154	676	2010	28 fév.	03h	155	800
1885	6 mars	06h	149	694	1943	12 janv.	12h	136	494
1879	20 fév.	12h	121	483	1866	11 janv.	11h	121	570
1876	14 nov.	19h	121	338	2009	24 janv.	05h	116	574
1880	18 nov.	18h	118	617	2002	13 nov.	23h	108	582
1879	4 déc.	18h	117	610	2006	8 déc.	07h	106	650
1895	11 fév.	05h	115	753	2000	6 nov.	03h	100	471
1896	6 déc.	14h	114	575	1872	10 déc.	13h	98	634
1894	12 nov.	15h	111	705	1867	26 juil.	03h	94	315
1883	2 sept.	15h	110	698	1865	28 nov.	05h	94	299

Tableau VI-22 : Classement, par ordre d'importance décroissant, des dix plus importantes surcotes horaires observées sur le littoral charentais, de 1859 à 2011.

Aix-Enet-Boyard					La Rochelle				
Date			Surcote	Hauteur	Date			Surcote	Hauteur
1885	6 mars	05h43	153	694	2010	28 fév.	02h59	151	800
1875	11 nov.	02h09	149	713	1866	11 janv.	11h26	111	570
1886	8 déc.	13h31	117	637	1872	10 déc.	12h42	96	634
1895	11 fév.	04h42	117	753	2006	8 déc.	06h01	90	650
1879	4 déc.	18h14	115	610	1869	3 avril	19h42	87	543
1894	12 nov.	14h48	111	705	1943	12 janv.	09h12	87	494
1896	6 déc.	16h39	108	644	2002	13 nov.	23h04	87	582
1883	2 sept.	15h16	106	698	1867	25 juil.	22h34	80	315
1860	11 déc.	01h42	101	674	1943	1 fév.	00h19	79	590
1872	10 déc.	12h56	95	635	2009	24 janv.	03h34	76	574

Tableau VI-23 : Classement, par ordre d'importance décroissant, des dix plus importantes surcotes de pleine mer observées sur le littoral charentais, de 1859 à 2011.

Aix-Enet-Boyard					La Rochelle				
Date			Surcote	Hauteur	Date			Surcote	Hauteur
1895	11 fév.	04h42	117	753	2010	28 fév.	02h59	151	800
1875	11 nov.	02h09	149	713	1978	11 janv.	05h16	57	712
1888	29 mars	04h33	76	712	1978	31 déc.	04h25	49	698
1894	12 nov.	14h48	111	705	1999	24 oct.	15h01	37	696
1885	1 fév.	04h45	75	701	1979	28 mars	03h38	34	695
1891	14 nov.	14h23	77	699	1864	9 mars	04h08	33	688
1883	2 sept.	15h16	106	698	1979	30 janv.	05h09	15	688
1899	12 fév.	04h50	48	698	1998	6 oct.	16h01	4	688
1877	1 janv.	04h53	87	697	2006	30 mars	04h00	20	688
1864	8 mars	03h55	44	696	2008	10 mars	05h13	39	688

Tableau VI-24 : Classement, par ordre d'importance décroissant, des dix plus importantes hauteurs d'eau atteintes sur le littoral charentais, de 1859 à 2011.

L'échantillonnage horaire des données n'est pas le plus adapté à l'étude et à la caractérisation des surcotes. Ces évènements ponctuels sont en effet brefs et ne durent parfois que quelques heures. Le maximum atteint par la surcote peut alors se situer en dehors de l'intervalle des mesures (1h). Par exemple, la surcote du 6 mars 1885 au fort Boyard, calculée à partir des hauteurs horaires est de 149 cm, alors que l'analyse des observations tous les quarts d'heure indique une surcote de pleine mer de 163 cm, soit 14 cm de plus (figure VI-50).

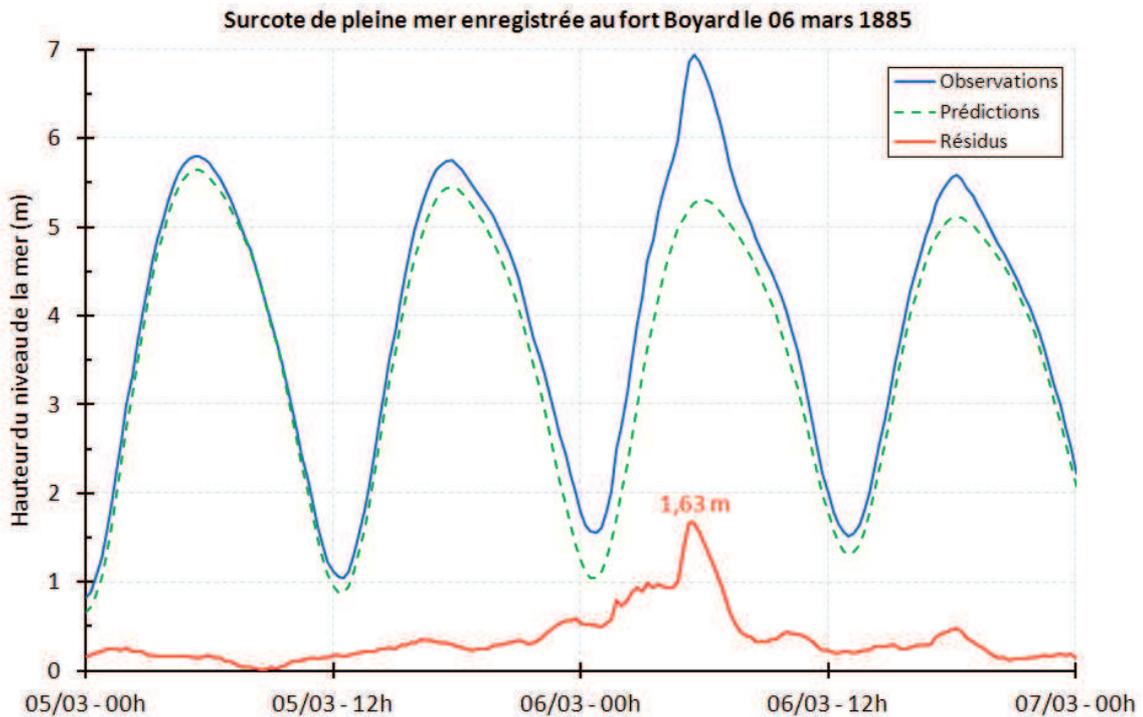


Figure VI-50 : Surcote de pleine mer (1,63 m) du 6 mars 1885 enregistrée au fort Boyard, calculée à partir des observations réalisées tous les quarts d'heure.

DISCUSSION GENERALE

Nous discutons, ici, de la possibilité de créer une série composite du niveau marin regroupant les séries de La Rochelle et d'Aix-Enet-Boyard pour former la série du pertuis d'Antioche. Puis, la tendance du niveau de la mer de cette nouvelle série est replacée dans un contexte européen et mondial. Enfin, nous verrons quel peut être l'apport de ces nouvelles données dans la problématique du cas Brest-Newlyn.

Peut-on construire une série composite du pertuis d'Antioche ?

Un des objectifs de ce travail de recherche était la construction de séries temporelles cohérentes du niveau marin sur le littoral charentais. C'est chose faite avec la construction des séries de La Rochelle, d'Aix-Enet-Boyard et de Cordouan (cf. *V.4. Séries du niveau de la mer*). Mais nous l'avons vu, l'analyse des tendances des composantes du niveau de la mer à partir de ces deux séries est rendue difficile par le faible nombre de valeurs, en regard de la période couverte. La série de La Rochelle ne possède que peu de valeurs au 19^e siècle et beaucoup plus dans la deuxième moitié du 20^e siècle. Au contraire, la série Aix-Enet-Boyard ne possède que très peu de valeurs au 20^e siècle, mais couvre 40 ans du 19^e siècle. On peut alors se poser la question de savoir s'il serait possible de mettre ces données en commun, et former ainsi une série composite La Rochelle-Aix-Enet-Boyard, que l'on pourrait appeler série du pertuis d'Antioche ? De cette façon, le nombre de données à disposition au 19^e et au 20^e siècle serait conséquent et une analyse de la tendance du niveau marin pourrait alors se faire avec une plus grande confiance. Nous allons donc analyser les différentes conditions préalables à une telle construction.

La distance séparant le site de La Rochelle de celui d'Aix-Enet-Boyard est d'environ 16 km (*figure DG-1*). La principale différence hydrodynamique entre les deux sites réside dans le fait que les mesures réalisées à La Rochelle se sont faites dans des lieux bien abrités de la houle, où les courants sont faibles, voire inexistants. Tandis que dans la rade de l'île d'Aix, les mesures ont été réalisées à l'abri de la houle (par l'intermédiaire de puits de tranquillisation), mais dans des environnements ouverts à la houle et où les courants sont plus importants qu'à La Rochelle. Il est probable que cette différence hydrodynamique entre les deux sites ait une influence sur la mesure instantanée du niveau d'eau. En revanche, il n'existe pas, à notre connaissance, de différence de température et de salinité entre les deux sites.

Concernant les conditions météorologiques, les champs de pression atmosphérique sont très larges, suffisamment pour que les variations de pression atmosphérique puissent être considérées comme identiques à La Rochelle et dans la rade de l'île d'Aix. De plus, la réponse locale du niveau marin à ces changements de pression est cohérente sur les deux sites, comme en témoigne les coefficients du

baromètre inverse calculés précédemment (cf. VI.3.1. *Le baromètre inverse*). Enfin, le vent est un autre paramètre météorologique pouvant avoir un impact non-négligeable sur les variations du niveau d'eau. De la même façon que pour les champs de pression atmosphérique, l'action du vent sur les deux sites peut être considérée comme similaire (cf. III.6.2. *Vent*).

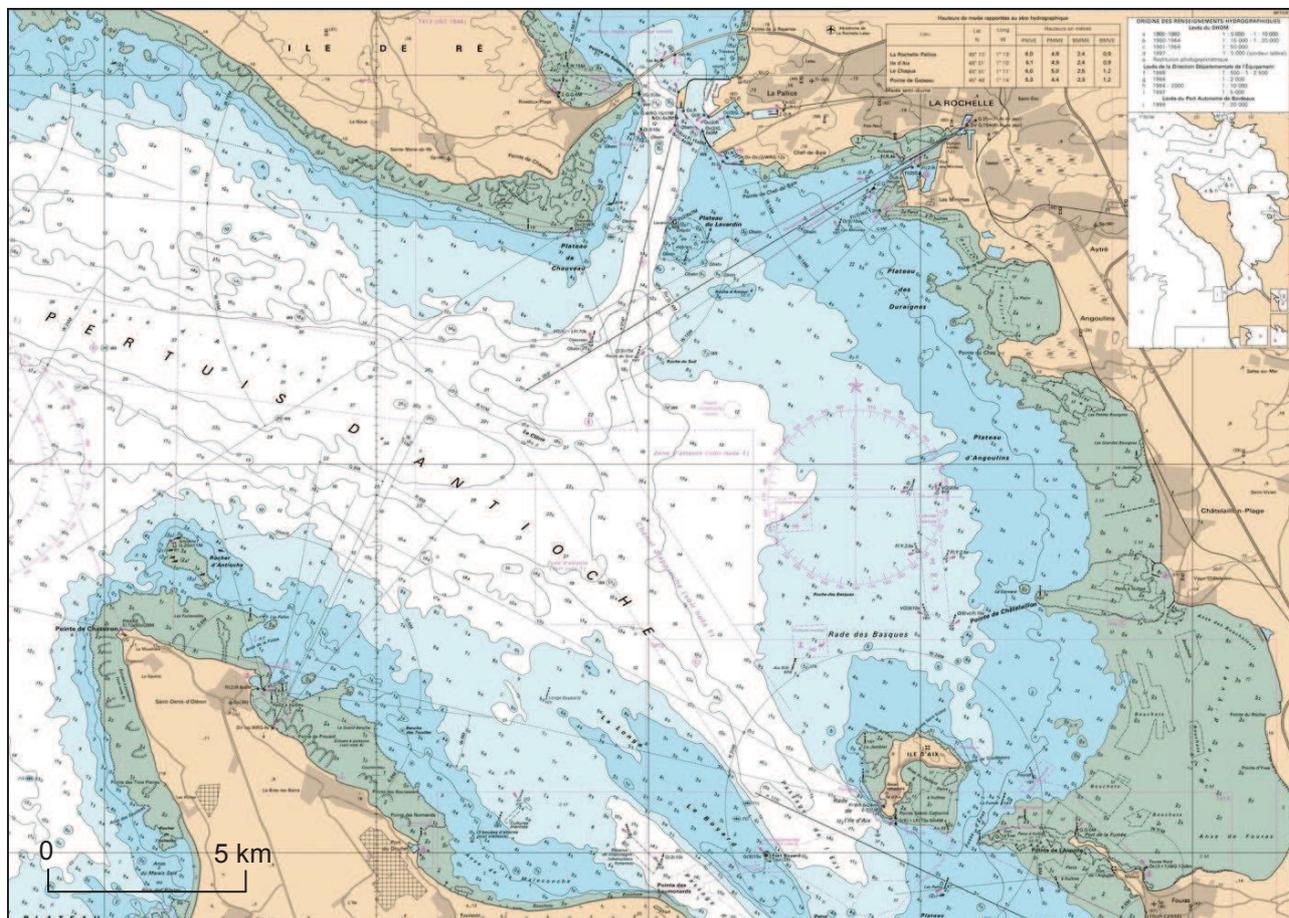


Figure DG-1 : Extrait de la carte bathymétrique n°7405 « De La Rochelle à la pointe de la Coubre » (publication 2001, convention n°25/2010, source : SHOM). En vert : zone intertidale ; en bleu foncé : profondeur comprise entre 0 et 5 m ; en bleu clair : profondeur comprise entre 5 et 10 m ; en blanc : profondeur supérieure à 10 m.

Nous l'avons vu, les caractéristiques de la marée sont très proches sur les deux sites (cf. VI.1.1.1. *Caractéristiques générales*). D'ailleurs, c'est une des raisons pour laquelle le SHOM considère qu'ils font partie de la même zone de marée [SHOM, 2011]. Il existe toutefois de très légères différences, notamment au niveau des amplitudes des composantes harmoniques. Elles sont en effet légèrement plus importantes dans la rade de l'île d'Aix qu'à La Rochelle. Par contre, les phases de ces mêmes composantes sont, elles, similaires, ce qui indique que les niveaux de pleine et basse mer sont atteints sur les deux sites quasi-simultanément. Quant à l'asymétrie tidale, elle est également un peu plus prononcée dans la rade de l'île d'Aix qu'à La Rochelle (cf. VI.1.1.2. *Asymétrie tidale*). Cette petite différence d'amplitudes va induire une légère différence sur les hauteurs d'eau instantanées entre les deux sites.

A priori donc, les hauteurs d'eau instantanées ne sont pas identiques sur les deux sites, en grande partie parce que l'amplitude des composantes harmoniques est plus importante dans la rade de l'île d'Aix

qu'à La Rochelle, et probablement aussi en raison de l'hydrodynamique locale qui diffère quelque peu sur les deux sites. Pour exemple, la *figure DG-2* présente les hauteurs d'eau mesurées simultanément à La Rochelle et dans la rade de l'île d'Aix le 14 juillet 1865.

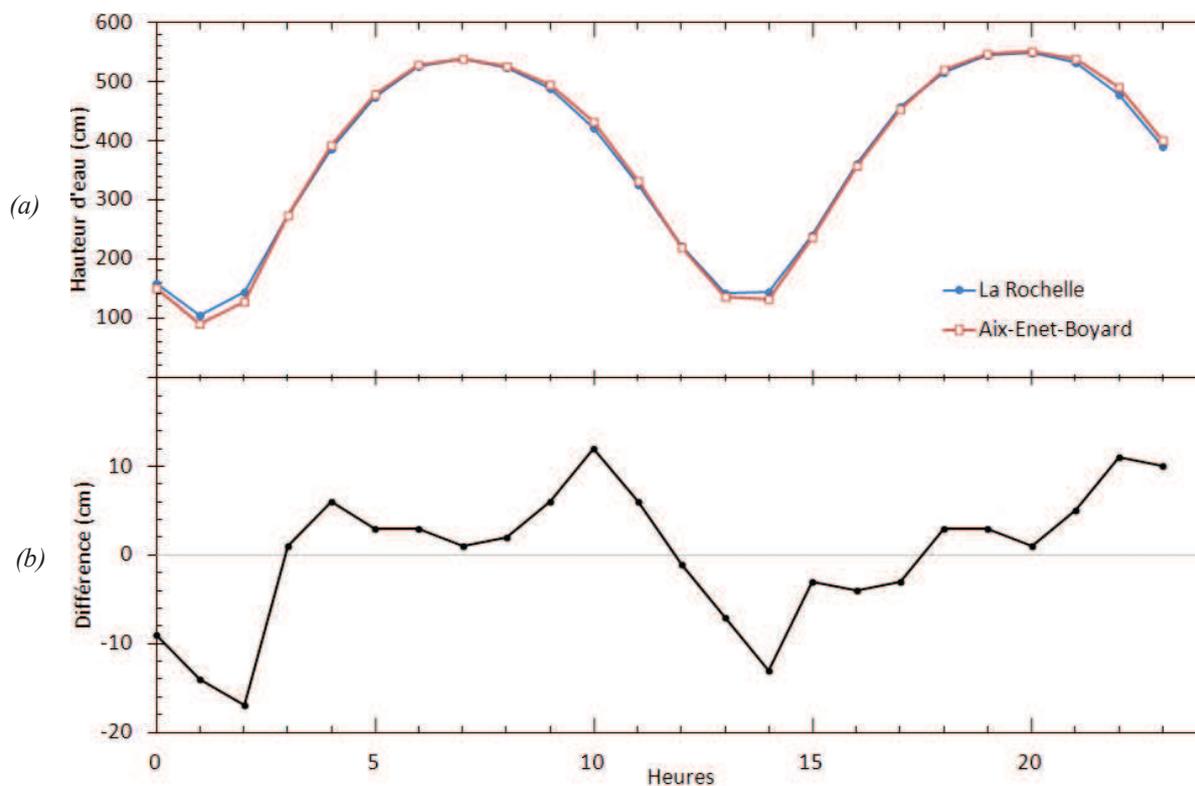


Figure DG-2 : (a) Hauteurs d'eau mesurées simultanément à La Rochelle (bleu) et à Aix-Enet-Boyard (rouge) le 14 juillet 1865. (b) Différence entre les courbes de hauteurs d'eau de la figure (a).

Ces différences empêchent donc de reconstruire une série composite à partir des hauteurs horaires. Mais le calcul de niveaux moyens permet d'atténuer ces différences, notamment en éliminant les composantes de la marée (cf. *I.2. Niveaux moyens*). Ainsi, nous pouvons prendre l'hypothèse que les moyennes mensuelles du niveau marin sont très proches sur les deux sites si elles ne sont soumises qu'à des forçages naturels et ne sont pas perturbées par des dysfonctionnements qui introduiraient des biais (différences de nature systématique). Nous avons voulu vérifier cette hypothèse à partir de la période commune 1863-1874, soit sur une période de 12 ans. Les deux autres périodes communes aux deux séries étant janvier 1973-mai 1974 et avril-mai 2011, pour un total de 13 moyennes mensuelles communes. La *figure DG-3* présente les anomalies du niveau marin pour nos deux séries (La Rochelle en noir, et Aix-Enet-Boyard en rouge), dont la méthode de calcul a été décrite précédemment (cf. *V.4.5.2.1. Comparaison avec une station proche ('Buddy checking')*). Globalement, les moyennes mensuelles des deux sites sont très proches, 80 % des différences d'anomalies représentées sur la *figure DG-3c* sont inférieures à 5 cm (*figure DG-4*). Par conséquent, nous pouvons envisager la construction d'une série composite dans le pertuis d'Antioche à partir des moyennes mensuelles du niveau marin des séries de La Rochelle et d'Aix-Enet-Boyard.

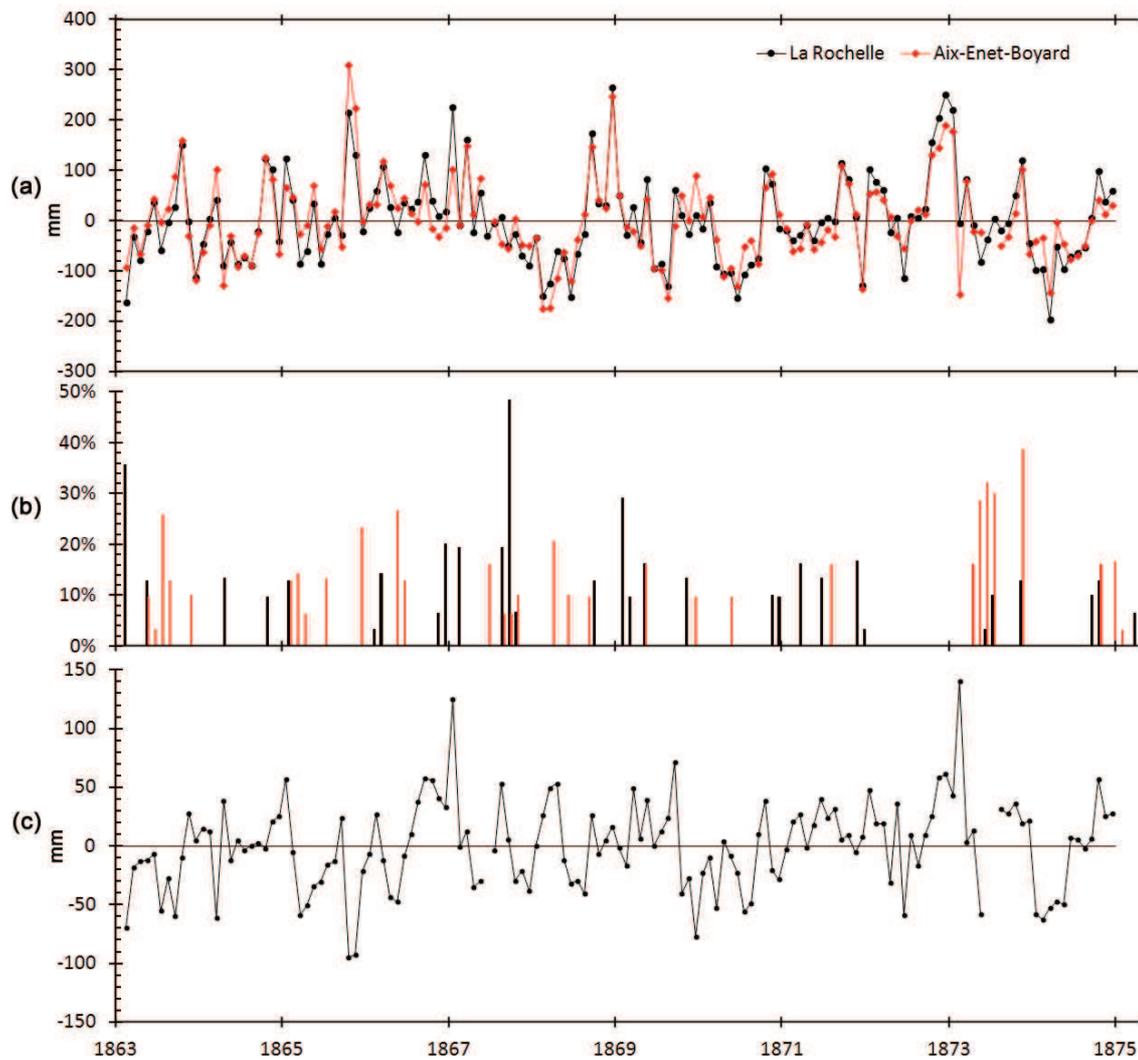


Figure DG-3 : (a) Anomalies mensuelles à La Rochelle (noir) et Aix-Enet-Boyard (rouge) par rapport au niveau moyen de la mer calculé sur la période 1863-1874. (b) Pourcentage de données manquantes par mois pour La Rochelle (noir) et Aix-Enet-Boyard (rouge). (c) Anomalies mensuelles de La Rochelle moins Aix-Enet-Boyard.

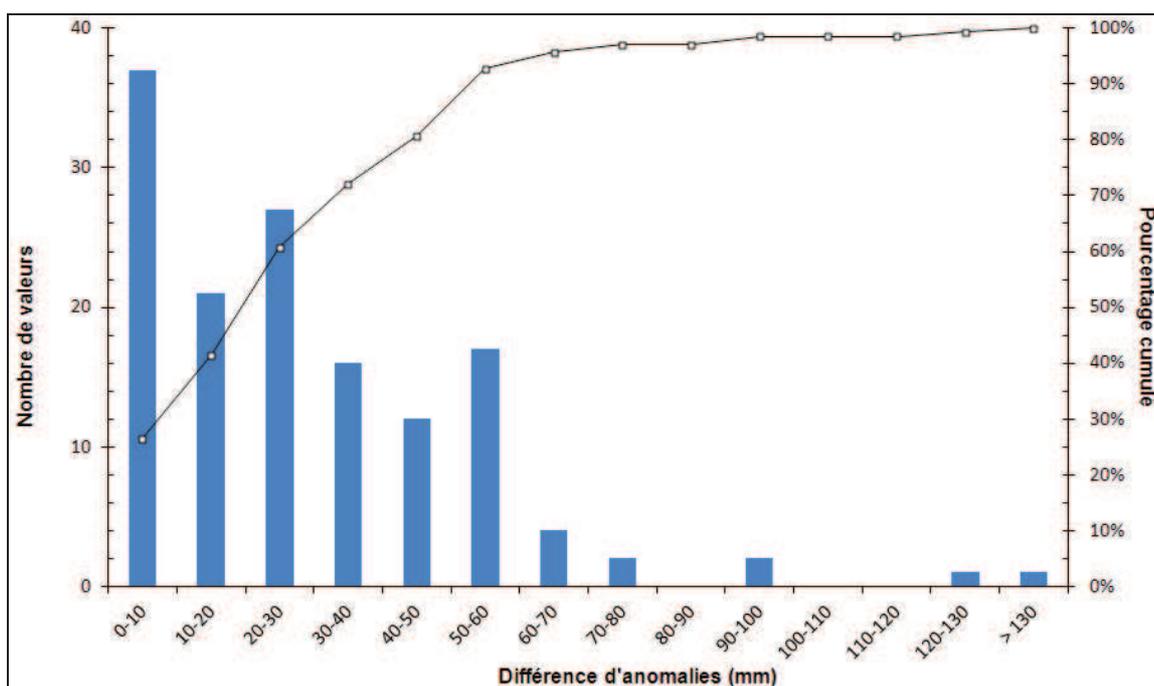


Figure DG-4 : Histogramme des différences d'anomalie représentées sur la figure DG-3c, classées par tranche de 10 mm.

Nous avons donc créé une nouvelle série composite du niveau marin, composée de moyennes mensuelles. Pour déterminer la valeur des moyennes mensuelles de la série composite, nous avons, pour chaque mois, soit pris la seule valeur disponible (ce cas représente environ 82% du total des moyennes), soit réalisé une moyenne pondérée des valeurs mensuelles de La Rochelle et d'Aix-Enet-Boyard. La pondération de cette moyenne étant le nombre de moyennes journalières par mois. La moyenne calculée tient ainsi compte des lacunes des mesures en donnant un poids moins important aux moyennes mensuelles qui comportent le plus de lacunes. Nous n'avons pas effectué ici de pondération liée à la qualité des moyennes mensuelles car l'ensemble des données de mauvaise qualité a été retiré préalablement suite au contrôle effectué (cf. V.4.5. *Contrôle qualité des séries temporelles*). Les moyennes utilisées ici sont donc *a priori* de bonne qualité. L'évolution des moyennes mensuelles et annuelles du MSL de la série du pertuis d'Antioche est présentée sur la *figure DG-5*.

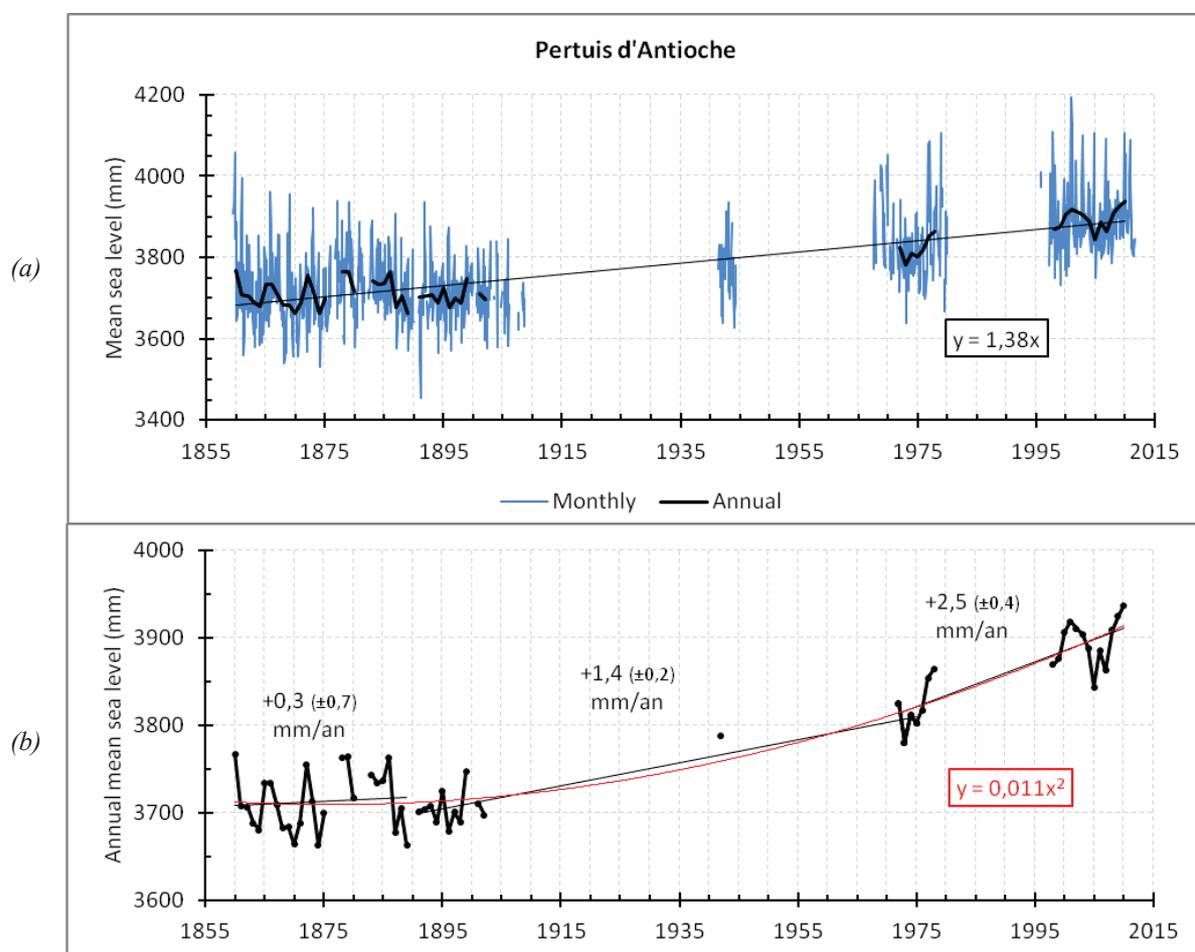


Figure DG-5 : Pertuis d'Antioche, 1860-2011 : (a) évolution des niveaux marins moyens (MSL) mensuels (bleu) et annuels (noir) ; (b) : gros plan sur le niveau moyen MSL annuel et accélération de l'élévation du niveau marin.

Afin d'intégrer quelques valeurs supplémentaires, nous avons réalisé le même exercice avec les moyennes mensuelles du MTL (*figure DG-6*). La méthode utilisée est la même que pour le MSL à une exception près : pour 1824, nous n'avons pris en compte que les moyennes mensuelles d'Aix-Enet-Boyard, et pas de La Rochelle, car ces dernières sont de mauvaise qualité en raison du non-enregistrement des basses mers de vives-eaux (cf. V.4.5.1.2. *Île d'Aix et La Rochelle Vieux port : 1824*).

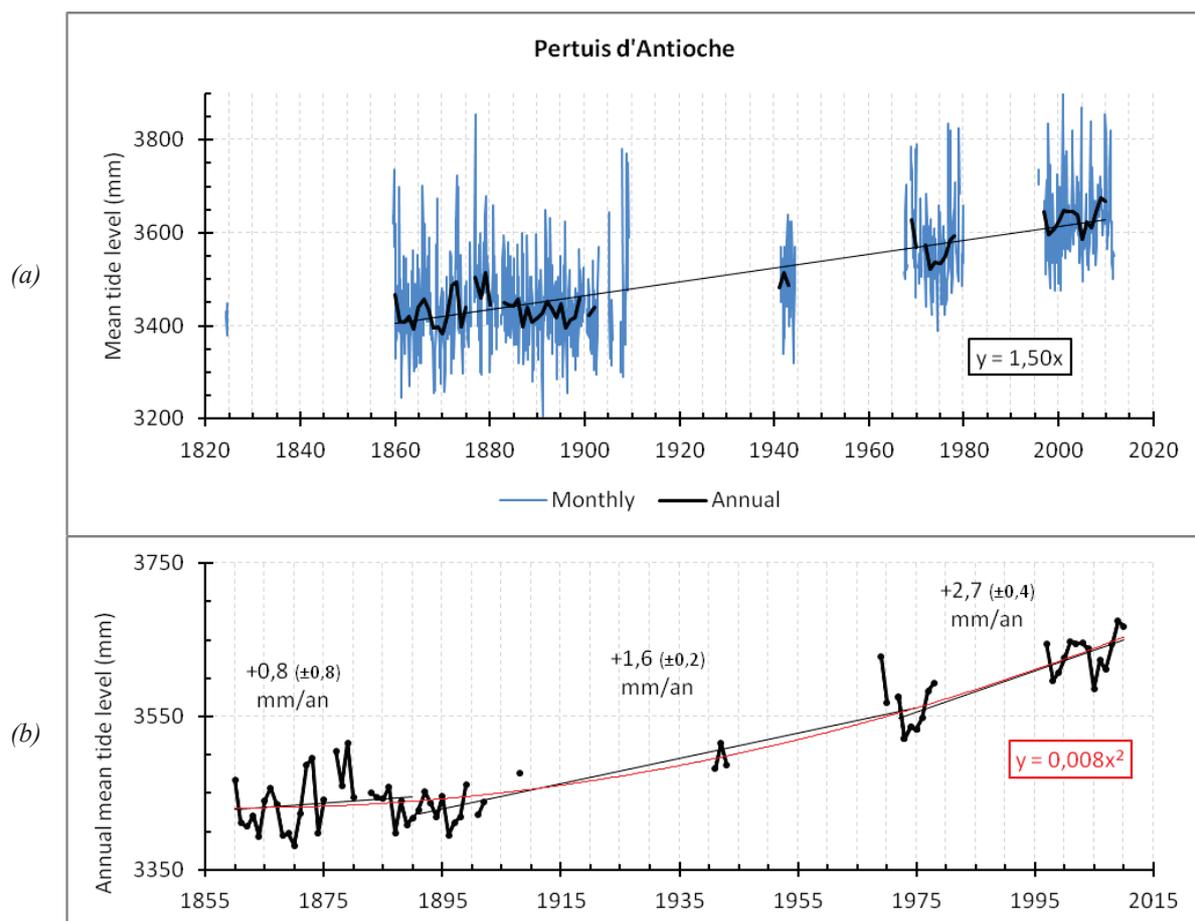


Figure DG-6 : Pertuis d'Antioche, 1824-2011 : (a) évolution des niveaux marins moyens MTL mensuels (bleu) et annuels (noir) ; (b) : gros plan sur le niveau moyen MTL annuel et accélération de l'élévation du niveau marin.

Comme le montre la *figure DG-5a*, la densité de valeurs est plus importante que lors de l'étude des tendances des séries de La Rochelle et d'Aix-Enet-Boyard, ce qui conduit à une plus grande confiance dans les résultats obtenus. Les tendances et écarts-types associés sont synthétisés dans le *tableau DG-1*.

	Pertuis d'Antioche			
	MSL		MTL	
	Tendance (mm/an)	Ecart-type (mm/an)	Tendance (mm/an)	Ecart-type (mm/an)
1860 - 2010	+ 1,38	0,08	+ 1,50	0,08
1860 - 1889	+ 0,3	0,7	+ 0,8	0,8
1891 - 1975	+ 1,4	0,2	+ 1,6	0,2
1975 - 2010	+ 2,5	0,4	+ 2,7	0,4

Tableau DG-1 : Tendances et écarts-types associés des niveaux moyens de la mer (MSL et MTL) dans le pertuis d'Antioche.

Entre 1860 et 2010, on constate une augmentation significative globale du MSL de $+1,38 \pm 0,08$ mm/an, et de $+1,50 \pm 0,08$ mm/an pour le MTL, en cohérence avec les tendances calculées précédemment, sur la même période (cf. VI.2. Niveaux marins moyens). A partir des données en présence

et de l'allure visuelle de la courbe, nous avons déterminé trois périodes différentes, comme le montre les figures DG-5b et DG-6b :

- 1860-1889 : stabilité du niveau marin (MSL : $+0,3 \pm 0,7$ mm/an)
- 1891-1975 : élévation du niveau marin (MSL : $+1,4 \pm 0,2$ mm/an)
- 1975-2010 : forte élévation du niveau marin (MSL : $+2,5 \pm 0,4$ mm/an)

Il y a donc une accélération de l'élévation du niveau marin, que l'on peut quantifier en appliquant une régression quadratique aux moyennes annuelles du pertuis d'Antioche. L'estimation de l'accélération de l'élévation du niveau marin est de l'ordre de $0,011$ mm/an² depuis 1860 à partir du MSL (figure DG-5b) et de l'ordre de $0,008$ mm/an² à partir du MTL (figure DG-6b). Le point d'inflexion, synonyme du début de l'accélération est estimé se situer vers la fin du 19^e siècle, aux alentours de 1890. Ce résultat est cohérent avec ceux de Wöppelmann *et al.* [2006] (point d'inflexion à Brest : 1890), Pouvreau [2008] (Brest : 1892), Wahl *et al.* [2011] (côte allemande : fin du 19^e siècle) et Kemp *et al.* [2011] (côte atlantique des Etats-Unis : entre 1865 et 1892).

Comparaison au contexte européen

Les tendances du MSL calculées pour le pertuis d'Antioche vont maintenant être comparées aux tendances de stations européennes. La station la plus proche sur la même période est celle de Brest (figure DG-7). Nos résultats sont cohérents avec ceux de Brest si l'on se réfère aux travaux de Wöppelmann *et al.* [2006] qui distinguaient également trois périodes dans la vitesse du niveau marin :

- 1807-1890 : $-0,09 \pm 0,15$ mm/an
- 1890-1980 : $+1,3 \pm 0,15$ mm/an
- 1980-2004 : $+3,0 \pm 0,5$ mm/an

Pouvreau [2008] a par la suite mis à jour les estimations de ces tendances, résultats qui se rapprochent encore un peu plus des nôtres :

- 1807-1892 : $+0,49 \pm 0,15$ mm/an
- 1892-1983 : $+1,28 \pm 0,15$ mm/an
- 1983-2004 : $+2,81 \pm 0,53$ mm/an

D'autre part, la tendance du niveau marin (MTL) au 19^e siècle a été estimée à $+0,42 \pm 0,18$ mm/an à Brest [Pouvreau, 2008] et à $+0,39 \pm 0,17$ mm/an à Liverpool [Woodworth, 1999b], révélant ainsi que l'élévation du niveau de la mer au 19^e siècle était faible. Ce résultat est cohérent avec l'estimation grossière que l'on peut faire visuellement en observant nos moyennes mensuelles du MTL depuis 1824 (figure DG-6a) et avec le calcul de la tendance du MTL pour le pertuis d'Antioche sur la période 1860-1901 : $+0,05 \pm 0,45$ mm/an.

Parmi les résultats marquants obtenus, le niveau moyen de la mer (MSL) s'est élevé de $+1,38 \pm 0,08$ mm/an dans le pertuis d'Antioche sur la période 1860-2010. Ce résultat est cohérent avec Brest ($+1,32 \pm 0,07$ mm/an, *tableau DG-2*) et Liverpool ($+1,23 \pm 0,12$ mm/an, période : 1858-1997 [Woodworth, 1999a]), et avec les récents résultats suggérant que l'élévation du niveau marin sur les côtes atlantiques européennes est moins importante qu'au niveau mondial ($+1,7 \pm 0,3$ mm/an, période : 1870-2004 [Church & White, 2006]). Le nombre de séries du niveau marin débutant en 1860 étant faible (cf. *figure II-15*), les stations les plus proches pour lesquelles une comparaison des tendances peut être réalisée sont Brest et Liverpool. Nous avons toutefois répertorié quelques autres stations européennes pour lesquelles des mesures existent depuis 1860 (*tableau DG-2* et *figure DG-7*).

1860-2010				
Station	Tendance (mm/an)	Période	Durée (an)	Lacunes
Stockholm	$-3,85 \pm 0,12$	1860-2000	141	0%
Swinoujscie	$+1,08 \pm 0,09$	1860-1999	140	4,3%
Cuxhaven	$+2,63 \pm 0,10$	1860-2008	149	0%
Sheerness	$+1,93 \pm 0,10$	1850-2006	157	54,8%
Liverpool	$+1,44 \pm 0,13$	1860-2007	148	33,8%
Brest	$+1,32 \pm 0,07$	1861-2010	150	10,0%
Pertuis d'Antioche	$+1,38 \pm 0,08$	1860-2010	151	61,6%
Trieste	$+1,13 \pm 0,01$	1875-2004	130	?

Tableau DG-2 : Tendances et écarts-types associés du MSL de quelques stations européennes, de 1860 à 2010 (calculés à partir des données du PSMSL).

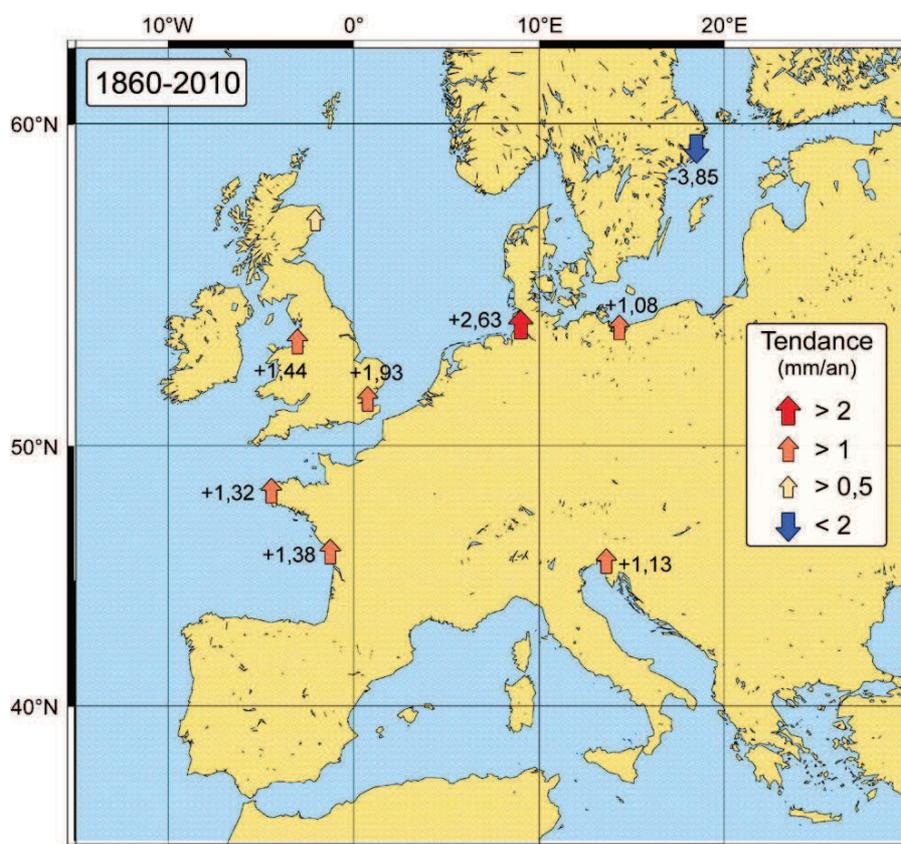


Figure DG-7 : Tendances de quelques stations européennes sur la période 1860-2010, issues du *tableau DG-2*. Le code couleur des flèches est repris de celui du PSMSL.

Enfin, nous avons répertorié dans le *tableau DG-3* les tendances du 20^e siècle de quelques stations européennes. Malgré le faible nombre de moyennes annuelles au 20^e siècle pour la série du pertuis d'Antioche (14 valeurs, soit 86% de lacunes entre 1899 et 2000), nous avons également calculé sa tendance, mais il convient d'être prudent quant à son interprétation.

20 ^e Siècle					
Station	Tendance (mm/an)	Période	Durée (an)	Lacunes	Source
Helsinki	-2,16 ± 0,23	1900-2000	101	0%	PSMSL
Stockholm	-3,89 ± 0,20	1900-2000	101	0%	PSMSL
Oslo	-3,98 ± 0,25	1916-2000	85	8,2%	PSMSL
Klaipeda	+1,33 ± 0,22	1900-2000	101	8,9%	PSMSL
Cuxhaven	+2,53 ± 0,18	1900-2000	101	0%	Wahl <i>et al.</i> [2011]
Vlissingen	+2,04 ± 0,11	1900-2000	101	0%	PSMSL
Sheerness	+2,36 ± 0,09	1901-2006	106	44,3%	Woodworth [2009b]
North Shields	+1,84 ± 0,12	1900-2000	101	13,9%	Woodworth [2009b]
Aberdeen	+0,94 ± 0,07	1901-2006	106	9,4%	Woodworth [2009b]
Liverpool	+1,32 ± 0,21	1900-2001	102	34,3%	Woodworth [1999a]
Newlyn	+1,65 ± 0,11	1916-2000	85	0%	Araújo [2005]
Royaume-Uni	+1,4 ± 0,2	1901-2006	-	-	Woodworth [2009b]
Brest	+1,32 ± 0,12	1900-2000	101	11,9%	Pouvreau [2008]
Pertuis d'Antioche	+1,58 ± 0,20	1899-2000	102	86,3%	<i>cette étude</i>
Cascais	+1,55 ± 0,11	1900-1993	94	11,7%	PSMSL
Marseille	+1,22 ± 0,11	1901-2000	100	8,0%	Woodworth [2003]
Gênes	+1,16 ± 0,12	1901-1992	92	27,2%	Woodworth [2003]
Venise	+2,40 ± 0,46	1909-2000	92	8,9%	PSMSL
Trieste	+1,14 ± 0,13	1905-2000	96	6,3%	Woodworth [2003]

Tableau DG-3 : Tendances et écarts-types associés du MSL de quelques stations européennes, au 20^e siècle.

Pour une meilleure lisibilité des résultats, nous avons replacé les tendances du *tableau DG-3* sur une carte géographique de l'Europe (*figure DG-8*). Les stations les plus proches du pertuis d'Antioche sont Brest, Newlyn et Liverpool au nord, et Cascais au sud. Compte tenu du faible nombre de valeurs utilisées pour le calcul de la tendance, il est difficile d'interpréter le chiffre de $+1,58 \pm 0,20$ mm/an d'élévation du niveau marin dans le pertuis d'Antioche. On peut toutefois remarquer que la tendance de Cascais ($+1,55 \pm 0,11$ mm/an) est identique à celle du pertuis d'Antioche, et qu'en tenant compte des écarts-types, celles de Brest, Newlyn et Liverpool ne sont pas statistiquement différentes.

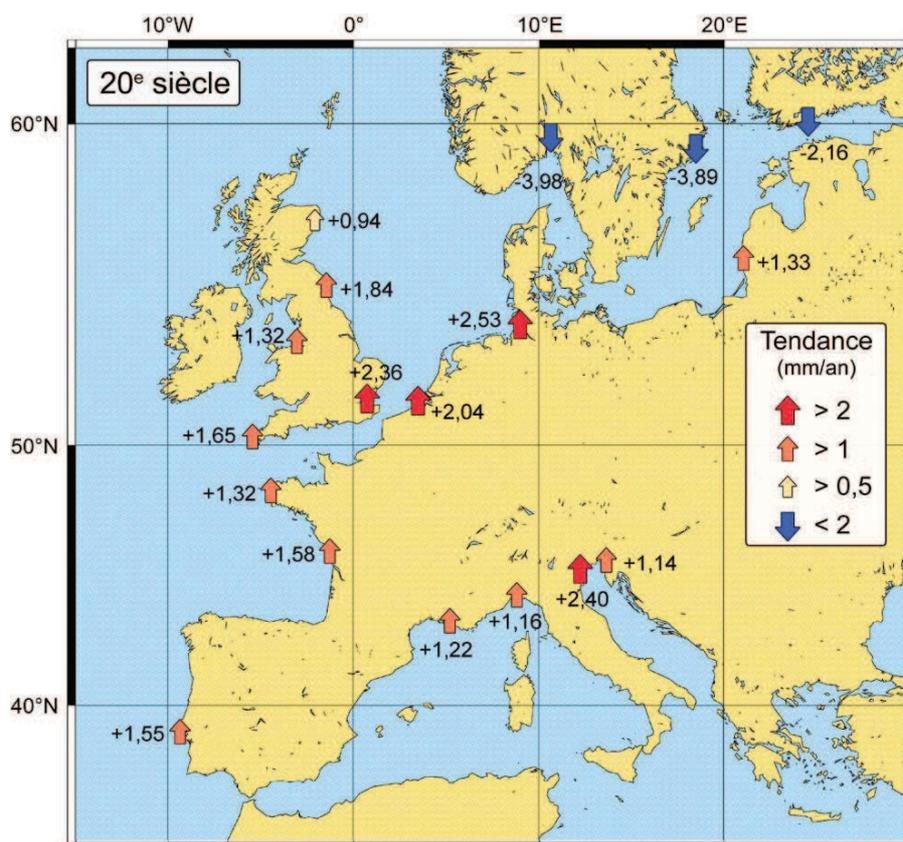


Figure DG-8 : Tendances de quelques stations européennes au 20^e siècle, issues du tableau DG-3. Le code couleur des flèches est repris de celui du PSMSL.

Le cas Brest-Newlyn

La série du niveau marin de Brest est le plus long enregistrement du niveau de la mer répertorié dans la base de données du PSMSL [Woodworth & Player, 2003]. Elle est, de plus, beaucoup utilisée dans les études scientifiques (au moins 120 publications scientifiques, faisant référence à cette série, répertoriée par Pouvreau [2008]). La question de la qualité de cette série est alors primordiale. En comparant les moyennes annuelles de la série de Brest à celles de Newlyn, Douglas [2001] a suggéré qu'il existe une discontinuité dans la référence verticale de la série de Brest (de l'ordre de 2 cm), suite au bombardement de la ville en 1944. Selon lui, cela expliquerait la différence des tendances des deux stations au 20^e siècle ($+1,32 \pm 0,12$ mm/an à Brest et $+1,65 \pm 0,11$ mm/an à Newlyn) alors même que cette différence est difficile à expliquer compte tenu que ces deux stations sont situées à environ 200 km l'une de l'autre et qu'il n'y a pas d'indice géologique permettant de penser à un mouvement vertical terrestre différent pour les deux sites. D'après la formule de van Onselen [2000] (p. 187), un saut de 2 cm provoquerait un écart de 0,3 mm/an sur la tendance de Brest au 20^e siècle. Ainsi, en corrigeant ce saut, les tendances de Brest et de Newlyn deviendraient statistiquement identiques. Or, Wöppelmann *et al.* [2008] ont démontré que la référence verticale du marégraphe de Brest n'avait pas subi de discontinuité, en se basant sur l'analyse de la position de repères de marée sur plus d'un siècle (cf. figure II-9). D'autre part, la tendance de Brest au 20^e siècle ne semble pas aberrante au regard de la tendance calculée pour les côtes

britanniques par Woodworth [2009b] : $+1,4 \pm 0,2$ mm/an. Il semblerait même que ce soit la série de Newlyn qui soit atypique dans ce contexte. Que peuvent apporter nos données inédites à ce débat ?

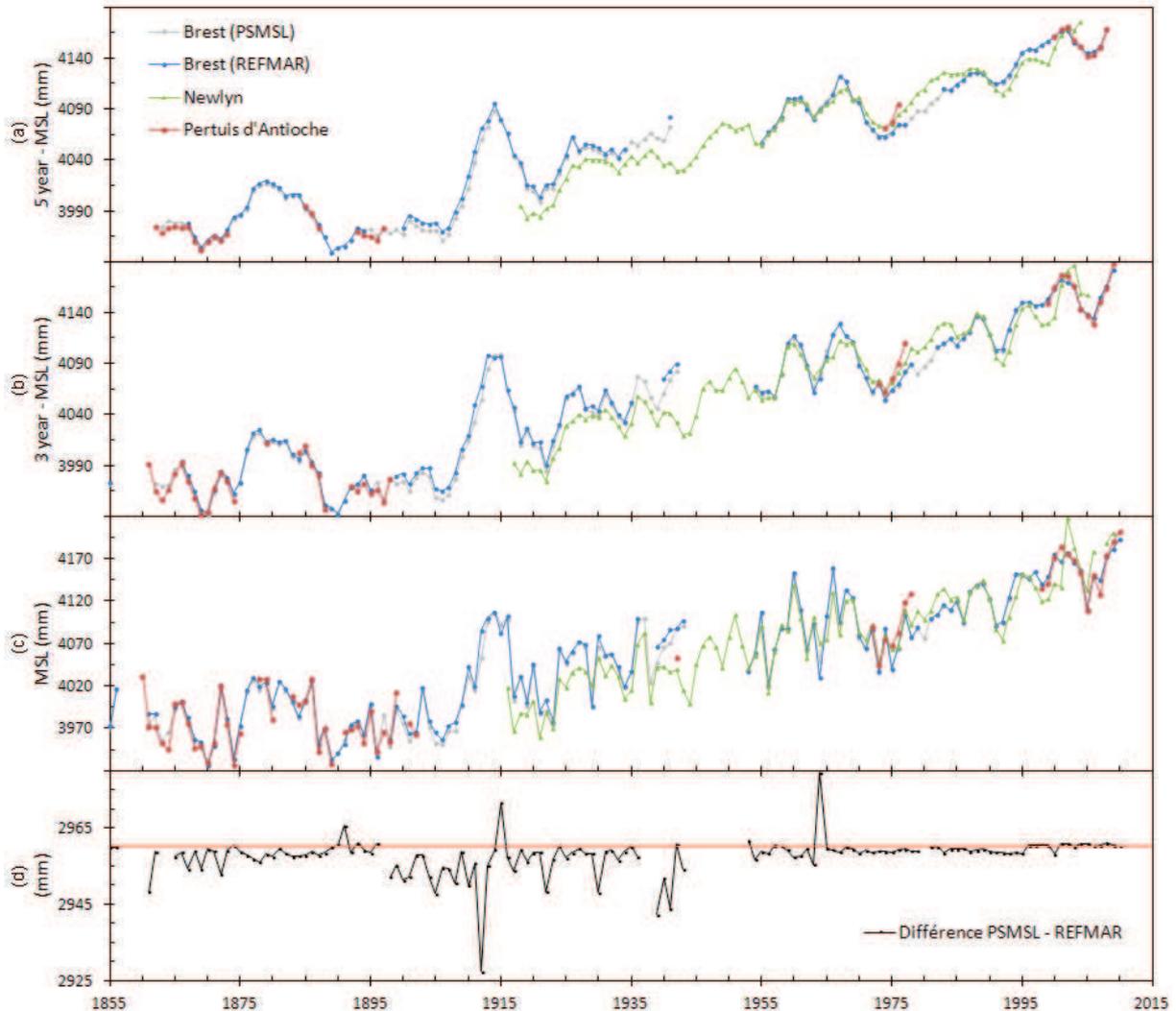


Figure DG-9 : (a) Moyennes annuelles mobiles sur 5 ans du MSL. (b) Moyennes annuelles mobiles sur 3 ans du MSL. (c) Moyennes annuelles du MSL. (d) Différence des moyennes annuelles du MSL de la série de Brest (PSMSL) – Brest (REFMAR-SONEL). Les séries de Newlyn et du Pertuis d'Antioche ont été décalées d'une valeur constante de telle sorte que la moyenne de ces deux séries après 1944 (Newlyn) et après 1995 (Pertuis d'Antioche) concordent avec celle de Brest sur la même période.

La *figure DG-9* présente les moyennes annuelles du MSL pour Brest, Newlyn et le pertuis d'Antioche sur la période 1855-2010. La *figure DG-9a* présente l'évolution des moyennes mobiles sur 5 ans, reprenant le principe du graphique de Wöppelmann *et al.* [2008] (cf. *figure II-9*), et en y ajoutant notre série inédite. Autre point de différence, mais très important, les moyennes annuelles de Brest utilisées ne sont pas celles fournies par le PSMSL, mais celles que nous avons calculés à partir des hauteurs horaires fournies par REFMAR (SONEL). Les valeurs annuelles ne sont en effet pas identiques selon les deux jeux de données. La *figure DG-9d* présente la différence entre les moyennes annuelles issues du PSMSL et les moyennes annuelles que nous avons calculées à partir de REFMAR (SONEL). Si les jeux de mesures étaient identiques, la différence serait constante, ce qui n'est pas le cas ici. Il existe des différences variant de -3 à +2 cm. De plus, des valeurs annuelles sont présentes dans le jeu de

données du PSMSL et absentes de celui de REFMAR (SONEL) : 1863-1864, 1897, 1937-1938 et 1980. D'après les informations fournies par le PSMSL, seule l'année 1980 est indiquée comme ayant été calculée après interpolation, ce qui explique qu'elle ne soit pas présente dans les moyennes calculées avec nos propres scripts puisque nous n'avons interpolé aucune moyenne. Cette explication ne peut s'appliquer aux valeurs de 1937 et 1938. Or la présence de ces deux moyennes dans le jeu de données du PSMSL empêche de s'apercevoir d'un arrêt dans la mesure du niveau de la mer à cette période, comme le montre les figures DG-9a et b. La figure DG-9c montre que les moyennes annuelles du niveau marin entre 1939 et 1943 semblent en décalage avec celles de Newlyn et du pertuis d'Antioche. Il est donc possible qu'il existe un saut dans la série de Brest entre 1939 et 1943, période qui correspond au contrôle du marégraphe par l'occupation allemande, lors de la seconde guerre mondiale. Peut-être existe-t-il un lien ?

Concernant la période 1915-1936, pour laquelle Douglas a également détecté un décalage de la référence verticale, notre série inédite du pertuis ne peut apporter un regard neuf car il n'existe pas de données à cette période pour le pertuis d'Antioche. En revanche, on peut remarquer la très bonne concordance des moyennes annuelles de Brest et du pertuis entre 1860 et 1902, soit à une période antérieure à celle de 1915-1936. Cette observation renforce un peu plus l'idée que la série de Brest ne semble pas avoir subi de saut au début du 20^e siècle, ou alors ce saut ne serait intervenu qu'après 1902, ce que nous ne pouvons pas analyser ici.

L'expérience acquise lors de ces travaux de recherche nous a montré qu'un saut pouvait se produire dans une série du niveau marin après une panne de l'appareil par exemple pour les marégraphe à flotteur, lorsque l'on remplace le fil reliant le flotteur au tambour enregistreur. Dans ce cas, si la longueur du nouveau fil n'est pas identique à la précédente, cela se traduit par un saut dans les mesures. De fait, la position du zéro du marégraphe change sans que cela ne soit forcément noté dans le registre par l'observateur, surtout si ce changement paraît peu important (de l'ordre du centimètre par exemple). Dès lors, il est difficile de pouvoir détecter un tel saut, même en analysant la position temporelle des repères de marée auxquels est relié le zéro du marégraphe. Cette hypothèse peut être vérifiée en parcourant les registres de marée de Brest à la recherche de pannes ou de tout autre arrêt du marégraphe, puis en effectuant une comparaison plus fine autour de la période de l'arrêt du marégraphe (à partir de moyennes journalières) par « *buddy checking* » entre Brest et Newlyn. L'étude des moyennes annuelles paraît en effet, ici, trop grossière : un arrêt du marégraphe de quelques jours ne peut se voir, car il n'empêche pas le calcul d'une moyenne mensuelle puis d'une moyenne annuelle du niveau marin.

Enfin, il serait intéressant de numériser de nouvelles séries historiques du niveau marin, proches de Brest, et qui possèderaient des mesures depuis 1915, par exemple : Lorient (1930-1936), Saint-Nazaire (1915-1920).

CONCLUSION

L'objectif principal de ces travaux de recherche était la construction de séries temporelles de la rade de La Rochelle, de celle de l'île d'Aix et du phare de Cordouan, à partir de lots de données hétérogènes, certains inédits pour la communauté scientifique et retrouvés dans les archives historiques. Puis un objectif plus ambitieux était de reconstruire une série composite du pertuis d'Antioche à partir des séries des rades de La Rochelle et de l'île d'Aix. Mais ces reconstructions ont nécessité de nombreuses étapes préalables.

Tout d'abord, le chapitre IV a permis de dresser un historique détaillé de la position du zéro hydrographique dans trois zones différentes : La Rochelle, l'île d'Aix et le phare de Cordouan. Nous avons constaté que, malgré sa vocation à être pérenne, le zéro hydrographique a souvent été redéfini depuis le début du 19^e siècle. Parfois les redéfinitions étaient volontaires, en s'appuyant sur de nouvelles campagnes hydrographiques (qui apportaient une meilleure estimation de sa réalisation selon leurs auteurs). Parfois, on peut se poser la question de savoir si la redéfinition était un acte involontaire en s'appuyant sur des documents d'archive différents. La définition du zéro utilisé n'était ainsi pas toujours la plus récente, ce qui révèle probablement un problème d'archivage et d'accès aux documents définissant le zéro hydrographique.

Nous avons également mis en évidence l'importance de consulter les registres de marée originaux ainsi que d'autres documents d'archives inhérents à l'observatoire marégraphique pour comprendre et expliquer des anomalies observées dans les données numérisées. Ces documents comportent en effet de nombreuses et précieuses annotations laissées par les observateurs. Par exemple, les lacunes de plusieurs mois observées dans la série du fort Boyard correspondent presque systématiquement à la difficulté des autorités à recruter un observateur acceptant les conditions de vie extrêmement difficiles de ce fort en pleine mer. Ces observations confirment toute l'importance qu'il s'agit d'accorder aux données contextuelles (ou métadonnées) qui contiennent la description des données du niveau marin, comme le soulignait déjà Woodworth [2006].

Nos travaux de recherche ont permis la construction de trois nouvelles séries temporelles de pression atmosphérique : Brest (1876-1884), La Rochelle (1863-1872) et Enet-Boyard (1860-1909). Le contrôle qualité effectué sur ces séries a révélé qu'elles sont toutes les trois de très bonne qualité. De plus, elles sont particulièrement intéressantes dans le panorama des séries françaises, puisque deux d'entre elles (Enet-Boyard et La Rochelle) possèdent des mesures dans la période 1860-1870, alors que BDCLIM, la base de données officielle de Météo-France, n'en compte que dix au niveau national pour cette même période. En outre, la série Enet-Boyard (47 ans) devient la quatrième série française en termes de durée

effective de mesures sur la période 1800-1909, derrière Rochefort (81 ans), Lyon (54 ans) et Brest (51 ans). Dans un contexte plus général, ces travaux de recherche ont aussi permis de mettre en évidence l'existence d'un grand potentiel de mesures de pression atmosphérique encore inexploité dans les archives du SHOM. Ces mesures, si elles venaient à être numérisées, pourraient considérablement enrichir la base de données existante, BDCLIM, et permettre ainsi une meilleure précision dans la reconstruction des champs de pression sur la France au 19^e siècle.

Nos travaux ont également permis la construction de trois nouvelles séries temporelles du niveau marin : La Rochelle (1775-auj.), Aix-Enet-Boyard (1824-auj.) et Cordouan (1812-1994), ainsi que la reconstruction d'une série composite du pertuis d'Antioche (1775-auj.), englobant les séries de La Rochelle et Aix-Enet-Boyard. Ce long et soigneux travail de construction a conduit à la production de fichiers numériques des séries temporelles, qui sont fournis comme complément électronique à ce manuscrit de thèse et seront prochainement mis à la disposition de la communauté scientifique.

A partir de ces nouvelles séries, l'évolution des composantes du niveau marin a pu être estimée sur le littoral charentais. L'analyse de l'évolution de l'asymétrie tidale a montré que la légère domination du perdant est de plus en plus prononcée dans le pertuis d'Antioche, en cohérence avec l'évolution morphologique des pertuis charentais : de 1824 à aujourd'hui, Bertin [2005] a observé une accrétion importante au niveau des estrans et une érosion du fond des chenaux. Concernant l'analyse de l'évolution des composantes harmoniques, malgré la grande période couverte par nos jeux de données (188 ans), la durée effective des mesures est trop courte pour pouvoir tirer des conclusions sur une tendance de leur amplitude. Cependant, il semble que l'amplitude des composantes semi-diurnes, M2 en tête, suit les mêmes variations qu'à Brest [Pouvreau *et al.*, 2006]. En revanche, les tendances calculées sur la phase indiquent une augmentation significative de la phase de l'onde M2 dans le pertuis d'Antioche, comprise entre 2,6% et 4% par siècle.

L'analyse de l'évolution des niveaux moyens dans le pertuis d'Antioche a montré qu'entre 1860 et 2010, on constate une augmentation significative globale du MSL de $+1,38 \pm 0,08$ mm/an. Ce résultat est cohérent avec Liverpool ($+1,2 \pm 0,1$ mm/an sur la période 1858-1997 [Woodworth, 1999a]). On peut également distinguer trois périodes pour lesquelles la vitesse de l'évolution du niveau marin diffère :

- 1860-1889 : stabilité du niveau marin ($+0,3 \pm 0,7$ mm/an)
- 1891-1975 : élévation du niveau marin ($+1,4 \pm 0,2$ mm/an)
- 1975-2010 : forte élévation du niveau marin ($+2,5 \pm 0,4$ mm/an)

Ces résultats sont cohérents avec ceux de [Wöppelmann *et al.*, 2006] qui distinguaient également trois périodes dans la vitesse du niveau marin à Brest :

- 1807-1890 : $-0,09 \pm 0,15$ mm/an
- 1890-1980 : $+1,3 \pm 0,15$ mm/an
- 1980-2004 : $+3,0 \pm 0,5$ mm/an

Notons également que notre estimation du point d'inflexion à partir duquel aurait débuté l'accélération de l'élévation du niveau marin enregistrée au 20^e siècle est aux alentours de 1890, en accord avec les résultats de Wöppelmann *et al.* [2006] (point d'inflexion à Brest : 1890), Pouvreau [2008] (Brest : 1892), Wahl *et al.* [2011] (côte allemande : fin du 19^e siècle) et Kemp *et al.* [2011] (côte atlantique des Etats-Unis : entre 1865 et 1892).

Dans un contexte plus global, la tendance du pertuis d'Antioche obtenue pour le 20^e siècle ($+1,6 \pm 0,2$ mm/an) est identique à celle estimée par Woodworth *et al.* [2009b] pour les côtes britanniques sur la période 1901-2006 ($+1,4 \pm 0,2$ mm/an) et en accord avec les récents résultats suggérant que l'élévation du niveau marin sur les côtes atlantiques européennes est moins importante qu'au niveau mondial ($+1,7 \pm 0,2$ mm/an, sur la période 1900-2009) [Church & White, 2011].

L'analyse de l'évolution des niveaux extrêmes a montré que la tendance des plus hauts niveaux extrêmes (95^e, 99^e et 99,9^e centiles) est stable, voire en très légère diminution. Ces résultats sont cohérents avec ceux de la littérature, comme nous l'avons vu [Woodworth *et al.*, 2011a]. Par contre, les tendances des plus bas niveaux extrêmes (5^e, 1^{er} et 0,1^e centiles) montrent des résultats opposés sur les deux sites : nette diminution à La Rochelle et nette augmentation dans la rade de l'île d'Aix. Faut-il y voir une variabilité naturelle ou une conséquence des conditions de mesure ? La question mérite d'être posée au vu des données et des résultats. On sait qu'il y a eu des problèmes fréquents d'envasement au Vieux port de La Rochelle, lors des mesures des hauteurs d'eau de 1863 à 1874. Il est probable que ce phénomène soit à l'origine de la diminution relative observée des plus bas niveaux extrêmes de ce port. Quant à la rade de l'île d'Aix, le faible nombre de points entre 1906 et 2011 incite à la prudence quant à la tendance calculée, d'autant plus que, comme à La Rochelle, des problèmes liés au puits de tranquillisation sont venus entacher d'erreurs les mesures réalisées au début du 20^e siècle au fort Boyard.

A la suite de ces travaux de recherches, plusieurs perspectives s'ouvrent à nous. Tout d'abord, il serait important de rééditer les mesures permettant de contrôler la stabilité relative du fort Boyard afin de confirmer le tassement pressenti du fort. On pourrait pour cela envisager l'implantation d'une antenne GNSS à long-terme sur le fort. Une autre piste pourrait être de rechercher un modèle de tassement plus élaboré qui pourrait convenir à notre cas d'étude, afin de déterminer si le tassement est de type exponentiel par exemple.

On pourrait également envisager d'installer une antenne GNSS au phare de Cordouan pour obtenir des mesures continues sur le long-terme. L'utilisation du GNSS géodésique en relatif entre le

phare et le continent permettrait ainsi d'une part de rattacher les repères de marée de Cordouan à un système de référence verticale, et d'autre part, de surveiller un éventuel mouvement du phare (tassement, bascule, etc.)

De même, une réflexion pourrait être menée pour créer un nouvel indicateur de la qualité des moyennes du niveau marin, autre que l'analyse des résidus (observations – prédictions de la marée) qui est trop dépendante à la fois des problèmes de calage en temps et des conditions météorologiques. En effet, les tempêtes hivernales engendrent de plus grands résidus, ce qui ne signifie pas pour autant que les moyennes du niveau marin sont de mauvaise qualité. Pour atténuer cet effet, on pourrait envisager d'appliquer cet indicateur de qualité à une série horaire choisie pour sa grande qualité. Ainsi, nous aurions une idée de la part des résidus liée aux conditions météorologiques. D'autre part, la qualité d'une série devrait être cherchée dans la façon dont elle est mesurée est non pas dans le signal qu'elle mesure. Cependant, l'expérience acquise au cours de ces travaux nous a montré qu'il était parfois difficile de détecter de mauvaises mesures, et cela même lorsque l'observateur précise qu'un problème de mesure est intervenu.

Plusieurs lots de mesures du littoral charentais restent à numériser et pourrait venir compléter nos séries inédites. Parmi eux, le lot de données de la période 1956-1963, enregistré à La Pallice, et conservé dans les archives de l'IGN. Plus au sud, il pourrait être intéressant de numériser les lots de Port-Bloc, Le Verdon et Royan, et de les associer à la série du phare de Cordouan pour tenter de construire une nouvelle série composite de l'embouchure de l'estuaire de la Gironde. Il serait aussi intéressant, à l'avenir, de compléter la série de Cordouan avec les données marégraphiques de la période 1950-2011. De façon plus globale, le *tableau II-4* montre le grand potentiel reposant encore dans les centres d'archives français, qu'il serait très intéressant de pouvoir numériser et d'analyser, dans le but d'obtenir de nouvelles estimations de la tendance du niveau marin sur les côtes françaises depuis le 19^e siècle au moins. Parmi ces séries, plusieurs paraissent prioritaires, en raison de leur situation géographique et de leur durée effective, ou période couverte :

- Cherbourg : 129 ans (1789-auj.)
- Le Havre : 125 ans (1701-auj.)
- Saint-Nazaire : 94 ans (1867-auj.)
- Saint-Jean de Luz : 79 ans (1875-auj.)
- Toulon : 72 ans (1777-auj.)

Enfin, la collaboration avec des historiens paraît également importante pour ce type de recherche. On pourrait, notamment, s'appuyer sur leur savoir pour mieux cerner le contexte métrologique du 17^e et du 18^e siècle, afin de répondre à la question suivante : quelle est la définition du pied et du pouce utilisée pour chacun des lots de mesures du niveau marin ? En effet, nos toutes dernières recherches laissent planer un doute quant à la définition du pied et du pouce de 1824 par exemple.

BIBLIOGRAPHIE

- ALLAN, R. & ANSELL, T. (2006). A New Globally Complete Monthly Historical Gridded Mean Sea Level Pressure Dataset (HadSLP2): 1850–2004. *Journal of Climate* **19**(22), pp. 5816-5842.
- ALLARD, J. (2008). *Enregistrements des changements environnementaux dans les sédiments littoraux : cas des Pertuis Charentais et du Bassin d'Arcachon*. Thèse de doctorat. Université de La Rochelle, 286p.
- ALLARD, J., CHAUMILLON, E., BERTIN, X., POIRIER, C. & GANTHY, F. (2010). Secular morphological evolution and Holocene stratigraphy of a macro tidal bay: the Marennes-Oléron Bay (SW France). *Bulletin de la Société Géologique de France* **181**(2), pp. 151-169.
- ALQUIER (1876). Note sur les marées dans le port de Rochefort, avril 1876. Observatoire de la Marine. *Archives du SHD Marine*, Rochefort, cote 2D45v, 32p.
- ALTAMIMI, Z., COLLILIEUX, X., LEGRAND, J., GARAYT, B. & BOUCHER, C. (2007). ITRF2005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters. *Journal of Geophysical Research* **112**(B9).
- ANDRE, X. (1986). *Elaboration et analyse de cartes bathymétriques détaillées du proche plateau Vendéo-Charentais (Golfe de Gascogne) ; reconstitution des paléorivages de la transgression holocène*. Thèse de doctorat. Université de Bordeaux I.
- ANSELL, T.J., JONES, P.D., ALLAN, R.J., LISTER, D., PARKER, D.E., BRUNET, M., MOBERG, A., JACOBET, J., BROHAN, P., RAYNER, N.A., AGUILAR, E., ALEXANDERSSON, H., BARRIENDOS, M., BRANDSMA, T., COX, N.J., DELLA-MARTA, P.M., DREBS, A., FOUNDA, D., GERSTENGARBE, F., HICKEY, K., JONSSON, T., LUTERBACHER, J., NORDLI, Ø., OESTERLE, H., PETRAKIS, M., PHILIPP, A., RODWELL, M.J., SALADIE, O., SIGRO, J., SLONOSKY, V., SRNEC, L., SWAIL, V., GARCIA-SUAREZ, A.M., TUOMENVIRTA, H., WANG, X., WANNER, H., WERNER, P., WHEELER, D. & XOPLAKI, E. (2006). Daily Mean Sea Level Pressure Reconstructions for the European–North Atlantic Region for the Period 1850–2003. *Journal of Climate* **19**(12), pp. 2717-2742.
- ANTONOV, J.I., LEVITUS, S. & BOYER, T.P. (2005). Thermosteric sea level rise, 1955–2003. *Geophysical Research Letters* **32**(L12602), 4p.
- ARAUJO, I.B. (2005). *Sea level variability: Examples from the atlantic coast of Europe*. Thèse de doctorat. University of Southampton, 433p.
- ARAUJO, I.B., PUGH, D.T. & COLLINS, M.B. (2001). An intensive analysis of sea level trends at Newlyn. Dans *Proceedings of the EOSS Sea Level Workshop*, pp. 90-92., Dubrovnik.
- ARAUJO, I.B., DIAS, J.M. & PUGH, D.T. (2008). Model simulations of tidal changes in a coastal lagoon, the Ria de Aveiro (Portugal). *Continental Shelf Research* **28**(8), pp. 1010-1025.
- ARMOGHATE, J-R. (2001). Un seul poids, une seule mesure. *Dix-septième siècle* **213**(4), pp. 631-640.
- AUBREY, D.G. & SPEER, P.E. (1985). A study of non-linear tidal propagation in shallow inlet/estuarine systems, Part I: Observations. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **21**(2), pp. 185-205.
- AUFFRAY, A., CLAVEL, A. & JOURDAIN, S. (2009). Contexte météorologique des mois d'octobre et novembre 1859. *Colloque « Isère 1859-2009 », 150e anniversaire de la crue de référence*, Grenoble, le 5 novembre 2009, 15p.
- BARNETT, T.P. (1984). The Estimation of « Global » Sea Level Change: A Problem of Uniqueness. *Journal of Geophysical Research* **89**(C5), pp. 7980-7988.
- DE BEAUCE & THURNINGER (1885). Ports maritimes de la France. Tome sixième (1ère partie) : de La Rochelle à Maubert - Notice du port de La Rochelle. *Archives du SHOM*, 61p.
- BEAUTEMPS-BEAUPRE, C-F. (1824a). Côtes de France - Marées, 1824 (25). *Archives du SHD Marine*, Rochefort, cote 7JJ 362.
- BEAUTEMPS-BEAUPRE, C-F. (1824b). Côtes de France - Marées, 1824 (27). *Archives du SHD Marine*, Rochefort, cote 7JJ 364.
- BEAUTEMPS-BEAUPRE, C-F. & DAUSSY, P. (1829). Exposé des travaux relatifs à la reconnaissance hydrographique des côtes occidentales de France. Suivi d'un précis des opérations géodésiques. Imprimerie royale de Paris. 124p. <http://books.google.fr/books?id=DTRRAAAAYAAJ>, consulté le 1^{er} décembre 2011.

- BECKER, M., KARPYTCHEV, M., DAVY, M. & DOEKES, K. (2009). Impact of a shift in mean on the sea level rise: Application to the tide gauges in the Southern Netherlands. *Continental Shelf Research* **29**(4), pp. 741-749.
- BECKER, M., MEYSSIGNAC, B., LETETREL, C., LLOVEL, W., CAZENAVE, A. & DELCROIX, T. (2012). Sea level variations at tropical Pacific islands since 1950. *Global and Planetary Change* **80-81**(0), pp. 85-98.
- BELL, C., VASSIE, J.M. & WOODWORTH, P.L. (1999). *POL/PSMSL Tidal Analysis Software Kit 2000 (TASK-2000)*, Birkenhead, Merseyside: Permanent Service for Mean Sea Level, 20p.
- BERAUD, R. (1981). *Petite encyclopédie monumentale et historique de La Rochelle*, La Rochelle: Rupella, 193p.
- BERTAUD, C. & PRAUD, T. (2005). Le port de commerce, l'histoire d'une ambition maritime. *AunisEco*.
- BERTIN, X. (2005). *Morphodynamique séculaire, architecture interne et modélisation d'un système baie/embouchure tidale : le Pertuis de Maumusson et la baie de Marennes-Oléron*. Thèse de doctorat. Université de La Rochelle, 198p.
- BERTIN, X. & CHAUMILLON, E. (2005). Apports de la modélisation sur bathymétries historiques dans la compréhension des évolutions des bancs de sable estuariens. *Comptes Rendus Geosciences* **337**, pp. 1375-1383.
- BERTIN, X. & CHAUMILLON, E. (2006). The implication of oyster farming in increasing sedimentation rates in a macrotidal bay: the Marennes-Oléron Bay, France. *Cahiers de Biologie Marine* **47**, pp. 19-22.
- BERTIN, X., CHAUMILLON, E., SOTTOLICHIO, A. & PEDREROS, R. (2005). Tidal inlet response to sediment infilling of the associated bay and possible implications of human activities: the Marennes-Oléron Bay and the Maumusson Inlet, France. *Continental Shelf Research* **25**(9), pp. 1115-1131.
- BERTIN, X., CASTELLE, B., CHAUMILLON, E., BUTEL, R. & QUIQUE, R. (2008). Longshore transport estimation and inter-annual variability at a high-energy dissipative beach: St. Trojan beach, SW Oléron Island, France. *Continental Shelf Research* **28**(10-11), pp. 1316-1332.
- BINDOFF, N.L., WILLEBRAND, J., ARTALE, V., CAZENAVE, A., GREGORY, J., GULEV, S., HANAWA, K., LE QUERE, C., LEVITUS, S., NOJIRI, Y., SHUM, C.K., TALLEY, L.D. & UNNIKRISSNAN, A. (2007). Observations: Oceanic Climate Change and Sea Level. Dans *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pp. 385-432., Cambridge University Press.
- BINOT, G. (2005a). Cordouan, la tour de Louis de Foix. *L'estuarien* (13), p. 15.
- BINOT, G. (2005b). Cordouan, la tour du Prince Noir. *L'estuarien* (11), p. 5.
- BINTANJA, R., VAN DE WAL, R.S.W. & OERLEMANS, J. (2005). Modelled atmospheric temperatures and global sea levels over the past million years. *Nature* **437**(7055), pp. 125-128.
- BOGDANOV, V.I., MEDVEDEV, M.Y., SOLODOV, V.A., TRAPEZNIKOV, Y., A., TROSHKOV, G.A. & TRUBITSINA, A.A. (2000). *Mean monthly series of sea level observations (1777-1993) at the Kronstadt gauge*. Reports of the Finnish Geodetic Institute, n°2000:1, 34p.
- BONA-CHRISTAVE (1868). Plans de nivellement, échelles de marée, seuils, repères. *Archives du SHD Marine*, Rochefort, cote 2D45t.
- BONNETAIN, P. (1987). *Instruction à l'usage des techniciens du nivellement*. IGN, Instructions Techniques IT/G 100, SGN n°27624, 126p.
- BOUIN, M-N. & WÖPPELMANN, G. (2010). Land motion estimates from GPS at tide gauges: a geophysical evaluation. *Geophysical Journal International* **180**(1), pp. 193-209.
- BOUQUET DE LA GRYE, J-J.A. (1869). « Note sur le marégraphe d'Enet », par Bouquet de la Grye, ingénieur de la Marine, 19 mai 1869. *Archives du SHD Marine*, Vincennes, cote DD²2053, 7p.
- BOUQUET DE LA GRYE, J-J.A. & HATT, P.E. (1876). Baie de La Rochelle - Etude hydrographique. *Archives du SHOM*.
- BOURGUEIL, B. & MOREAU, P. (1974). Carte géologique de la France au 1/50000 : feuille de l'île d'Oléron. Orléans : BRGM.
- BUREAU DES LONGITUDES (2011). *Ephémérides astronomiques : Connaissance des temps*, édition 2011, EDP SCIENCES, 350p.
- CAILLEUX, A. (1952). Récentes variations du niveau des mers et des terres. *Bulletin de la Société Géologique de France* **6e série**(2), pp. 135-144.

- CALAFAT, F.M. & GOMIS, D. (2009). Reconstruction of Mediterranean sea level fields for the period 1945–2000. *Global and Planetary Change* **66**(3-4), pp. 225-234.
- CALAFAT, F.M., MARCOS, M. & GOMIS, D. (2010). Mass contribution to Mediterranean Sea level variability for the period 1948–2000. *Global and Planetary Change* **73**(3-4), pp. 193-201.
- CALBET, J.-M. (2005). La restauration du phare de Cordouan. *L'estuarien* (14), pp. 15-16.
- CALZAS, M., DREZEN, C., GUILLOT, A., MELLET, M. & TESTUT, L. (2010). Le service d'observation NIVMER. *Présentation orale*, AEI, Brest, 23-24 juin 2010.
- CARTWRIGHT, D.E. (1971). Tides and Waves in The Vicinity of Saint Helena. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences* **270**(1210), pp. 603 -646.
- CARTWRIGHT, D.E. (1972). Secular Changes in the Oceanic Tides at Brest, 1711–1936. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society* **30**(4), pp. 433-449.
- CARTWRIGHT, D.E. (1999). *Tides: a scientific history*, Cambridge Univ. Press, 292p.
- CASTAING, P. (1981). *Le transfert à l'océan des suspensions estuariennes : Cas de la Gironde*. Thèse d'état. Université de Bordeaux 1, 530p.
- CASTELLE, B. (2004). *Modélisation de l'hydrodynamique sédimentaire au-dessus des barres sableuses soumises à l'action de la houle : application à la côte aquitaine*. Thèse de doctorat. Université de Bordeaux 1.
- CAZENAVE, A. & NEREM, R.S. (2004). Present-day sea level change: Observations and causes. *Reviews of Geophysics* **42**(RG3001), 20p.
- CAZENAVE, A. & LLOVEL, W. (2010). Contemporary Sea Level Rise. *Annual Review of Marine Science* **2**(1), pp. 145-173.
- CAZENAVE, A., REMY, F., DOMINH, K. & DOUVILLE, H. (2000). Global ocean mass variation, continental hydrology and the mass balance of Antarctica Ice Sheet at seasonal time scale. *Geophysical Research Letters* **27**(22), pp. 3755-3758.
- CAZENAVE, A., LOMBARD, A. & LLOVEL, W. (2008). Present-day sea level rise: A synthesis. *Comptes Rendus Geoscience* **340**(11), pp. 761-770.
- CETTOUR, D. (1999). Sur les terrasses de fort Boyard. *Le mausolée* (756).
- CHAGNEAU, G. (1996). Le Fort Boyard, vaisseau de pierre, monstre créateur. *Les cahiers d'Oléron* (6), 7^e édition, 31p.
- CHAMBERS, D.P., RIES, J.C., SHUM, C.K. & TAPLEY, B.D. (1998). On the use of tide gauges to determine altimeter drift. *Journal of Geophysical Research* **103**(C6), pp. 12885-12890.
- CHAO, B.F., WU, Y.H. & LI, Y.S. (2008). Impact of Artificial Reservoir Water Impoundment on Global Sea Level. *Science* **320**(5873), pp. 212-214.
- CHAPPELL, J. & POLACH, H. (1991). Post-glacial sea-level rise from a coral record at Huon Peninsula, Papua New Guinea. *Nature* **349**(6305), pp. 147-149.
- CHAUMILLON, E. & WEBER, N. (2006). Spatial variability of modern incised valleys on the French Atlantic coast: comparison between the Charente and the Lay-Sèvre incised valleys. Dans *Incised valleys in time and space (85)*, pp. 57–85., Tulsa: R. Dalrymple, D. Leckie, R. Tillman.
- CHAUMILLON, E., GILLET, H., WEBER, N. & TESSON, M. (2002). Évolution temporelle et architecture interne d'un banc sableux estuarien : la Longe de Boyard (littoral atlantique, France). *Comptes Rendus Geoscience* **334**(2), pp. 119-126.
- CHAUMILLON, E., PROUST, J.-N., MENIER, D. & WEBER, N. (2008a). Incised-valley morphologies and sedimentary-fills within the inner shelf of the Bay of Biscay (France): A synthesis. *Journal of Marine Systems* **72**(1-4), pp. 383-396.
- CHAUMILLON, E., BERTIN, X., FALCHETTO, H., ALLARD, J., WEBER, N., WALKER, P., POUVREAU, N. & WOPPELMANN, G. (2008b). Multi time-scale evolution of a wide estuary linear sandbank, the Longe de Boyard, on the French Atlantic coast. *Marine Geology* **251**, pp. 209-223.
- CHAUMILLON, E., TESSIER, B. & REYNAUD, J.-Y. (2010). Stratigraphic records and variability of incised valleys and estuaries along French coasts. *Bulletin de la Société Géologique de France* **181**(2), pp. 75-85.
- CHAZALLON, R. (1839). Annuaire des marées des côtes de France. Publié au Dépôt de la Marine, Paris. *Archives du SHOM*.

- CHAZALLON, R. (1860). Journal des marées - Marégraphe de Enet - Années 1860 et 1861. Dépôt des cartes et plans de la Marine, Paris. *Archives du SHOM*.
- CHEVALLIER (1857). « Note pour la direction du Matériel », Chevallier, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, adjoint à l'Inspection Générale des travaux maritimes. Paris, le 5 octobre 1857. *Archives du SHD Marine*, Vincennes, cote DD²2053, 3p.
- CHURCH, J.A. & WHITE, N.J. (2006). A 20th century acceleration in global sea-level rise. *Geophysical Research Letters* **33**(L01602), 4p.
- CHURCH, J.A. & WHITE, N.J. (2011). Sea-Level Rise from the Late 19th to the Early 21st Century. *Surveys in Geophysics* **32**(4-5), pp. 585-602.
- CHURCH, J.A., GREGORY, J.M., HUYBRECHTS, P., KUHN, M., LAMBECK, K., NHUAN, M.T., QIN, D. & WOODWORTH, P.L. (2001). Observations: Oceanic Climate Change and Sea Level. Dans *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pp. 639-693., Cambridge University Press.
- CHURCH, J.A., WHITE, N.J., COLEMAN, R., LAMBECK, K. & MITROVICA, J.X. (2004). Estimates of the Regional Distribution of Sea Level Rise over the 1950–2000 Period. *Journal of Climate* **17**(13), pp. 2609-2625.
- CHURCH, J.A., WHITE, N.J., AARUP, T., WILSON, W.S., WOODWORTH, P.L., DOMINGUES, C.M., HUNTER, J.R. & LAMBECK, K. (2008). Understanding global sea levels: past, present and future. *Sustainability Science* **3**(1), pp. 9-22.
- COUNEAU, E. (1904). *La Rochelle disparue*, La Rochelle: A. Foucher, 406p.
- COURTEAU, R. (2007). *L'évaluation et la prévention du risque de tsunami sur les côtes françaises en métropole et outre-mer.*, Office Parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, 4p.
- CRAHAY DE FRANCHIMONT (1885). Ports maritimes de la France. Tome sixième (1ère partie) : de La Rochelle à Maubert - Notice du port de l'île d'Aix. *Archives du SHOM*, 10p.
- DAI, A. & WANG, J. (1999). Diurnal and Semidiurnal Tides in Global Surface Pressure Fields. *Journal of the Atmospheric Sciences* **56**(22), pp. 3874-3891.
- DAVIS, J.L. & MITROVICA, J.X. (1996). Glacial isostatic adjustment and the anomalous tide gauge record of eastern North America. *Nature* **379**(6568), pp. 331-333.
- DEBESSE, M. (1935). Le port de La Rochelle. *La Nature Soixante troisième année, premier semestre*(2944-2955), pp. 256-260.
- DELBALAT, MANEN & VIDALIN (1860). Mission hydrographique pour l'amélioration de la Charente - Nivellement longitudinal : embouchure de la Charente - Repères. *Archives du SHOM*, Portefeuille 12, division 7, numéros 20bis et 22.
- DEMERLIAC, A. (1973). *Le niveau moyen de la mer, calcul du niveau moyen journalier*, Rapport du SHOM.
- DOMINGUES, C.M., CHURCH, J.A., WHITE, N.J., GLECKLER, P.J., WIJFFELS, S.E., BARKER, P.M. & DUNN, J.R. (2008). Improved estimates of upper-ocean warming and multi-decadal sea-level rise. *Nature* **453**(7198), pp. 1090-1093.
- DOODSON, A.T. (1921). The Harmonic Development of the Tide-Generating Potential. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A* **100**(704), pp. 305-329.
- DOUGLAS, B.C. (1991). Global sea level rise. *Journal of Geophysical Research* **96**(C4), pp. 6981–6992.
- DOUGLAS, B.C. (1992). Global Sea Level Acceleration. *Journal of Geophysical Research* **97**(C8), pp. 12699-12706.
- DOUGLAS, B.C. (1997). Global sea rise: a redetermination. *Surveys in Geophysics* **18**(2-3), pp. 279-292.
- DOUGLAS, B.C. (2001). Sea Level Change in the Era of the Recording Tide Gauge. Dans *Sea Level Rise: History and Consequences*, pp. 37-64. International Geophysics, San Diego: Academic Press Inc.
- DOUGLAS, B.C., KEARNEY, M.S. & LEATHERMAN, S.P. (2001). *Sea Level Rise: History and Consequences*, San Diego: Academic Press Inc, 232p.
- DUCET, N., LE TRAON, P-Y. & GAUZELIN, P. (1999). Response of the Black Sea mean level to atmospheric pressure and wind forcing. *Journal of Marine Systems* **22**(4), pp. 311-327.
- DUPUY (1858). « Rapport au ministre », de Dupuy, directeur du Matériel du ministère de la Marine et des colonies. Paris, le 16 juin 1858. *Archives du SHD Marine*, Vincennes, cote DD²2053, 3p.

- DUPUY, P.-Y. & BATANY, C. (1992). *Evaluation d'un marégraphe côtier à ultra-sons*, SHOM, Rapport d'étude n° 005/92.
- DUQUENNE, H. (1998). Grille de correction pour effectuer du nivellement par GPS. *Revue Géomètre* 6, pp. 37-40.
- EKMAN, M. (2003). *The World's Longest Sea Level Series and a Winter Oscillation Index for Northern Europe 1774-2000.*, Small Publications in Historical Geophysics, n°12, Aland Islands: Summer Institute for Historical Geophysics, 34p.
- EMERY, K.O. & AUBREY, D.G. (1991). *Sea Levels, land levels and tide gauges*, New York: Springer-Verlang, 237p.
- EYRIES, M. (1968). Marégraphes de grandes profondeurs. *Cahiers océanographiques* 20(5), pp. 355-368.
- FAUCHERRE, N., PROST, P., CHAZETTE, A. & LE BLANC, F.-Y. (1996). *Les fortifications du littoral : la Charente-Maritime*, Patrimoines et Médias, 222p.
- FENOGLIO-MARC, L. & TEL, E. (2010). Coastal and global sea level change. *Journal of Geodynamics* 49(3-4), pp. 151-160.
- FERREGEAU (1801). Rapport de la commission nommée par les ministres de la Guerre et de la Marine les 11 floréal et 1er prairial an 9, sur les moyens d'augmenter la défense de la rade de l'île d'Aix. *Archives du génie (SHAT)*, Vincennes, Article 8, Section 1.
- FEVRIER, D. (2007). Un historique du mètre. <http://www.industrie.gouv.fr/metro/aquoisert/metre.htm>, consulté le 1^{er} décembre 2011.
- FIERRO, A. (1991). *Histoire de la météorologie*, Paris: Denoël, 315p.
- FILLEY (1763). Projet et estimation d'un fort à construire sur le banc de Boyard pour servir à la défense de la rade de l'île d'Aix. *Archives du génie (SHAT)*, Vincennes, Article 8, Section 1.
- FLEMING, K. (2000). *Glacial Rebound and Sea-level Change Constraints on the Greenland Ice Sheet*. Thèse de doctorat. Australian National University.
- FLEMING, K., JOHNSTON, P., ZWARTZ, D., YOKOYAMA, Y., LAMBECK, K. & CHAPPELL, J. (1998). Refining the eustatic sea-level curve since the Last Glacial Maximum using far- and intermediate-field sites. *Earth and Planetary Science Letters* 163(1-4), pp. 327-342.
- FOREMAN, M.G.G., CHERNIAWSKY, J.Y. & BALLANTYNE, V.A. (2009). Versatile Harmonic Tidal Analysis: Improvements and Applications. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 26(4), pp. 806-817.
- FRIEDRICH, C.T. & AUBREY, D.G. (1988). Non-linear tidal distortion in shallow well-mixed estuaries: a synthesis. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 27(5), pp. 521-545.
- FRIEDRICH, C.T. & MADSEN, O.S. (1992). Nonlinear Diffusion of the Tidal Signal in Frictionally Dominated Embayments. *Journal of Geophysical Research* 97(C4), pp. 5637-5650.
- FRIEDRICH, C.T. & AUBREY, D.G. (1994). Tidal propagation in strongly convergent channels. *Journal of Geophysical Research* 99(C2), pp. 3321-3336.
- FU, L.L. & CAZENAVE, A. (2001). *Satellite altimetry and Earth sciences, A Handbook of techniques and applications.*, San Diego: Academic Press, 463p.
- GABILLY, J. (1978). *Guide géologique régionale : Poitou-Vendée-Charentes.*, Masson, 200p.
- GARCIA, M.J., GOMEZ, B.P., RAICICH, F., RICKARDS, L., BRADSHAW, E., PLAG, H.-P., ZHANG, X., BYE, B.L. & ISAKSEN, E. (2007). European Sea Level Monitoring: Implementation of ESEAS Quality Control. Dans *Dynamic Planet* (éd. P. Tregoning & C. Rizos), pp. 67-70. Berlin, Heidelberg: Springer.
- GEHRELS, W.R., DAWSON, D.A., SHAW, J. & MARSHALL, W.A. (2011). Using Holocene relative sea-level data to inform future sea-level predictions: An example from southwest England. *Global and Planetary Change* 78(3-4), pp. 116-126.
- GLOSS (2009). *Quality control of sea level observations.*, Version 0.1, Global Sea Level Observing System, 29p.
- GODIN, G. (1992). Possibility of rapid changes in the tide of the Bay of Fundy, based on a scrutiny of the records from Saint John. *Continental Shelf Research* 12(2-3), pp. 327-338.
- GONZALEZ, J.-L., JOUANNEAU, J.-M., DOMINIK, J. & BOUTIER, B. (1991). Particulate Cd and Hg fluxes to the sediment in the Marennes-Oléron Bay: origin and evolution. *Environmental Technology* 12(3), pp. 209-216.
- GORNITZ, V., LEBEDEFF, S. & HANSEN, J. (1982). Global Sea Level Trend in the Past Century. *Science* 215(4540), pp. 1611-1614.

- GOULEAU, D., JOUANNEAU, J.-M., WEBER, O. & SAURIAU, P.-G. (2000). Short- and long-term sedimentation on Montportail–Brouage intertidal mudflat, Marennes–Oléron Bay (France). *Continental Shelf Research* **20**(12-13), pp. 1513-1530.
- GOURIOU, T. & WÖPPELMANN, G. (2010). A joint analysis of sea-level and meteorological data over the past 19th and 20th century on the Charente-Maritime French atlantic coast. *Présentation orale*, Assemblée générale de l'EGU (European Geosciences Union), Vienne, Autriche, 05 mai 2010.
- GOURIOU, T. & TIPHANEAU, P. (2010a). *Campagne de nivellement et d'observations GPS au fort Boyard (Charente-Maritime). Juillet-Août 2009*, Rapport de mission n°003/09, UMR 6250 LIENSs, 31p.
- GOURIOU, T. & TIPHANEAU, P. (2010b). *Campagne de nivellement et d'observations GPS au fort Enet (Charente-Maritime). Juillet-Août 2009.*, Rapport de mission n°002/09, UMR 6250 LIENSs, 37p.
- GOURIOU, T., POUVREAU, N. & WÖPPELMANN, G. (2008). Mesures du niveau de la mer en France : un patrimoine historique à fort potentiel scientifique. L'exemple du littoral charentais. *Géologues* **158**, pp. 83-89.
- GOURIOU, T., LE PAJOLEC, S., TIPHANEAU, P. & GRAVELLE, M. (2010). *Campagne de nivellement au Vieux port de La Rochelle (Charente-Maritime), Juin 2010*, Rapport de mission n°002/10, UMR 6250 LIENSs, 44p.
- GOURIOU, T., GRAVELLE, M., LETETREL, C. & KARPYTCHEV, M. (2011). *Campagne de nivellement au fort Boyard (Charente-Maritime). 20 avril 2011.*, Rapport de mission n°001/11, UMR 6250 LIENSs, 19p.
- GUILHIERMOZ, P. (1913). De l'équivalence des anciennes mesures. A propos d'une publication récente. *Bibliothèque de l'école des chartes* **74**(1), pp. 267-328.
- GUILLEMET, D. (2004). Insultes et injures littorales : les descentes ennemies sur le littoral français du Ponant aux 17e et 18e siècle. Dans *La violence et la mer dans l'espace atlantique : XIIIe-XIXe siècle*, 528p. Histoire, Rennes: Presses universitaires de Rennes.
- GUTENBERG, B. (1941). Changes in sea level, postglacial uplift, and mobility of the earth's interior. *Geological Society of America Bulletin* **52**(5), pp. 721 -772.
- HAIGH, I., NICHOLLS, R. & WELLS, N. (2009). Mean sea level trends around the English Channel over the 20th century and their wider context. *Continental Shelf Research* **29**(17), pp. 2083-2098.
- HAIGH, I., NICHOLLS, R. & WELLS, N. (2010). Assessing changes in extreme sea levels: Application to the English Channel, 1900–2006. *Continental Shelf Research* **30**(9), pp. 1042-1055.
- HANNAH, J. (2004). An updated analysis of long-term sea level change in New Zealand. *Geophysical Research Letters* **31**(L03307), 4p.
- HAYS, J.D., IMBRIE, J. & SHACKLETON, N.J. (1976). Variations in the Earth's Orbit: Pacemaker of the Ice Ages. *Science* **194**(4270), pp. 1121 -1132.
- HEIN, G.W., BLOMENHOFER, H., LANDAU, H. & TAVEIRA, E. (1992). Measuring sea level changes using GPS in buoys. *Geophysical Monograph Series* **69**, pp. 101-105.
- HOLGATE, S.J. (2007). On the decadal rates of sea level change during the twentieth century. *Geophysical Research Letters* **34**(L01602), 4p.
- HOLGATE, S.J. & WOODWORTH, P.L. (2004). Evidence for enhanced coastal sea level rise during the 1990s. *Geophysical Research Letters* **31**(L07305), 4p.
- HUANG, H., CHEN, C., BLANTON, J.O. & ANDRADE, F.A. (2008). A numerical study of tidal asymmetry in Okatee Creek, South Carolina. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **78**(1), pp. 190-202.
- HUNTER, J., COLEMAN, R. & PUGH, D. (2003). The Sea Level at Port Arthur, Tasmania, from 1841 to the Present. *Geophysical Research Letters* **30**(1401), 4p.
- ISHII, M., KIMOTO, M., SAKAMOTO, K. & IWASAKI, S.-I. (2006). Steric sea level changes estimated from historical ocean subsurface temperature and salinity analyses. *Journal of Oceanography* **62**(2), pp. 155-170.
- JAY, D.A. (2009). Evolution of tidal amplitudes in the eastern Pacific Ocean. *Geophysical Research Letters* **36**(L04603).
- JEVREJEVA, S., GRINSTED, A., MOORE, J.C. & HOLGATE, S. (2006). Nonlinear trends and multiyear cycles in sea level records. *Journal of Geophysical Research* **111**(C09012), 11p.
- JEVREJEVA, S., MOORE, J.C., GRINSTED, A. & WOODWORTH, P.L. (2008). Recent global sea level acceleration started over 200 years ago? *Geophysical Research Letters* **35**(L08715), 4p.

- JONES, P.D., DAVIES, T.D., LISTER, D.H., SLONOSKY, V., JONSSON, T., BÄRRING, L., JÖNSSON, P., MAHERAS, P., KOLYVA-MACHERA, F., BARRIENDOS, M., MARTIN-VIDE, J., RODRIGUEZ, R., ALCOFORADO, M.J., WANNER, H., PFISTER, C., LUTERBACHER, J., RICKLI, R., SCHUEPBACH, E., KAAS, E., SCHMITH, T., JACOBET, J. & BECK, C. (1999). Monthly mean pressure reconstructions for Europe for the 1780–1995 period. *International Journal of Climatology* **19**(4), pp. 347-364.
- KANG, J.W., MOON, S.-R., PARK, S.-J. & LEE, K.-H. (2009). Analyzing sea level rise and tide characteristics change driven by coastal construction at Mokpo Coastal Zone in Korea. *Ocean Engineering* **36**(6-7), pp. 415-425.
- KASSER, M. (1989). Un nivellement de très haute précision: la traversée Marseille-Dunkerque 1983. *Comptes rendus de l'Académie des sciences* **309**(7), pp. 695-700.
- KEMP, A.C., HORTON, B.P., DONNELLY, J.P., MANN, M.E., VERMEER, M. & RAHMSTORF, S. (2011). Climate related sea-level variations over the past two millennia. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **108**(27), pp. 11017-11022.
- KÖNNEN, G.P., ZAIKI, M., BAEDE, A.P.M., MIKAMI, T., JONES, P.D. & TSUKAHARA, T. (2003). Pre-1872 Extension of the Japanese Instrumental Meteorological Observation Series back to 1819. *Journal of Climate* **16**(1), pp. 118-131.
- KRANZ, S., ZENZ, T. & BARJENBRUCH, U. (2001). Radar: Is it a new technology applicable to water level gauging? *Phys. Chem. Earth (C)* **26**(10-12), pp. 751-754.
- L.C.H.F. (1987). *Catalogue sédimentologique des côtes françaises : Côtes de la Manche et de l'Atlantique.*, Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'EDF, 559p.
- DE LA LANDE, J. (1777). Mémoire sur les observations à faire du Flux et du Reflux de la Mer. Imprimerie royale, Paris. *Archives de la médiathèque Michel Crépeau*, La Rochelle, cote MS 783.
- LACOMBE, A. (1979). Histoire de l'invention et de la mise en application du système métrique. *The French Review* **53**(2), pp. 246-254.
- LACROIX, S.F. (1826). *Manuel d'arpentage, ou instruction élémentaire sur cet art et sur celui de lever les plans*, Paris: Librairie Roret, 214p.
- LAMBECK, K. (1997). Sea-level change along the French Atlantic and Channel coasts since the time of the Last Glacial Maximum. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **129**, pp. 1-22.
- LAMBECK, K. & CHAPPELL, J. (2001). Sea Level Change Through the Last Glacial Cycle. *Science* **292**(5517), pp. 679 -686.
- LAMBECK, K., YOKOYAMA, Y. & PURCELL, T. (2002). Into and out of the Last Glacial Maximum: sea-level change during Oxygen Isotope Stages 3 and 2. *Quaternary Science Reviews* **21**(1-3), pp. 343-360.
- LAMBECK, K., ANZIDEI, M., ANTONIOLI, F., BENINI, A. & ESPOSITO, A. (2004). Sea level in Roman time in the Central Mediterranean and implications for recent change. *Earth and Planetary Science Letters* **224**(3-4), pp. 563-575.
- LE CANN, B. (1990). Barotropic tidal dynamics of the Bay of Biscay shelf: observations, numerical modelling and physical interpretation. *Continental Shelf Research* **10**(8), pp. 723-758.
- LE CHATELIER (1849). Rapport fait par M. Le Chatelier, au nom du comité des arts mécaniques, sur le marégraphe de M. Chazallon, construit par M. Wagner, le 25 avril 1849. *Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale*, Paris, 3p. <http://cnum.cnam.fr/>, consulté le 1^{er} décembre 2011.
- LE HIR, P., ROBERTS, W., CAZAILLET, O., CHRISTIE, M., BASSOULLET, P. & BACHER, C. (2000). Characterization of intertidal flat hydrodynamics. *Continental Shelf Research* **20**(12-13), pp. 1433-1459.
- LE ROY, R. (2006). *Evaluation des performances des télémètres radar pour la mesure des hauteurs d'eau*, SHOM, Rapport d'étude n°001/06, 49p.
- LEFEBVRE (1880). Note sur les variations de la marée à Rochefort, à Enet et au fort Boyard, 15 mai 1880. *Archives du SHD Marine*, Rochefort, cote 2D45y, 17p.
- LEFFLER, K.E. & JAY, D.A. (2009). Enhancing tidal harmonic analysis: Robust (hybrid L1/L2) solutions. *Continental Shelf Research* **29**(1), pp. 78-88.
- LENNON, G.W. (1993). *The stilling well: a help or a hindrance?*, Joint IAPSO-IOC Workshop on Sea Level Measurements and Quality Control, IOC Workshop Report No. 54, pp 52-64.

- LETETREL, C. (2010). *Mouvements verticaux à la surface de la Terre par altimétrie radar embarquée sur satellite, marégraphie et GPS. Un exemple d'application : le Golfe du Mexique*. Thèse de doctorat. Université de La Rochelle, 185p.
- LETETREL, C., MARCOS, M., MARTIN MIGUEZ, B. & WÖPPELMANN, G. (2010). Sea level extremes in Marseille (NW Mediterranean) during 1885–2008. *Continental Shelf Research* **30**(12), pp. 1267-1274.
- LEULIETTE, E.W., NEREM, R.S. & MITCHUM, G.T. (2004). Calibration of TOPEX/Poseidon and Jason Altimeter Data to Construct a Continuous Record of Mean Sea Level Change. *Marine Geodesy* **27**(1-2), pp. 79-94.
- LISITZIN, E. (1974). *Sea-level changes*, Elsevier Oceanography Series, 295p.
- LORIN, J. (1970). *Etude sédimentologique de la partie orientale du Pertuis Breton et de la baie de l'Aiguillon*, Rapport, Université de Bordeaux 1, 177p.
- MANNEVY, P. (1971). Levé au large des Charentes - Mission hydrographique des côtes de France et d'Afrique du Nord (1959-1960). Extrait des annales hydrographiques, pp. 406-439. *Archives du SHOM*, cote TAP/19.
- MARCOS, M. & TSIMPLIS, M.N. (2007). Forcing of coastal sea level rise patterns in the North Atlantic and the Mediterranean Sea. *Geophysical Research Letters* **34**(L18604), 6p.
- MARCOS, M., WÖPPELMANN, G., BOSCH, W. & SAVCENKO, R. (2007). Decadal sea level trends in the Bay of Biscay from tide gauges, GPS and TOPEX. *Journal of Marine Systems* **68**(3-4), pp. 529-536.
- MARCOS, M., TSIMPLIS, M.N. & SHAW, A.G.P. (2009). Sea level extremes in southern Europe. *Journal of Geophysical Research* **114**(C01007).
- MARTIN MIGUEZ, B., TESTUT, L. & WÖPPELMANN, G. (in press). Performance of modern tide gauges: towards mm-level accuracy. *Scientia Marina* (accepté le 27 juin 2011).
- MARTIN MIGUEZ, B., LE ROY, R. & WÖPPELMANN, G. (2008a). The Use of Radar Tide Gauges to Measure Variations in Sea Level along the French Coast. *Journal of Coastal Research* **24**(4C), pp. 61-68.
- MARTIN MIGUEZ, B., TESTUT, L. & WÖPPELMANN, G. (2008b). The Van de Casteele Test Revisited: An Efficient Approach to Tide Gauge Error Characterization. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **25**(7), pp. 1238-1244.
- MENENDEZ, M. & WOODWORTH, P.L. (2010). Changes in extreme high water levels based on a quasi-global tide-gauge data set. *Journal of Geophysical Research* **115**(C10011).
- MERRIFIELD, M.A., FIRING, Y.L., AARUP, T., AGRICOLE, W., BRUNDRIT, G., CHANG-SENG, D., FARRE, R., KILONSKY, B., KNIGHT, W., KONG, L., MAGORI, C., MANURUNG, P., MCCREERY, C., MITCHELL, W., PILLAY, S., SCHINDELE, F., SHILLINGTON, F., TESTUT, L., WIJERATNE, E.M.S., CALDWELL, P., JARDIN, J., NAKAHARA, S., PORTER, F.-Y. & TURETSKY, N. (2005). Tide gauge observations of the Indian Ocean tsunami, December 26, 2004. *Geophysical Research Letters* **32**(L09603), 4p.
- MESNARD, J. (2004). La stratégie au grand siège de La Rochelle. Dans *Actes du colloque « La Rochelle assiégée, 1573, 1622, 1628 »*, 170p. Saintes: Société des Archives historiques de la Saintonge et de l'Aunis.
- MILLER, L. & DOUGLAS, B.C. (2004). Mass and volume contributions to twentieth-century global sea level rise. *Nature* **428**(6981), pp. 406-409.
- MILNE, G.A., LONG, A.J. & BASSETT, S.E. (2005). Modelling Holocene relative sea-level observations from the Caribbean and South America. *Quaternary Science Reviews* **24**(10-11), pp. 1183-1202.
- MITROVICA, J.X. & DAVIS, J.L. (1995). Present-day post-glacial sea level change far from the Late Pleistocene ice sheets: Implications for recent analyses of tide gauge records. *Geophysical Research Letters* **22**(18), pp. 2529-2532.
- MODERAN, J. (2010). *Estuaire de la Charente : structure de communauté et écologie trophique du zooplancton, approche écosystémique de la contamination métallique*. Thèse de doctorat. Université de La Rochelle, 258p.
- MÜLLER, B., ZOBACK, M.L., FUCHS, K., MASTIN, L., GREGERSEN, S., PAVONI, N., STEPHANSSON, O. & LJUNGGREN, C. (1992). Regional Patterns of Tectonic Stress in Europe. *Journal of Geophysical Research* **97**(B8), pp. 11783-11803.
- NERAUDEAU, D. & MOREAU, P. (1989). Paléoécologie et paléobiogéographie des faunes d'échinides du Cénomaniens nord-aquitain (Charente-Maritime, France). *Geobios* **22**(3), pp. 293-324.
- NICHOLLS, R.J. & CAZENAVE, A. (2010). Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal Zones. *Science* **328**(5985), pp. 1517-1520.

- NICOLLE, A. & KARPYTCHEV, M. (2007). Evidence for spatially variable friction from tidal amplification and asymmetry in the Pertuis Breton (France). *Continental Shelf Research* **27**(18), pp. 2346-2356.
- OTTO-BLIESNER, B.L., MARSHALL, S.J., OVERPECK, J.T., MILLER, G.H. & HU, A. (2006). Simulating Arctic Climate Warmth and Icefield Retreat in the Last Interglaciation. *Science* **311**(5768), pp. 1751 -1753.
- OVERPECK, J.T., OTTO-BLIESNER, B.L., MILLER, G.H., MUHS, D.R., ALLEY, R.B. & KIEHL, J.T. (2006). Paleoclimatic Evidence for Future Ice-Sheet Instability and Rapid Sea-Level Rise. *Science* **311**(5768), pp. 1747 -1750.
- PALMER, H.R. (1831). Description of a Graphical Registrar of Tides and Winds. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **121**, pp. 209-213.
- PARKER, B.B. (1991). The relative importance of the various nonlinear mechanisms in a wide range of tidal interactions (review). Dans *Tidal Hydrodynamics*, pp. 237-268. New York: John Wiley & Sons.
- PAWLOWICZ, R., BEARDSLEY, B. & LENTZ, S. (2002). Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. *Computers & Geosciences* **28**(8), pp. 929-937.
- PELTIER, W.R. (1996). Global sea level rise and glacial isostatic adjustment: An analysis of data from the East Coast of North America. *Geophysical Research Letters* **23**(7), pp. 717-720.
- PELTIER, W.R. (2001). Global Glacial Isostatic Adjustment and Modern Instrumental Records of Relative Sea-Level History. Dans *Sea Level Rise: History and Consequences*, pp. 65-95. International Geophysics, San Diego: Academic Press Inc.
- PELTIER, W.R. (2004). Global glacial isostasy and the surface of the ice-age earth: The ICE-5G (VM2) Model and GRACE. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* **32**(1), pp. 111-149.
- PELTIER, W.R. & TUSHINGHAM, A.M. (1991). Influence of Glacial Isostatic Adjustment on Tide Gauge Measurements of Secular Sea Level Change. *Journal of Geophysical Research* **96**(B4), pp. 6779-6796.
- PICADO, A., DIAS, J.M. & FORTUNATO, A.B. (2010). Tidal changes in estuarine systems induced by local geomorphologic modifications. *Continental Shelf Research* **30**(17), pp. 1854-1864.
- PICARD, J. & DE LA HIRE, P. (1729). Observations faites à Brest et à Nantes pendant l'année 1679. Mémoire de l'Académie Royale des Sciences, rédigé entre 1666 et 1698. pp 379-390.
- PIGEOT, J. (2001). *Approche écosystémique de la contamination métallique du compartiment biologique benthique des littoraux Charentais : exemple du bassin de Marennes-Oléron*. Thèse de doctorat. Université de La Rochelle, 315p.
- PINEAU-GUILLOU, L. (2008). Niveaux marins extrêmes : jusqu'où la mer peut-elle monter ? *La lettre du SHOM aux navigateurs* (25), 5p.
- PIRAZZOLI, P.A. (1986). Secular trends of relative sea-level (RSL) changes indicated by tide-gauge records. *Journal of Coastal Research* **SI**(1), pp. 1-26.
- PIRAZZOLI, P.A. (1989). Present and near-future global sea-level changes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **75**(4), pp. 241-258.
- PIRAZZOLI, P.A. (1996). *Sea-level changes: the last 20,000 years*, Chichester: John Wiley & Sons, 211p.
- PIRAZZOLI, P.A. (2000). Surges, atmospheric pressure and wind change and flooding probability on the Atlantic coast of France. *Oceanologica Acta* **23**(6), pp. 643-661.
- PIRAZZOLI, P.A. & TOMASIN, A. (2007). Estimation of return periods for extreme sea levels: a simplified empirical correction of the joint probabilities method with examples from the French Atlantic coast and three ports in the southwest of the UK. *Ocean Dynamics* **57**(2), pp. 91-107.
- PIRAZZOLI, P.A., COSTA, S., DORNBUSCH, U. & TOMASIN, A. (2006). Recent evolution of surge-related events and assessment of coastal flooding risk on the eastern coasts of the English Channel. *Ocean Dynamics* **56**(5-6), pp. 498-512.
- PLOUVIEZ, P. (1960). Mission de MHCAN, cahier n°2/3, Nivellement Cholesky, rattachements divers. *Archives du SHOM*, Rayon n°2.1, cote SH2-886.
- POFFA, N., CREACH, R., KERINEC, J., CROGUENOC, B., KERVELLA, C., GOIRAND, V., LE GALL, R., LENGART, T. & TREGUIER, B. (2011). Evolution instrumentale des marégraphes du réseau RONIM. *Annales Hydrographiques* **6e série - Vol. 8**(777), 13p.
- POIRIER, C. (2010). *Enregistrements sédimentaires des changements environnementaux séculaires à millénaires par la micro- et la macrofaune benthiques littorales*. Thèse de doctorat. Université de La Rochelle, 216p.

- PONS, F. (2005). *Digitalisation d'enregistrements de marégraphes ou de limnigraphes*, Notice d'utilisation du logiciel NUNIEAU, CETE Méditerranée, 69p.
- PONTE, R.M. (1994). Understanding the relation between wind- and pressure-driven sea level variability. *Journal of Geophysical Research* **99**(C4), pp. 8033-8039.
- POUVREAU, N. (2008). *Trois cents ans de mesures marégraphiques en France : outils, méthodes et tendances des composantes du niveau de la mer au port de Brest*. Thèse de doctorat. Université de La Rochelle, 474p.
- POUVREAU, N., MARTIN MIGUEZ, B., SIMON, B. & WÖPPELMANN, G. (2006). Évolution de l'onde semi-diurne M2 de la marée à Brest de 1846 à 2005. *Comptes Rendus Geosciences* **338**(11), pp. 802-808.
- PRANDI, P., CAZENAVE, A. & BECKER, M. (2009). Is coastal mean sea level rising faster than the global mean? A comparison between tide gauges and satellite altimetry over 1993–2007. *Geophysical Research Letters* **36**(L05602), 5p.
- PRIVAT-DESCHANDEL, A. & FOCILLON, A.J. (1880). *Dictionnaire général des sciences théoriques et appliquées*, C. Delagrave. <http://books.google.com/books?id=V34AAAAAMAAJ>, consulté le 1^{er} décembre 2011.
- PUGH, D.T. (1987). *Tides, Surges and Mean Sea Level*, John Wiley & Sons., Chichester, 472p.
- PUGH, D.T. (2004). *Changing Sea Levels: Effects of Tides, Weather, and Climate*, Cambridge University Press, 280p.
- PUGH, D.T. & MAUL, G.A. (1999). Coastal sea level prediction for climate change. *Coastal and Estuarine Studies* **56**, pp. 377-404.
- RAHMSTORF, S., CAZENAVE, A., CHURCH, J.A., HANSEN, J.E., KEELING, R.F., PARKER, D.E. & SOMERVILLE, R.C.J. (2007). Recent Climate Observations Compared to Projections. *Science* **316**(5825), pp. 709.
- RAICICH, F. (2007). A Study of Early Trieste Sea Level Data (1875–1914). *Journal of Coastal Research* **234**, pp. 1067-1073.
- RANASINGHE, R. & PATTIARATCHI, C. (2000). Tidal inlet velocity asymmetry in diurnal regimes. *Continental Shelf Research* **20**(17), pp. 2347-2366.
- RAY, R.D. (2009). Secular changes in the solar semidiurnal tide of the western North Atlantic Ocean. *Geophysical Research Letters* **36**(L19601).
- RAY, R.D. & DOUGLAS, B.C. (2011). Experiments in reconstructing twentieth-century sea levels. *Progress In Oceanography* **91**(4), pp. 496-515.
- REault-MILLE, S. (2003). *Les marais charentais : Géohistoire des paysages du sel*, Rennes: Presses universitaires de Rennes, 272p.
- REBISCHUNG, P. & DUQUENNE, H. (2008). Le nouveau réseau de nivellement scientifique français : NIREF. *Poster*, Colloque CNFG2, Paris.
- ROLLET DE L'ISLE, M. (1905). Observation, étude et prédiction des marées. Imprimerie nationale, Paris. *Archives du SHOM*.
- ROLLET DE L'ISLE, M. (1950). Etude historique sur les ingénieurs hydrographes et le service hydrographique de la marine (1814-1914). Recueil de documents et mémoires relatifs à l'hydrographie et à la navigation. 4^{ème} série, Tome premier (bis). *Archives du SHOM*.
- ROSSI, V., HORTON, B.P., CORBETT, D.R., LEORRI, E., PEREZ-BELMONTE, L. & DOUGLAS, B.C. (2011). The application of foraminifera to reconstruct the rate of 20th century sea level rise, Morbihan Golfe, Brittany, France. *Quaternary Research* **75**(1), pp. 24-35.
- ROTHE, J.-P. (1983). « La séismicité de la France de 1971 à 1977 » dans Observations sismologiques. Institut de Physique du Globe.
- SAUZEAU, T. (2009). *Fort Boyard*, La Crèche: Geste éditions, 95p.
- SHAW, A.G.P. & TSIMPLIS, M.N. (2010). The 18.6 yr nodal modulation in the tides of Southern European coasts. *Continental Shelf Research* **30**(2), pp. 138-151.
- SHENNAN, I. & WOODWORTH, P.L. (1992). A comparison of late Holocene and twentieth-century sea-level trends from the UK and North Sea region. *Geophysical Journal International* **109**(1), pp. 96-105.
- SHOM (2011). *Références Altimétriques Maritimes. Cotes du zéro hydrographique et niveaux caractéristiques de la marée*, Brest: Service Hydrographique et Océanographique de la Marine, 98p.

- SILVESTRE, J. (1912). *Les brûlots anglais en rade de l'île d'Aix (1809)*, A. Savaète (Paris), 252p. <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k66595j>, consulté le 1^{er} décembre 2011.
- SIMON, B. (2007a). *La marée océanique côtière*, Paris: Institut océanographique, 433p.
- SIMON, B. (2007b). *Utilisation du programme « mas »*, SHOM, Notice interne, 14p.
- SIMON, B. (2008). *Statistiques des niveaux marins extrêmes de pleine mer Manche et Atlantique*, CD-ROM, produit commun SHOM-CETMEF.
- SMITH, D.E., HARRISON, S., FIRTH, C.R. & JORDAN, J.T. (2011). The early Holocene sea level rise. *Quaternary Science Reviews* **30**(15-16), pp. 1846-1860.
- SORNIN, J-M. (1981). *Processus sédimentaires et biodéposition liés à différents modes de conchyliculture – Baie de Cancale, Anse de l'Aiguillon et Bassin de Marennes-Oléron*. Thèse de doctorat. Université de Nantes, 188p.
- SPEER, P.E. & AUBREY, D.G. (1985). A study of non-linear tidal propagation in shallow inlet/estuarine systems, Part II: Theory. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **21**(2), pp. 207-224.
- SPEER, P.E., AUBREY, D.G. & FRIEDRICH, C.T. (1991). Nonlinear hydrodynamics of shallow tidal inlet/bay systems. Dans *Tidal hydrodynamics*, pp. 321-339. John Wiley and Sons.
- STIRLING, C., ESAT, T., LAMBECK, K. & MCCULLOCH, M. (1998). Timing and duration of the Last Interglacial: evidence for a restricted interval of widespread coral reef growth. *Earth and Planetary Science Letters* **160**(3-4), pp. 745-762.
- STRAPPINI, S., DUBOS, C. & LAUX, F. (2008). Patrimoine de l'estuaire : Le phare de Cordouan, Versailles de la mer. http://archives.gironde.fr/exposition/phare_cordouan.asp, consulté le 1^{er} décembre 2011.
- TAMISIEA, M. & MITROVICA, J. (2011). The Moving Boundaries of Sea Level Change: Understanding the Origins of Geographic Variability. *Oceanography* **24**(2), pp. 24-39.
- TARATTE (1866). Notice historique sur la construction (des assises) du fort Boyard. *Archives du génie (SHAT)*, Vincennes, Article 8, Section 1.
- TERS, M. (1986). Variations in Holocene sea level on the French Atlantic coast and their climatic significance. Dans *Climate: history, periodicity and predictability*, pp. 204-237. New York: Van Nostrand Reinhold.
- TESSON, M. (1973). *Aspects dynamiques de la sédimentation dans la baie de Marennes-Oléron (France)*. Thèse de doctorat. Université de Bordeaux 1, 128p.
- TESTUT, L., WÖPPELMANN, G., SIMON, B. & TECHINE, P. (2006). The sea level at Port-aux-Français, Kerguelen Island, from 1949 to the present. *Ocean Dynamics* **56**(5-6), pp. 464-472.
- TESTUT, L., CALZAS, M., DREZEN, C., GUILLOT, A., BONNEFOND, P., LAURAIN, O. & GAILLEMIN, C. (2010a). Precision and accuracy of GPS buoys: an inter-comparison experiment. *Poster*, OSTST Meeting, Lisbonne, Portugal, 18-21 octobre 2010.
- TESTUT, L., MARTIN MIGUEZ, B., WÖPPELMANN, G., TIPHANEAU, P., POUVREAU, N. & KARPYTCHEV, M. (2010b). Sea level at Saint Paul Island, southern Indian Ocean, from 1874 to the present. *Journal of Geophysical Research* **115**(C12028), 10p.
- TOMASIN, A. (2005). *The software « POLIFEMO » for tidal analysis*, ISMAR-CNR, Venice, Italy, Technical note n°202.
- TOMASIN, A. & PIRAZZOLI, P.A. (1999). The seiches in the Adriatic Sea. *Atti Istituto Veneto di Scienze Lettere ed Arti* **CLVII**, pp. 299-316.
- TOMASIN, A. & PIRAZZOLI, P.A. (2008). Extreme Sea Levels in the English Channel: Calibration of the Joint Probability Method. *Journal of Coastal Research* **24**(4), pp. 1-13.
- TRUPIN, A. & WAHR, J. (1990). Spectroscopic analysis of global tide gauge sea level data. *Geophysical Journal International* **100**(3), pp. 441-453.
- TSIMPLIS, M.N. & SPENCER, N.E. (1997). Collection and analysis of monthly mean sea level data in the Mediterranean and the Black Sea. *Journal of Coastal Research* **13**(2), pp. 534-544.
- ULLMANN, A. & MONBALIU, J. (2009). Changes in atmospheric circulation over the North Atlantic and sea-surge variations along the Belgian coast during the twentieth century. *International Journal of Climatology* **30**, pp. 558-568.

- ULLMANN, A., PONS, F. & MORON, V. (2005). Tool Kit Helps Digitize Tide Gauge Records. *Eos, Transactions American Geophysical Union* **86**(38).
- ULLMANN, A., PIRAZZOLI, P.A. & TOMASIN, A. (2007). Sea surges in Camargue: Trends over the 20th century. *Continental Shelf Research* **27**(7), pp. 922-934.
- UNESCO (1983). *Stations marégraphiques opérationnelles*, Commission Océanographique Intergouvernementale, Série technique, n°23, 35p.
- UNESCO (1985). *Manual on Sea-Level Measurement and Interpretation. Volume I. Basic procedures*, Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides, n°14, 78p.
- UNESCO (2002). *Manual on Sea Level Measurement and Interpretation. Volume III. Reappraisals and Recommendations as of the year 2000.*, Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides, n°14, 55p.
- UNESCO (2003). *Workshop on new technical developments in sea and land level observing systems*, Intergovernmental Oceanographic Commission, Workshop Report, n°193, 196p.
- VAN DE CASTEELE, C. (1962). Au sujet du contrôle du fonctionnement des marégraphes enregistreurs. *Présentation orale*, IGN, Section d'Océanographie Physique du Comité National Français de Géodésie et Géophysique, 26 Juin 1962.
- VAN ONSELEN, K.I. (2000). *The influence of data quality on the detectability of sea-level height variations*. Thèse de doctorat. Delft University, 204p.
- VERMEER, M. & RAHMSTORF, S. (2009). Global sea level linked to global temperature. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **106**(51), pp. 21527 -21532.
- VIENNOT & THURNINGER (1894). Port de La Rochelle - Nivellement des ouvrages du port et de la rade : cotes rapportées à différents plans de comparaison. *Archives AD17*, Série S, fonds DDE service maritime, Ponts et Chaussées, cote DDE 3965 : « Nivellements généraux », chemise A.
- VIGNAL, J. (1935). *Les changements du niveau moyen des mers le long des côtes en Méditerranée et dans le monde*, Annales des Ponts et Chaussées, Mémoires et Documents, 52p.
- VILIBIC, I. (2006). The role of the fundamental seiche in the Adriatic coastal floods. *Continental Shelf Research* **26**(2), pp. 206-216.
- WAHL, T., JENSEN, J. & FRANK, T. (2010). On analysing sea level rise in the German Bight since 1844. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **10**(2), pp. 171-179.
- WAHL, T., JENSEN, J., FRANK, T. & HAIGH, I.D. (2011). Improved estimates of mean sea level changes in the German Bight over the last 166 years. *Ocean Dynamics* **61**(5), pp. 701-715.
- WARRICK, R.A. & OERLEMANS, J. (1990). Sea Level Rise. Dans *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment. Contribution of Working Group I to the First Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pp. 258-281. Cambridge University Press.
- WARRICK, R.A., LE PROVOST, C., MEIER, M.F., OERLEMANS, J. & WOODWORTH, P.L. (1995). Changes in Sea Level. Dans *Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pp. 359-405. Cambridge University Press.
- WATSON, C., WHITE, N.J., COLEMAN, R., CHURCH, J., MORGAN, P.J. & GOVIND, R. (2004). TOPEX/Poseidon and Jason-1: Absolute Calibration in Bass Strait, Australia. *Marine Geodesy* **27**(1-2), pp. 107-131.
- WEBER, N. (2004). *Morphologie, architecture des dépôts, évolution séculaire et millénaire du littoral Charentais. Apports de la sismique réflexion combinée à des suivis bathymétriques et validée par des vibrocarottages*. Thèse de doctorat. Université de La Rochelle, 357p.
- WHITE, N.J., CHURCH, J.A. & GREGORY, J.M. (2005). Coastal and global averaged sea level rise for 1950 to 2000. *Geophysical Research Letters* **32**(L01601), 4p.
- WOODWORTH, P.L. (1999a). *A Study of Changes in High Water Levels and Tides at Liverpool during the Last TwoHundred and Thirty Years with Some Historical Background.*, Report No. 56, Merseyside: Proudman Oceanographic Laboratory, 92p.
- WOODWORTH, P.L. (1999b). High waters at Liverpool since 1768: The UK's longest sea level record. *Geophysical Research Letters* **26**(11), pp. 1589-1592.

- WOODWORTH, P.L. (2003). Some Comments on the Long Sea Level Records from the Northern Mediterranean. *Journal of Coastal Research* **19**(1), pp. 212-217.
- WOODWORTH, P.L. (2006). Some important issues to do with long-term sea level change. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* **364**(1841), pp. 787-803.
- WOODWORTH, P.L. (2010). A survey of recent changes in the main components of the ocean tide. *Continental Shelf Research* **30**(15), pp. 1680-1691.
- WOODWORTH, P.L. & BLACKMAN, D.L. (2002). Changes in extreme high waters at Liverpool since 1768. *International Journal of Climatology* **22**(6), pp. 697-714.
- WOODWORTH, P.L. & SMITH, D.E. (2003). A one year comparison of radar and bubbler tide gauges at Liverpool. *International Hydrographic Review* **4**(3), 8p.
- WOODWORTH, P.L. & PLAYER, R. (2003). The Permanent Service for Mean Sea Level: An Update to the 21st Century. *Journal of Coastal Research* **19**(2), pp. 287-295.
- WOODWORTH, P.L. & BLACKMAN, D.L. (2004). Evidence for Systematic Changes in Extreme High Waters since the Mid-1970s. *Journal of Climate* **17**(6), pp. 1190-1197.
- WOODWORTH, P.L., SHAW, S.M. & BLACKMAN, D.L. (1991). Secular trends in mean tidal range around the British Isles and along the adjacent European coastline. *Geophysical journal international* **104**(3), pp. 593-609.
- WOODWORTH, P.L., TSIMPLIS, M.N., FLATHER, R.A. & SHENNAN, I. (1999). A review of the trends observed in British Isles mean sea level data measured by tide gauges. *Geophysical Journal International* **136**(3), pp. 651-670.
- WOODWORTH, P.L., BLACKMAN, D.L., PUGH, D.T. & VASSIE, J.M. (2005). On the role of diurnal tides in contributing to asymmetries in tidal probability distribution functions in areas of predominantly semi-diurnal tide. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **64**(2-3), pp. 235-240.
- WOODWORTH, P.L., WHITE, N.J., JEVREJEVA, S., HOLGATE, S.J., CHURCH, J.A. & GEHRELS, W.R. (2009a). Evidence for the accelerations of sea level on multi-decade and century timescales. *International Journal of Climatology* **29**(6), pp. 777-789.
- WOODWORTH, P.L., TEFERLE, F.N., BINGLEY, R.M., SHENNAN, I. & WILLIAMS, S.D. (2009b). Trends in UK mean sea level revisited. *Geophysical Journal International* **176**(1), pp. 19-30.
- WOODWORTH, P.L., POUVREAU, N. & WÖPPELMANN, G. (2010). The gyre-scale circulation of the North Atlantic and sea level at Brest. *Ocean Science* **6**(1), pp. 185-190.
- WOODWORTH, P.L., MENENDEZ, M. & GEHRELS, R.W. (2011a). Evidence for Century-Timescale Acceleration in Mean Sea Levels and for Recent Changes in Extreme Sea Levels. *Surveys in Geophysics* **32**(4-5), pp. 603-618.
- WOODWORTH, P.L., GEHRELS, W.R. & NEREM, S. (2011b). Nineteenth and Twentieth Century Changes in Sea Level. *Oceanography* **24**, pp. 80-93.
- WÖPPELMANN, G. (1997). *Rattachement géodésique des marégraphes dans un système de référence mondial par techniques de géodésie spatiale*. Thèse de doctorat. Observatoire de Paris, 263p.
- WÖPPELMANN, G. (2007). *Géodésie et Niveau de la mer*. Dossier d'Habilitation à Diriger des Recherches. Université de La Rochelle, 193p.
- WÖPPELMANN, G. & MARCOS, M. (2011). Coastal sea level rise in southern Europe and the non-climate contribution of vertical land motion. *Journal of Geophysical Research* (in press).
- WÖPPELMANN, G., ALLAIN, S., BAHUREL, P., LANNUZEL, S. & SIMON, B. (1999). Zéro hydrographique : vers une détermination globale. *Revue XYZ* **79**, pp. 27-34.
- WÖPPELMANN, G., POUVREAU, N. & SIMON, B. (2006). Brest sea level record: a time series construction back to the early eighteenth century. *Ocean Dynamics* **56**(5-6), pp. 487-497.
- WÖPPELMANN, G., POUVREAU, N., COULOMB, A., SIMON, B. & WOODWORTH, P.L. (2008). Tide gauge datum continuity at Brest since 1711: France's longest sea-level record. *Geophysical Research Letters* **35**.
- WÖPPELMANN, G., LETETREL, C., SANTAMARIA, A., BOUIN, M-N., COLLILIEUX, X., ALTAMIMI, Z., WILLIAMS, S.D.P. & MARTIN MIGUEZ, B. (2009). Rates of sea-level change over the past century in a geocentric reference frame. *Geophysical Research Letters* **36**(L12607).
- WUNSCH, C. & STAMMER, D. (1997). Atmospheric loading and the oceanic « inverted barometer » effect. *Reviews of Geophysics* **35**(1), pp. 79-107.

COMMUNICATIONS SCIENTIFIQUES

Articles de revue :

► SENECHAL N., GOURIOU T., CASTELLE B., PARISOT J-P., CAPO S. & BUJAN S. (2009). Morphodynamic response of a meso- to macro-tidal intermediate beach based on a long-term data set. *Geomorphology* **107**(3-4), 263-274. doi:10.1016/j.geomorph.2008.12.016

► GOURIOU T., POUVREAU N. & WÖPPELMANN G. (2008). Mesures du niveau de la mer en France : un patrimoine historique à fort potentiel scientifique. L'exemple du littoral charentais. *Géologues* **158**, 83-89

Communication orale :

► GOURIOU T. & WÖPPELMANN G. (2010). A joint analysis of sea-level and meteorological data over the past 19th and 20th century on the Charente-Maritime French atlantic coast. *Présentation orale*, Assemblée générale de l'EGU (European Geosciences Union), 05 mai 2010, Vienne (Autriche).

Posters :

► GOURIOU T. (2009). Et si la mer montait de 3 mètres... *Poster*, Colloque des Doctorants de 2^e année de l'université de La Rochelle, 18 mai 2009, La Rochelle (France).

Prix du meilleur Poster de jeune chercheur dans la catégorie « *Climate: Past, Present, Future* » pour :

► GOURIOU T., WÖPPELMANN G. & POUVREAU N. (2008). Tide gauge records on the Charente-Maritime french atlantic coast back to the middle of the 19th century. *Poster*, Assemblée générale de l'EGU (European Geosciences Union), 13-18 avril 2008, Vienne (Autriche).

► CAPO S., BUJAN S., PARISOT J-P., SÉNÉCHAL N. & GOURIOU T. (2008). Evolution morphodynamique d'une plage du littoral aquitain : la plage du Truc Vert en Gironde, France. *Poster*, 10^e Journées Nationales Génie Côtier Génie Civil, 14-16 octobre 2008, Sophia Antipolis (France).

► PARISOT J-P., BUJAN S., BRETTEL P., MICHEL D., LELABOUSSE C., GOURIOU T., SENECHAL N. & CAPO S. (2007). Traitement des données GPS acquises sur le littoral aquitain : optimisation des mesures effectuées en quad. *Poster*, 11^e Congrès Français de Sédimentologie, 21-27 octobre 2007, Caen (France).

LISTE DES ANNEXES

Les annexes se trouvent dans un manuscrit séparé intitulé :

Volume II : Annexes

Annexe A : Fiches descriptives des repères

- A.1. Vieux port de La Rochelle
- A.2. Port de La Pallice
- A.3. Île d'Aix
- A.4. Fort Enet
- A.5. Fort Boyard
- A.6. Phare de Cordouan

Annexe B : Mémoire sur les observations à faire du flux et du reflux de la mer

Annexe C : Ecart entre les systèmes NGF à Rochefort

Annexe D : Tables de corrections incluses dans les registres de marée de Chazallon

Annexe E : Comparaison des séries de pression atmosphérique

Annexe F : Notes des observateurs dans les registres de marée

Annexe G : Evolution à long-terme des ondes de marée

Annexe H : Exemple de fichier de constantes harmoniques calculées par *mas*

Annexe I : Exemple de fichier de constantes harmoniques calculées par *t_tide*

ANNEXES ELECTRONIQUES

Annexe E1 : Inventaire détaillé des données du niveau de la mer répertoriées sur l'ensemble du littoral charentais

Annexe E2 : Fichiers de données de pression atmosphérique (Brest : 1876-1884 ; La Rochelle : 1863-1872 ; Enet-Boyard : 1860-1909)

Annexe E3 : Fichiers de données du niveau marin (La Rochelle : 1775-2011 ; Aix-Enet-Boyard : 1824-2011 ; Cordouan : 1812-1994 ; Pertuis d'Antioche : 1824-2011) et niveaux moyens et PBM

Annexe E4 : Graphiques permettant de contrôler visuellement la qualité des hauteurs horaires

Annexe E5 : Graphiques des comparaisons (« *buddy checking* ») des moyennes journalières des séries Enet-Boyard, La Rochelle et Brest.

Annexe E6 : Liste des sauts répertoriés et corrigés pour les séries Enet et Boyard

Annexe E7 : Scripts MATLAB permettant d'obtenir les graphiques des annexes E4 et E5

Annexe E8 : Sauvetage des données archivées : photographies ou scans des documents originaux

Evolution des composantes du niveau marin à partir d'observations de marégraphie effectuées depuis la fin du 18^e siècle en Charente-Maritime

Les estimations de la remontée générale du niveau de la mer, de l'ordre de 17 ± 2 cm sur le siècle dernier, masquent une réalité très variable d'une région à l'autre. Qu'en est-il du littoral charentais ? Des séries temporelles de plus de 40-50 ans sont souvent indispensables pour tirer des tendances fiables à long terme sur les composantes du niveau marin : niveau moyen de la mer, ondes de marée et effets météorologiques. Or, de nombreux lots de mesures marégraphiques du littoral charentais « sommeillaient » dans les centres d'archive français, i.e. : La Rochelle-Vieux port (1775-1892), La Rochelle-La Pallice (1885-auj.), île d'Aix (1824-auj.), fort Enet (1859-1873), fort Boyard (1873-1909) et Cordouan (1812-1994). Les objectifs de nos travaux de recherche étaient multiples : inventorier, sauvegarder et numériser des lots de mesures historiques du niveau marin, puis construire des séries temporelles recomposées à partir de ces lots de mesures hétérogènes, temporellement et spatialement, et enfin les exploiter pour mieux décrire et comprendre l'évolution à long terme du niveau de la mer. La qualité des trois séries construites (La Rochelle : 1775-auj. ; Aix-Enet-Boyard : 1824-auj. ; et Cordouan : 1812-1994) a ensuite été éprouvée en détail afin d'évaluer le niveau de précision de notre reconstruction. A partir de ces séries inédites, nous avons pu étudier l'évolution des composantes du niveau marin. Suite à ces travaux, nous fournissons un inventaire le plus exhaustif possible détaillant les mesures de 25 observatoires de Charente-Maritime, de 1775 à aujourd'hui. Les données des séries temporelles ainsi que des éléments permettant d'apprécier leur qualité seront bientôt disponibles en ligne sur REFMAR (refmar.shom.fr), SONEL (www.sonel.org) et au PSMSL (www.psmsl.org). Nos résultats positifs nous ont permis de reconstruire une série encore plus globale, celle du pertuis d'Antioche, à partir des moyennes mensuelles du niveau marin des séries de La Rochelle et d'Aix-Enet-Boyard. Parmi les résultats marquants obtenus, le niveau moyen de la mer s'est élevé de $+1,38 \pm 0,08$ mm/an dans le pertuis d'Antioche sur la période 1860-2010. Ce résultat est cohérent avec Liverpool ($+1,2 \pm 0,1$ mm/an sur la période 1858-1997 [Woodworth, 1999a]) et avec les récents résultats suggérant que l'élévation du niveau marin sur les côtes atlantiques européennes est moins importante qu'au niveau mondial ($+1,7 \pm 0,3$ mm/an sur la période 1870-2004 [Church & White, 2006]).

Mots clés : niveau marin, marée, surcotes, marégraphes, nivellement, données historiques, Charente-Maritime

Changes in sea level components from tide gauge data since the end of the 18th century along the Charente-Maritime French Atlantic coast

Global sea level rise, which is estimated at 17 ± 2 cm over the last century, does not reflect the differences of the sea level evolution between places across the world. What is the situation along the Charente-Maritime French Atlantic coast? Time series covering a period of at least 40-50 years are vital to establish reliable long-term trends of sea level components: mean sea level, tidal constituents and meteorological effects. Many tide gauge data sets of the Charente-Maritime coast have recently been rediscovered in archives: La Rochelle-Vieux port (1775-1892), La Rochelle-La Pallice (1885-today), île d'Aix (1824-today), fort Enet (1859-1873), fort Boyard (1873-1909) and Cordouan (1812-1994). The aims of this thesis were firstly to inventory, to rescue and to digitize historical sea level data sets. Secondly, those data sets were put back together in order to construct continuous time series, which have been analysed and led to a better description of long-term sea level changes. In this way, three time series were constructed (La Rochelle: 1775-today; Aix-Enet-Boyard: 1824-today; and Cordouan: 1812-1994) and have been deeply examined to assess the construction validity and quality. From these new time series, we could estimate changes of sea level components. Thanks to this research work, we have been able to provide an inventory as exhaustive as possible, with detailed measurements of twenty five Charente-Maritime's stations from 1775 to nowadays. All those data will be soon available on REFMAR (refmar.shom.fr), SONEL (www.sonel.org) and PSMSL (www.psmsl.org) websites. From those positive results, we have been able to reconstruct a more global time series (Pertuis d'Antioche) from the monthly mean sea levels of La Rochelle and Aix-Enet-Boyard. Among our results, we can highlight that the mean sea level trend on Pertuis d'Antioche is estimated at $+1.38 \pm 0.08$ mm/year, from 1860 to 2010. This result is consistent with Liverpool's trend ($+1.2 \pm 0.1$ mm/year from 1858 to 1997 [Woodworth, 1999a]) and also with recent results suggesting that sea level rise along the European Atlantic coasts is slower than global sea level rise ($+1.7 \pm 0.3$ mm/year from 1870 to 2004 [Church & White, 2006]).

Keywords: sea level, tide, storm surges, tide gauges, leveling, historical observations, Charente-Maritime (France)



UMR 6250 LIENSs (Littoral, Environnement et Sociétés)
2 rue Olympe de Gouges, 17000 LA ROCHELLE



UNIVERSITÉ DE LA ROCHELLE

ÉCOLE DOCTORALE
Sciences pour l'Environnement - Gay Lussac

Laboratoire « Littoral, Environnement et Sociétés » (UMR 6250 LIENSs)

THÈSE

présentée par :

Thomas GOURIOU

soutenue le 26 mars 2012
pour l'obtention du grade de Docteur de l'université de La Rochelle

Discipline : Océanographie physique

Evolution des composantes du niveau marin à partir d'observations de marégraphie effectuées depuis la fin du 18^e siècle en Charente-Maritime

Volume II : Annexes

JURY :

Pierre RICHARD
Nicolas FLORSCH
Paolo PIRAZZOLI
Michel BOCHACA
Alain COULOMB
Laurent TESTUT
Guy WÖPPELMANN
Bernard SIMON

Professeur, Université de La Rochelle
Professeur, Université Pierre et Marie Curie, Paris
Directeur de Recherche, CNRS, Meudon
Professeur, Université de La Rochelle
Ingénieur, IGN, Saint-Mandé
Physicien-adjoint, LEGOS, Toulouse
Maître de conférences HDR, Université de La Rochelle
Ingénieur à la retraite, SHOM, Brest

Président du jury
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur
Directeur de thèse
Invité

TABLE DES ANNEXES

Annexe A : Fiches descriptives des repères.....	4
A.1. Vieux port de La Rochelle.....	4
A.2. Port de La Pallice.....	14
A.3. Île d’Aix.....	18
A.4. Fort Enet.....	27
A.5. Fort Boyard.....	31
A.6. Phare de Cordouan.....	39
Annexe B : Mémoire sur les observations à faire du flux et du reflux de la mer	45
Annexe C : Ecart entre les systèmes NGF à Rochefort	47
Annexe D : Tables de corrections incluses dans les registres de marée de Chazallon	48
Annexe E : Comparaison des séries de pression atmosphérique.....	49
Annexe F : Notes des observateurs dans les registres de marée.....	55
Annexe G : Evolution à long-terme des ondes de marée	73
Annexe H : Exemple de fichier de constantes harmoniques calculées par <i>mas</i>	79
Annexe I : Exemple de fichier de constantes harmoniques calculées par <i>t_tide</i>	83

ANNEXES ELECTRONIQUES

Annexe E1 : Inventaire détaillé des données du niveau de la mer répertoriées sur l’ensemble du littoral charentais

Annexe E2 : Fichiers de données de pression atmosphérique (Brest : 1876-1884 ; La Rochelle : 1863-1872 ; Enet-Boyard : 1860-1909)

Annexe E3 : Fichiers de données du niveau marin (La Rochelle : 1775-2011 ; Aix-Enet-Boyard : 1824-2011 ; Cordouan : 1812-1994 ; Pertuis d’Antioche : 1824-2011) et niveaux moyens et PBM

Annexe E4 : Graphiques permettant de contrôler visuellement la qualité des hauteurs horaires

Annexe E5 : Graphiques des comparaisons (« *buddy checking* ») des moyennes journalières des séries Enet-Boyard, La Rochelle et Brest.

Annexe E6 : Liste des sauts répertoriés et corrigés pour les séries Enet et Boyard

Annexe E7 : Scripts MATLAB permettant d’obtenir les graphiques des annexes E4 et E5

Annexe E8 : Sauvetage des données archivées : photographies ou scans des documents originaux

Annexe A : Fiches descriptives des repères

A.1. Vieux port de La Rochelle

A.1.1. Repères de nivellement

Voici un historique de la cote des principaux repères de nivellement et/ou de marée présents sur le Vieux port de La Rochelle de 1824 à nos jours. Cet historique a été réalisé à partir d'informations retrouvées dans les centres d'archives de l'Institut Géographique National (IGN), du Service hydrographique et océanographique de la marine (SHOM), des archives départementales de la Charente-Maritime (AD17) et du Service Historique de la Défense - Marine de Rochefort (SHD-Marine Rochefort). Après une vue d'ensemble précisant l'emplacement de chaque repère (*figure A-1*), les repères sont détaillés précisément un à un, et toutes les informations recueillies sur leurs cotes historiques sont indiquées.

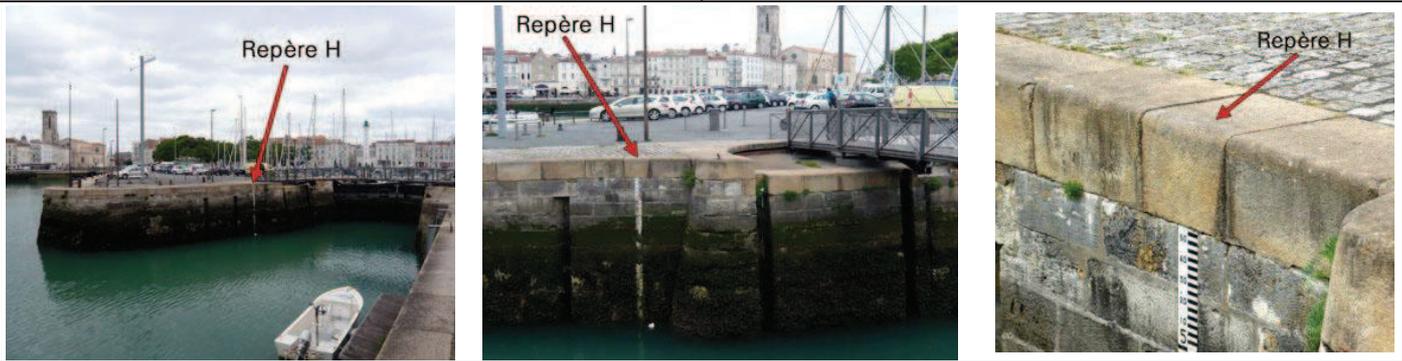


Figure A-1 : Localisation des différents repères de nivellement et/ou de marée au Vieux port de La Rochelle. Photographie aérienne récente modifiée (© 2011 - IGN).

REPÈRE H (existant)

Période : 1824 à aujourd'hui

Type : Repère naturel



Description : Couronnement du bajoyer aval, côté nord, de l'écluse du bassin à flot intérieur du Vieux port de La Rochelle. La pierre qui a servi de repère est celle se situant à l'aplomb de l'échelle de marée. **Pour les hydrographes, c'est le repère fondamental du Vieux port depuis 1824.** Il sera consolidé par l'implantation d'un rivet en 1957 (repère O.O.K3-24-I), afin de le définir plus précisément.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
1824	Couronnement	+ 7,00 m	zéro de réduction des sondes	« Marées - 1824, Côtes de France », Beautemps-Beaupré, archives du SHD-Marine (Rochefort), cote 7JJ 364
1861	Couronnement	+ 7,00 m	Zéro de Beautemps-Beaupré	« Port de La Rochelle et dépendances. Affaires diverses (1853-1870), archives AD17, cote DDE 3509
		+ 4,207 m	NGF-Bourdalouë	« Nivellement général de la France, lignes de base, 20 mars 1862 », Leclerc, archives de l'IGN
1868	Surface supérieure	+ 4,203 m	NGF-Bourdalouë	« Année 1868, Plans de nivellement, Echelle de marées, Seuils, Repères. Travail de M. Bona-Christave, Capitaine de vaisseau, directeur du port », archives du SHD Rochefort, cote 2D45t
		+ 7,000 m	Zéro de Beautemps-Beaupré	
1876	Couronnement	+ 5,203 m	NGF-Bourdalouë	« Baie de La Rochelle - Etude Hydrographique par MM. Bouquet de la Grye et Hatt - 1876 », archives du SHOM
1894	Couronnement	+ 4,203 m	NGF-Bourdalouë	« Port de La Rochelle, Nivellement des ouvrages du port et de la rade », Viennot, archives AD17, cote DDE 3965
		+ 7,203 m	Zéro des cartes marines	
1913	Couronnement	+ 3,655 m	NGF-Lallemand	Cahier de « Calcul des altitudes des repères, réseau de 3 ^e ordre », opérateur : Guy, archives de l'IGN
2010	H	+ 3,818 m	NGF-IGN69	UMR 6250 LIENSs

REPERE O.O.K3-24c-I (existant)

Période : ? à aujourd'hui

Type : Repère « Téton » métallique



Description : Repère « téton » métallique scellé sur un des quais de la porte des Deux-Moulins, à mi-distance entre les deux échelles de marée (en pieds et pouces) gravées dans le mur. Déjà en place, il a été choisi comme repère de nivellement par l'équipe LIENSs le 15 juin 2010, car situé à proximité des échelles de marée gravées.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
2010	B	+ 4,608 m	NGF-IGN69	UMR 6250 LIENSs
2011	O.O.K3-24c-I	+ 4,6098 m	NGF-IGN69	IGN - Triplet

REPERE O.HO-2 • PHARE BLANC (existant)

Période : 1861 à aujourd'hui

Type : Repère Bourdalouë



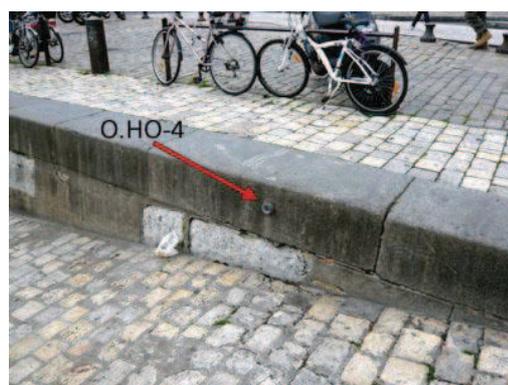
Description : Repère scellé au socle du phare blanc (ou Grand phare), au fond du Vieux port. Il est situé au n°31 du quai Valin, à environ 0,60 m au dessus du sol.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
1861	R. du grand phare	+ 5,599 m	NGF-Bourdalouë	« Nivellement général de la France, lignes de base, 20 mars 1862 », Leclerc, archives de l'IGN
1876	R. du grand phare	+ 5,599 m	NGF-Bourdalouë	« Baie de La Rochelle - Etude Hydrographique par MM. Bouquet de la Grye et Hatt - 1876 », archives du SHOM
1894	R. du feu blanc	+ 5,599 m	NGF-Bourdalouë	« Port de La Rochelle, Nivellement des ouvrages du port et de la rade », Viennot, archives AD17, cote DDE 3965
1913	R.B.-605-3	+ 4,968 m	NGF-Lallemand	Cahier de « Calcul des altitudes des repères, réseau de 3 ^e ordre », opérateur : Guy, archives de l'IGN
1957	O.O.K3-22	+ 4,9680 m	NGF-Lallemand	Cahier de « Calcul des altitudes des repères, réseau de 3 ^e ordre », opérateur : Dupuy, archives de l'IGN
1986	O.O.K3-22	+ 5,1535 m	NGF-IGN69	Cahier de « Calcul des altitudes des repères, réseau de 3 ^e ordre », opérateur : Dupuy, archives de l'IGN
1995	O.HO-2	+ 5,150 m	NGF-IGN69	http://geodesie.ign.fr/fiches/ (consulté le 26 avril 2011)
2011	O.HO-2	+ 5,152 m	NGF-IGN69	IGN - Triplet

REPERE O.HO-4 • QUAI DUPERRÉ (existant)

Période : 1995 à aujourd'hui

Type : Repère cylindrique type M (IGN)



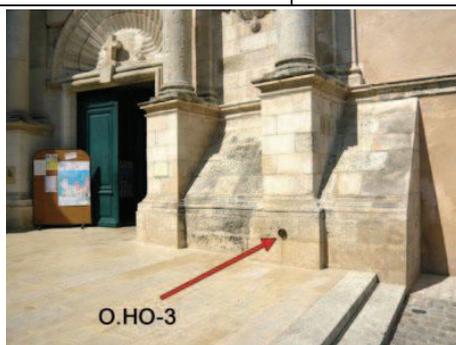
Description : Repère scellé au quai, face sud-est, à l'angle nord-ouest du Vieux port. Il est situé à environ 0,20 m au dessous de l'arrête supérieure.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
1995	O.HO-4	+ 3,547 m	NGF-IGN69	http://geodesie.ign.fr/fiches/ (consulté le 26 avril 2011)
2010	O.HO-4	+ 3,542 m	NGF-IGN69	UMR 6250 LIENSs
2011	O.HO-4	+ 3,539 m	NGF-IGN69	IGN - Triplet

REPERE O.HO-3 • EGLISE SAINT-SAUVEUR (existant)

Période : 1861 à aujourd'hui

Type : Repère Bourdalouë



Description : Repère scellé sur le soubassement du pilier le plus au sud, sur le mur de façade de l'église Saint-Sauveur.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
1861	R. église St-Sauveur	+ 6,040 m	NGF-Bourdalouë	« Nivellement général de la France, lignes de base, 20 mars 1862 », Leclerc, archives de l'IGN
1913	R.B.-605-1	+ 5,412 m	NGF-Lallemand	Cahier de « Calcul des altitudes des repères, réseau de 3 ^e ordre », opérateur :Guy, archives de l'IGN
1957	O.O.K3-22 ^a	+ 5,4120 m	NGF-Lallemand	Cahier de « Calcul des altitudes des repères, réseau de 3 ^e ordre », opérateur :Dupuy, archives de l'IGN
1986	O.O.K3-22 ^a	+ 5,5982 m	NGF-IGN69	Cahier de « Calcul des altitudes des repères, réseau de 3 ^e ordre », opérateur :Dupuy, archives de l'IGN
1995	O.HO-3	+ 5,597 m	NGF-IGN69	http://geodesie.ign.fr/fiches/ (consulté le 26 avril 2011)
2010	O.HO-3	+ 5,599 m	NGF-IGN69	UMR 6250 LIENSs
2011	O.HO-3	+ 5,601 m	NGF-IGN69	IGN - Triplet

REPERE O.O.K3-24A-III (existant)

Période : 1894 à aujourd'hui

Type : Repère naturel



Description : Couronnement du bajoyer amont, côté sud, de l'écluse du bassin à flot extérieur du Vieux port de La Rochelle. La pierre qui a servi de repère est la première pierre se trouvant à l'ouest de celle se situant à l'aplomb de l'échelle de marée.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
1894	Couronnement	+ 4,573 m	NGF-Bourdalouë	« Port de La Rochelle, Nivellement des ouvrages du port et de la rade », Viennot, archives AD17, cote DDE 3965
1913	O.O.K3-24 ^a -I ^{bis}	+ 4,114 m	NGF-Lallemand	Cahier de « Calcul des altitudes des repères, réseau de 3 ^e ordre », opérateur :Guy, archives de l'IGN
1957	O.O.K3-24 ^a -II	+ 4,1095 m	NGF-Lallemand	Cahier de « Calcul des altitudes des repères, réseau de 3 ^e ordre », opérateur :Dupuy, archives de l'IGN
1986	O.O.K3-24 ^a -III	+ 4,2958 m	NGF-IGN69	Cahier de « Calcul des altitudes des repères, réseau de 3 ^e ordre », opérateur :Dupuy, archives de l'IGN
2010	O.O.K3-24a-III	+ 4,294 m	NGF-IGN69	UMR 6250 LIENSs

REPERE O.HO-5 • TOUR DE LA CHAÎNE (existant)

Période : 1861 à aujourd'hui

Type : Repère Bourdalouë



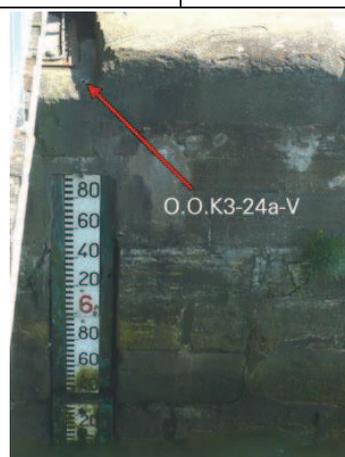
Description : Repère scellé au pied de la tour de la chaîne, à l'entrée du Vieux port. Il est situé sur la face Nord de la tour, sur la face opposée à l'avant-port, à environ 0,78 m au dessus du sol.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
1861	R. Tour de la Chaîne	+ 5,652 m	NGF-Bourdalouë	« Nivellement général de la France, lignes de base, 20 mars 1862 », Leclerc, archives de l'IGN
1876	R. Tour de la Chaîne	+ 5,652 m	NGF-Bourdalouë	« Baie de La Rochelle - Etude Hydrographique par MM. Bouquet de la Grye et Hatt - 1876 », archives du SHOM
1913	O.O.K3-24 ^b	+ 5,024 m	NGF-Lallemand	Cahier de « Calcul des altitudes des repères, réseau de 3 ^e ordre », opérateur : Guy, archives de l'IGN
1957	O.O.K3-24 ^b	+ 4,9981 m	NGF-Lallemand	Cahier de « Calcul des altitudes des repères, réseau de 3 ^e ordre », opérateur : Dupuy, archives de l'IGN
1986	O.O.K3-24 ^b	+ 5,1849 m	NGF-IGN69	Cahier de « Calcul des altitudes des repères, réseau de 3 ^e ordre », opérateur : Dupuy, archives de l'IGN
1995	O.HO-5	+ 5,171 m	NGF-IGN69	http://geodesie.ign.fr/fiches/ (consulté le 26 avril 2011)
2010	O.HO-5	+ 5,169 m	NGF-IGN69	UMR 6250 LIENSs
2011	O.HO-5	+ 5,171 m	NGF-IGN69	IGN - Triplet

REPERE O.O.K3-24A-V (existant)

Période : ? à aujourd'hui

Type : Repère « Téton » métallique



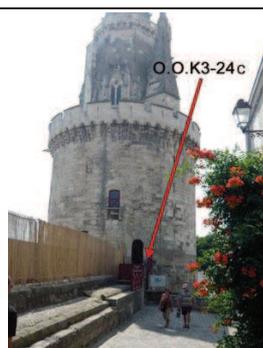
Description : Repère « téton » métallique scellé à l'aplomb de l'échelle de marée aval de l'écluse du bassin à flot extérieur. Il est situé sur le bajoyer Sud et a été choisi comme repère de nivellement par l'équipe LIENSs le 15 juin 2010, car situé à proximité de deux échelles de marée.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
1960	-	+ 3,889 m	NGF-Lallemand	Annales hydrographiques 1971, pages 412 à 415 (MHCAN), Mannevy 1960, archives du SHOM, cote TAP/19
2010	A	+ 4,107 m	NGF-IGN69	UMR 6250 LIENSs
2011	O.O.K3-24a-V	+ 4,110 m	NGF-IGN69	IGN - Triplet

REPERE O.O.K3-24c • TOUR DE LA LANTERNE (existant)

Période : 1913 à aujourd'hui

Type : Repère cylindrique type M (NGF)



Description : Repère scellé en bas à droite de la porte d'entrée de la tour de la Lanterne, dans le prolongement de la rue Sur-les-Murs.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
1913	O.O.K3-24°	+ 10,700 m	NGF-Lallemand	Cahier de « Calcul des altitudes des repères, réseau de 3 ^e ordre », opérateur :Dupuy, archives de l'IGN
1957	O.O.K3-24°	+ 10,6907 m	NGF-Lallemand	Cahier de « Calcul des altitudes des repères, réseau de 3 ^e ordre », opérateur :Dupuy, archives de l'IGN
1986	O.O.K3-24c	+ 10,8783 m	NGF-IGN69	Cahier de « Calcul des altitudes des repères, réseau de 3 ^e ordre », opérateur :Dupuy, archives de l'IGN http://geodesie.ign.fr/fiches/ (consulté le 26 avril 2011)
		+ 10,878 m	NGF-IGN69	
2010	O.O.K3-24c	+ 10,876 m	NGF-IGN69	UMR 6250 LIENSs
2011	O.O.K3-24c	+ 10,878 m	NGF-IGN69	IGN - Triplet

REPERE O.O.K3-24-I (existant)

Période : 1957 à aujourd'hui

Type : Rivet



Description : Rivet scellé sur le couronnement du bajoyer aval, côté nord, de l'écluse du bassin à flot intérieur du Vieux port. Rivet installé à quelques centimètres du repère H, afin de le pérenniser de manière plus précise.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
1957	O.O.K3-24-I	+ 3,6359 m	NGF-Lallemand	Cahier de « Calcul des altitudes des repères, réseau de 3 ^e ordre », opérateur :Dupuy, archives de l'IGN
1960	Rivet	+ 3,635 m	NGF-Lallemand	« Mission de MHCAN, cahier n°2/3, Nivellement Cholesky, rattachements divers », archives du SHOM, rayon n°2.1, cote SH2-886
		+ 7,265 m	Zéro hydrographique	
1986	O.O.K3-24-I	+ 3,6359 m	NGF-Lallemand	Cahier de « Calcul des altitudes des repères, réseau de 3 ^e ordre », opérateur :Dupuy, archives de l'IGN http://geodesie.ign.fr/fiches/ (consulté le 26 avril 2011)
		+ 3,8219 m	NGF-IGN69	
		+ 3,822 m	NGF-IGN69	
2010	O.O.K3-24-I	+ 3,818 m	NGF-IGN69	UMR 6250 LIENSs
2011	O.O.K3-24-I	+ 3,820 m	NGF-IGN69	IGN - Triplet

REPÈRE O.O.K3-24A • PHARE ROUGE (existant)

Période : 1861 à aujourd'hui

Type : Repère Bourdalouë



Description : Repère scellé au socle du phare rouge (ou Petit phare, Petit fanal), près du quai de la jetée, à proximité de la tour Saint-Nicolas et du bureau du port.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
1861	R. du petit fanal (fanal d'aval)	+ 7,699 m	Zéro de réduction des sondes	« Marées – 1824, Côtes de France », Beautemps-Beaupré, archives du SHD-Marine (Rochefort), cote 7JJ 364
	R. du petit fanal	+ 4,906 m	NGF-Bourdalouë	« Nivellement général de la France, lignes de base, 20 mars 1862 », Leclerc, archives de l'IGN
1876	R. du petit fanal	+ 4,906 m	NGF-Bourdalouë	« Baie de La Rochelle – Etude Hydrographique par MM. Bouquet de la Grye et Hatt – 1876 », archives du SHOM
1894	R. du feu rouge	+ 4,906 m	NGF-Bourdalouë	« Port de La Rochelle, Nivellement des ouvrages du port et de la rade », Viennot, archives AD17, cote DDE 3965
		+ 7,906 m	Zéro des cartes marines	
1913	R.B.-605-3	+ 4,275 m	NGF-Lallemand	Cahier de « Calcul des altitudes des repères, réseau de 3 ^e ordre », opérateur :Guy, archives de l'IGN
1957	O.O.K3-24 ^a	+ 4,2689 m	NGF-Lallemand	Cahier de « Calcul des altitudes des repères, réseau de 3 ^e ordre », opérateur :Dupuy, archives de l'IGN
1986	O.O.K3-24a	+ 4,2689 m	NGF-Lallemand	Cahier de « Calcul des altitudes des repères, réseau de 3 ^e ordre », opérateur :Dupuy, archives de l'IGN
		+ 4,4552 m	NGF-IGN69	
		+ 4,455 m	NGF-IGN69	
2010	O.O.K3-24a	+ 4,450 m	NGF-IGN69	http://geodesie.ign.fr/fiches/ (consulté le 26 avril 2011) UMR 6250 LIENSs
2011	O.O.K3-24a	+ 4,452 m	NGF-IGN69	IGN - Triplet

A.1.2. Echelles de marée

A l'heure actuelle, plusieurs échelles de marée sont installées dans le Vieux port de La Rochelle, mais il n'existe pas encore, à notre connaissance, d'inventaire de ces échelles. Comme pour les repères de nivellement, les échelles sont, ici, listées à l'aide de l'ensemble des informations retrouvées. Parmi ces échelles de marée, quelques-unes sont susceptibles d'être les mêmes que celles dont nous avons retrouvé la trace dans les documents d'archive. Les résultats de nos nivellements nous ont permis de déterminer si les échelles nivelées en 2010, lors d'une campagne de mesures, correspondent bien aux échelles indiquées dans ces documents. Les résultats sont présentés dans le volume I (manuscrit de thèse, cf. IV.1.3.1.2. *Echelles de marée*). Après une première vue d'ensemble (*figure A-2*), les échelles sont détaillées une à une.



Figure A-2 : Localisation des différentes échelles de marée du Vieux port de La Rochelle. Photographie aérienne récente modifiée (© 2011 - IGN).

REPERE O.O.K3-24A-IV • ECHELLE AMONT, BASSIN EXTERIEUR (existant)				
Période : 1894 à aujourd'hui			Type : Echelle de marée en lave émaillée	
Description : Echelle de marée située en amont de l'écluse du bassin à flot extérieur (ou bassin des grands yachts, anciennement bassin des chalutiers), le long du bajoyer sud, face nord. Cette échelle est un repère de nivellement répertorié dans la base de données de l'IGN. La graduation de l'échelle qui sert de repère est la graduation 7,00 m				
Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
1957	O.O.K3-24 ^a -IV	+ 2,6370 m	NGF-Lallemand	Cahier de « Calcul des altitudes des repères, réseau de 3 ^e ordre », opérateur :Dupuy, archives de l'IGN
1960	-	+ 2,65 m	NGF-Lallemand	Annales hydrographiques 1971, pages 412 à 415 (MHCFAN), Mannevy 1960, archives du SHOM, cote TAP/19
		- 0,72 m	Zéro hydrographique	
1986	O.O.K3-24a-IV	+ 2,8233 m	NGF-IGN69	Cahier de « Calcul des altitudes des repères, réseau de 3 ^e ordre », opérateur :Dupuy, archives de l'IGN http://geodesie.ign.fr/fiches/ (consulté le 26 avril 2011)
		+ 2,823 m	NGF-IGN69	
2010	O.O.K3-24A-IV	+ 2,835 m	NGF-IGN69	Graduation 7,00 m ; UMR 6250 LIENSs
		- 0,718 m	Zéro hydrographique	Graduation 0,00 m ; UMR 6250 LIENSs

ECHELLE E2 • ECHELLE AVAL, BASSIN EXTERIEUR (existante)

Période : ? à aujourd'hui

Type : ?



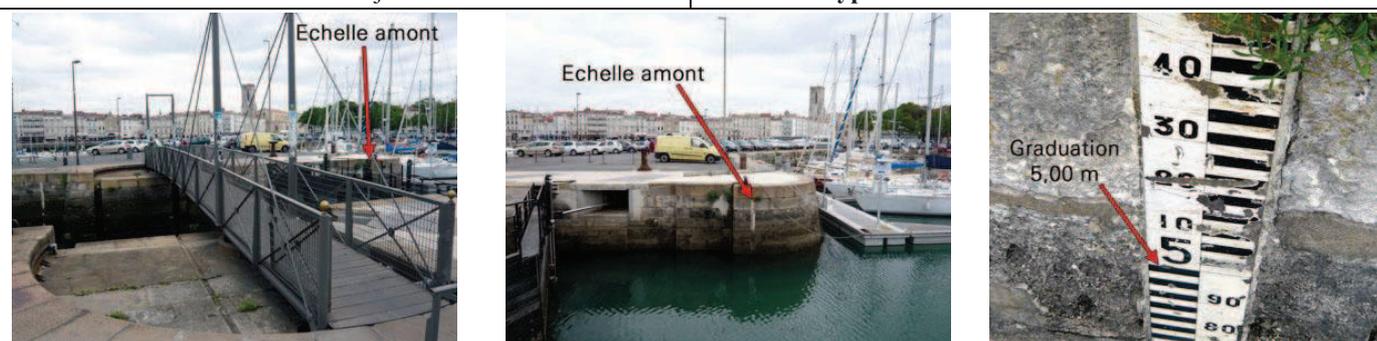
Description : Echelle de marée située en aval de l'écluse du bassin à flot extérieur (ou bassin des grands yachts, anciennement bassin des chalutiers), le long du bajoyer sud, face nord. La graduation de l'échelle qui sert de repère est la graduation 6,00 m.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
2010	E2	+ 2,784 m	NGF-IGN69	Graduation 6,00 m ; UMR 6250 LIENSs
		+ 0,231 m	Zéro hydrographique	Graduation 0,00 m ; UMR 6250 LIENSs

ECHELLE E3 • ECHELLE AMONT, BASSIN INTERIEUR (existante)

Période : ? à aujourd'hui

Type : Echelle de marée en lave émaillée



Description : Echelle de marée située en amont de l'écluse du bassin à flot intérieur, le long du bajoyer nord, face sud. La graduation de l'échelle qui sert de repère est la graduation 5,00 m.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
2010	E3	+ 2,769 m	NGF-IGN69	Graduation 5,00 m ; UMR 6250 LIENSs
		+ 1,216 m	Zéro hydrographique	Graduation 0,00 m ; UMR 6250 LIENSs

ECHELLE E4 • ECHELLE AVAL, BASSIN INTERIEUR (existante)

Période : ? à aujourd'hui

Type : Echelle de marée en lave émaillée



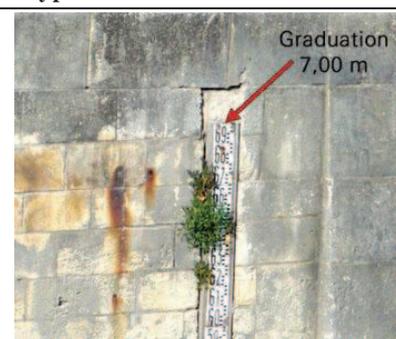
Description : Echelle de marée située en aval de l'écluse du bassin à flot intérieur, le long du bajoyer nord, face sud. La graduation de l'échelle qui sert de repère est la graduation 5,00 m.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
2010	E4	+ 2,768 m	NGF-IGN69	Graduation 5,00 m ; UMR 6250 LIENSs
		+ 1,215 m	Zéro hydrographique	Graduation 0,00 m ; UMR 6250 LIENSs

ECHELLE E5 • ECHELLE AMONT, CANAL MAUBEC (existante)

Période : ? à aujourd'hui

Type : ?



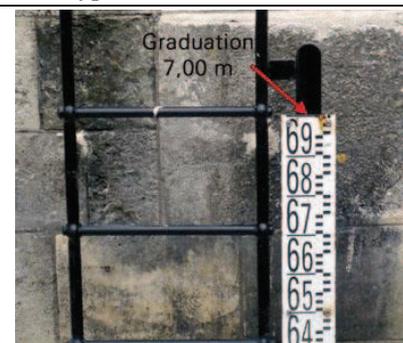
Description : Echelle de marée située en amont de l'écluse du canal Maubec, le long du mur Nord-Ouest du canal. La graduation de l'échelle qui sert de repère est la graduation 7,00 m.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
2010	E5	+ 3,457 m	NGF-IGN69	Graduation 7,00 m ; UMR 6250 LIENSs
		- 0,096 m	Zéro hydrographique	Graduation 0,00 m ; UMR 6250 LIENSs

ECHELLE E6 • ECHELLE CENTRALE, CANAL MAUBEC (existante)

Période : ? à aujourd'hui

Type : ?



Description : Echelle de marée située en aval de l'écluse du canal Maubec, dans le canal lui-même (après le pont), le long de l'escalier situé sur le bajoyer Nord-Ouest. La graduation de l'échelle qui sert de repère est la graduation 7,00 m.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
2010	E6	+ 3,607 m	NGF-IGN69	Graduation 7,00 m ; UMR 6250 LIENSs
		+ 0,054 m	Zéro hydrographique	Graduation 0,00 m ; UMR 6250 LIENSs

ECHELLE E7 • ECHELLE AVAL, CANAL MAUBEC (existante)

Période : ? à aujourd'hui

Type : ?



Description : Située en aval de l'écluse du canal Maubec, près de la zone d'échouage du bassin, le long du bajoyer Nord, face Sud. Les graduations de cette échelle sont presque illisibles. La graduation qui sert de repère est nommée X,00 m, située à environ 1 m en dessous de l'extrémité haute de l'échelle, au niveau de la 9^e rangée de pierres en partant du bord de la route.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
2010	E7	+ 1,087 m	NGF-IGN69	Graduation X,00 m ; UMR 6250 LIENSs

ECHELLE E8 • ECHELLE AMONT, PORTE DES DEUX-MOULINS (existante)

Période : ? à aujourd'hui

Type : Echelle gravée dans la pierre



Description : Echelle de marée gravée dans le mur Ouest du conduit d'évacuation des eaux des anciennes douves de la porte des Deux-Moulins. Echelle située juste en amont de l'ancien système d'écluse. C'est une échelle gravée en pieds et en pouces dont le zéro correspondrait à la base du radier. La graduation de l'échelle qui sert de repère est la graduation 11 Pieds.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
2010	E8	+ 3,666 m	NGF-IGN69	Graduation 11 Pieds ; UMR 6250 LIENSs
		+ 3,341 m	Zéro hydrographique	Graduation 0 Pieds ; UMR 6250 LIENSs

ECHELLE E9 • ECHELLE AVAL, PORTE DES DEUX-MOULINS (existante)

Période : ? à aujourd'hui

Type : Echelle gravée dans la pierre



Description : Echelle de marée gravée dans le mur Ouest du conduit d'évacuation des eaux des anciennes douves de la porte des Deux-Moulins. Echelle située juste en aval de l'ancien système d'écluse. C'est une échelle gravée en pieds et en pouces dont le zéro correspondrait à la base du radier. La graduation de l'échelle qui sert de repère est la graduation 7 Pieds.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
2010	E8	+ 2,310 m	NGF-IGN69	Graduation 7 Pieds ; UMR 6250 LIENSs
		+ 3,411 m	Zéro hydrographique	Graduation 0 Pieds ; UMR 6250 LIENSs

A.2. Port de La Pallice

Voici un historique de la cote des principaux repères de nivellement présents au port de La Pallice de 1906 à nos jours. Cet historique a été réalisé à partir d'informations retrouvées dans les centres d'archives de l'Institut Géographique National (IGN) et du Service hydrographique et océanographique de la marine (SHOM). Après une vue d'ensemble précisant la position de chaque repère (*figure A-3*), les repères sont détaillés précisément un à un, et toutes les informations recueillies sur leurs cotes historiques sont indiquées.

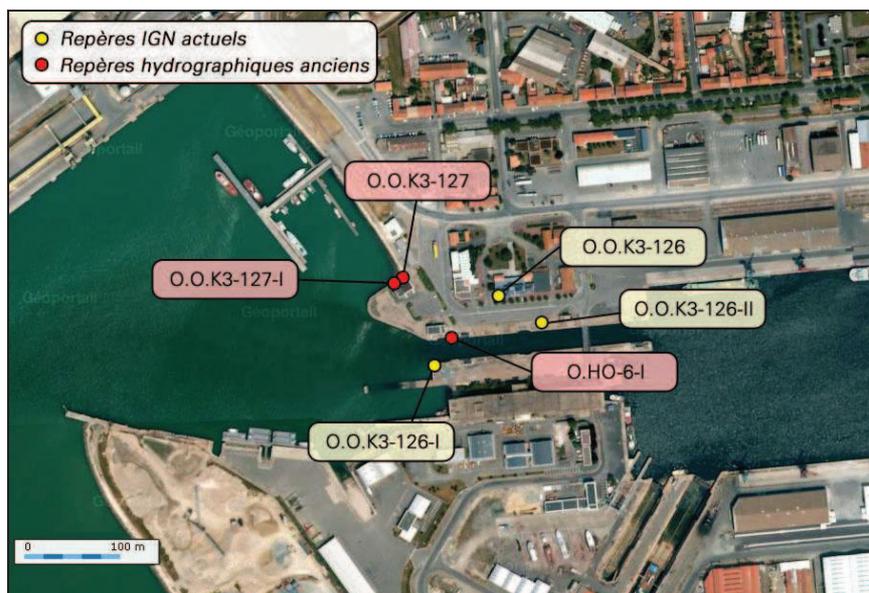


Figure A-3 : Localisation des différents repères de nivellement du port de La Pallice. Photographie aérienne récente modifiée (© 2011 - IGN).

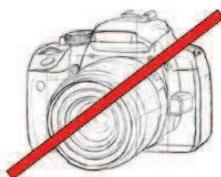
REPÈRE O.O.K3-126-I (existant)				
Période : ? à aujourd'hui		Type : Echelle de marée		
 <p>© IGN 2009</p>				
Description : Zéro de l'échelle de marée située en aval de l'écluse du bassin à flot.				
Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
1973	O.O.K3-126-I	- 8,4488 m	NGF-IGN69	Cahier de « Calcul des altitudes des repères, réseau de 3 ^e ordre », opérateur : Mazieres, archives de l'IGN http://geodesie.ign.fr/fiches/ (consulté le 26 avril 2011)
		- 8,449 m		

REPÈRE O.O.K3-126-II (existant)				
Période : ? à aujourd'hui		Type : Rivet		
 <p>© IGN 2011</p>				
Description : Repère hexagonal en laiton entourant un regard métallique sur le quai de l'écluse.				
Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
2011	O.O.K3-126-II	+ 5,189 m	NGF-IGN69	IGN - Triplet

REPERE O.O.K3-127 (disparu)

Période : ? à aujourd'hui

Type : Repère cylindrique type M (NGF)



Repère non photographié

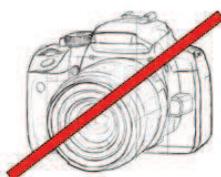
Description : Repère scellé sur une borne à proximité du marégraphe.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
1961	O.ho 7 bis	+ 5,4293 m	NGF-Lallemand	« Rattachement du marégraphe de La Pallice », Van de Castele, archives de l'IGN, caisse SGN 1347
1960	NGF n°7 bis	+ 5,429 m	NGF-Lallemand	« Nivellement Cholesky - Rattachements divers, cahier n°2/3 », MHCAN, Plouviez, 1960, archives du SHOM, cote SH2-886
1963	M	+ 5,429 m	NGF-Lallemand	« Nivellement », MHCAN, Le Fur, 1963, archives du SHOM, cote SH2-775
1965	O.ho 7 bis	+ 5,429 m	NGF-Lallemand	Archives de l'IGN, caisse SGN 1347
	O.ho 15			
1973	O.O.K3-127	+ 5,6174 m	NGF-IGN69	Cahier de « Calcul des altitudes des repères, réseau de 3 ^e ordre », opérateur : Mazieres, archives de l'IGN http://geodesie.ign.fr/fiches/ (consulté le 26 avril 2011)
		+ 5,617 m		
1979	B, NGF n°7 bis	+ 5,429 m	NGF-Lallemand	Annales hydrographiques, 5 ^e série, vol. 7, fasc. 1, n°751, archives du SHOM
		+ 9,119 m	Zéro hydrographique	

REPÈRE O.O.K3-127-I (disparu)

Période : 1961 à aujourd'hui

Type : Rivet



Repère non photographié

Description : Scellé sur le couronnement du puits du bâtiment du marégraphe par Van de Castele le 30 mars 1961.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
1961	O.ho 7-I bis	+ 5,157 m	NGF-Lallemand	« Rattachement du marégraphe de La Pallice », Van de Castele, archives de l'IGN, caisse SGN 1347
1965	Rivet	+ 5,157 m	NGF-Lallemand	Archives de l'IGN, caisse SGN 1347
1973	O.O.K3-127-I	+ 5,3419 m	NGF-IGN69	Cahier de « Calcul des altitudes des repères, réseau de 3 ^e ordre », opérateur : Mazieres, archives de l'IGN http://geodesie.ign.fr/fiches/ (consulté le 26 avril 2011)
		+ 5,342 m		
1979	C, NGF n°7-1 bis	+ 5,157 m	NGF-Lallemand	Annales hydrographiques, 5 ^e série, vol. 7, fasc. 1, n°751, archives du SHOM
		+ 8,847 m	Zéro hydrographique	

REPERE O.O.K3-126 (existant)

Période : ? à aujourd'hui

Type : Repère à console



© IGN 2009

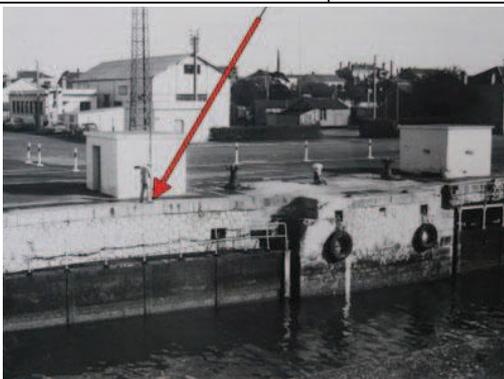
Description : Repère scellé au bas du mur du bâtiment de la D.D.T.M. (ancienne gare de La Pallice), 18 rue Sénégal (ancien bâtiment des Ponts et Chaussées). **Repère fondamental du SHOM.**

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
1913	O.ho 6	+ 5,423 m	NGF-Lallemand	Cahier de « Calcul des altitudes des repères, réseau de 3 ^e ordre », opérateur :Guy, archives de l'IGN
1960	NGF n°6	+ 5,417 m	NGF-Lallemand	« Nivellement Cholesky - Rattachements divers, cahier n°2/3 », MHCAN, Plouviez, 1960, archives du SHOM, cote SH2-886
1979	A	+ 5,417 m	NGF-Lallemand	Annales hydrographiques, 5 ^e série, vol. 7, fasc. 1, n°751, archives du SHOM
		+ 9,107 m	Zéro hydrographique	
1999	O.O.K3-126	+ 5,6034 m	NGF-IGN69	Cahier de « Calcul des altitudes des repères, réseau de 3 ^e ordre », opérateur : Mazieres, archives de l'IGN
		+ 5,603 m		http://geodesie.ign.fr/fiches/ (consulté le 26 avril 2011)
2011	O.O.K3-126	+ 5,604 m	NGF-IGN69	IGN - Triplet

REPÈRE O.HO-6-I (existant)

Période : ? à aujourd'hui

Type : Repère naturel



SHOM 1960

Description : Couronnement du bajoyer sud de l'écluse (tête aval).

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
1906	Couronnement	+ 5,56 m	NGF-Bourdaloüë	« Marées, Côtes de France II, de Brest à Saint-Jean de Luz », archives du SHOM
		+ 8,36 m	Zéro hydrographique	
1913	O.ho 6-I	+ 4,934 m	NGF-Lallemand	Cahier de « Calcul des altitudes des repères, réseau de 3 ^e ordre », opérateur :Guy, archives de l'IGN
1960	Repère hydro.	+ 4,962 m	NGF-Lallemand	« Nivellement Cholesky - Rattachements divers, cahier n°2/3 », MHCAN, Plouviez, 1960, archives du SHOM, cote SH2-886
		+ 8,39 m	Zéro hydrographique	

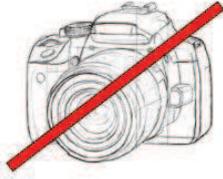
A.3. Île d'Aix

Un historique de la cote des principaux repères de nivellement et/ou de marée présents sur l'île d'Aix de 1809 à nos jours a été réalisé à partir d'informations retrouvées dans les centres d'archives de l'Institut Géographique National (IGN), du Service hydrographique et océanographique de la marine (SHOM), et du Service Historique de la Défense - Marine de Rochefort (SHD-Marine Rochefort). Pour chacun de ces repères, une fiche a été produite regroupant le nom du repère, la période d'existence, le type de repère, des photographies, une description ainsi que toutes les informations recueillies sur leurs cotes historiques. Après une vue d'ensemble précisant l'emplacement de chaque repère (*figure A-4*), les repères sont détaillés précisément un à un, et toutes les informations recueillies sur leurs cotes historiques sont indiquées.



Figure A-4 : Localisation des différents repères de nivellement et/ou de marée à l'île d'Aix. Photographies aériennes récentes de l'île d'Aix (à gauche) et de son fort de la rade (à droite), modifiées (© 2011 - IGN).

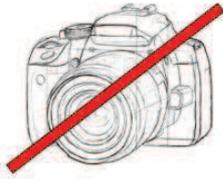
REPERE CROIX ROUGE (détruit)

Période : 1960 à ?	Type : Repère naturel
En 1960 :	En 2010 :
	 Repère détruit

Description : Croix à la peinture rouge à l'extrémité de la jetée Sainte Catherine, à l'île d'Aix. Repère détruit suite aux travaux d'agrandissement de la jetée Sainte Catherine.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence	Source
1960	Croix rouge	+ 4,107 m	NGF-Lallemand
« Nivellement Cholesky - Rattachements divers, cahier n°2/3 », MHCAN, Lefas, 1960, archives du SHOM, cote SH2-886			

REPERE C (détruit)

Période : 1960 à 1983	Type : Repère vertical en bronze (SHOM)
En 1960 :	En 2010 :
	 Repère détruit

Description : Repère du Service Hydrographique (S.H.) en bronze scellé en 1960 par la MHCAN dans la paroi verticale du couronnement de la jetée Sainte Catherine, au dessus de la cale, à proximité du lampadaire. Repère détruit suite aux travaux d'agrandissement de la jetée Sainte Catherine.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence	Source
1960	-	+ 3,897 m	NGF-Lallemand
	SH7	+ 3,8971 m	NGF-Lallemand
	A1	+ 3,895 m	NGF-Lallemand
1964	B1	+ 7,60 m	Zéro hydrographique
		+ 3,897 m	NGF-Lallemand
1983	C	+ 7,69 m	Zéro hydrographique
		+ 3,88 m	NGF-Lallemand
		+ 4,04 m	NGF-IGN69
« Fiche d'Observatoire de Marée de l'île d'Aix, n°351 », MHA, Guyon, 28 avril 1983, archives du SHOM			

REPERE D (existant)

Période : 2010 à aujourd'hui

Type : Rivet en bronze



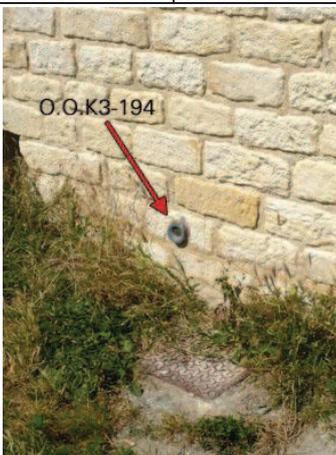
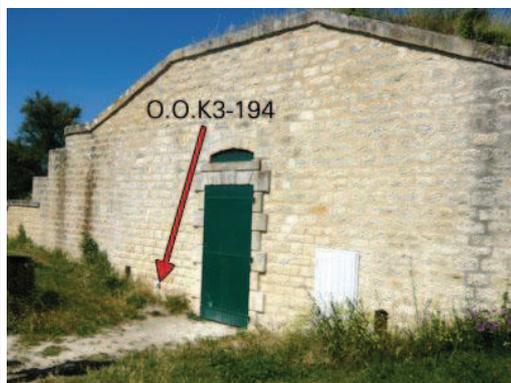
Description : Rivet en alliage de bronze (comportant une marque de centrage) scellé par une équipe de l'UMR LIENSs en 2010, à proximité de l'emplacement du marégraphe à capteur radar à air libre (jetée Sainte-Catherine).

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
2010	D	+ 4,281 m	NGF-IGN69	UMR 6250 LIENSs
2011	D	+ 4,2819 m	NGF-IGN69	IGN - Triplet

REPERE O.O.K3-194 (existant)

Période : 2006 à aujourd'hui

Type : Repère cylindrique type M (IGN)



Description de l'IGN : Voie suivie : route du tennis, du sémaphore à Bois Joly, Support : toilettes publiques, Partie support : mur de façade sud-est, face route, Repèrtements : à 1,10 m au sud-ouest de la porte d'entrée, à 0,28 m au-dessus du sol. Ce repère appartient à un triplet.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
2006	O.O.K3-194	+ 4,2330 m	NGF-IGN69	Cahier de « Calcul des altitudes des repères, réseau de 3 ^e ordre », opérateur : Papin, archives de l'IGN http://geodesie.ign.fr/fiches/ (consulté le 26 avril 2011)
		+ 4,226 m		
2011	O.O.K3-194	+ 4,2252 m	NGF-IGN69	IGN - Triplet

REPERE O.O.K3-195 (existant)

Période : 2006 à aujourd'hui

Type : Repère cylindrique type M (IGN)



Description de l'IGN : Voie suivie : Chemin de Bois Joly à fort Liédot, Support : toilettes publiques, Partie support : muret, face ouest, face chemin, Repèrments : à 1,30 m de l'extrémité nord mitoyenne d'une ouverture, à 0,97 m au-dessous de l'arête supérieure. Ce repère appartient à un triplet.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
2006	O.O.K3-195	+ 3,6114 m	NGF-IGN69	Cahier de « Calcul des altitudes des repères, réseau de 3 ^e ordre », opérateur : Papin, archives de l'IGN http://geodesie.ign.fr/fiches/ (consulté le 26 avril 2011)
		+ 3,604 m		
2011	O.O.K3-195	+ 3,6022 m	NGF-IGN69	IGN - Triplet

REPERE O.O.K3-195A (existant)

Période : 2011 à aujourd'hui

Type : Repère cylindrique type M (IGN)



Description : Localisation : fort de la rade, bâtiment du Cercle Nautique de l'Île d'Aix, Partie support : mur de façade sud, Repèrments : à 0,80 m à l'est de la porte ouest, à 0,47 m au-dessus du sol. Repère installé dans le cadre du nouvel observatoire marégraphique de l'île d'Aix.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
2011	O.O.K3-195a	+ 8,773 m	NGF-IGN69	IGN - Triplet

REPERE O.O.K3-195B (existant)

Période : 1867 à aujourd'hui

Type : Repère Bourdalouë



Description : Repère fondamental du SHOM pour la détermination du zéro hydrographique actuel. Repère scellé au dessus du palier de l'escalier situé au fond du vieux port de l'île d'Aix.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source	
1867	Repère du nivellement général	+ 3,119 m	NGF-Bourdalouë	« Année 1868, Plans de nivellement, Echelle de marées, Seuls, Repères. Travail de M. Bona-Christave, Capitaine de vaisseau, directeur du port », archives du SHD Rochefort, cote 2D45t	
1868	-	+ 3,15 m	NGF-Bourdalouë	« Cote Leclère », Annales hydrographiques 1971, pages 412 à 415 (MHCAN), Mannevy 1960, archives du SHOM, cote TAP/19	
		+ 2,55 m	NGF-Lallemand		
1960	-	+ 2,56 m	NGF-Lallemand	Annales hydrographiques 1971, pages 412 à 415 (MHCAN), Mannevy 1960, archives du SHOM, cote TAP/19	
		SH5	+ 2,5595 m	NGF-Lallemand	« Nivellement Cholesky - Rattachements divers, cahier n°2/3 », MHCAN, Plouviez, 1960, archives du SHOM, cote SH2-886
		C1	+ 2,560 m	NGF-Lallemand	« Fiche d'observation de la marée de l'île d'Aix n°352 », MHCAN, Mannevy, 1960, archives du SHOM
1983	A	+ 6,37 m	Zéro hydrographique	« Fiche d'Observatoire de Marée de l'île d'Aix, n°351 », MHA, Guyon, 28 avril 1983, archives du SHOM	
		+ 2,56 m	NGF-Lallemand		
		+ 2,72 m	NGF-IGN69		
2010	A	+ 2,719 m	NGF-IGN69	UMR 6250 LIENSs	
2011	O.O.K3-195b	+ 2,7197 m	NGF-IGN69	IGN - Triplet	

REPERE O.O.K3-195C (existant)

Période : 1983 à aujourd'hui

Type : Repère du SHOM



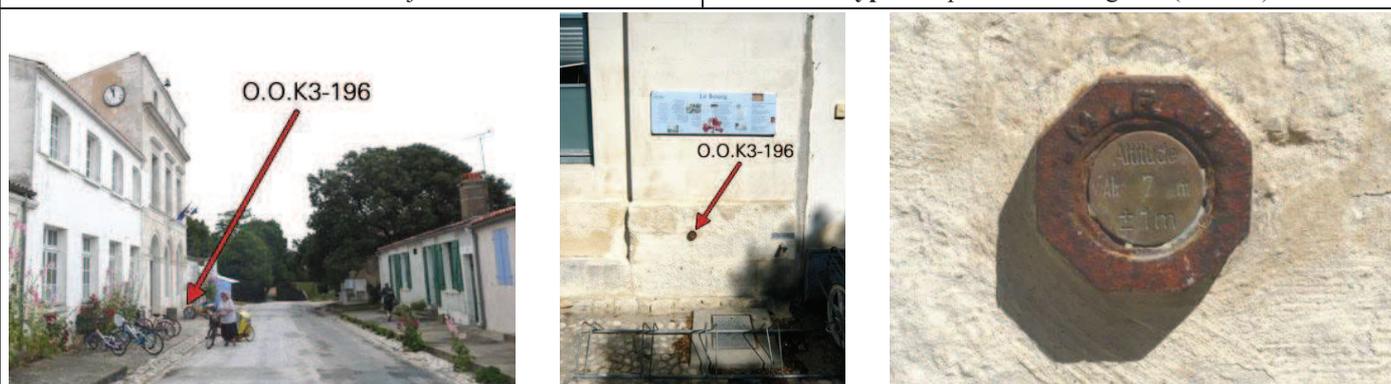
Description : Repère du Service Hydrographique (S.H.), scellé dans la partie verticale de la digue Sainte Catherine.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
1983	B	+ 7,76 m	Zéro hydrographique	« Fiche d'Observatoire de Marée de l'île d'Aix, n°351 », MHA, Guyon, 28 avril 1983, archives du SHOM
		+ 3,95 m	NGF-Lallemand	
		+ 4,11 m	NGF-IGN69	
2010	B	+ 4,082 m	NGF-IGN69	UMR 6250 LIENSs
2011	O.O.K3-195c	+ 4,0824 m	NGF-IGN69	IGN - Triplet

REPERE O.O.K3-196 (existant)

Période : 2006 à aujourd'hui

Type : Repère local octogonal (M.R.U.)



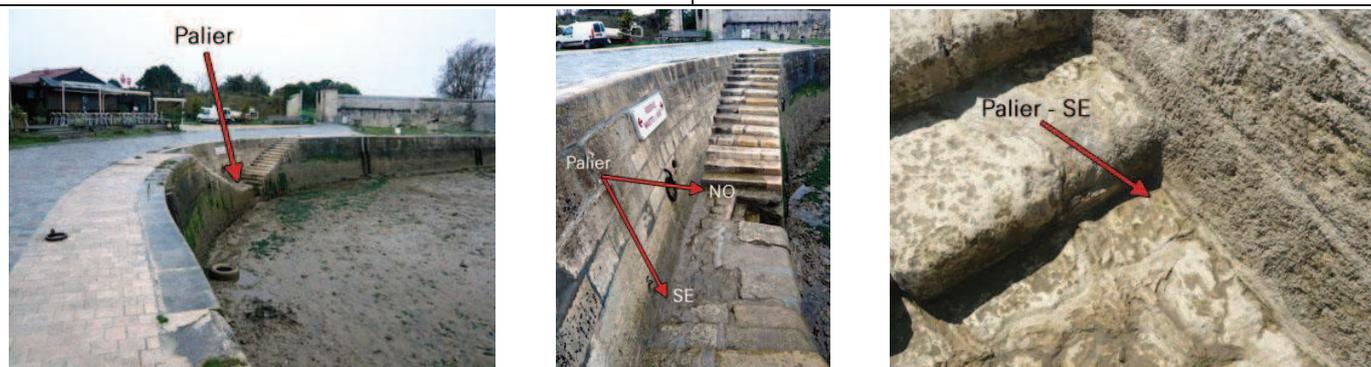
Description de l'IGN : Localisation : rue Gourgaud, Support : mairie, Partie support : soubassement du mur de façade sud-est, face rue, Repèrtements : à 0,89 m de l'extrémité nord-est, à 0,26 m au-dessous de l'arête supérieure. Ce repère appartient à un triplet.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
2006	O.O.K3-196	+ 7,3816 m	NGF-IGN69	Cahier de « Calcul des altitudes des repères, réseau de 3 ^e ordre », opérateur :Papin, archives de l'IGN http://geodesie.ign.fr/fiches/ (consulté le 26 avril 2011)
		+ 7,374 m		
2011	O.O.K3-196	+ 7,3750 m	NGF-IGN69	IGN - Triplet

REPERE PALIER (existant)

Période : 1809 à aujourd'hui

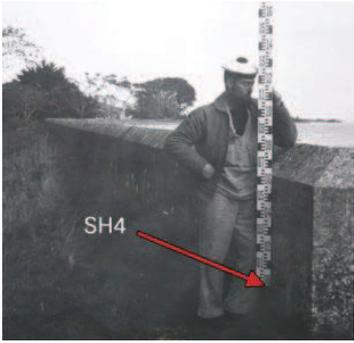
Type : Repère naturel

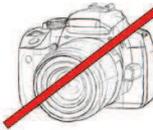


Description : Palier de l'escalier situé au fond du vieux port de l'île d'Aix. Repère principal pour définir le zéro hydrographique en 1809 (par Raoul) et en 1824 (par Beautemps-Beaupré). Afin d'éviter au maximum les erreurs de nivellement liées à l'usure du temps des pierres du palier, Delbalat a défini, en 1858, les repères SE et NO qui sont situés aux extrémités sud-est et nord-ouest du palier, à l'endroit où les pierres sont le moins soumises à l'usure.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
1809	Palier	+ 5,197 m	Zéro hydrographique	« Marées, Côtes de France, 1824 », Beautemps-Beaupré, 1824, archives du SHD Rochefort, cote 7JJ 362
1824	Palier	+ 5,306 m	Zéro hydrographique	
1858	Palier	+ 5,386 m	Zéro hydrographique	« Nivellement longitudinal de la Charente », Delbalat, 1860, archives du SHOM, portefeuille 12-7-22
1867	Palier	- 1,011 m	Repère A	« Année 1868, Plans de nivellement, Echelle de marées, Seuils, Repères. Travail de M. Bona-Christave, Capitaine de vaisseau, directeur du port », archives du SHD Rochefort, cote 2D45t
		+ 2,536 m	NGF-Bourdalouë	
1868	Palier	+ 2,108 m	NGF-Bourdalouë	
		+ 5,386 m	Zéro hydrographique	
1960	Repère hydrographique	+ 1,5340 m	NGF-Lallemand	« Nivellement Cholesky - Rattachements divers, cahier n°2/3 », MHCAN, Plouviez, 1960, archives du SHOM, cote SH2-886
2010	Palier Aix	+ 1,664 m	NGF-IGN69	UMR 6250 LIENSs
		+ 5,204 m	Zéro hydrographique	

REPERE SH3 (existant)				
Période : 1960 à aujourd'hui			Type : Soupape zinguée (SHOM)	
En 1960 :		En 2010 :		
				
Description : Soupape zinguée scellée par le SHOM sur le pilier sud de la poterne de l'île d'Aix.				
Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
1960	SH3	+ 9,9977 m	NGF-Lallemand	« Nivellement Cholesky - Rattachements divers, cahier n°2/3 », MHCAN, Plouviez, 1960, archives du SHOM, cote SH2-886

REPERE SH4 (existant)				
Période : 1960 à aujourd'hui			Type : Repère vertical en bronze (SHOM)	
En 1960 :		En 2010 :		
				
Description : Repère vertical en bronze scellé par le SHOM dans le rempart du nord-est de la poterne de l'île d'Aix.				
Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
1960	SH4	+ 7,8298 m	NGF-Lallemand	« Nivellement Cholesky - Rattachements divers, cahier n°2/3 », MHCAN, Plouviez, 1960, archives du SHOM, cote SH2-886

REPERE SH8 (détruit)				
Période : 1960 à ?			Type : Repère naturel	
En 1960 :		En 2010 :		
 Repère non photographié		 Repère détruit		
Description : Organeau scellé à l'extrémité de la jetée Sainte Catherine. Repère détruit suite aux travaux d'agrandissement de la jetée Sainte Catherine.				
Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
1960	SH8	+ 4,1459 m	NGF-Lallemand	« Nivellement Cholesky - Rattachements divers, cahier n°2/3 », MHCAN, Plouviez, 1960, archives du SHOM, cote SH2-886

REPERE SH6 (détruit)

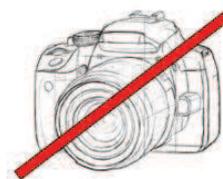
Période : 1960 à 1972

Type : Boulon

En 1960 :



En 2010 :



Repère détruit

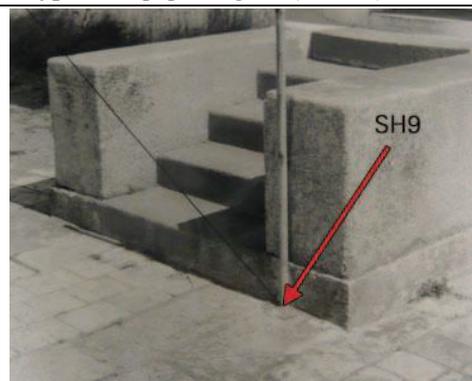
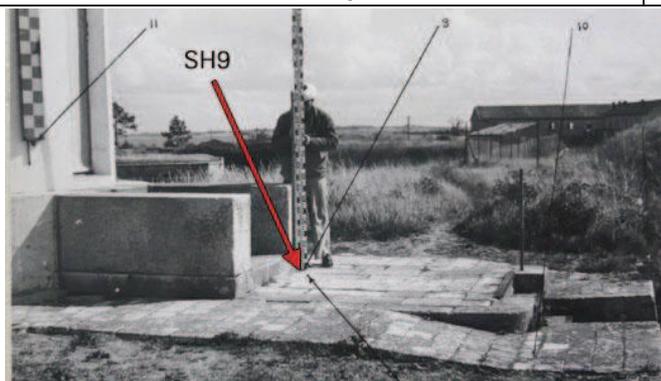
Description : Boulon marqué d'une croix gravée au burin au pied d'un lampadaire en haut de la cale de la jetée Sainte Catherine. Repère détruit suite aux travaux d'agrandissement de la jetée Sainte Catherine.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
1960	-	+ 4,237 m	NGF-Lallemand	Annales hydrographiques 1971, pages 412 à 415 (MHCAN), Mannevy 1960, archives du SHOM, cote TAP/19
	SH6	+ 4,2347 m	NGF-Lallemand	« Nivellement Cholesky - Rattachements divers, cahier n°2/3 », MHCAN, Plouviez, 1960, archives du SHOM, cote SH2-886
	B1	+ 4,235 m	NGF-Lallemand	« Fiche d'observation de la marée de l'île d'Aix n°352 », MHCAN, Mannevy, 1960, archives du SHOM
1964	A1	+ 7,94 m	Zéro hydrographique	« Fiche descriptive d'observatoire de marée de l'île d'Aix », MHCAN, Ortais, 22 octobre 1964, archives du SHOM
		+ 4,235 m	NGF-Lallemand	

REPERE SH9 (existant)

Période : 1960 à aujourd'hui

Type : Soupape zinguée (SHOM)



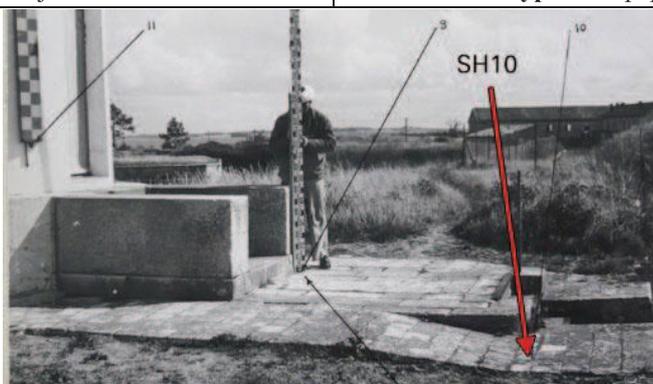
Description : Soupape zinguée scellée par le SHOM au pied de l'escalier du phare Est de l'île d'Aix. Les photos datent de 1960. Nous avons constaté que le repère était en place en juillet 2009. A l'automne 2009, un périmètre de sécurité de 30 m autour des phares a été mis en place suite à la découverte de nombreuses fissures faisant craindre un possible effondrement. Nous n'avons donc pas pu actualiser les photos du repère.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
1960	SH9	+ 10,5349 m	NGF-Lallemand	« Nivellement Cholesky - Rattachements divers, cahier n°2/3 », MHCAN, Plouviez, 1960, archives du SHOM, cote SH2-886

REPERE SH10 (existant)

Période : 1960 à aujourd'hui

Type : Soupape zinguée (SHOM)



Description : Soupape zinguée scellée par le SHOM sur le terre-plein du phare Est de l'île d'Aix. Les photos datent de 1960. Nous avons constaté que le repère était en place en juillet 2009. A l'automne 2009, un périmètre de sécurité de 30 m autour des phares a été mis en place suite à la découverte de nombreuses fissures faisant craindre un possible effondrement. Nous n'avons donc pas pu actualiser les photos du repère.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence	Source
1960	SH10	+ 10,3621 m NGF-Lallemand	« Nivellement Cholesky - Rattachements divers, cahier n°2/3 », MHCFA, Plouviez, 1960, archives du SHOM, cote SH2-886

REPERE SH12 (existant)

Période : 1960 à aujourd'hui

Type : Repère local octogonal (M.R.U.)



Description : Repère scellé à la base du phare Ouest de l'île d'Aix. Le repère n'a pas été photographié en 1960 mais une photo lointaine a pu être prise en juillet 2009, juste avant qu'un périmètre de sécurité de 30 m autour des phares fut mis en place suite à la découverte de nombreuses fissures, laissant craindre un possible effondrement.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence	Source
1960	SH12	+ 11,6396 m NGF-Lallemand	« Nivellement Cholesky - Rattachements divers, cahier n°2/3 », MHCFA, Plouviez, 1960, archives du SHOM, cote SH2-886

A.4. Fort Enet

Comme pour l'île d'Aix, voici un historique de la cote des principaux repères de nivellement et/ou de marée présents au fort Enet de 1860 à nos jours. Après une vue d'ensemble précisant l'emplacement de chaque repère (*figure A-5*), les repères sont détaillés précisément un à un, et toutes les informations recueillies sur leurs cotes historiques sont indiquées.

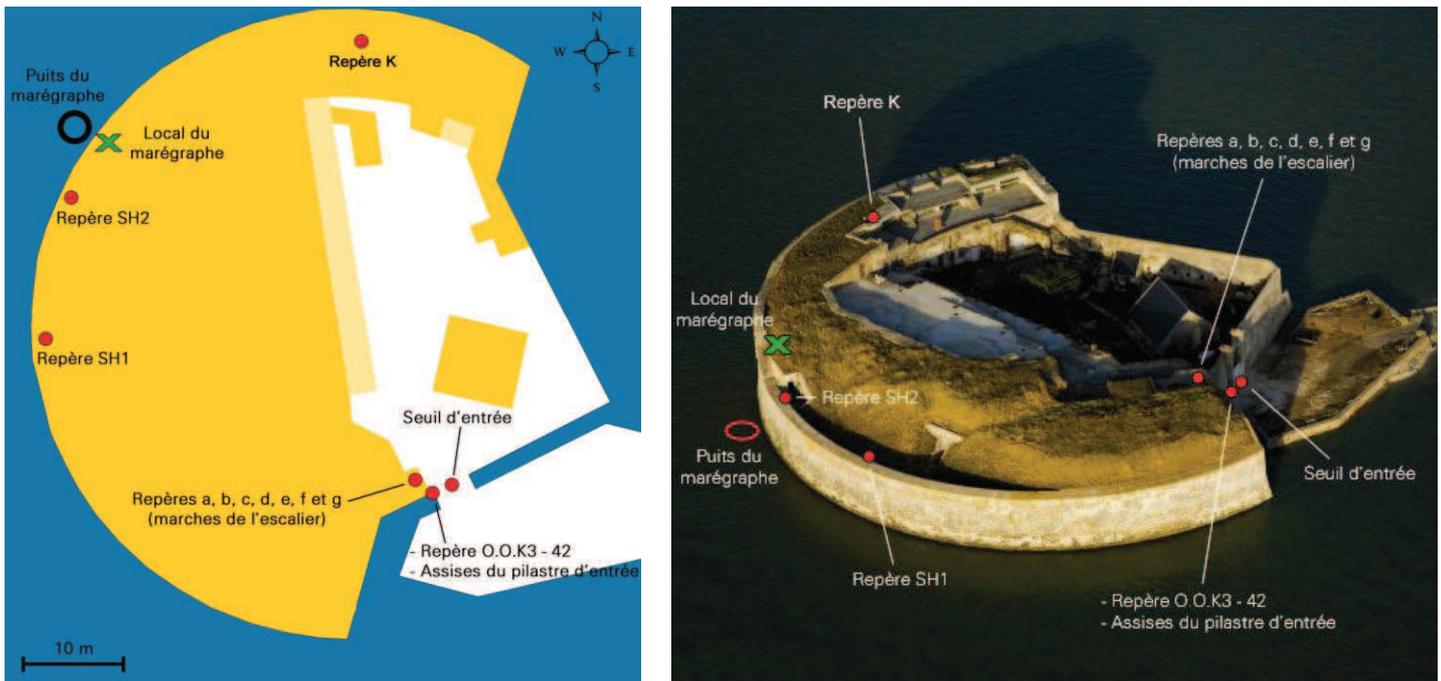


Figure A-5 : Localisation des différents repères répertoriés au fort Enet. À gauche : fond de carte provenant du site internet du plan cadastral français (<http://cadastre.gouv.fr>). À droite : photo de Francis Leroy, 2006.

REPERE K (existant)				
Période : 2009 à aujourd'hui			Type : Rivet en bronze	
<p>Description : Rivet en alliage de bronze (comportant une marque de centrage) scellé par une équipe de l'UMR LIENSs le 23 juillet 2009, à proximité de la terrasse des canons, au nord du fort. Il est situé à 69 cm du bord ouest, 82 cm de la rambarde métallique et 130 cm d'un anneau scellé.</p>				
Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence	Source	
2009	K	+ 14,113 m	NGF-IGN69	UMR 6250 LIENSs

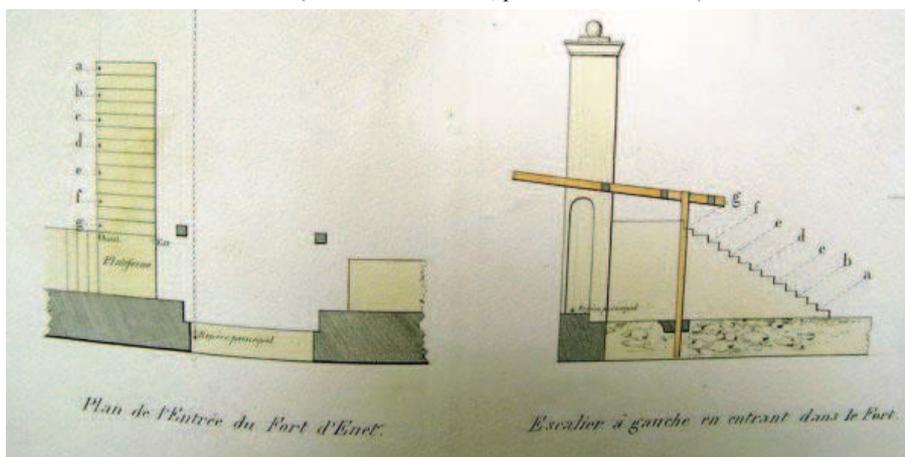
REPERES A, B, C, D, E, F ET G (détruits)

Période : 1850 à ?

Type : Repères naturels

En 1860 (archives du SHOM, portefeuille 12-7-22) :

En 2009 :



Description : Marches de l'escalier situé à l'entrée du fort, juste sur la gauche après avoir passé le seuil de la porte d'entrée. L'escalier existant aujourd'hui est différent de celui indiqué sur les plans de 1860. Il n'a pas la même configuration ni le même nombre de marches (13 en 1860 contre 19 en 2009). Les repères indiqués par Delbalat en 1860 ont donc été détruits au cours d'une des rénovations du fort entre 1905 et 1960.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence	Source
1860	A	+ 0,004 m	Seuil de la porte d'entrée du fort Enet « Nivellement longitudinal de la Charente », Delbalat, 1860, archives du SHOM, portefeuille 12-7-22
	B	+ 0,413 m	
	C	+ 0,812 m	
	D	+ 1,207 m	
	E	+ 1,602 m	
	F	+ 1,987 m	
	G	+ 2,381 m	

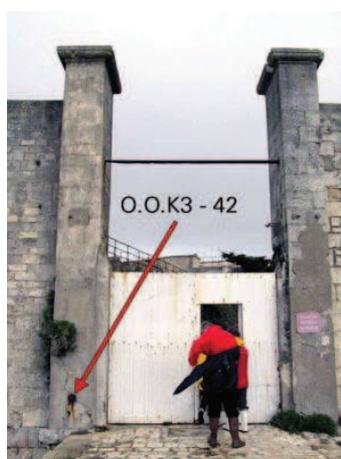
REPERE O.O.K3-42 (déplacé)

Période : ? à 2008

Type : Repère Bourdaloué

En 1960 :

En 2004 :



Description : Repère scellé sur le pilastre gauche extérieur (= pilastre ouest) de l'entrée du fort Enet, face Est. C'est un repère de type « Bourdaloué, Charente inférieure ». Ce repère a été abaissé de 8 mm en juillet 2008, lors de la rénovation des deux pilastres de l'entrée du fort.

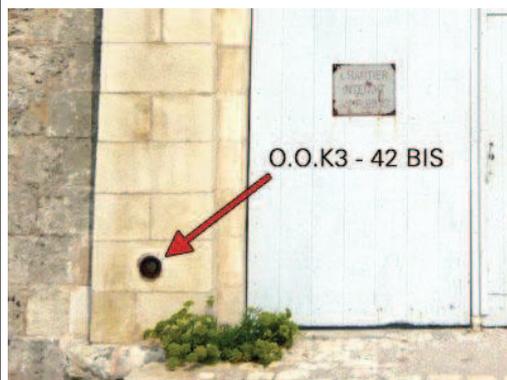
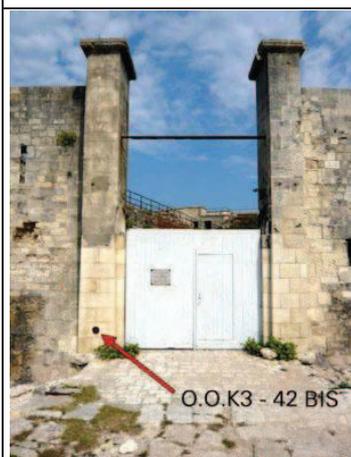
Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence	Source
1957	O.O.K3-42	+ 4,3952 m	NGF-Lallemand
1986	O.O.K3-42	+ 4,5504 m	NGF-IGN69

Cahier de « Calcul des altitudes des repères, réseau de 4^e ordre », opérateur : Dupuy, archives de l'IGN

REPERE O.O.K3-42 BIS (existant)

Période : 2008 à aujourd'hui

Type : Repère Bourdalouë



Description : Repère scellé sur le pilastre gauche extérieur (= pilastre ouest) de l'entrée du fort Enet, face Est. C'est un repère de type « Bourdalouë, Charente inférieure ». Ce repère a été renommé suite à son déplacement en juillet 2008, lors de la rénovation des deux pilastres de l'entrée du fort.

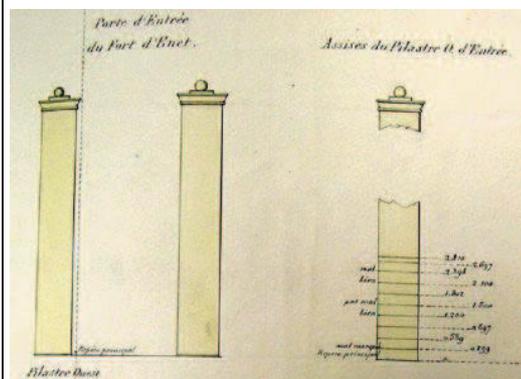
Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
2009	O.O.K3-42 BIS	+ 4,542 m	NGF-IGN69	UMR 6250 LIENSs

REPERE SEUIL (existant) ET ASSISES DU PILASTRE OUEST (détruits)

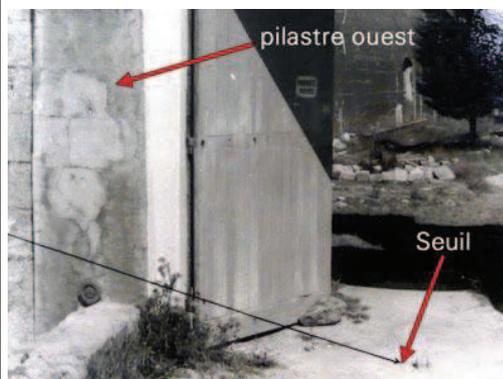
Période : 1850 à aujourd'hui

Type : Repère naturel

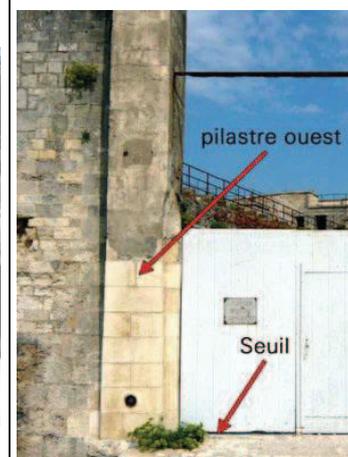
En 1860 :



En 1960 :

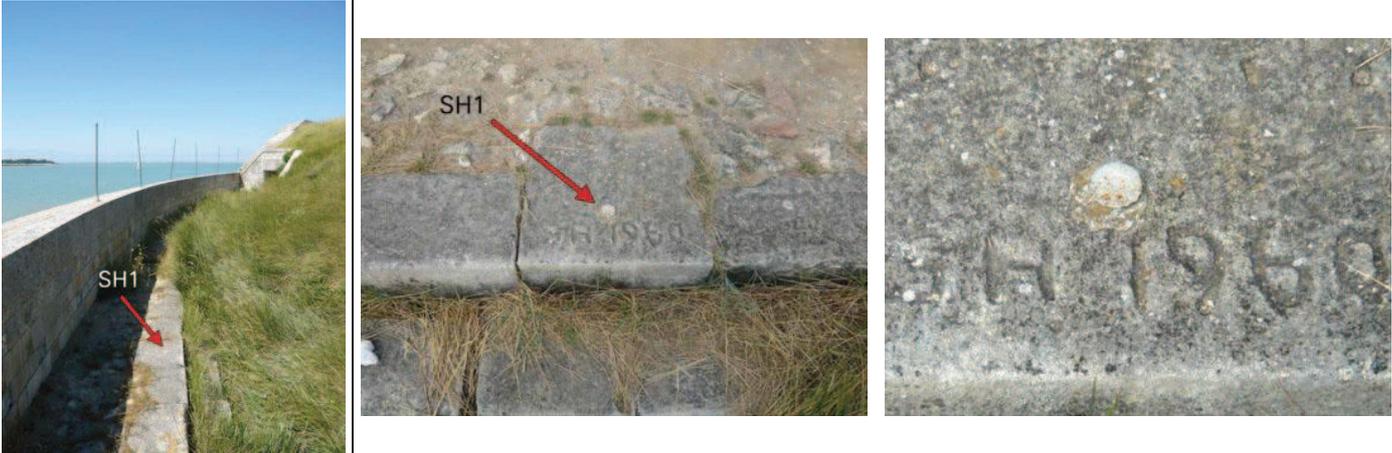


En 2009 :



Description : Le seuil d'entrée est le repère principal utilisé par Delbalat en 1860. Il s'agit du sol de la porte d'entrée, au pied du pilastre ouest. Plusieurs marques gravées sur le pilastre ouest (assises) ont servi de repères en 1860. Ces marques ont aujourd'hui disparues à la suite de la rénovation des deux pilastres en juillet 2008. A noter que le SHOM, en 1960, a nivelé le centre du seuil de la porte d'entrée, alors que le repère est situé au pied du pilastre ouest, soit quelques dizaines de centimètres plus à gauche sur la photo.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
1860	Seuil	+ 7,728 m	Zéro hydrographique	« Nivellement longitudinal de la Charente », Delbalat, 1860, archives du SHOM, portefeuille 12-7-22
1868	Seuil	+ 4,442 m	NGF-Bourdalouë	« Année 1868, Plans de nivellement, Echelle de marées, Seuils, Repères. Travail de M. Bona-Christave, Capitaine de vaisseau, directeur du port », archives du SHD Rochefort, cote 2D45t
1960	Palier	+ 3,8689 m	NGF-Lallemand	« Nivellement Cholesky - Rattachements divers », MHCAN, Plouviez, 1960, archives du SHOM, cote SH2-886
2009	Seuil	+ 4,007 m	NGF-IGN69	UMR 6250 LIENSs
		+ 7,547 m	Zéro hydrographique	

REPERE SH1 (existant)				
Période : 1960 à aujourd'hui			Type : Soupape zinguée (SHOM)	
				
Description : Soupape scellée par le SHOM en 1960. Située sur le chemin de ronde à l'ouest du fort, l'inscription SH1960 est gravée juste en dessous.				
Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
1960	SH1	+ 8,3824 m	NGF-Lallemand	« Nivellement Cholesky - Rattachements divers », MHCAN, Plouviez, 1960, archives du SHOM, cote SH2-886
2009	SH1	+ 8,537 m	NGF-IGN69	UMR 6250 LIENSs

REPERE SH2 (existant)				
Période : 1960 à aujourd'hui			Type : Soupape zinguée (SHOM)	
				
Description : Soupape scellée par le SHOM en 1960, à quelques mètres au nord du repère SH1. Située sur le chemin de ronde à l'ouest du fort, l'inscription SH1960 est gravée juste au dessus.				
Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
1960	SH2	+ 8,4032 m	NGF-Lallemand	« Nivellement Cholesky - Rattachements divers », MHCAN, Plouviez, 1960, archives du SHOM, cote SH2-886
2009	SH2	+ 8,559 m	NGF-IGN69	UMR 6250 LIENSs

A.5. Fort Boyard

De même, voici maintenant l'historique de la cote des principaux repères de nivellement et/ou de marée du fort Boyard. Après une vue d'ensemble précisant l'emplacement de chaque repère (*figures A-6 et A-7*), les repères sont détaillés précisément un à un, et toutes les informations recueillies sur leurs cotes historiques sont indiquées.

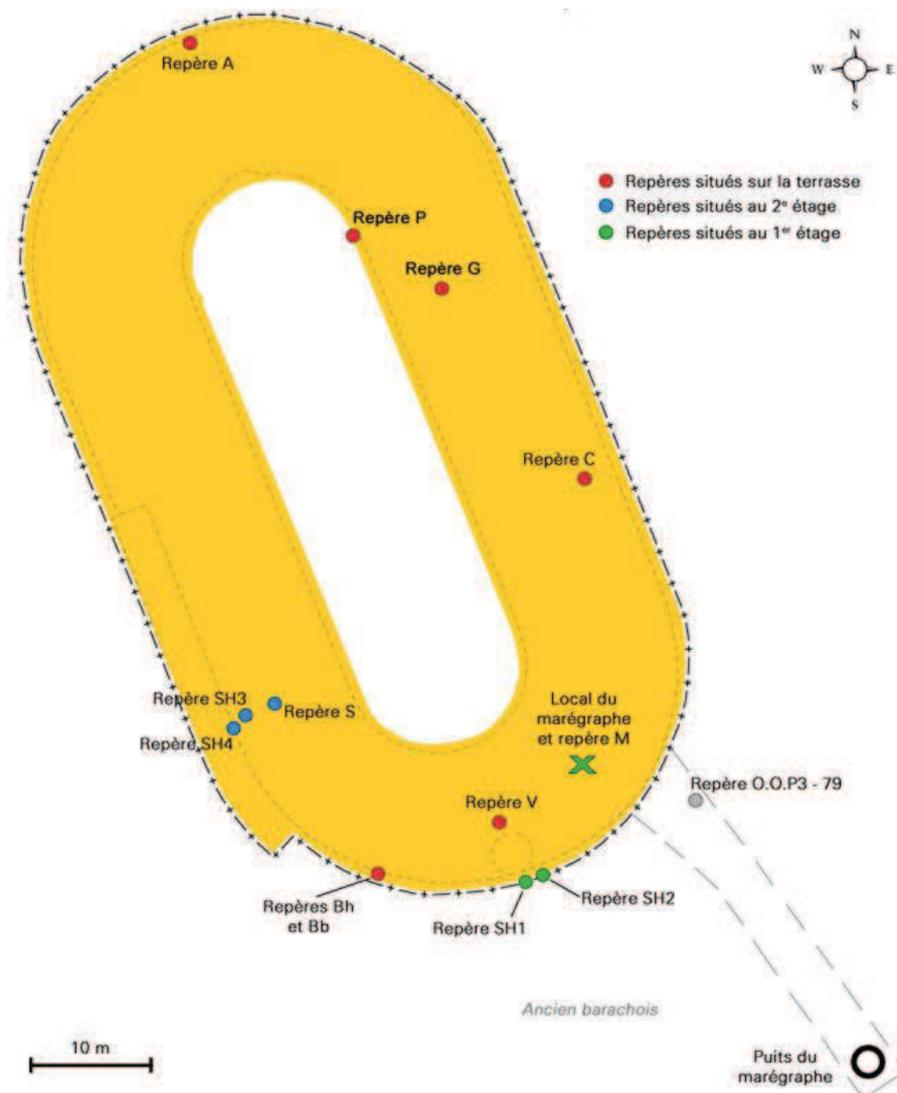


Figure A-6 : Localisation des différents repères répertoriés au fort Boyard : fond de carte modifié, provenant du site internet du plan cadastral français (<http://cadastre.gouv.fr>).

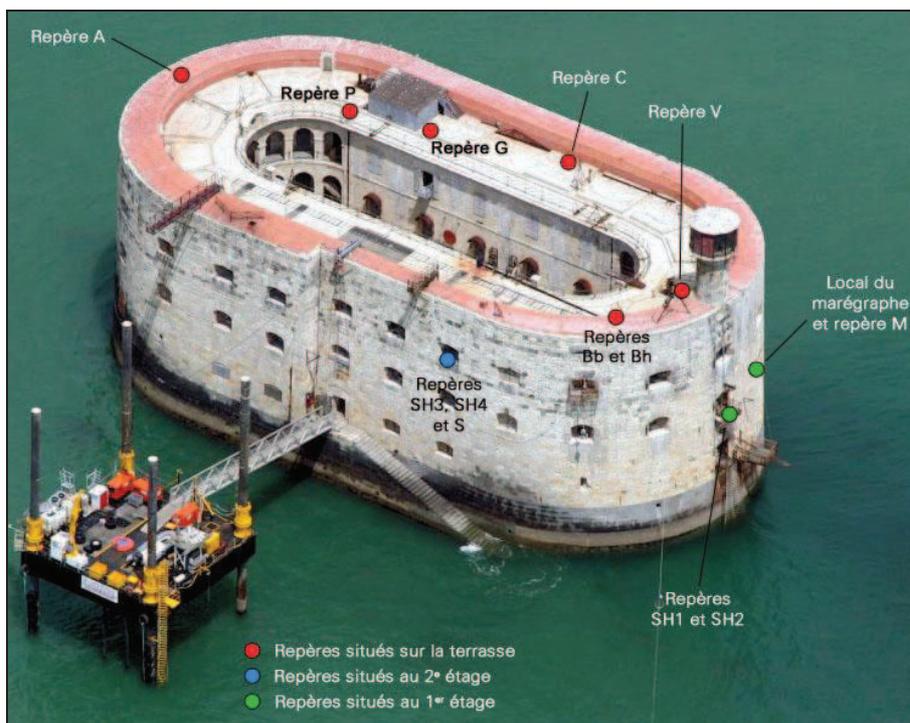
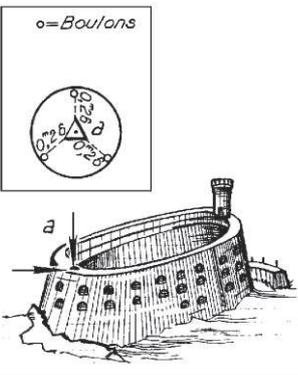
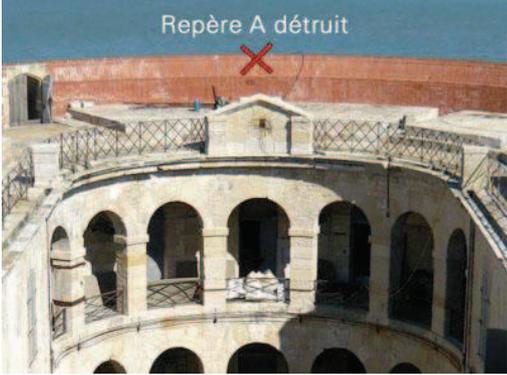


Figure A-7 : Localisation des différents repères répertoriés au fort Boyard. Photographie aérienne de Philippe Dufour, 2008.

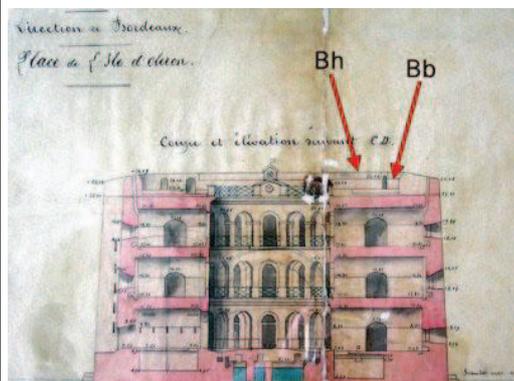
REPÈRE A (détruit)				
Période : 1866 à 1996			Type : Repère naturel	
En 1957 :	En 1966 :		En 2011 :	
				
Description de l'IGN : Boulon en bronze scellé dans la partie supérieure du bâtiment. Correspond au point a du site géodésique n°1733708 (Saint-Georges-d'Oléron VIII). Repère détruit lors des travaux de rénovation de la terrasse du fort en 1996.				
Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
1957	a	+ 23,85 m	NGF-IGN69	Précision décimétrique http://geodesie.ign.fr/fiches/ (consulté le 26 avril 2011)

REPERE BB (existant)

Période : 1866 à aujourd'hui

Type : Repère naturel

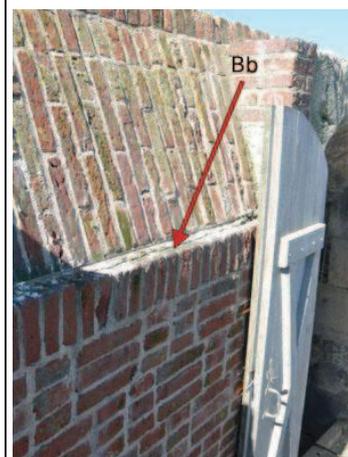
En 1878 :



En 2009 :



En 2011 :



Description : Le repère Bb correspond au dessus du rebord situé à mi-hauteur du mur de brique de la terrasse. Ce mur a été presque entièrement reconstruit lors des travaux de rénovation de 1996 puis de 1999 de la terrasse du fort.. Seule une petite portion du mur initial a été conservée, comme mur témoin. Il s'agit de la partie du mur située entre les deux portes, au sud ouest du fort, à l'endroit où ont été défini les repères Bb et Bh.

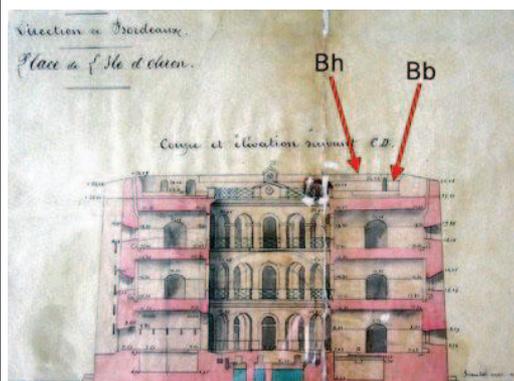
Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
1878	-	+ 24,04 m	NGF-Bourdalouë	« Fort Boyard en mer, plan du 10 mars 1878 », archives du CG17, série J, cote 12J23 pièce 636
2009	Bb	+ 23,51 m	NGF-IGN69	UMR 6250 LIENSs, Incertitude : 0,03 m
2011	Bb	+ 23,51 m	NGF-IGN69	UMR 6250 LIENSs, Incertitude : 0,03 m

REPERE BH (existant)

Période : 1866 à aujourd'hui

Type : Repère naturel

En 1878 :



En 2009 :



En 2011 :



Description : Le repère Bh correspond au sommet du mur de brique qui longe la terrasse du fort. Ce mur a été presque entièrement reconstruit lors des travaux de rénovation de 1996 puis de 1999 de la terrasse du fort.. Seule une petite portion du mur initial a été conservée, comme mur témoin. Il s'agit de la partie du mur située entre les deux portes, au sud ouest du fort, à l'endroit où ont été défini les repères Bb et Bh.

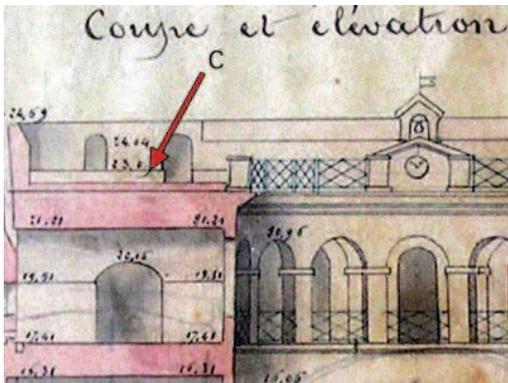
Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
1878	-	+ 24,69 m	NGF-Bourdalouë	« Fort Boyard en mer, plan du 10 mars 1878 », archives du CG17, série J, cote 12J23 pièce 636
2009	Bh	+ 24,26 m	NGF-IGN69	UMR 6250 LIENSs, Incertitude : 0,03 m
2011	Bh	+ 24,28 m	NGF-IGN69	UMR 6250 LIENSs, Incertitude : 0,03 m

REPERE C (existant)

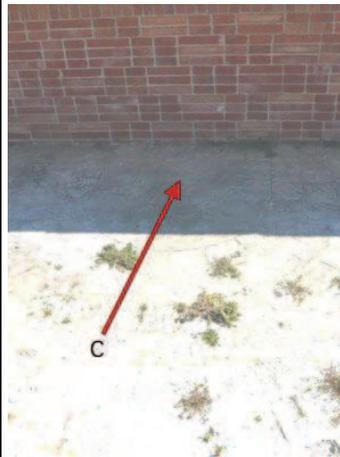
Période : 1866 à aujourd'hui

Type : Repère naturel

En 1878 :



En 2011 :



Description : Le repère C correspond au sol de la sur-terrasse sur laquelle reposaient les canons (terrasse du fort).

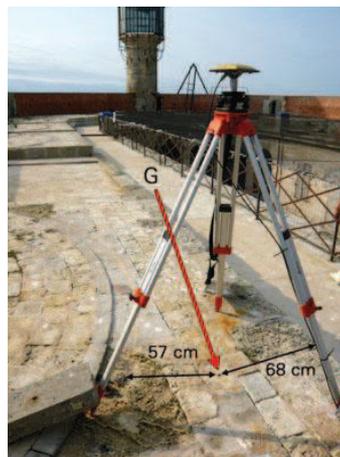
Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
1878	-	+ 23,09 m	NGF-Bourdalouë	« Fort Boyard en mer, plan du 10 mars 1878 », archives du CG17, série J, cote 12J23 pièce 636
2011	C	+ 22,54 m	NGF-IGN69	UMR 6250 LIENSs, Incertitude : 0,03 m

REPERE G (existant)

Période : 2009 à aujourd'hui

Type : Rivet en bronze

En 2009 :



En 2011 :



Description : Boulon en alliage de bronze (comportant une marque de centrage) scellé par une équipe de l'UMR 6250 LIENSs le 20 juillet 2009, à proximité de l'héliport, sur la terrasse du fort, au nord-est. Il est situé à 68 cm du bord ouest, 57 cm d'un bout de métal scellé et 138 cm de l'angle sud-ouest de l'abri gris.

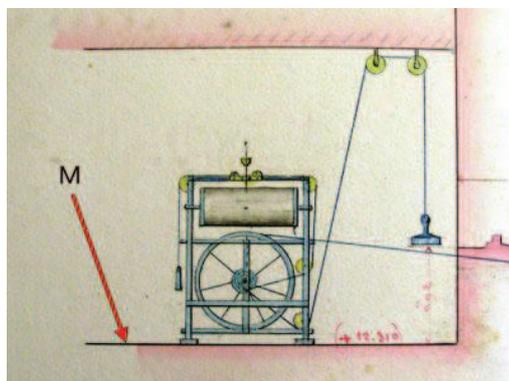
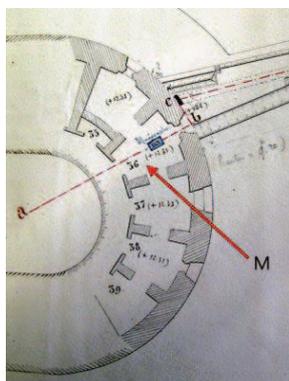
Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
2009	G	+ 22,54 m	NGF-IGN69	UMR 6250 LIENSs, Incertitude : 0,03 m

REPERE M (existant)

Période : 1866 à aujourd'hui

Type : Repère naturel

En 1878 :



En 2011 :



Description : Le repère M correspond au sol de la casemate dans laquelle était installé le marégraphe de 1873 à 1909. Cette casemate (numéro 118) est située au 1^{er} étage, orientée légèrement sud-sud/est (côté vigie). Aujourd'hui, cette casemate abrite un jeu destiné à l'émission de télévision « Fort Boyard », et est connue sous le nom de « salle du billard ». Le sol de la casemate est en partie recouvert d'un parquet, depuis la fenêtre jusqu'aux 3/4 de la salle en se dirigeant vers la porte, mais le sol est d'origine.

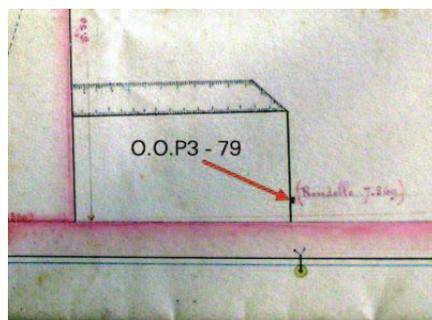
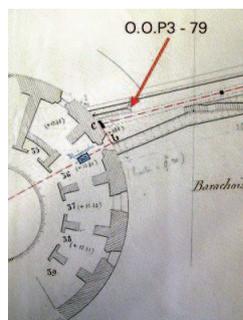
Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
1878	-	+ 12,31 m	NGF-Bourdalouë	« Fort Boyard en mer, plan du 10 mars 1878 », archives du CG17, série J, cote 12J23 pièce 636
2011	M	+ 11,73 m	NGF-IGN69	UMR 6250 LIENSs, Incertitude : 0,03 m

REPERE O.O.P3-79 (détruit)

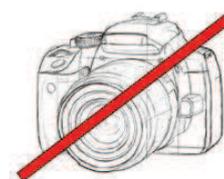
Période : 1868 à 1955

Type : Repère Bourdalouë

En 1882 :



En 2011 :



Repère détruit

Description : Repère de type « Bourdalouë, Charente inférieure » scellé sur le mur de cale de la jetée sud-est de l'ancien barachois. Il existe un doute sur la continuité du repère. En effet, l'ancien repère correspondant à cette description se nommait « Île d'Oléron, n°51 », et même s'il se situait exactement au même endroit que le repère O.O.P3-79, leurs altitudes dans le réseau NGF-Lallemand diffèrent de 5 cm. Peut-être a-t-il été déplacé ?

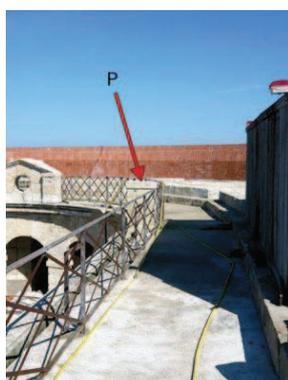
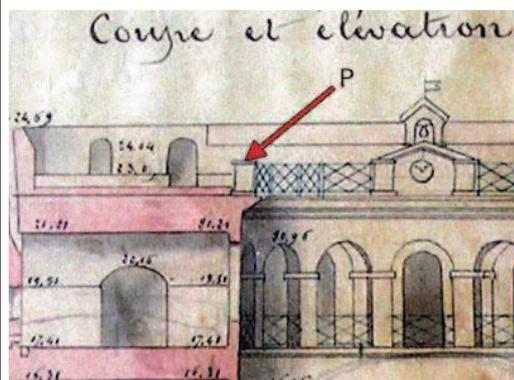
Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
1868	Île d'Oléron, n°51	+ 7,569 m	NGF-Bourdalouë	« Île d'Oléron, traverses de 4 ^e ordre », archives de l'IGN, cote 90-422 SGN/IGN
1929	Île d'Oléron, n°51	+ 6,99 m	NGF-Lallemand	« Île d'Oléron, traverses de 4 ^e ordre », archives de l'IGN, cote 90-422 SGN/IGN
1957	O.O.P3-79	+ 6,939 m	NGF-Lallemand	Cahier de « Calcul des altitudes des repères, réseau de 4 ^e ordre », opérateur :Dupuy, archives de l'IGN
1971	O.O.P3-79	+ 7,108 m	NGF-IGN69	Cahier de « Calcul des altitudes des repères, réseau de 4 ^e ordre », opérateur :Dupuy, archives de l'IGN

REPERE P (existant)

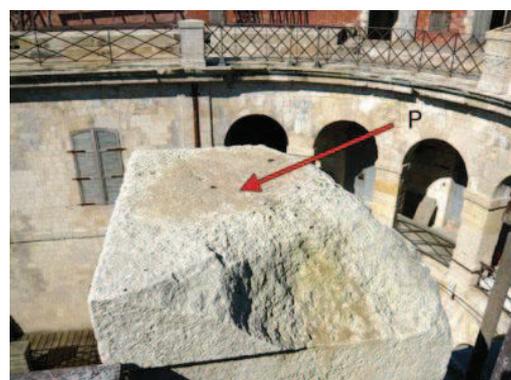
Période : 1866 à aujourd'hui

Type : Repère naturel

En 1878 :



En 2011 :



Description : Le repère P correspond au sommet du pilier nord-est situé sur la terrasse du fort. Les trois autres piliers de la terrasse ont l'air d'avoir été entièrement reconstruit et modifié par rapport au plan de 1878. Seul ce pilier correspond au plan ancien et semble être d'origine.

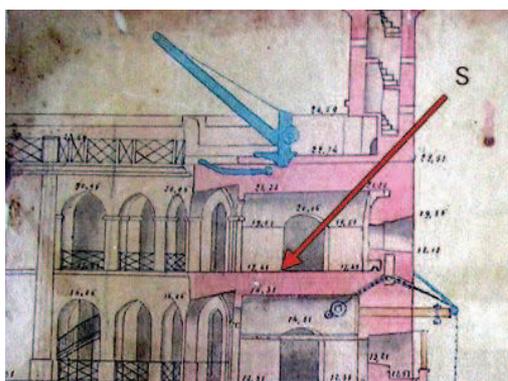
Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
1878	-	+ 23,59 m	NGF-Bourdalouë	« Fort Boyard en mer, plan du 10 mars 1878 », archives du CG17, série J, cote 12J23 pièce 636
2011	P	+ 23,03 m	NGF-IGN69	UMR 6250 LIENSs, Incertitude : 0,03 m

REPERE S (existant)

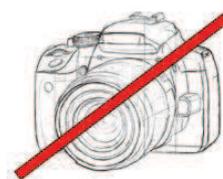
Période : 1866 à aujourd'hui

Type : Repère naturel

En 1878 :



En 2011 :



Repère non photographié

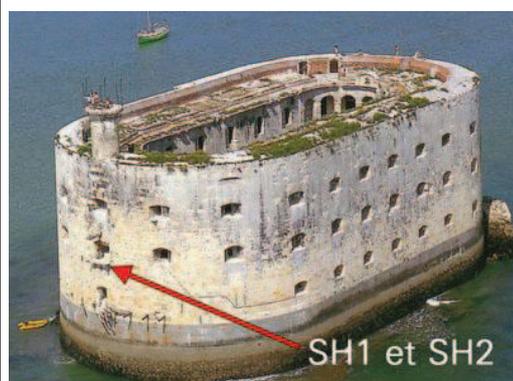
Description : Le repère S correspond au sol du 2^e étage du fort. Attention, le sol des coursives a été refait, seul le sol des casemates est d'origine.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
1878	-	+ 17,41 m	NGF-Bourdalouë	« Fort Boyard en mer, plan du 10 mars 1878 », archives du CG17, série J, cote 12J23 pièce 636
2011	S	+ 16,77 m	NGF-IGN69	UMR 6250 LIENSs, Incertitude : 0,03 m

REPERE SH1 (détruit)

Période : 1960 à ?

Type : Soupape zinguée (SHOM)



Description : Soupape scellée par le SHOM en 1960, sur un encorbellement situé au sud du fort, au 1^{er} étage, à une trentaine de centimètres du repère SH2. Ce repère a aujourd'hui disparu.

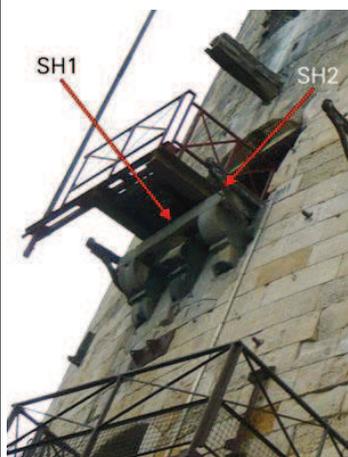
Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence	Source
1960	SH1	+ 11,781 m	NGF-Lallemand « Nivellement Cholesky - Rattachements divers », MHCAN, Lefas, 1960, archives du SHOM, cote SH2-886

REPERE SH2 (existant)

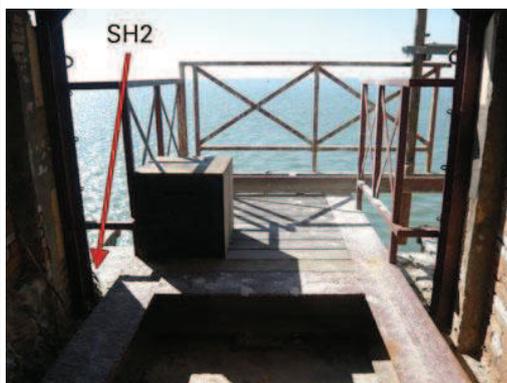
Période : 1960 à aujourd'hui

Type : Soupape zinguée (SHOM)

En 2009 :



En 2011 :

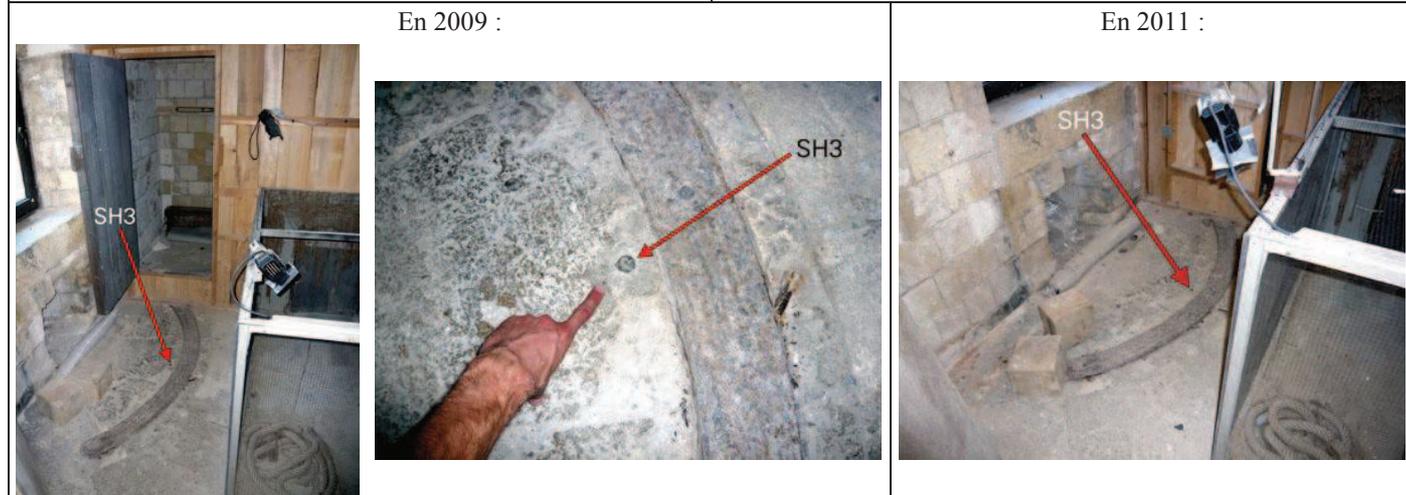


Description : Soupape scellée par le SHOM en 1960, sur un encorbellement situé au sud du fort, au 1^{er} étage.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence	Source
1960	SH2	+ 11,783 m	NGF-Lallemand « Nivellement Cholesky - Rattachements divers », MHCAN, Lefas, 1960, archives du SHOM, cote SH2-886
2011	SH2	+ 11,98 m	NGF-IGN69 UMR 6250 LIENSs, Incertitude : 0,03 m

REPERE SH3 (existant)

Période : 1960 à aujourd'hui **Type :** Soupape zinguée (SHOM)

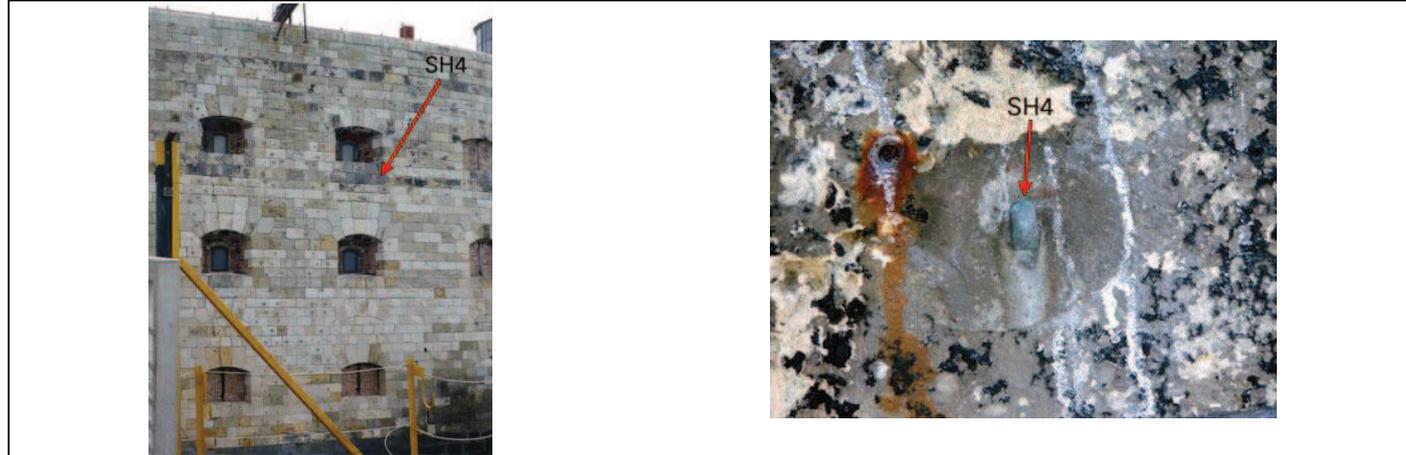


Description : Soupape scellée par le SHOM en 1960, dans le sol de la casemate n°223, située au 2^e étage du fort, orientée légèrement sud-sud/ouest. Cette casemate est aujourd'hui occupée pour le jeu télévisé « Fort Boyard », et est connue sous le nom de « salle des mygales et des scorpions ». Le repère est situé au sol, dans l'axe de la fenêtre, à environ 1 m du mur, côté mer.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
1960	SH3	+ 16,597 m	NGF-Lallemand	« Nivellement Cholesky - Rattachements divers », MHCFAN, Lefas, 1960, archives du SHOM, cote SH2-886
2009	SH3	+ 16,78 m	NGF-IGN69	UMR 6250 LIENSs, Incertitude : 0,03 m
2011	SH3	+ 16,78 m	NGF-IGN69	UMR 6250 LIENSs, Incertitude : 0,03 m

REPERE SH4 (existant)

Période : 1960 à aujourd'hui **Type :** Repère vertical en bronze (SHOM)



Description : Repère vertical en bronze scellé par le SHOM en 1960 dans le mur extérieur du fort, sous la fenêtre de la casemate où se trouve le repère SH3 (casemate n°223). Pour le trouver, il faut monter sur le rebord de la fenêtre et se pencher légèrement vers la gauche. Le repère SH4 est alors juste en bas à gauche du rebord de la fenêtre.

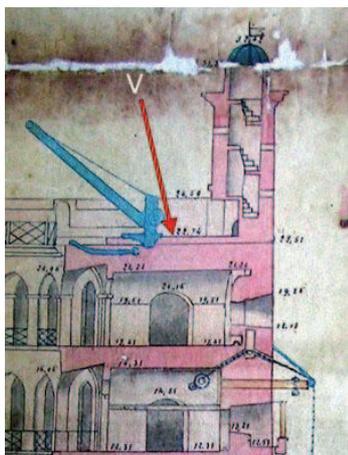
Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
1960	SH4	+ 16,981 m	NGF-Lallemand	« Nivellement Cholesky - Rattachements divers », MHCFAN, Lefas, 1960, archives du SHOM, cote SH2-886

REPERE V (existant)

Période : 1866 à aujourd'hui

Type : Repère naturel

En 1878 :



En 2011 :



Description : Le repère V correspond au sol entre l'entrée de la vigie et l'ancienne grue métallique rouillée, sur la terrasse, au sud du fort.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
1878	-	+ 22,74 m	NGF-Bourdalouë	« Fort Boyard en mer, plan du 10 mars 1878 », archives du CG17, série J, cote 12J23 pièce 636
2009	V	+ 22,18 m	NGF-IGN69	UMR 6250 LIENSs, Incertitude : 0,03 m
2011	V	+ 22,18 m	NGF-IGN69	UMR 6250 LIENSs, Incertitude : 0,03 m

A.6. Phare de Cordouan

Voici un historique de la cote des principaux repères de nivellement et/ou de marée présents au phare de Cordouan de 1812 à nos jours. Cet historique a été réalisé à partir d'informations retrouvées dans les centres d'archives du Service hydrographique et océanographique de la marine (SHOM) et du Service Historique de la Défense - Marine de Rochefort (SHD-Marine Rochefort). Après une vue d'ensemble précisant l'emplacement de chaque repère (*figure A-8*), les repères sont détaillés précisément un à un, et toutes les informations recueillies sur leurs cotes historiques sont indiquées.

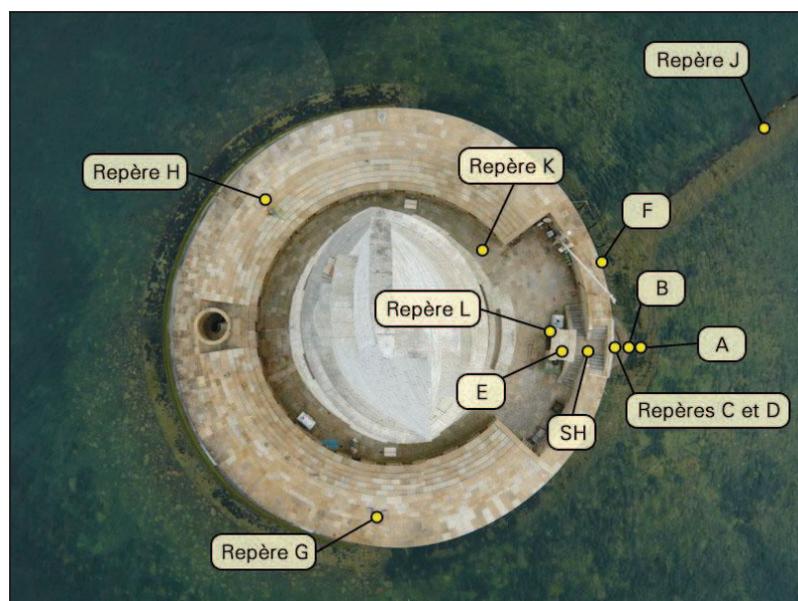


Figure A-8 : Localisation des différents repères de nivellement et/ou de marée du phare de Cordouan. Montage photo réalisé à partir de photographies prises au sommet du phare.

REPERE A (existant)

Période : 1812 à aujourd'hui

Type : Repère naturel



Description : Seuil du Perrat, au pied de la première marche.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
1812	-	+ 2,896 m	Zéro hydrographique	« Côtes de France – Marées », Vol.7, Beautemps-Beaupré, 1813, archives du SHOM
1825	-	+ 2,599 m	Zéro hydrographique	« Cahier de marées – Echelle de Cordouan », Beautemps-Beaupré, archives du SHD Rochefort, cote 7JJ 407
1853	-	+ 2,60 m	Zéro hydrographique	« Côtes de France 1874, Embouchure de la Gironde, Observatoire n°4 – Cordouan », Manen, archives du SHD Rochefort, cote 7JJ 1336
1874	-	+ 2,65 m	Zéro hydrographique	
2005	A	+ 2,647 m	Zéro hydrographique	« Fiche d'Observatoire de Marée de Cordouan, n°1670 », MHA, Deniel, 10 janvier 2006, archives du SHOM
2008	A	+ 2,630 m	Zéro hydrographique	UMR 6250 LIENSs

REPERE B (existant)

Période : 1988 à aujourd'hui

Type : Repère naturel



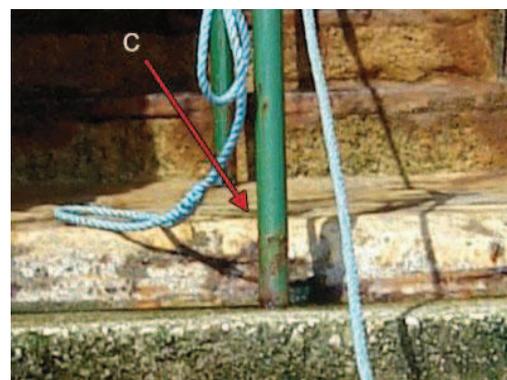
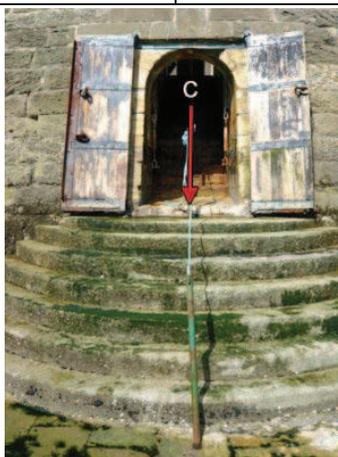
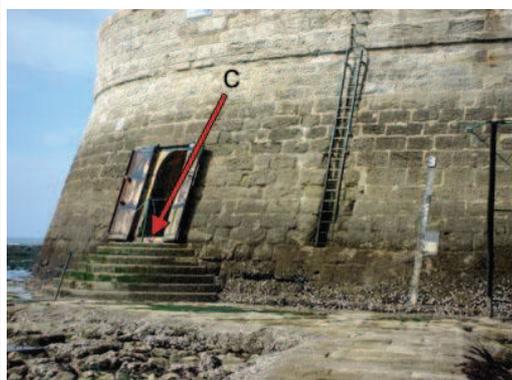
Description : Surface supérieure de la première marche menant à l'escalier d'accès au phare.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
1825	-	+ 2,924 m	Zéro hydrographique	« Cahier de marées – Echelle de Cordouan », Beautemps-Beaupré, archives du SHD Rochefort, cote 7JJ 407
1853	-	+ 2,92 m	Zéro hydrographique	« Côtes de France 1874, Embouchure de la Gironde, Observatoire n°4 – Cordouan », Manen, archives du SHD Rochefort, cote 7JJ 1336
1874	B	+ 2,97 m	Zéro hydrographique	
2005	B	+ 2,855 m	Zéro hydrographique	« Fiche d'Observatoire de Marée de Cordouan, n°1670 », MHA, Deniel, 10 janvier 2006, archives du SHOM
2008	B	+ 2,848 m	Zéro hydrographique	UMR 6250 LIENSs

REPERE C (existant)

Période : 1874 à aujourd'hui

Type : Repère naturel



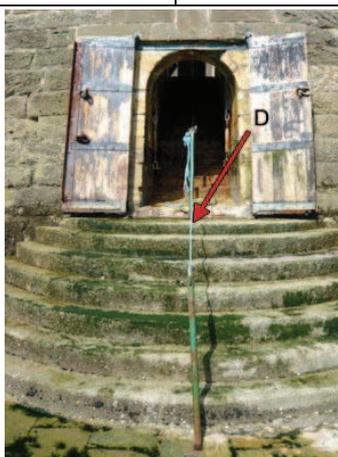
Description : Seuil en bronze de la porte d'entrée de la poterne.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
1874	C	+ 4,12 m	Zéro hydrographique	« Côtes de France 1874, Embouchure de la Gironde, Observatoire n°4 – Cordouan », Manen, archives du SHD Rochefort, cote 7JJ 1336
1912	-	+ 4,12 m	Zéro hydrographique	« Recherches hydrographiques », Vol. 19, page 21, Fichot, archives du SHOM
1970	C	+ 4,12 m	Zéro hydrographique	« Fiche d'Observatoire de Marée de Cordouan », Port Autonome de Bordeaux, 1970, archives du SHOM
2005	C	+ 4,127 m	Zéro hydrographique	« Fiche d'Observatoire de Marée de Cordouan, n°1670 », MHA, Deniel, 10 janvier 2006, archives du SHOM
2008	C	+ 3,867 m	Zéro hydrographique	UMR 6250 LIENSs

REPERE D (existant)

Période : 1988 à aujourd'hui

Type : Repère naturel



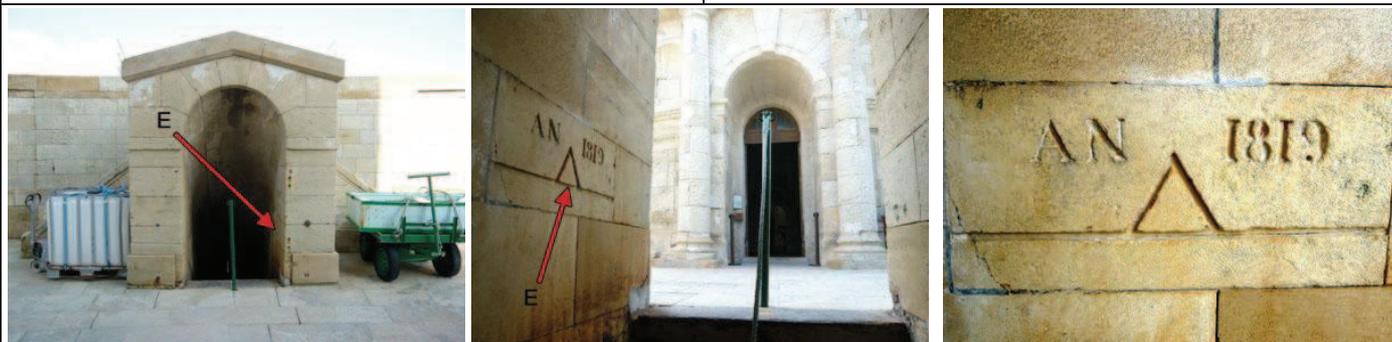
Description : Sommet de la dernière marche menant à l'escalier d'accès au phare.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
2005	C bis	+ 3,990 m	Zéro hydrographique	« Fiche d'Observatoire de Marée de Cordouan, n°1670 », MHA, Deniel, 10 janvier 2006, archives du SHOM
2008	D	+ 3,867 m	Zéro hydrographique	UMR 6250 LIENSs

REPERE E (existant)

Période : 1819 à aujourd'hui

Type : Repère gravé



Description : Repère gravé par le colonel Brousseau en 1819, en haut à gauche de l'escalier d'accès à la plateforme du phare. Ce repère est plus connu sous le nom de « Repère des géographes ». L'endroit exact ayant servi de repère est le trait inférieur de la base de la gravure.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
1825	Marque de Brousseau	+ 8,213 m	Zéro hydrographique	« Cahier de marées – Echelle de Cordouan », Beautemps-Beaupré, archives du SHD Rochefort, cote 7JJ 407
1853	Marque des géographes	+ 8,20 m	Zéro hydrographique	« Côtes de France 1874, Embouchure de la Gironde, Observatoire n°4 – Cordouan », Manen, archives du SHD Rochefort, cote 7JJ 1336
1874	E	+ 8,08 m	Zéro hydrographique	
2008	E	+ 8,121 m	Zéro hydrographique	UMR 6250 LIENSs

REPERE F (existant)

Période : 1874 à aujourd'hui

Type : Echelle en lave émaillée



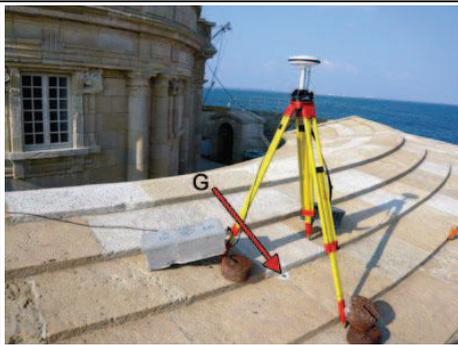
Description : Echelle en lave émaillée installée en 1874 par la mission hydrographique dirigée par Manen et fabriquée par une usine de Saint-Martin-près-Riom. Elle est située contre le bouclier de protection du phare, côté Est. Le zéro de cette échelle correspond au zéro hydrographique encore en vigueur à Cordouan. Graduation ayant servi de repère en 2008 : 3,00 m. **Repère fondamental du SHOM.**

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
2005	F	+ 3,00 m	Zéro hydrographique	« Fiche d'Observatoire de Marée de Cordouan, n°1670 », MHA, Deniel, 10 janvier 2006, archives du SHOM
2008	F	+ 3,00 m	Zéro hydrographique	Graduation 3,00 m

REPERE G (existant)

Période : ? à aujourd'hui

Type : Rivet



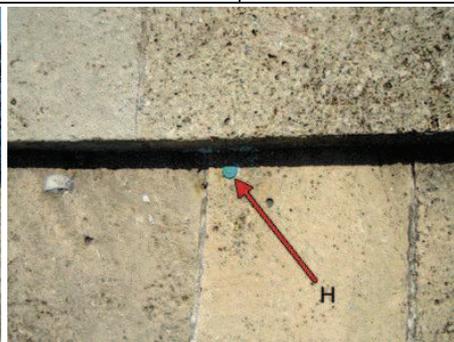
Description : Rivet scellé sur la surface supérieure du bouclier de protection du phare, côté Sud, sur lequel il est inscrit « Arpentage ». L'altitude de ce repère a été observée par GPS lors de notre mission de 2008.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
2008	G	+ 11,127 m	Zéro hydrographique	UMR 6250 LIENSs

REPERE H (existant)

Période : ? à aujourd'hui

Type : Rivet



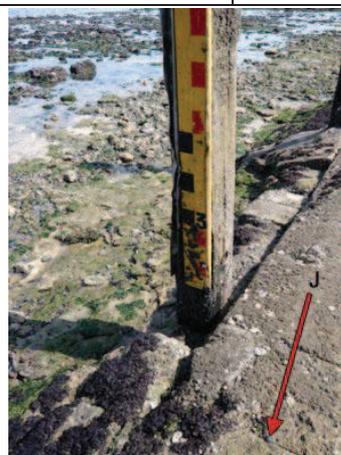
Description : Rivet scellé sur la surface supérieure du bouclier de protection du phare, côté Ouest, sur lequel il est inscrit « Arpentage ».

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
2008	H	+ 10,930 m	Zéro hydrographique	UMR 6250 LIENSs

REPERE J (existant)

Période : ? à aujourd'hui

Type : Rivet



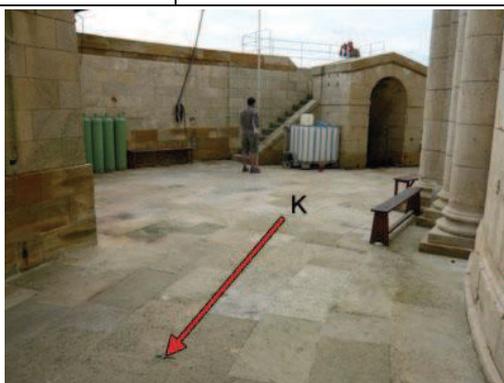
Description : Rivet scellé dans le Perrat, à proximité de l'échelle de marée actuelle.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
2008	J	+ 2,602 m	Zéro hydrographique	UMR 6250 LIENSs

REPERE K (existant)

Période : ? à aujourd'hui

Type : Repère « Téton » métallique



Description : Repère « téton » métallique scellé sur la plateforme du phare, entre la cuisine et la tour.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
2008	K	+ 7,634 m	Zéro hydrographique	UMR 6250 LIENSs

REPERE L (existant)

Période : 1924 à aujourd'hui

Type : Repère gravé



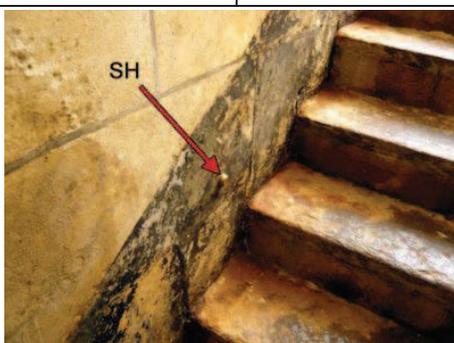
Description : Repère situé sur la plateforme du phare, gravé juste en bas à droite en sortant de l'escalier d'accès au phare. L'endroit exact ayant servi de repère est le trait inférieur de la base de la gravure.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
2008	L	+ 8,152 m	Zéro hydrographique	UMR 6250 LIENSs

REPERE SH (existant)

Période : ? à aujourd'hui

Type : Rivet



Description : Repère du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM), scellé dans l'escalier d'accès à la plateforme du phare. Il est situé du même côté que le repère E gravé dans le mur.

Année	Nom d'usage	Altitude / hauteur et référence		Source
2008	SH	+ 6,264 m	Zéro hydrographique	UMR 6250 LIENSs

Annexe B : Mémoire sur les observations à faire du flux et du reflux
de la mer (de La Lande, 1777)

2
sur les marées : elles furent suivies avec soin & intelligence par M. Baert à Dunkerque, par M. Dubocqge au Havre, par M. Moutier de Longchamp à Brest, & à l'Orient par un Observateur dont le nom ne nous est pas parvenu.

Ces observations ayant été remises à M. Cassini, il les examina, & en tira des conséquences qu'on peut voir dans les Mémoires de l'Académie, années 1712, 1713, 1714 & 1720. Mais les registres originaux étant perdus, & les détails des circonstances n'ayant pas été publiés, on a compris depuis long-temps la nécessité de se procurer de nouvelles observations, faites avec de nouvelles précautions, par des Observateurs assidus, & que l'on publierait pour aider les Savans dans leurs recherches. M.^r Mac-Laurin, Daniel Bernoulli & Euler, dont les pièces partagèrent le Prix de l'Académie proposé à ce sujet en 1740, sentirent combien les observations détaillées & précises pourroient éclaircir la théorie : ils regretterent de n'avoir pas eu assez de secours pour établir la leur, & depuis ce temps-là les Géomètres, par les mêmes raisons, ont presque cessé de suivre cette partie intéressante de la Physique.

En conséquence, l'Académie a demandé les ordres du Roi pour faire faire de nouvelles observations dans nos principaux ports par des personnes qui, pour un temps, se consacroient à ce travail utile pour l'avancement des Sciences.

Ces observations seroient nécessaires sur-tout dans les ports de la Rochelle, de l'Orient, de Brest, du Havre, de Saint-Malo, de Dunkerque, & même de Toulon, quoique la mer y soit à peine sensible.

14



M É M O I R E

SUR LES OBSERVATIONS à faire du Flux & du Reflux de la Mer.

LA Théorie du flux & du reflux de la Mer, est une des parties de la Physique que les Savans ont le moins approfondies, faute de bonnes observations. On fait très-bien, depuis la fin du siècle dernier, que les attractions du Soleil & de la Lune sont les véritables causes de ce phénomène; mais on ignore le rapport exact de ces forces, l'altération que les vents & les circonstances locales y occasionnent, & principalement l'influence que peut avoir l'inertie des eaux sur l'heure & la hauteur des marées. L'opinion générale, que les marées des équinoxes sont les plus fortes de toutes, paroît au moins douteuse, suivant un Mémoire imprimé parmi ceux de l'Académie, année 1772 : Enfin l'observation ni la théorie n'ont point encore mis en état de pouvoir prédire, avec quelq'exactitude, la hauteur de la mer dans un port, pour un jour & une heure quelconque.

L'Académie royale des Sciences avoit obtenu en 1701, de M. de Pontchartrain, & en 1716, de M. le Régent, de faire faire dans quelques-uns de nos ports des observations

3

L'Académie désireroit donc que dans ces ports il fût fait, pendant une année consécutive, des observations de la hauteur & de l'heure de la pleine & de la basse mer tous les jours, & avec les attentions suivantes.

- 1.° L'échelle graduée en pieds & pouces, sera placée dans un lieu qui n'assèche pas de basse mer.
- 2.° Pour éviter l'agitation des vagues & le clapotage de la mer, l'échelle doit être environnée d'un bâtis ou tambour, dans lequel l'eau ne communique que par de petites ouvertures.
- 3.° On aura soin de marquer la direction des vents sur la côte, & autant que faire se pourra, le degré de sa force, suivant les expressions usitées par les Marins.
- 4.° On pourra y joindre les hauteurs du baromètre & du thermomètre, pour connoître l'état de l'Atmosphère aux époques des observations.
- 5.° On observera non-seulement l'heure & la minute de la plus grande hauteur & du plus grand abaiffement de la mer, mais encore d'autres hauteurs intermédiaires. Il sera même utile, de temps en temps, d'observer ces hauteurs pendant une marée entière, de demi-heure en demi-heure, pour connoître les loix de la marche du flot & du jusant, objet très-essentiel qui peut conduire à perfectionner la théorie. Il faudra que les Observateurs règlent leur montre sur quelque bonne méridienne.

Les personnes qui auront assez de zèle pour s'occuper de ces observations, imagineront sans doute des moyens pour les faire avec beaucoup de précision. Parmi ceux qui sont venus à la connoissance de l'Académie, elle seroit portée à

4

adopter celui qu'on trouve dans le Journal des Savans, année 1685 : il consiste à placer dans un lieu qui n'assèche pas de basse mer, un tuyau dans lequel un corps flottant s'éleve & s'abaiffe avec la mer : ce corps flottant est suspendu par une corde qui passe sur une poulie, & qui porte à son extrémité un poids dont la hauteur indique celle de la mer. On pourroit encore, sur ce corps flottant qui seroit d'une certaine étendue, faire porter une règle de bois léger, & graduée, dont l'extrémité supérieure passeroit dans une boucle fixe, & qui indiqueroit l'état de la marée par sa graduation.

Ces précautions, & d'autres semblables que la situation des lieux pourra suggérer, procureront des observations précises que l'Académie regarde comme très-importantes pour cette partie des sciences Physico-mathématiques.

Si les Observateurs désireroient quelques éclaircissements ultérieurs, l'Académie s'empressera de les leur envoyer au premier avis.

A P A R I S,
DE L'IMPRIMERIE ROYALE.
M. DCCLXXVII.

Document original conservé dans les archives

de la médiathèque Michel Crépeau (La Rochelle), cote MS 783.

Annexe C : Ecart entre les systèmes NGF à Rochefort

Les repères ci-dessous (situés à Rochefort) ont été observés pour la première fois par l'IGN en 1957. Les altitudes ont alors été mesurées dans le système NGF-Lallemand puis calculées dans le système NGF-IGN69. Lorsque les altitudes « *nivellement Charente Inférieure* » sont connues, elles sont indiquées ; les repères étant du type « *Bourdalouë, Charente inférieure* ». A partir de ces résultats, il semble que l'écart entre les deux systèmes NGF-Lallemand et NGF-Bourdalouë soit de l'ordre de -0,588 m à Rochefort. Lorsque l'écart est différent, il s'agit probablement de repères qui ont bougé ou qui ont été déplacés entre la première observation et 1957.

Matricule	SUPPORT	Altitude Bourdalouë (m) [1]	NGF-Lallemand (m) [2]	NGF-IGN1969 (m) [3]	Différence [3] - [2]	Différence [2] - [1]
10	Aqueduc	6,039	5,4600	5,6129	0,1529	-0,5790
10-a	Maison	R.M.R.U	5,2332	5,3912	0,1580	
11	Aqueduc	3,908	3,1695	3,3280	0,1585	-0,7385
11-a	Eglise		5,6375	5,7960	0,1585	
12	B.K. n° 163	14,583	14,0000	14,1604	0,1604	-0,5830
13	Pont	4,689	4,7250	4,8844	0,1594	0,0360
27	Abattoirs		4,11			
28	Maison	4,708	3,9093	4,0561	0,1468	-0,7987
18-a	Eglise	R.M.R.U	10,5218	10,6738	0,1520	
19	B.K. n° 172	11,169	10,5786	10,7300	0,1514	-0,5904
14	Ecluse	6,073	5,468	5,6260	0,1580	-0,6050
15-bis	Transfo.	-	6,2951	6,45606	0,1610	
16	Portail	6,108	5,5251	5,6800	0,1549	-0,5829
16-a	P.N. n° 2	-	7,1834	7,3378	0,1544	
17-bis	Ponceau	-	2,8091	2,9627	0,1536	
18-bis	Maison	-	3,6788	3,8316	0,1528	
Moyenne :					0,155	-0,588
Ecart-Type					0,004	0,009

Annexe D : Tables de corrections incluses dans les registres de marée de Chazallon

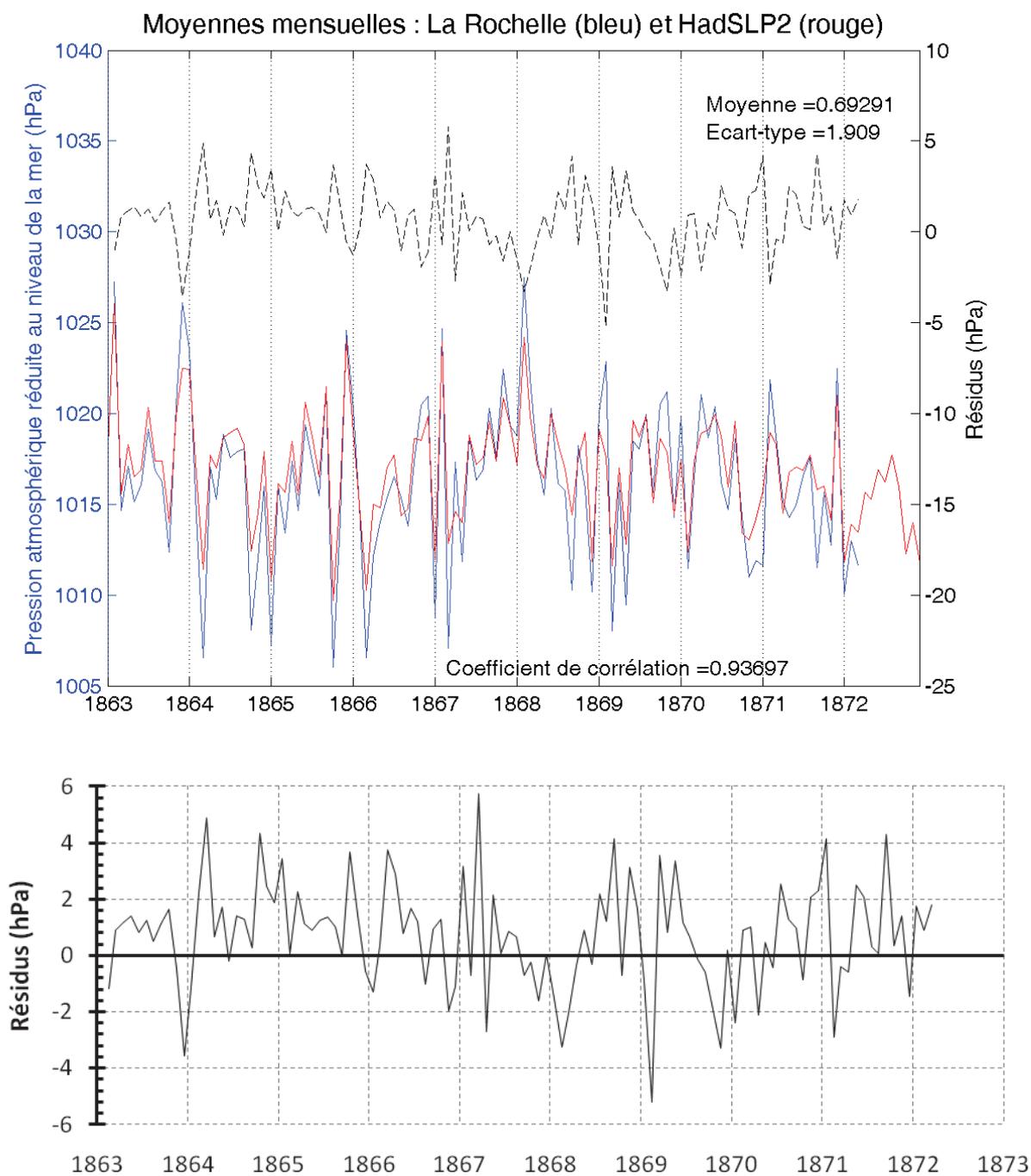
Tables utilisées pour réduire les hauteurs barométriques à la température zéro (table 1, à gauche) et pour corriger les hauteurs de la pleine mer et de la basse mer de la pression barométrique (table 2, à droite).

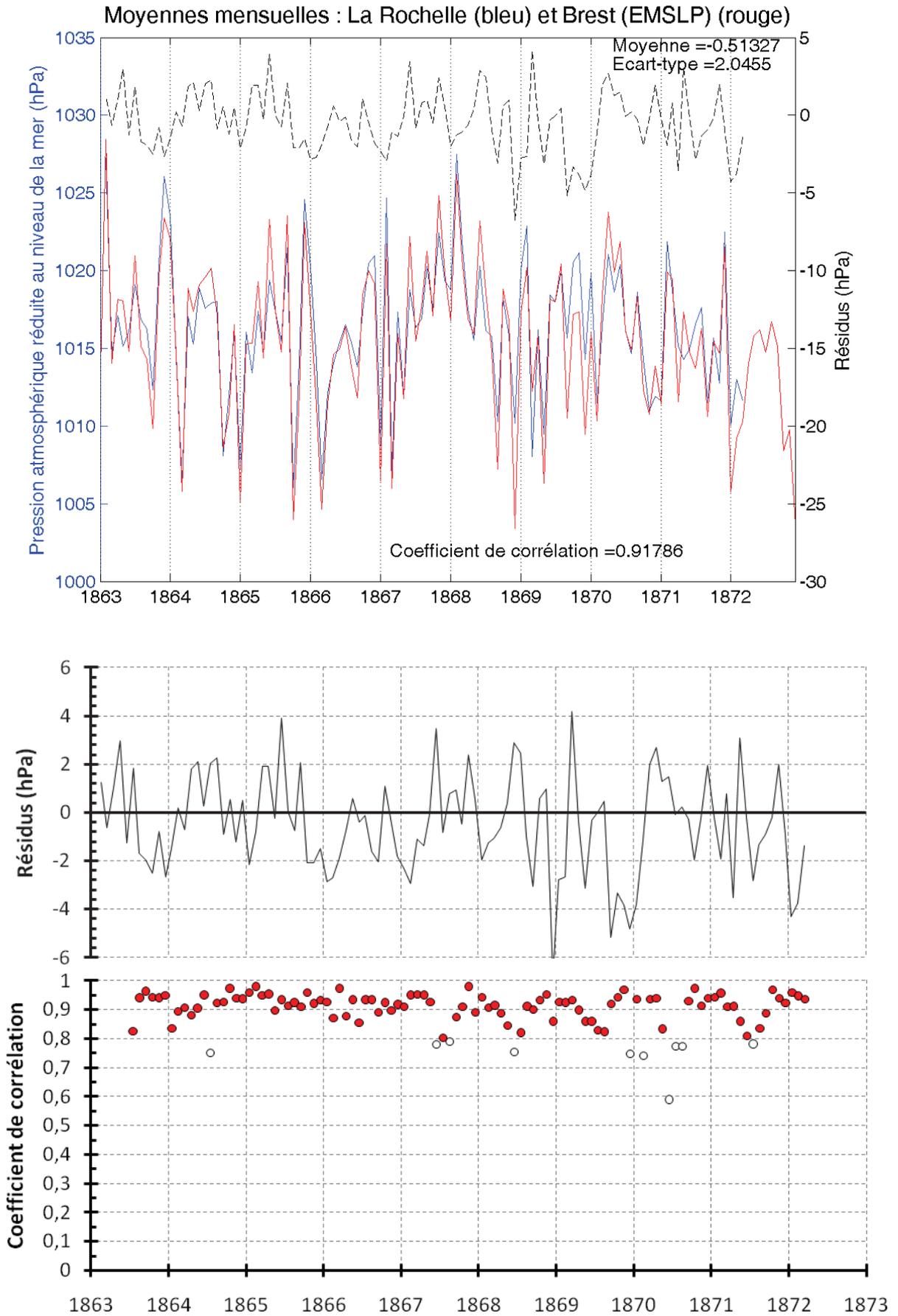
TABLE 1. POUR RÉDUIRE LES HAUTEURS BAROMÉTRIQUES À LA TEMPÉRATURE ZÉRO.								TABLE 2. POUR CORRIGER LES HAUTEURS DE LA PLEINE MER ET DE LA BASSE MER SELON LA PRESSION BAROMÉTRIQUE.				
THERMO- MÈTRE ATTACHÉ	HAUTEUR DU BAROMÈTRE EN MILLIMÈTRES.							HAUTEUR DU BAROMÈTRE réduite à 0 (°).	CORRECTION pour les millimètres du baromètre.	CORRECTION POUR LES DIXIÈMES DE MILLIMÈTRE du baromètre.		OBSERVATIONS.
	720.	730.	740.	750.	760.	770.	780.			Baromètre.	Correction.	
	^{mm} millimètres.	millimètres.	millimètres.	millimètres.	millimètres.	millimètres.	millimètres.	millimètres.	millimètres.	millimètres.	millimètres.	
0°	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	720	0.67	0.1	1	<p><i>NOTA.</i> La correction s'ajoute à la hauteur de la pleine mer et à celle de la basse mer.</p> <p><i>EXEMPLE :</i> Soit 74^{mm} la hauteur du baromètre réduite primitivement à zéro au moyen de la table 1, on aura, à l'aide de la table 2, la correction de la manière suivante :</p> <p>Pour 74^{mm} o. 747^{mm} Pour 0^{mm} 4. 5^{mm} Pour 74^{mm} 4. 752^{mm}</p> <p>Ainsi, dans ce cas, on ajoute 75^{mm} (soit 25^{mm}) à la hauteur de la pleine mer ou de la basse mer.</p> <p>Dans la 7^e colonne du journal intitulée correction de la position, l'on inscrira que les centimètres dont le nombre est augmenté de l'unité si les millimètres négligés excèdent cinq.</p> <p>L'addition pour les dixièmes de millimètre du baromètre peut se faire à vue.</p> <p>On remarquera que l'emploi de la table 2 rend toutes les hauteurs trop fortes de 1 mètre ou 100 centimètres; mais cela n'a aucun inconvénient du moment qu'on est prévenu.</p>
1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	21	680			
2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	22	493	0.2	3	
3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	23	507			
4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	24	520	0.3	4	
5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	25	533			
6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	26	547	0.4	5	
7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	27	560			
8	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	28	573	0.5	7	
9	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	29	587			
10	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.3	30	600	0.6	8	
11	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.4	1.4	31	613			
12	1.4	1.4	1.4	1.5	1.5	1.5	1.5	32	627	0.7	9	
13	1.5	1.5	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	33	640			
14	1.6	1.6	1.7	1.7	1.7	1.7	1.8	34	653	0.8	11	
15	1.7	1.8	1.8	1.8	1.8	1.9	1.9	35	667			
16	1.9	1.9	1.9	1.9	2.0	2.0	2.0	36	680	0.9	12	
17	2.0	2.0	2.0	2.1	2.1	2.1	2.1	37	693			
18	2.1	2.1	2.1	2.2	2.2	2.2	2.3	38	707	1.0	13	
19	2.2	2.2	2.3	2.3	2.3	2.4	2.4	39	720			
20	2.3	2.4	2.4	2.4	2.5	2.5	2.5	40	733			
21	2.4	2.5	2.5	2.5	2.6	2.6	2.6	41	747			
22	2.6	2.6	2.6	2.7	2.7	2.7	2.8	42	760			
23	2.7	2.7	2.7	2.8	2.8	2.9	2.9	43	773			
24	2.8	2.8	2.9	2.9	2.9	3.0	3.0	44	787			
25	2.9	2.9	3.0	3.0	3.1	3.1	3.1	45	800			
26	3.0	3.1	3.1	3.1	3.2	3.2	3.3	46	813			
27	3.1	3.2	3.2	3.3	3.3	3.4	3.4	47	827			
28	3.3	3.3	3.3	3.4	3.4	3.5	3.5	48	840			
29	3.4	3.4	3.5	3.5	3.6	3.6	3.7	49	853			
30	3.5	3.5	3.6	3.6	3.7	3.7	3.8	50	867			
31	3.6	3.7	3.7	3.8	3.8	3.9	3.9	51	880			
32	3.7	3.8	3.8	3.9	3.9	4.0	4.0	52	893			
								53	907			
								54	920			
								55	933			
								56	947			
								57	960			
								58	973			
								59	987			
								60	1,000			
								61	1,013			
								62	1,027			
								63	1,040			
								64	1,053			
								65	1,067			
								66	1,080			
								67	1,093			
								68	1,107			
								69	1,120			
								70	1,133			
								71	1,147			
								72	1,160			
								73	1,173			
								74	1,187			
								75	1,200			
								76	1,213			
								77	1,227			
								78	1,240			
								79	1,253			
								80	1,267			
								81	1,280			
								82	1,293			
								83	1,307			
								84	1,320			
								85	1,333			

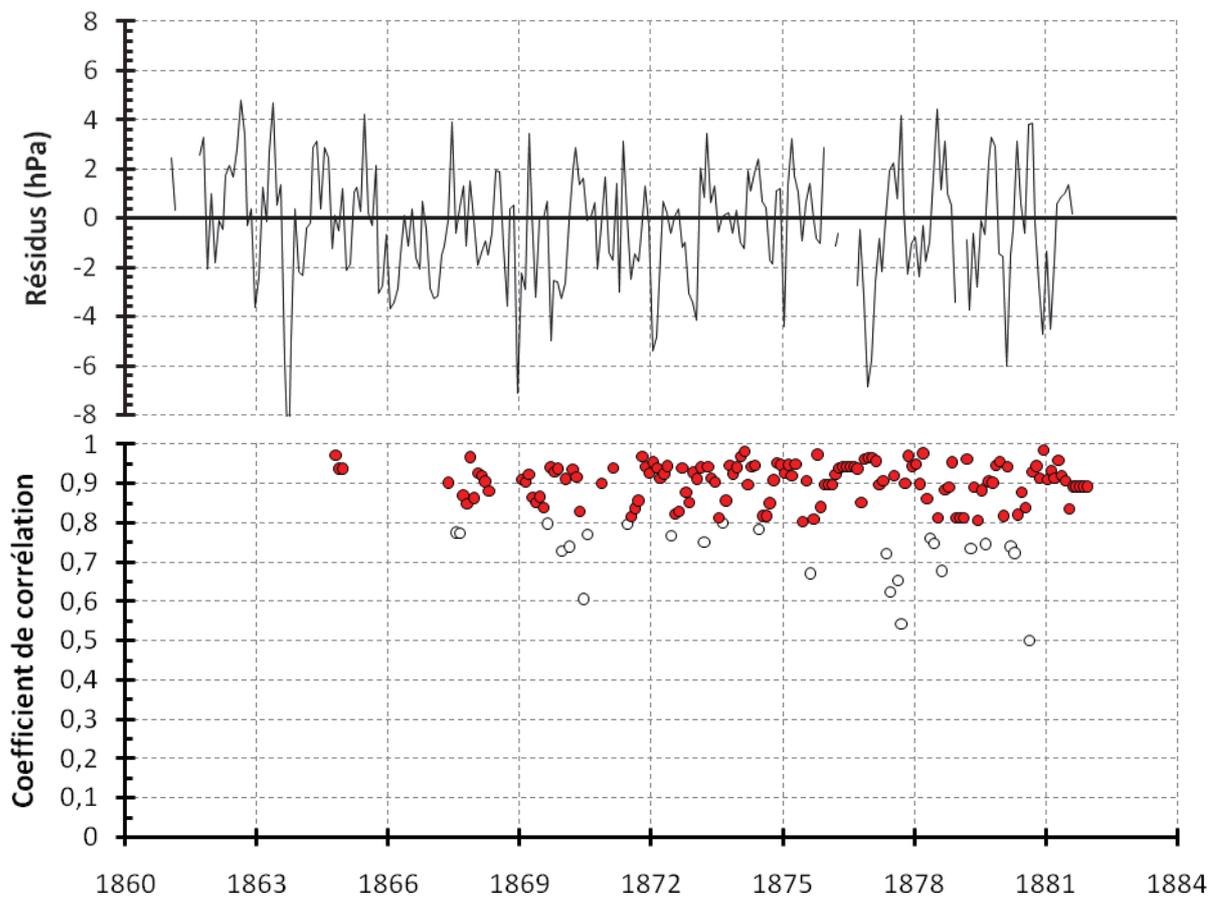
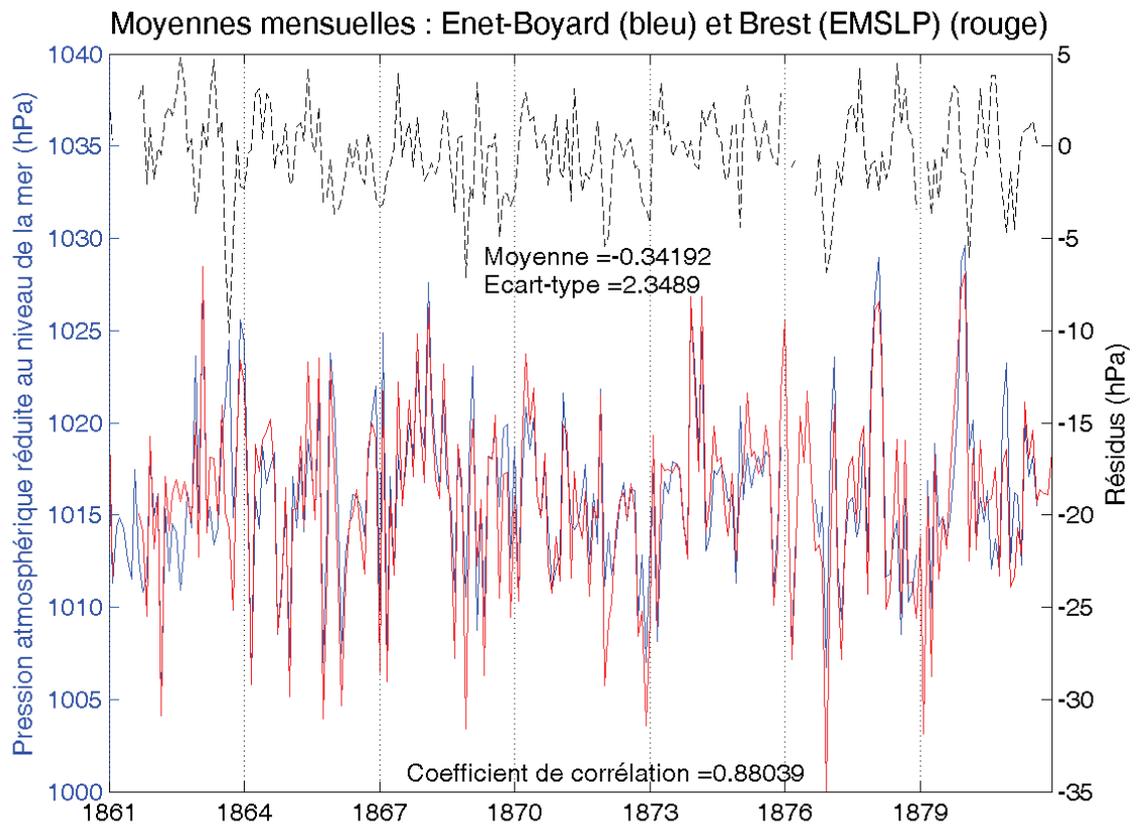
NOTA. La correction est *subtractive* pour toutes les températures au-dessus de zéro. Elle est *additive* pour celles qui sont au-dessous de zéro. Ainsi, pour 5°, par exemple, au-dessous de zéro, et une hauteur barométrique de 76^{mm}, on ajouterait 1^{mm}, et l'on aurait 76^{mm},0 pour la hauteur réduite à zéro.

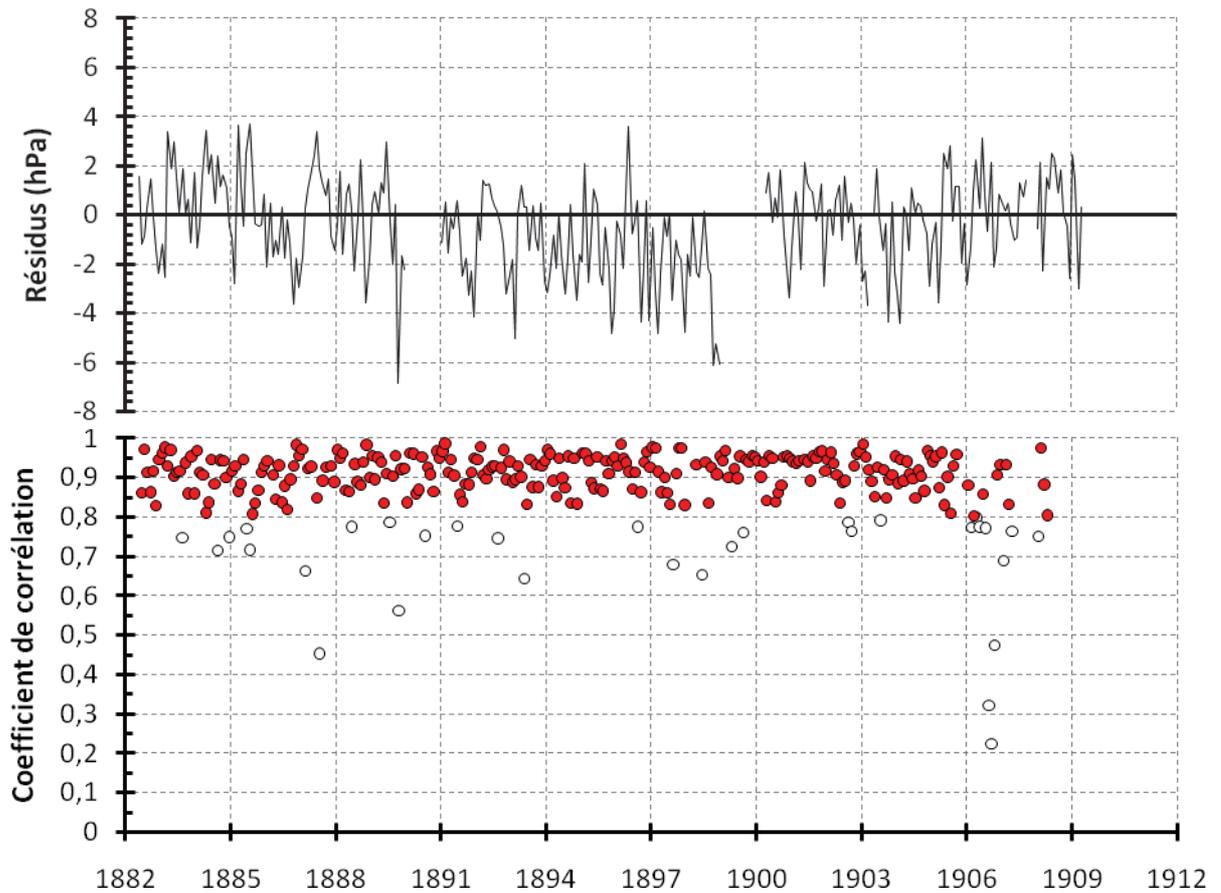
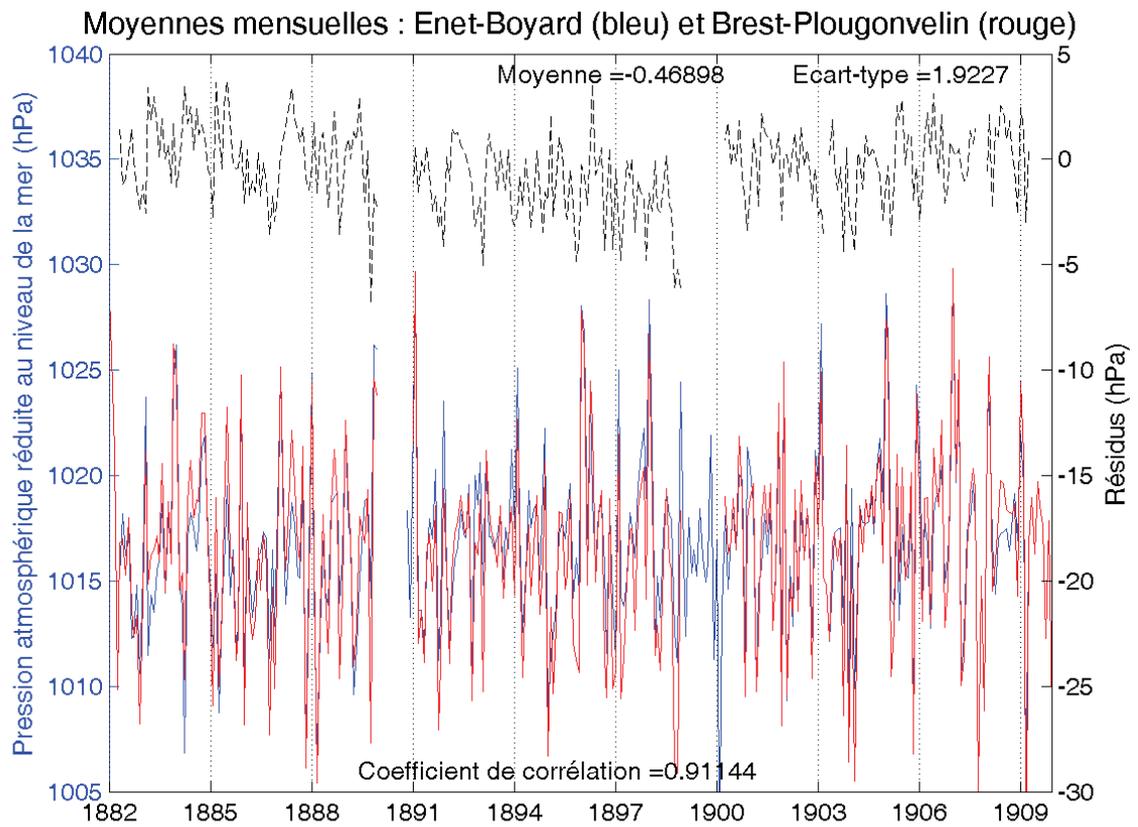
Annexe E : Comparaison des séries de pression atmosphérique

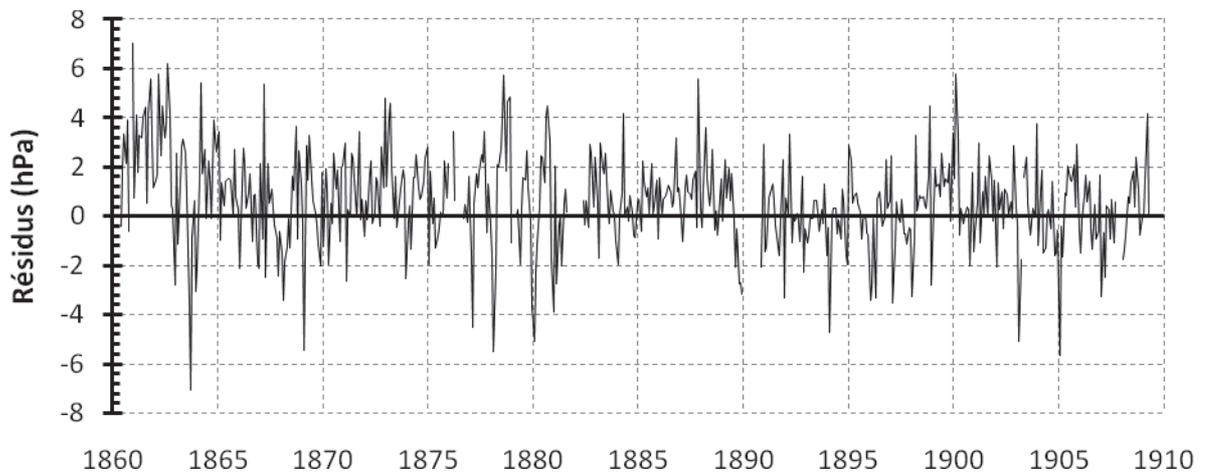
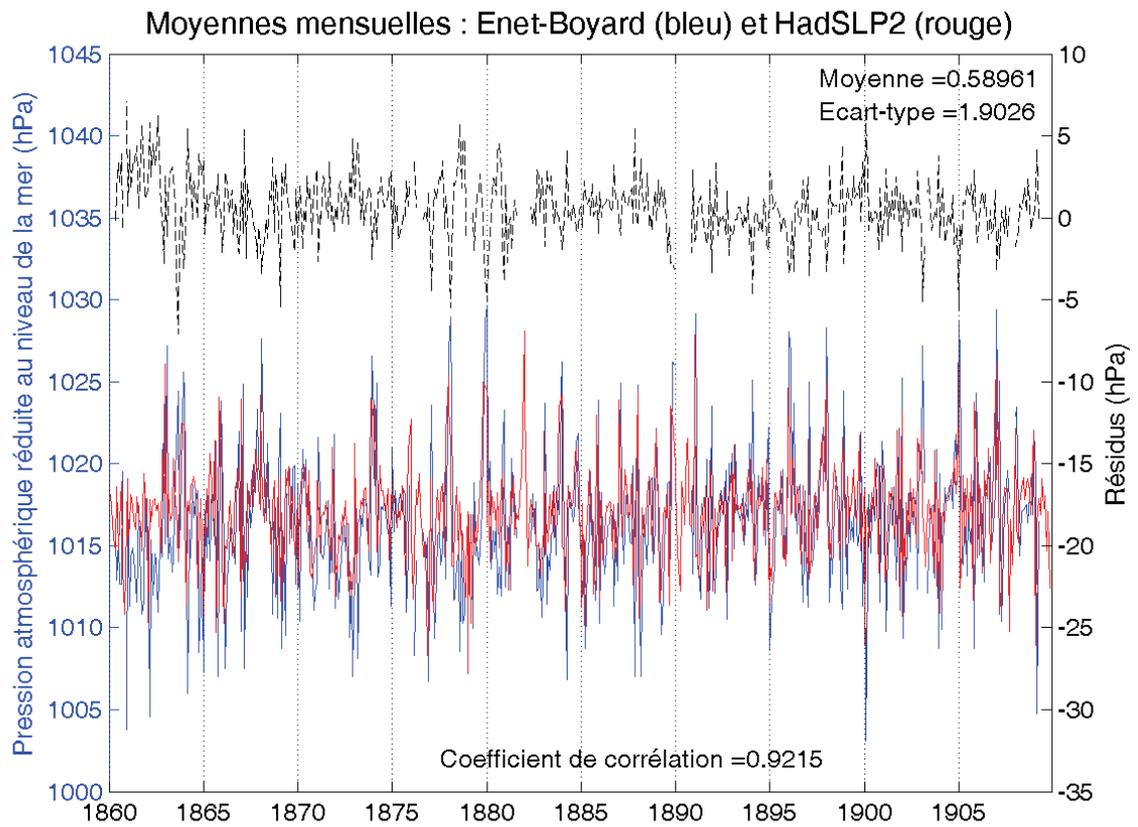
Complément du paragraphe V.3.5. *Contrôle qualité des séries inédites*

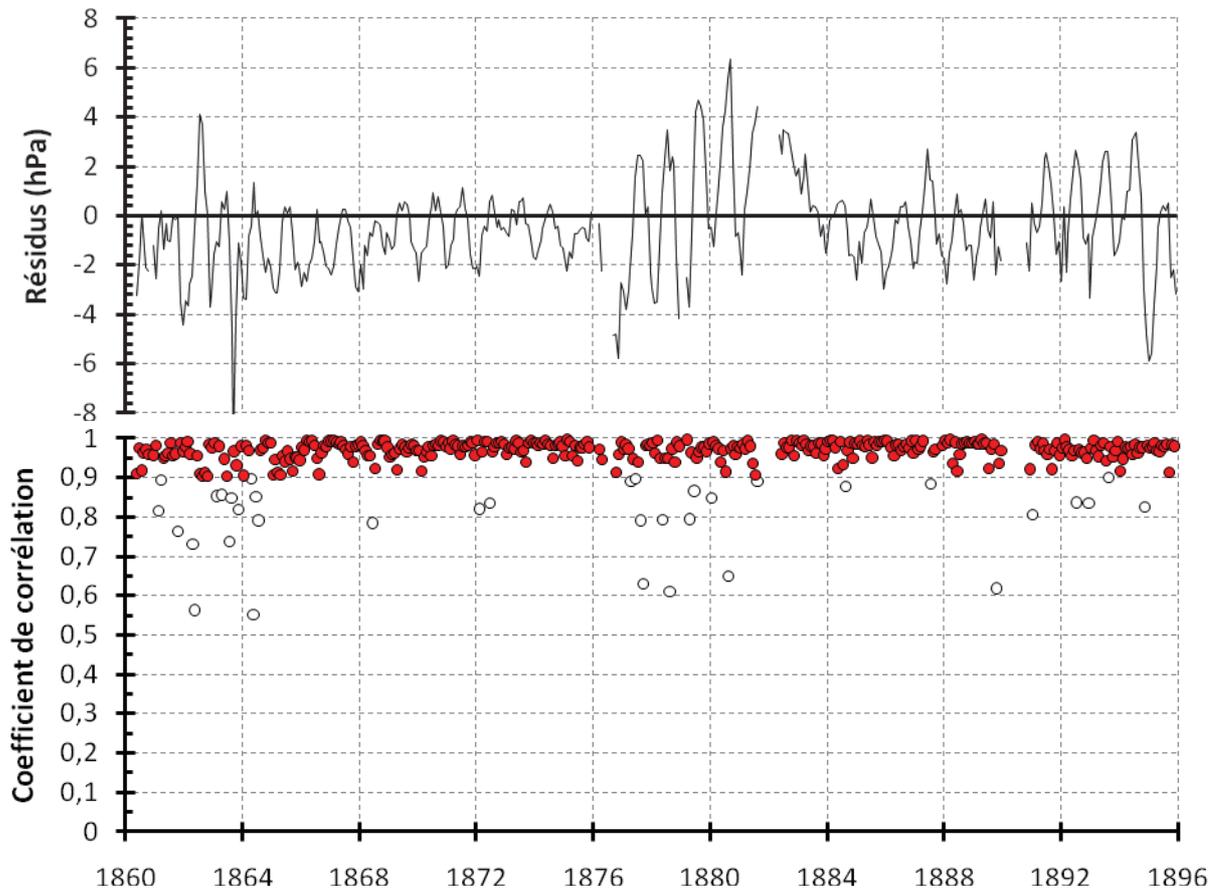
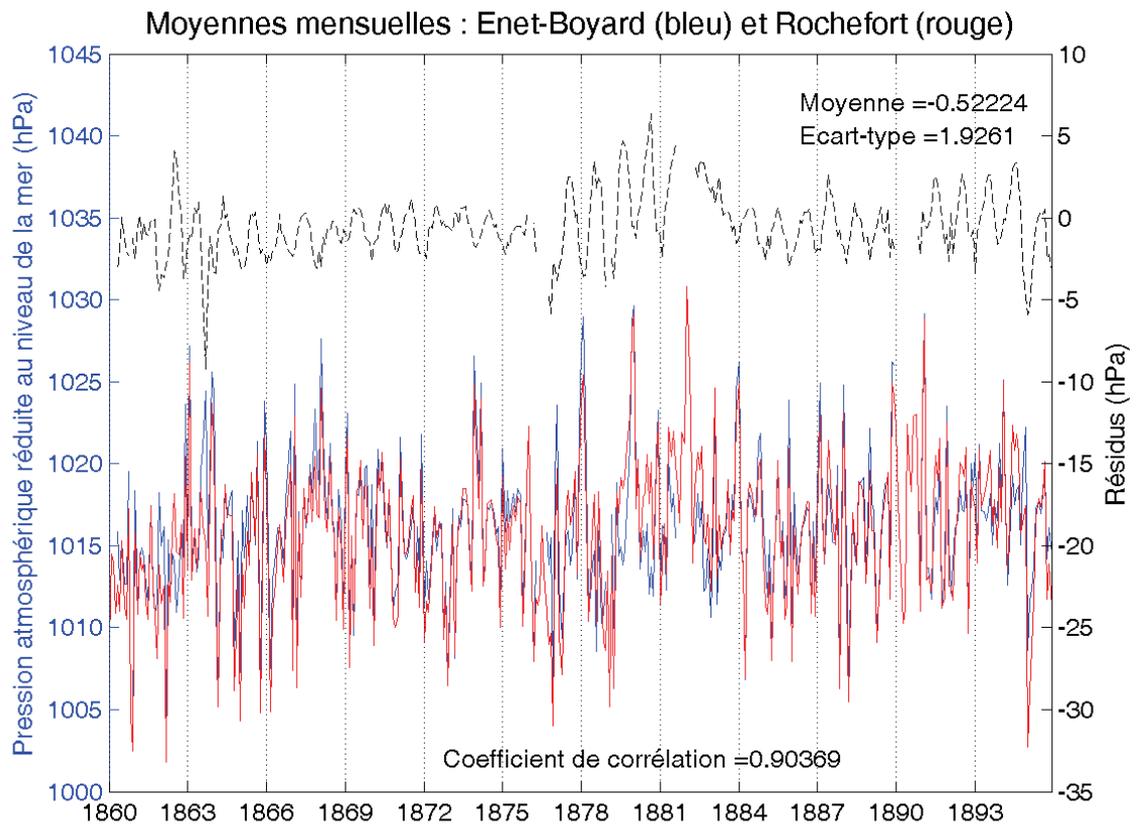












Annexe F : Notes des observateurs dans les registres de marée

Nous avons choisi de retranscrire ici les notes des observateurs le plus fidèlement possible, en respectant la ponctuation utilisée, les fautes d'orthographe commises et le langage de l'époque.

fort Enet

Juillet 1859 :

Le premier, les observations marchant sur le temps vrai, on donna ordre le 4 de changer la feuille et faire marcher les observations en temps moyen. La rouille dont l'instrument était couvert a causé ce retard, et tout un mois m'a à peine suffi pour le mettre en état. Malgré tout si je cesse un seul jour de fourbir, le salpêtre et l'humidité rouille les escieux des poulies, l'horloge s'arrête, le chariau s'arrête, le petit fil décapel. Cet état de chose me met en retard pour coucher sur les cahiers de chaque mois les 6 912 nombres que j'ai à trouver. Le baromètre n'a été mis à Enet que le 11 juillet.

Septembre 1859 :

Le 7 le marégraphe s'est arrêté depuis 4 heures du soir jusqu'au 8 à 6h15 minutes du matin et a continué à s'arrêter de moment en moment jusqu'au 13 où il a été démonté et remonté en doublant le poids de l'horloge. La roue d'embrayage était rouillée et la vis touchait l'engrenage. Toutes les lignes ponctuées sur la feuille marquent que le marégraphe s'est arrêté et la reprise des lignes indiquent que je le forçais à marcher.

Octobre 1859 :

Le 11 à 9 heures du soir, la corde contre-poids du flotteur a cassé, les fils se sont brisés et en descendant dans le puits pour crocher le flotteur, deux pointes me traversèrent la main gauche et prolongea les réparations jusqu'au 12 à 11 heures du matin. Le 14 à 10 heures du matin, Monsieur Delbalat, ingénieur en chef de la mission hydrographique des observations de la Charente, a fait démonté l'horloge du marégraphe pour la faire réparer à Rochefort. Le 22, on a monté l'horloge du marégraphe à 6 heures du soir et mis le crayon à 6 heures 20 minutes temps moyen. Le 23, le marégraphe avançait de 15 minutes. Le 24 de 5 minutes, le 25 de 3 minutes. Le 26 cette avancée était réduite au moyen de la vis régulatrice. Il va bien.

Le 25, à 2 heures de l'après-midi, la tempête de vent de sud lachait tout ce qu'elle avait de violence, la mer brisait avec fureur et couvrait le fort de ses nappes d'eau et déjà tout flottait dans la cour et la poudrière, le pont soulevé par l'eau, les chaînes se décrochèrent la mer montait toujours, le marégraphe et sa tourelle tremblèrent, les coups de mer menacèrent de défoncer les contrevents et inondèrent la feuille. Je plafonnais les contrevents pour les soutenir et mis les rideaux en taux pour préserver la feuille, les fils du flotteur et du chariau cassèrent, je réparais tout et me teint en veille pour faire face aux accidents. Je ne tardais pas à voir une gabarre qui allait disparaître sous l'eau et se briser sur les roches, me faisant signe d'aller à leurs secours, n'ayant pas de canot et qu'une main pour y aller à la nage, je fis signe de contourner le rocher et de mouiller à l'abri d'Enet, elle y coula, mais homme et navire purent être sauvés. Le 29, je dus secourir un canot équipé par 3 prussiens et mettre mes efforts et mon pain à la disposition de ses malheureux. Le 31 et 1^{er} septembre, je restais sans pain.

Décembre 1859 :

Le 17, le petit fil a cassé par une forte houle et dans sa rupture le crayon a déchiré la feuille. Je fus obligé de la changer et le 17 au matin à 9h19m le crayon traçait sa courbe sur la nouvelle feuille. Cet accident a été réparé en 33 minutes et n'en a pas fait perdre une pour les observations. J'ai porté la courbe déjà tracée sur la feuille avariée, sur la dernière feuille de décembre. Cette courbe est tracée en bleu et son point de rencontre avec la rouge indique qu'elle est juste. Cette dernière feuille demande à être ménagée, elle a été lavée par les coups de mers du 14 au 30, ce qui m'a conduit chaque matin à monter ma femme sur un banc pour la sécher avec des fers à repasser et retiré les plis que l'eau lui faisait prendre. Ce qui me ferait désirer pour mes feuilles aussi bien que pour mes instruments, un contrevent en dehors des fenêtres et une toile en dedans.

Janvier 1860 :

Le 24, les deux petits verrous des fenêtres ont cédé au vent et aux coups de mers, je les ai remplacés par des taquets en bois. La mer terrible rentre par les fenêtres. Je ne pus tenir la feuille sèche que de bas d'eau.

Février 1860 :

L'échelle de marée est givrée, malgré la mer qui se brise dessus.

Mars 1860 :

Le 10, calme plat pas un souffle dans l'air, la mer ne faisant pas une ride, j'en ai profité pour changer la courbe des hauteurs de l'échelle, toutes m'ont donnés une différence exacte de 0,32m. La brise reprend, et pour peu que la mer frise ou moutonne, je ne peu plus avoir qu'une moyenne de 0,44m à 0,46m.

Avril 1860 :

Le 1^{er} à 3 heures le petit fil a cassé et recassé 6 fois de suite, ce fil miné par le salpêtre est devenu inserviable. Le fil cassé avait 2m87c de longueur, celui qui l'a remplacé à 2m87c juste, distance fixée par deux clous, où ils ont été mesuré tout deux.

Mai 1860 :

Les courbes sont tracées sur l'heure temps moyen. L'ordre de mettre les observations en temps vrai n'a permis de l'exécuter qu'en changeant la feuille le premier juin, à 9 heures du matin. Les hauteurs de l'échelle de marée sont corrigées de leurs amplitudes, c'est-à-dire $638+646/2=642$.

Le 21 mai, commence les observations à l'échelle, de $\frac{1}{4}$ d'heure et $\frac{1}{4}$ d'heure, la mer frise et moutonne, les deux courants des deux extrémités de l'Ile d'Aix se rencontrent forment clapotis, ne laisse autre moyen que de prendre une moyenne entre 8 et 12 centimètres d'amplitude, qui ne peut être susceptible à erreur, avec les vents modérés de NO, il est possible à l'œil de s'arrêter une seconde sur un point de l'échelle, mais avec la moindre brise du nord à l'est impossible.

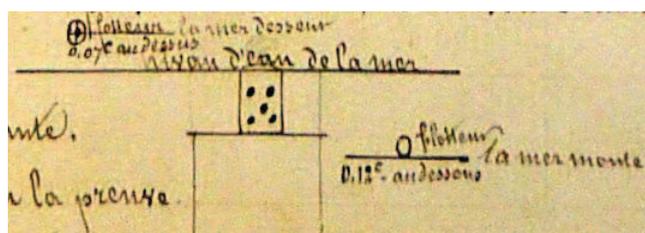
Juin 1860 :

Les hauteurs de marée de quart d'heure en quart d'heure présent sur la partie de courbe ponctuée du 20 juin, de minuit 5 minutes à 6 heures du matin n'est que le résultat de mon estime pour suppléer à la partie de courbe vide que le fil cassant pendant la nuit a laissé. Je la mets en observations à la clairvoyance de mes chefs.

Le 23 à 9 heures du soir il a paru dans l'Est d'Enet une comète, à peu près à 25 (m ?) au dessus de l'horizon d'un mètre 50 de longueur et très pale se dirigeant à l'Ouest où elle s'est perdu à 11 heures $\frac{1}{2}$ dans un petit nuage noir, le ciel était étoilé et beau. Cette comète a reparue le 24 et le 25 de la même manière seulement le 25 la queue était un peu plus longue et à parue jusqu'à 2 heures du matin.

Juillet 1860 :

Le 3 observé la hauteur de l'eau à l'échelle de marée, de 5 heures du matin à 3 heures du soir. En portant les hauteurs en courbe sur la feuille du marégraphe, je suis naturellement porté à justifier mes observations et je trouve pendant 4 heures consécutives une différence exacte de 59 à 60 centimètres puis pendant 3 heures au plus fort de la marée vers le bas d'eau et son voisinage, une différence de 65 à 67 centimètres, tant que la mer perd et 0,43 à 0,50 pendant qu'elle monte, dans l'espace de 2h30. Cette erreur ne peut devenir de l'échelle puisque je met le même soins à l'observer et suivre la ligne ponctuée que je trace. Elle peut donc devenir que de la courbe du marégraphe qui doit suivre la ligne ponctuée et non la pleine. Si je cherche la vérité, je la trouve à la porte du conduit d'eau au puits du marégraphe, les trous de cette porte devant donner une quantité d'eau suffisante pour approvisionner le puits, ayant été bouché, les côtés reserrés ne peuvent laisser aller ni recevoir l'eau assez vite, et que le flotteur se trouve au dessus et au dessous du niveau de la mer. Comme il suit l'eau ne rentre et ne sort que par le haut de la porte, en quantité insuffisante. Et si les trois jours 19, 20 et 21 passé à observé l'échelle ne m'en avait fourni la preuve je la trouverai encore lorsque la porte couvre, l'eau bouillonne et fait l'entonnoir pendant deux heures que la mer soit agitée ou non. Le ruisseau n'a point asséché mais il y a 2 pieds d'épaisseur de vase dedans. Il aurait besoin d'être netoyé la maline prochaine et débouché quelque trous de la porte. C'est en espérant que vous daignerez me fournir le moyen de faire disparaître cette erreur trop sensible de dessus mes feuilles et journeaux que j'ai bien, l'honneur d'être, Monsieur le Directeur, votre très humble serviteur.



Comme j'ai eu l'honneur d'en prévenir le 3 juillet et de porter à la remarque précédemment, la porte du conduit d'eau se bouche. De plus en plus et l'erreur devient considérable et à un tel point que toutes les courbes de flot des 3

et 4 premiers jours Prendraient une fausse direction. Et j'en trouve la preuve en comparant la courbe du 19 au marégraphe à celle de l'échelle de marée. Je vois facilement que même au pleine mer le flotteur se trouve à 0,33 ou 0,34m au dessous du niveau de la mer. Les courbes de jusant ne ce sont pas encore détournées de leurs directions que très peu en arrivant au bas d'eau, cela est très concevable, la mer descendant sept heures et dans sa plus grande vitesse n'amointri la hauteur de l'eau que de 32 à 35 centimètres par ¼ d'heure, au lieu que le flot n'a que 5 heures à 5heures ½ de durées dont trois seulement montant la mer de 45 à 50 centimètres par 1/4 d'heure, la conduite presque à son plein. Et la porte du conduit d'eau n'est pas en état de recevoir assez vite, une pareille quantité d'eau dans si peu de temps pour en approvisionner le puits. Le marégraphe est dans un bon état et va bien, mais il manque d'eau, ce qui arrivera souvent si quelques trous de la porte se sont débouchés. Le premier août les ouvriers sont arrivés à Enet pour nettoyer le conduit d'eau mais le vent d'Ouest soufflant bon frais s'opposa à la descente de la mer et la rendant grosse, les obligea de partir sans y avoir pu travailler.

Août 1860 :

Le 2 août observé à l'échelle de marée, de 5 heures du matin à 4 heures soir et ces longues heures de veille et le désir bien arrêté de faire un bon service me donne un chagrin mortel de voir que toutes les courbes de flot de grandes marée ne sont qu'erreur. D'après ce qui précède j'ai l'espérance que mes chefs trouveront qu'il n'a pas dépendu de moi de les faire disparaître.

Depuis le 18 août quoique satisfait de la tournure des courbes du marégraphe, n'ayant pu les justifier par des hauteurs d'échelle de marée dont les divisions sont complètement effacées, j'ai profité du premier septembre d'un canot pour passer toute cette journée à observer l'échelle et ces observations me donne un accord parfait entre les deux instruments. J'ose solliciter de nouveau de faire repeindre l'échelle sans cela ce service me devient impossible.

Le 18 août les ouvriers envoyé par la Direction du génie hydraulique sont arrivés au matin et ont pu travailler de suite à déboucher le conduit d'eau. Après 1 heure de travail on put ouvrir la porte qui débonda un torrent d'eau, et fit faire une courbe au crayon, qu'on verra près du bas d'eau le 18 au matin. La régularité des courbes depuis ce jour me font espérer pour cette dernière quinzaine, des résultats parfaitement exact, à part les courbes du 16 et 17 déjà tracées. Cette marée n'a pas suffi pour nettoyer complètement le ruisseau, et il serait bon qu'on acheva la prochaine grande marée.

Septembre 1860 :

Le 14 présument que le défaut de nettoyage du conduit d'eau le laisserait à sec ainsi que l'échelle marégraphique pendant les trois jours 15, 16 et 17, je disposais des pieux dans le conduit d'eau à distance, de manière à placer une échelle auxiliaire sur l'un ou l'autre pieux à mesure que l'eau descendrait, en prenant continuellement le niveau de la grande échelle du marégraphe. Par ce moyen et l'aide de deux marins distingués qui me furent envoyé, nous pûmes suivre l'eau et obtenir des résultats satisfaisant. Du reste, il n'y a que les courbes du 16 et 17 du marégraphe qui ont manqué de 7 centimètres d'eau qui m'a été facile de corriger avec les hauteurs d'échelle, que j'ai portées toutes en courbes sur la feuille du marégraphe. Cette marée du 15 septembre n'a pas été extraordinaire, le conduit d'eau n'eut pas asséché s'il eut été nettoyé convenablement. La maline du 22 mars, la mer a descendu 60 centimètres plus basse.

Octobre 1860 :

Le conduit d'eau est à moitié bouché, l'échelle du marégraphe n'a plus de marques. Je peu encore remedié au courbes de basse mers de grande marées par le moyen d'un mètre, et je ne peu plus rien sur l'erreur des courbes de flot sans échelle.

Décembre 1860 :

Le 26 à midi le petit fil a cassé. Le 27 à minuit 6 minutes, il a cassé une seconde fois. Le 30 le marégraphe s'est arrêté et a cassé le fil pour la troisième fois. Il ne sera pas étonnant si la rupture de se fil arrive souvent, on connaît son état je l'ai présenté à monsieur le directeur des observations l'an dernier. Je ne me suis pas aperçu du changement dans les observations causée par la rupture des fils. La situation du service le 10 janvier 1861 est le conduit d'eau encombré à une hauteur d'un mètre quatre vingts. Le plomb soulevé de la toiture de tout le côté sud, la boucle de suspente du baromètre arrachée et sauvé d'une rupture certaine par des balanciers de précaution.

Du 11 au 12, de 11 heures du soir à 3 heures du matin, il a fait une tempête si violente et la mer si grosse que la toiture de la tourelle du marégraphe a eu beaucoup à souffrir, les coups déployaient ... avec tant de force que la charpente laissa jour entre elle et le rempart du fort et que le plomb qui la recourait souleva de tout le côté sud, dès lors l'intérieur du marégraphe fut inondé. A 2 heures après minuit la mer avait perdu lorsque le vent lachant toute sa force l'obligea à remonter et encore plus terrible l'eau et le flotteur. Sous le, les fils se brisèrent. Inutile de dire dans quel état se trouva l'instrument, on le reconnaitre à la rouille qui reste sur la feuille malgré la peine qu'elle a donné. Aussitôt que l'eau se fut retiré de dessus le plafond, je me mis à réparer les avaries qu'elle m'avait laissé, et malgré que je passais les journées du 12 et 13 après le marégraphe pour ne pas qu'il s'arrête, le 14 le chariot se cola

au conduit par la rouille, le 15 cela se répéta plus souvent, enfin le 16 à 5 heures 20 minutes du matin, il s'arrêta encore, j'ai suspendu les observations pour donner un grand nettoyage et remettre tout en état. A midi 11 minutes, je remettais le crayon sur une nouvelle feuille.

Malgré les soins précédant porté au marégraphe, il a tellement souffert dans la tempête du 11 au 12, que je n'ai pu éviter qu'il s'arrête et qu'il brise les petits fils à trois fois depuis le 12. Tout le rouage a été saisi par la rouille et lors qu'une roue s'arrête le fil casse. J'ai introduit de l'huile avec une plume en faisant travailler les roues et je compte que bientôt il reprendra sa marche habituelle. Je ne crains que pour le ressort d'embrayage auquel je ne puis rien faire que couler un peu d'huile et il me faut mettre tous mes efforts pour embrayer et débrayer et je crains dans ces efforts de le cassé.

Janvier 1861 :

Le 26 les ouvriers du génie hydraulique sont arrivés à Enet pour nettoyer le conduit d'eau, et malgré que cette marée fut petite, et qu'elle à peu perdu, le nettoyage c'est fait avec succès. Aussi s'aperçoit-on dès le 27 à la tournure de la courbe qu'à l'avenir celles qui se traceront sur la feuille donneront de bons résultats. La courbe de l'échelle du 27, prise en dehors du conduit d'eau rapport aux traveaux, peut en fournir la preuve. J'ai fini par obligé le marégraphe de reprendre la marche habituelle, il va bien. Et le ressort d'embrayage a fini par cédé à mon pouce d'invalidé.

Février 1861 :

Le 26 et 27 février, le conduit d'eau est resté à sec. La toiture du marégraphe n'a pas encore été réparée depuis la tempête du 11 décembre, les instruments ne sont pas à l'abri de la pluie.

Mars 1861 :

La grande échelle du marégraphe ne tient plus que sur ces haubans que j'ai fortement ridés, elle a laissés les murs qui lui servaient d'appui de 0,25 centimètres, un seul clou tient à l'extrémité de sa base. Si elle tombe de morte marée, elle est perdue.

28 et 29 mars : les observations du 28 et 29 ont été prisent de mauvais temps avec le seul moyen de se mettre à l'eau. Le 29, à ma dernière hauteur, voulant la comparer au niveau de la grande échelle du marégraphe, le court espace de temps qu'il a fallu pour m'y rendre, la petite échelle me fut enlevée par la mer, avec le pieux sur lequel elle était amarée. J'ai trouvé dans ce bain un peu trop précosse mais volontaire par amour du service, une récompense dans des observations satisfaisante qui me permettent de corriger toutes les fausses courbes de basse mer, il me reste le regret de la perte de la petite échelle. Je l'ai signalée au Syndic et à la douane de fouras.

Le 26, 27, 28 et 29, le conduit d'eau a resté complètement à sec et a laissé voir le mauvais état où il se trouve. Les murs en partie écroulé et le ruisseau plein d'une grande quantité de sard, sable et roche. On ne s'en étonnera pas si l'on remarque les nombreuses raffalles de vent qui ont passées en février et mars. Le 26, reconnaissant cet état de chose, et voulant éviter de fausse courbe, en suivant les observations d'échelle, je me mis dans le ruisseau, à retiré 16 brouettés de sard, ne pouvant en même temps l'éloigné des murs la même marée rejette tout dans le ruisseau, j'ai travaillé 3 fois avec le même résultat, que je renonce à ce travail infructueux.

Avril 1861 :

Le 8 avril le compteur Jacob 227 réglé sur le temps moyen par l'observatoire à + 0h01m25s Il devait avancé sur le temps vrai, plus l'équation du temps (+0h01m50s), ou +3m15s Il avançait sur le marégraphe de 4m23s. Le marégraphe retardait sur le temps vrai -1m8s Sans déranger l'heure du marégraphe, j'ai donné un tour de vis du balancier à l'avance pour que cette minute ce rattrape dans les 24h sans influencer le moins possible sur la courbe et être considérée comme néant. Le 9 ayant une avancée de 7 secondes, je retirais la fourchette du balancier de cette même espace de temps, après lequel fourchette et vis reprirent leur primitive position.

On a encore rien fait à l'échelle marégraphique, ni à la toiture du marégraphe. Je porte tout cela sur mon Journal, convaincu qu'il est de mon devoir de prévenir me chefs de tout, et de m'abrité des accidents s'il venait à en survenir malgré mon incessante surveillance. C'est dans cet état que j'ai reçu l'inspection de monsieur l'inspecteur général le 7 mai 1861.

Le 24, 25, 26 et 27 les ouvriers du génie hydraulique sont venu à Enet et ont assez bien nettoyé la partie extérieure du conduit d'eau et relever ces murs écroulés. Mais le 27, au moment du bas d'eau, m'apercevant que le crayon traçait une ligne droite au lieu d'une courbe, je du m'adresser au surveillant des travaux pour lui dire qu'on avait oublier la partie souterraine la plus essentielle et que le trous du puits était bouché. Oui me répondit-il la vase est à moitié corps d'homme, et le puits lui-même envasé, que ce travail ne pouvait se faire qu'en démontant le marégraphe. Sur cela, je lui ai dit je vais en informer mes chefs, faites en autant et nous aurons fait notre Service (je sonderais le puits la prochaine marée, je rendrais compte de cet état).

Mai 1861 :

J'ai cherché avec la sonde la porte du puits jusqu'à épuisé patience, l'ayant trouvé, je l'ai frappée à plusieurs reprises de telle sorte que la vase a du se décollé des petits trous et de la porte. La courbe a pris aussitôt une bonne direction. Lorsqu'il me fallu remonter l'épaisse couche de vase qui me couvrait me laisse dans l'impuissance, ma femme appela à mon aide. Si le puits n'est pas nettoyé et que le fil du flotteur casse, je ne puis le réparé qu'à mer haute. L'échelle de marée tombée nettoyée et rentrée au fort pour y recevoir les réparations nécessaires ne m'a pas interrompu ces observations avant sa chute. J'avais marqué sa hauteur à trois mètres dans l'arrête du mur qui lui servait d'appui. J'ai continué mes observations comme si elle eut été à place. C'est de la manière dont j'ai du accomplir mon service depuis plus d'un an.

Le puits et le conduit souterrain reste dans l'état signalé le 27 avril, on dis qu'il faut batard d'eau, pompe refoulante et démonté le marégraphe. Ces connaissances échappe à mon intelligence, et au lieu de courir après, j'ai préféré m'assuré en allant voir l'état des choses et remonter le puits avec un peu d'aide et dire la vérité ; qu'avec la volonté de faire, et les outils d'habitude, on peut laissé néant les grands appaux et fonctionné le marégraphe. C'est le compte exact que j'ai à rendre de l'état de mon service.

L'état de la grande échelle de marée, signalée depuis le 26 mars comme susceptible de tomber à chaque instant, a enfin achevé sa chute, le 11 mai à 7 heures du matin. Heureusement à moitié marée et qu'il y avait des ouvriers au fort qui m'ont aidé à la retiré, avant qu'elle ne se brise sur les roches, par la grosse mer et grand frais de SSO. Déjà privé de bonne courbes par l'envasement du puits et son conduit souterrain, j'allais resté néant et les observations interrompus. J'ai descendu dans le puits pour sonder l'eau qui y restait, je n'ai trouvé que 65 centimètres d'eau sur la vase et la marée était très petite, il ne reste donc que fort peu d'eau pour le flotteur.

Le 24 mai, il est arrivé à Enet 4 ouvriers et leur surveillant, ils ont replanté l'échelle de marée sans la plus légère réparation, sans peinture ni graduation, la partie supérieure qui ne couvre que de grande marée, en a seulement conservé quelques traces, les règles que j'ai cloué dessus pour pouvoir lire la hauteur de l'eau sont bientôt sans graduation après huit mois de service. De sorte que sous peu je me trouverais aussi avancé que s'il n'en existait pas du tout. On a recloué la toiture du marégraphe et cimanté les ouverturs qui donnaient accès à la pluie. Les instruments sont enfin abrité, il ne valais assurément pas la peine, pour une demis heure de travail, quelques pointes et un peu de ciment, les laisser se dégradé depuis le 10 décembre 1860. On a passé une légère couche de gris sur la cloison, c'est tout.

Juin 1861 :

Le conduit d'eau ayant asséché quatre fois avant son envasement, m'ayant fourni le moyen irréfutable d'avoir le point zéro du marégraphe, je l'ai saisi pour en donner connaissance à la direction. Il est de 1 mètre 21 centimètres ou 121 centimètres. Preuve, chaque fois que la mer a laissé le conduit elle laissait aussi le niveau du puits par la même raison, le crayon cessait sa courbe pour faire une ligne droite, mesurant à chaque fois la hauteur de la fin des courbes, elles donne 122, 120, 121 et 123, soit 121 la moyenne, elle sera le point zéro. La preuve se reproduira sur les courbes des basses mers, qui n'ont jamais été au dessous de 121, quelles ne soient ponctuée, c'est à dure produite par les observations d'échelle.

Juillet 1861 :

Les courbes de basses mers d'une partie du flot ne valent plus rien, le conduit d'eau est bouché de toute part. Les courbes de jour, sont corrigées par les courbes de l'échelle de marée, et suivant les courbes ponctuées. Les courbes de nuit sont corrigées à vue d'œil d'après celles de jour.

Août 1861 :

Le 9 août à 10 heures du matin, Monsieur Charvin, conducteur des travaux hydrauliques est arrivé à Enet pour reconnaître la situation du conduit d'eau ; lorsque la vase et le sable qui l'encombre à resté à sec, je lui ai fait lire à l'échelle une épaisseur de vase de 160 centimètres et la porte bouchée à une hauteur de 120 centimètres. Aussitôt le bas d'eau j'ai descendu dans le puits pour le sondé, cette sonde rapporte un tout de 150 centimètres, dont 10 centimètres d'eau et 140 de vase. Le puits n'ayant que 80 centimètres de profondeur au dessous de la porte qui l'approvisionne, cette porte serait elle-même de 60 centimètres au dessous de la vase. Le flotteur restait touché. Ces reconnaissances prisent, Monsieur Charvin me fit signé son apparition à Enet et reparti à midi.

Le 20 août il est arrivé à Enet six ouvriers du génie hydraulique qui ont travaillé au nettoyage du conduit d'eau, la porte est en partie dévasée, les courbes ont repris une meilleure tournure, ils sont partis le 22 laissant les outils à Enet, pour être prêt au grand netoyage à la marée du 4 septembre.

Septembre 1861 :

Le 7 pour lavé l'intérieur du puits, je fus obligé de démonter les fils et hallé le flotteur en haut. A 7 heures 9 minutes du matin, avec un mètre, j'ai pris la hauteur de l'eau sur la pièce de bois sans peinture et sans nulle marque qui

fonctionne comme grande échelle du marégraphe. J'ai pu compléter entièrement la courbe du 7. A midi 20 minutes, le lavage étant fini, je remontais le marégraphe et à midi 37 minutes, il reprenait ses fonctions.

Le 18, la roue et le crayon, depuis si longtemps endormis, ont repris leur travail et tout va bien, au marégraphe. Je ne désirerais plus que les échelles fussent dans le même état, pour travailler d'un bon cœur à faire un bon service.

Le 21, en remontant le marégraphe avec les mêmes cordes et les mêmes fils, m'apercevant que le contre-poids du flotteur était plus bas que d'habitude, le 22 vers le bas d'eau, je pris avec un mètre la hauteur de l'eau et je reconnus qu'il y avait une différence de 12 centimètres, c'est-à-dire que la différence du marégraphe avec l'échelle était encore le 18, de 0,62 centimètres et que le 21 elle était de 0,72 à 0,74 centimètres. Le puits dégagé 140 centimètres de vase, l'eau doit être plus haute.

Le 4 septembre, les ouvriers du génie hydraulique sont arrivés à Enet pour finir le nettoyage du conduit d'eau. Ils ont mis le conduit d'eau en bon état, lavé l'intérieur, mais n'ont pu retirer les 140 centimètres de vase qui reposait au fond du puits. Le contre maître me déclara qu'il ne pouvait rien y faire sans pompe qu'on avait refusé d'en donner une.

Le 18 septembre, les ouvriers revinrent avec une pompe, pour terminer le nettoyage du puits, ce même jour, à 7 heures 17 minutes du soir, je démontais les fils, hallais le flotteur et à défaut d'un mauvais morceau de fourrure pour envelopper le marégraphe dans ces circonstances, je l'ai couvert de nappe et de sacs. Cette précaution n'échappa pas la feuille de nombreuses taches de vase. A minuit le même jour la pompe installée dans le puits commençait à jouer. Cela continue jusqu'au 21, où le puits étant dégagé et propre, on retira la pompe. Je remontais le marégraphe et le 21 à 8 heures 53 minutes, il reprenait ces fonctions, en traçant une ligne courbe de 9 millimètres de largeur.

Janvier 1862 :

Le conduit d'eau est bouché les courbes de basses mers de maline, ne sont plus exactes, le vent et la mer me repoussent de l'échelle.

Le 31 décembre les ouvriers du génie hydraulique sont arrivés à Enet pour nettoyer le conduit d'eau. Le 2 janvier, repoussé par la mer, ils partirent laissant le mur de l'ouest en partie écroulé.

Mars 1862 :

Le 15 mars, il est arrivé à Enet dix ouvriers du génie hydraulique pour nettoyer le conduit d'eau, ce même jour la courbe était en défaut. Le 16 et 17 on travailla au dévasement et à relever les murs écroulés par la mer, le 18 au matin, cette partie en était à une position équitable, lorsque je reconnus une fausse courbe au marégraphe. Je demandais à ce qu'on ouvrit la porte du conduit sous-terrain et qu'on le visita, ayant reconnu une épaisseur de vase de 0,60 centimètres, je priais le contre maître chargé de ce travail de pousser tous ces efforts sur cette dernière partie et ne pas manquer la marée du soir car il ne fallait pas compter sur la journée du 19, le baromètre étant à 49. En effet, à 11h45m du soir, ils furent repoussés par une averse pluviale et une raffale de SO qui continue. Cette dernière partie reste inachevée et mérite de l'être, mais n'empêche pas de fonctionner le marégraphe. Je chercherais une marée convenable pour finir ce travail et prévendrais d'avance. J'ai passé quatre jours à l'échelle pour ne pas laisser une fausse courbe sans correction, j'ai sondé le puits, tout va bien, et ce qui se dévira, je forcerais d'aller droit.

Le 28 mars à 3 heures du soir, il ventait grand frais de SO et la mer terrible couvrait de ces nappes d'eau la tourelle du marégraphe, la targette de la fenêtre du côté du vent céda à la rafale et avant que je puisse me porter à la condamner deux coups de mer lavèrent le marégraphe et la feuille ; en asséchant l'eau, je postais ma femme à la feuille pour l'assécher avec les fers et aplanir les milles plis que le crayon aurait brisés. Je crains que ces soins ne suffisent pour la sauver. Si la mer ne cesse sa furie, le crayon la mettra en lambeaux. Les cordes et les poulies bruissent, la roue tourne à rompre tout et le crayon trace des lignes de 10 cm ?

Avril 1862 :

Les trois jours de raffale de NE du 12, 13 et 14 avril ont détruit le travail du 15, 16 et 17 mars, le mur du NE a été renversé dans le ruisseau et les algues marines l'ont encombré et sur ces algues la vase et le sable formeront bientôt muraille à l'embouchement. Si j'osais en dire la cause, ce qu'à Dieu ne plaise sans ordres, je trouverais je n'en doute pas un appui dans monsieur l'ingénieur de la rade.

Juin 1862 :

Le 12 juin, il ventait bon frais de SO et Ouest et la mer grosse. Pendant la nuit la grande échelle de marée a cassé à 3 mètres au dessus de sa base. Le 13 au jour elle était à se briser sur les roches retenue par ces haubants et les règles graduées qui étaient clouées dessus se sont brisées et disparues. Cette échelle est pourrie et mangée par les vers. Ce service m'est impossible jusqu'à ce qu'il y en ait un autre.

Juillet 1862 :

Le 11, les ouvriers du génie hydraulique sont venu nettoyer le conduit d'eau et mettre l'échelle à place ; mais en mettant son lien de capelage un de ses pitons ont cassé et on n'a pu la mettre ; donc elle est restée dans la cour du Fort jusqu'à la marée du 9 août.

Septembre 1862 :

Le 11 septembre à 1 heure du soir la chaîne du flotteur a cassé les fils et les cordes et le flotteur plein d'eau a resté envasé au fond du puits. J'ai passé toute la marée dans le puits pour avoir le flotteur, tous mes efforts furent infructueux la mer me repoussa. Le 13, malgré qu'il y avait déjà 5 jours de lune de passé, et qu'il ne restait pas moins de 4 à 5 mètres d'eau dans le puits de basse mer, je retentais de nouveaux efforts, qui furent comme les premiers sans succès, le flotteur était tombé debout dans la vase ou il y était enfoncé de tout son diamètre, et rien ne pouvait le crocher, je remontais le puits désespéré. Lorsque mon fils prit une masse en fer, l'attache à une ligne comme plomb de sonde. Sonda le flotteur et y laissa sa masse dessus, et s'affola dans le puits ; cette manœuvre était trop claire pour ne pas être vue et sentie, trop imprudente pour n'être pas contrariée dans cette mer là et je lui défendais de se laisser couler ; mais à peine avait-il pris haleine qu'il disparut sous l'eau, à pic de sa ligne. Poussé comme par la foudre, je me jettais dans le puits, plutôt que je m'y affolais, et halant sur la ligne, j'amenais sur l'eau, mon fils piqué dans la vase la tête sanglante, le flotteur et la masse. On aura beau à me dire encore des centaines de fois que je suis trop vif, j'aime cette vivacité et ne la laisserais qu'avec mes os, dans quelques trous comme le puits du marégraphe d'Enet. J'ai envoyé de suite le flotteur troué en réparation.

Le 24 septembre, j'ai reçu le flotteur réparé un bout de sa chaîne primitive sans réparation dont la plus longue partie à restée dans le puits. Le grand fil se trouvant raccourci de toute la longueur de la chaîne perdue, n'était plus en harmonie avec le petit fil, et les tours sur le rouage. Une erreur considérable s'en suivait, pour la détruire, je fus obligé de raccourcir le petit fil en le mettant à la hauteur de l'échelle de marée à peu près jusqu'à ce qu'une nouvelle chaîne m'arrive. Pour mettre tout au point primitif. Je crains que le bout de chaîne qui existe ne me laisse pas attendre la nouvelle, la remplacer par une corde serait perdre son temps.

Novembre 1862 :

Le 7 novembre à 8 heures 43 minutes les ouvriers du génie hydraulique sont arrivés à Enet pour nettoyer le puit il a falu suspendre les observations et haller le flotteur haut pour établir la pompe dans le puit. Le 8 à 2 heures le travail étant fini on retira la pompe et je remis le marégraphe en marche en ajoutant au flotteur le bout de chaîne qui était resté dans le puit précédemment et en changeant tous les fils pour les mettre à leur primitive longueur c'est-à-dire le grand fils à 11 mètres 40 centimètres et le petit à 2 mètres 93 centimètres. Je dis primitive longueur parce que dans les derniers avaris du flotteur, la chaîne manquant je fus obligé d'allonger le grand fils qui cassa et pour faire exister toujours la même différence ou à peu près entre l'échelle et le marégraphe, je fus obligé de réduire ou raccourcir le petit, pour que les observations courantes soient dans le même rapport qu'avait le passé c'est-à-dire le marégraphe devant compter 0,60 centimètres de plus que l'échelle ou a peu de chose près comme cela a toujours existé.

Janvier 1863 :

Le 20 janvier la mer fut affreuse, elle décapelait dessus le fort et le marégraphe fut plein d'eau. Le 20, 21 et 22 de ce mois le conduit du marégraphe fut à sec, ce qui fait que ces trois courbes sont fausses. Je me suis occupé ces trois jours à retirer le sard, la vase et les pierres, mais mon travail fut inutile, car la mer le remit de nouveau. Le 27 le canot du génie hydraulique vint amener un homme pour arranger le dessus de la tourelle, puis pour mettre un carreau à la fenêtre du marégraphe.

Février 1863 :

Les courbes du 18 et du 19 février furent fausses, le conduit était à sec, les autres sont bonnes car le conduit fut en un bon état le 20 février.

Mars 1863 :

Le 11, la gabare n°1 vint à Enet avec une jolie brise de la partie du NNO. Sur les minuit, le vent venant à affraichir, il appareilla pour se rendre dans la partie Sud où il trouvait un abri. Mais le 12 à 5 heures du matin, le vent étant à tempête de la partie du Sud, le patron voulut appareiller pour une seconde fois lorsqu'une grenasse vint, déchira sa grand voile du haut en bas, se trouvant alors désamarrée de sa voile majeure, mouilla ses deux encres, mais la tempête étant à son comble, les encres ne tinrent pas, ce qui fit que le navire fut jetée sur les banches d'Enet ou il fit de sensibles avaris car le navire était crevé. Aussitôt je pris les ouvriers avec moi pour aller porter secours à ses pauvres malheureux qui étaient extenué de fatigue, mais malgré notre bon courage, notre travail fut infructueux. Voyant qu'il n'y avait plus rien à faire, l'équipage vint à la maison ou je leur portais le secours qu'un cœur marin et dévoué doit à son semblable. Le 13 ayant eu du secours du port de Rochefort, il partit de ce dangereux trou pour se rendre sur les chantier.

Juillet 1863 :

Les courbes du 30 juin, du 1^{er}, 2, 3, 4, 5, 6 juillet se trouvent fausses, car le conduit se trouvait rempli de sable et de vase. Les marées ne se trouvant pas convenable pour pouvoir le nettoyer, on fut dans l'obligation d'espérer à la marée du 30 juillet, non seulement cela, le tir se faisant sur le blindage du fort Enet empêchait tout travail car l'on tirait la plupart du temps à marée basse.

Le 13 juillet, le fils du chariot cassa à 11 heures du matin, par cause du salpêtre ce qui le fait rouiller, d'où il suit qu'il casse comme du verre. Il fut remis en place à un heure de l'après midi.

Octobre 1863 :

Le 30 octobre, on fit des expériences de tir sur le fort Liédot et en tirant le mortier on me cassa deux carreaux à la tourelle du marégraphe plus une équerre, cela eut lieu par suite de la comotion.

Novembre 1863 :

Le 11 novembre la mer était affreuse et menaçait à chaque instant d'engloutir la tourelle du marégraphe en la couvrant de ses napes d'eau. Il y avait un pied d'eau dans l'intérieur de cette tourelle. Le 11 novembre, les ouvriers du génie hydraulique vinrent au fort pour nettoyer le conduit du marégraphe et repartirent le 13 après la marée du matin. Ils partirent avant d'avoir mis tout en état de propreté mais la grande tempête qui régnait en ce moment leur a opposés de travailler. Pendant cette grande tempête il y eut deux haubans de l'échelle de marée brisés plus un morceau de madrier servant de support à cette échelle fut enlevé par la mer qui était épouvantable.

Décembre 1863 :

Toutes les lignes qui se trouvent ponctuées ou du moins les courbes indiquent qu'elles sont fausses, cela fut occasionné par l'encombrement du conduit du marégraphe.

Février 1864 :

Le 24 février à 1 heure du matin le fil du chariot cassa il fut remplacé à 7 heures 20 minutes. Le même jour il cassa une seconde fois à 9h30 et fut remis à 10h45 ceci eut lieu par la grande humidité qui règne constamment dans le fort car le salpêtre mine les fils.

Juin 1864 :

Ayant perdu l'échelle de marée (petite ringle qui fut emporté par la mer), il me fut impossible de prendre la hauteur à l'époque des zygies.

Août 1864 :

Le 17 août, j'ai raccourci les fils du chariot et du flotteur afin de mettre le marégraphe en parfaite concordance avec l'échelle de marée, les fils furent raccourci de 0,30m.

Septembre 1864 :

L'échelle de marée étant renversée, il est impossible de prendre les observations à l'époque des zygies.

Octobre 1864 :

Dans la nuit du 19 au 20 octobre, l'échelle de marée qui se trouvait dans le conduit du marégraphe fut renversée et même brisée, ceci eut lieu par suite de la grande tempête de vent (la mer était très grosse).

Novembre 1864 :

Dans ces grandes tempêtes de vent de SO, la mer était affreuse, elle décapelait sur la tourelle et chaque coup de mer menaçait de l'engloutir, la tourelle était pleine d'eau, aussi le marégraphe et la feuille furent complètement mouillés, ceci arriva du 13 novembre au 23, où le temps resta le même, ou du moins à quelque chose près.

Décembre 1864 :

Les courbes ponctuées du 29, 30, 31 et 1^{er} janvier sont fausses par suite du manque d'eau dans la cunette.

Janvier 1865 :

Les ouvriers du génie hydraulique vinrent au fort Enet le 28 janvier pour nettoyer le puits et le conduit du marégraphe, ils firent tous leurs efforts, afin de pouvoir mettre tout en bon état de propreté, mais le 31 la mer ne perdant pas assez ils furent dans l'obligation de partir, en espérant terminer ce nettoyage pour la marée du 25 février qui sera beaucoup plus forte que celle de Janvier. Le 29 janvier à 8 heures 15m je fus dans l'obligation de retirer le flotteur afin de pouvoir établir la pompe refoulante dans le puits et je ne puis remettre le marégraphe en marche que le 31 à 8h15 du matin, c'est pour ce motif que les lignes du 29, 30 et une partie du 31 sont ponctuées.

Février 1865 :

Le 25 février, les ouvriers du génie hydraulique vinrent au fort Enet pour nettoyer le puits et le conduit du marégraphe, ils ont fait ce nettoyage d'une manière extraordinaire, car je n'ai qu'à me louer du travail du contremaître (Mr Giraud), chargé de faire faire ce nettoyage. Il a montré tout son dévouement aussi le marégraphe est-il en ce moment dans un état exemplaire de propreté. Ils sont partis le 1^{er} mars après la marée du matin pour le port de Rochefort. Le 27, à 8h45m je fus dans l'obligation de retirer le flotteur afin d'établir la pompe refoulante dans le puits, c'est pour ce motif que les lignes du 27 et 28 sont ponctuées. Je ne remis le marégraphe en marche que le 1^{er} mars, jour où les ouvriers partirent.

Mars 1865 :

Le 1^{er} mars la mer étant houleuse, défonça le trou par lequel on passe le tuyau de la pompe refoulante dans le puits, ceci provient que le ciment n'a pas eu le temps de sécher, la mer montant très rapidement a tout enlevé, aussi les courbes du 1^{er} et du 2 au moment du pleine mer, sont abimés sous le rapport des dents de scie, car elles sont très bonne sous le rapport de la justesse des observations, aussi je fus dans l'obligation de faire le maçon pour réparer ce faible avarie, qui serait devenu grave par la suite et cependant je n'ai jamais fait ce métier là.

Avril 1865 :

Depuis le 23 septembre 1864, je n'ai pu remplir la colonne de l'échelle de marée, vu que cette échelle fut renversée par un fort coup de vent, ou la mer était très grosse. Je me suis servi depuis cette époque de la petite échelle de marée que Mr Bouquet de Lagrille a fait placer dans le puits du marégraphe afin de m'assurer la parfaite concordance de mes fils et je continue ce travail jusqu'au moment où l'on viendra placer les échelles.

Mai 1865 :

Le 23 mai Monsieur Chermont conducteur des travaux hydrauliques vint au fort Enet avec plusieurs ouvriers, afin de placer les échelles de marée, une dans l'intérieur du puits, et l'autre dans la cunette du marégraphe, mais la mer ne leur permettant pas de terminer leur ouvrage, ils partirent pour Rochefort le 24 au soir, espérant venir dans le courant du mois de juin pour terminer leur travail.

Juin 1865 :

Le 9 juin, Monsieur Chermont conducteur aux travaux hydrauliques vint au fort Enet pour terminer de poser les échelles de marée. Ces échelles furent placées au point donné par Mr Bouquet de Lagrille. J'espère de jour en jour un nouveau flotteur, afin de pouvoir mettre les fils du marégraphe en parfaite concordance avec la hauteur donnée par ces échelles, qui sont au véritable point zéro. Le 9 juin, je fus dans l'obligation de retirer le flotteur du puits à 11h30m afin de placer l'échelle dans le puits, je ne pus remettre les observations en marche que le 10 à 9h15m c'est pour ce motif que les lignes du 9 et du 10 sont ponctuées.

Août 1865 :

Le 18 août à 10h45 changé la feuille et réduit le fils du chariot de 0,75 centimètres, afin de mettre la hauteur donnée par le marégraphe en parfaite concordance avec celle donnée par l'échelle de marée qui fut placée au point donné par Monsieur Bouquet de Lagrille.

Octobre 1865 :

Du 17 octobre au 1^{er} novembre, il y eut une forte tempête de vent de Sud au NO. Le temps était orageux, la mer très grosse, et le vent ne venait à tempête que dans les grenasses. La tourelle du marégraphe pendant toute la durée de cette tempête resta pleine d'eau et je craignais à chaque instant que la tourelle s'écroulat dessous mes pieds, car à chaque coup de mer tout tremblait. L'on aurait pu en ce moment comparer le marégraphe du fort Enet à un navire en détresse (en pleine mer). Aussi il est facile de voir que le marégraphe demande beaucoup plus de peine, de soins et de dépenses que les autres qui sont à terre.

Janvier 1866 :

Du 7 janvier au soir jusqu'au 13 du même mois, il y eut une forte tempête de vent de SO, Ouest et NO. La mer était très grosse, et je craignais que la tourelle fût engloutie par les coups de mer. La feuille qui était sur le cylindre pour recevoir les courbes marégraphiques du 1^{er} janvier au 17 fut complètement mouillée et cela fut occasionné par la force de la mer ; car chaque embrun passait par les joints de la tourelle. Aussi y avait-il dans la tourelle un pied d'eau et cela exista pendant toute la tempête. Par suite de cette tempête nous restâmes huit jours sans pain.

Mars 1866 :

Le 16 mars, les ouvriers du génie hydraulique vinrent au fort Enet, pour nettoyer le puits et le conduit du marégraphe, qui se trouvaient encombrés d'un mètre 50c de vase. Ils ne purent nettoyer que la cunette ; la mer ne descendait pas assez pour leur permettre de travailler, car les grands vents de Sud et de OSO qui régnaient en ce moment retenaient beaucoup la mer. Nous espérons donc la marée du mois d'avril pour terminer ce nettoyage. Les ouvriers partirent du fort Enet pour se rendre à Rochefort le 21 mars au soir.

Avril 1866 :

Le 3 avril, je fus dans l'obligation d'entrer à l'hôpital car depuis longtemps j'avais de très forts accès de fièvre, qui m'empêchaient par moment de faire mon service, et tout cela provient de la grande humidité qui règne au fort. Je suis sorti de l'hôpital le 21 avril, avant même d'être complètement guéri, mais le temps me durait de n'être pas à mon service. Les observations du temps et les vents m'ont manqué à l'hôpital ; il m'était impossible de prendre les vents, attendu que je ne sortais pas de ma chambre. Les courbes de basse mer du 14, 15, 16, 17 et 18 avril sont complètement fausses, aussi au lieu de former des courbes, cela ne représente que des lignes droites. Pendant ces cinq jours la cunette était à sec et ceci fut occasionné par le sable et la vase qui encombrèrent la cunette et qui oppose à l'eau de circuler. J'avais demandé à faire nettoyer la cunette mais ayant beaucoup de travail à Rochefort, il fut impossible d'envoyer les ouvriers. J'espère avec impatience la marée du 15 mai pour faire réparer ce désordre.

Juillet 1866 :

Le 17 juillet, je fus forcé de rentrer à l'hôpital maritime car j'avais depuis plusieurs jours de fortes fièvres et il m'était impossible de faire mon service. Je suis sorti de l'hôpital le 24 juillet au matin avant même d'être complètement guéri mais je ne pouvais rester plus longtemps absent de mon poste.

Novembre 1866 :

Le 16 novembre, jour où je devais changer ma feuille, je me trouvais allité, accablé par une forte fièvre, cependant il fallait que la feuille du marégraphe soit changée. Ma mère la changea, seulement il arriva qu'au lieu de la coller à minuit elle la mit à 3 heures. Lorsque je me sentis un peu mieux, je fus voir au marégraphe, c'est alors que je m'aperçus de l'erreur, mais ne pouvant y remédier, je fus forcé de la laisser subsister, c'est pour ce motif que la feuille n'est pas coupée à l'endroit collé.

Février 1867 :

Le 30 janvier, je fus dans l'obligation d'entrer à l'hôpital maritime pour une bronchite aiguë. Je ne voulais pas y entrer, mais étant dangereusement malade, le docteur m'y obligea.

Avril 1867 :

Le 2 avril les ouvriers du génie hydraulique vinrent au fort Enet pour nettoyer le puits et le conduit du marégraphe, qui se trouvaient complètement encombrés de sard et de vase ? Mais la cunette se trouvait si tellement pleine, qu'il fut impossible de toucher au puits. J'espère qu'au mois de juillet les ouvriers du génie hydraulique viendront pour nettoyer le puits. Ils partirent du fort le 7 avril pour se rendre à Rochefort.

Juin 1867 : Le 28 mai, on vint démonter le marégraphe du fort Enet pour l'emporter nettoyer à Rochefort, c'est pour ce motif que la feuille se termine le 28 mai à 10 heures 42 minutes temps vrai. Heure du démontage de la pendule. Le 28 mai le marégraphe fut démonté pour être nettoyé, mais ne pouvant faire cet ouvrage au fort, il fut emporté à Rochefort. L'horloger vint au fort le 15 juin, comptant monter l'horloge du marégraphe mais n'ayant pas le temps de faire ce travail dans la journée, il fut dans l'obligation de retourner le 18 juin, jour où tout fut mis en ordre. Je mis ma feuille sur le cylindre, et fit aussitôt fonctionner l'appareil à midi 55 minutes du soir. Temps vrai.

Juillet 1867 :

Le 25 juillet, il y eut une grande tempête de vent de SO et de Ouest, elle dura jusqu'au 26 à 9 heures du matin. Je croyais à chaque instant que la tourelle allait s'écrouler sous mes pieds. Il y avait dans le moment du pleine mer plus d'un pied d'eau dans la tourelle du marégraphe.

Septembre 1867 :

Le 6 septembre, Monsieur Bouquet de Lagrille vint au fort Enet, il trouva les fils du marégraphe 2 centimètres trop courts. Le 16 septembre en changeant la feuille, j'ai remédié à cette erreur et les fils sont en parfaite concordance avec l'échelle de marée, placée dans l'intérieur du puits.

Octobre 1867 :

Le 1^{er} octobre, emportant le Compteur Dumas 149 pour le faire régler à l'Observatoire de la Marine, il s'arrêta et le choc qu'il éprouva fut occasionné par le transport, vu que toutes les fois que je vais le faire régler, je prends la Chaloupe canonnière qui fait le service de la rade. Souvent arrive que la mer est grosse, alors le compteur est sujet à de très grands dérangements.

Février 1868 :

Le 7, les ouvriers du génie hydraulique vinrent au fort Enet pour nettoyer le puits et la cunette du marégraphe. Ils firent parfaitement leur nettoyage, la marée fut très propice car l'eau laisse plus de 30 mètres derrière elle le bout de la cunette, ce qui fait que tout fut à sec environ deux heures par marée et cela pendant trois jours. Ils partirent du fort pour se rendre à Rochefort le 12, après la marée.

Avril 1868 :

Du 23 avril à 11 heures du soir au 25 au matin il y eut une forte tempête de vent de OSO et de SO. La mer était très grosse. La tourelle du marégraphe fut complètement décollée du fort, ce qui fait qu'à chaque coup de mer, elle était pleine d'eau et la feuille était toute mouillée. Je me mis à condamner toutes les ouvertures, puis afin d'avoir la hauteur de la pleine mer, je fus dans l'obligation de faire chauffer des fers et de faire sécher ma feuille sinon le crayon aurait déchiré le papier. Je fus en faction dans la tourelle du marégraphe pendant trois heures environ au moment du pleine mer car je craignais qu'elle fut emportée par la mer. Aussi je me disposais à démonter le marégraphe. Pendant le mois d'avril, il y eut plusieurs tempêtes, ce qui fait que la tourelle du marégraphe a été bien avariée, aussi je crains que le haut de cette tourelle ne puisse supporter de pareilles secousses.

Juillet 1868 :

Le 17 juillet il vint au fort Enet une corvée de 10 hommes, envoyé par la Direction des Mouvements du Port pour nettoyer le puits et la cunette du marégraphe, mais ces hommes n'étant pas habitué à ce travail ne firent que la moitié de l'ouvrage, aussi sont-ils obligés de venir à la prochaine marée, qui se trouve dans le mois d'août. Ils partirent du fort Enet pour se rendre à Rochefort le 23 juillet au soir.

Août 1868 :

Le 16 août il vint une corvée de vingt hommes au fort Enet pour dévaser le puits et la cunette du marégraphe mais la mer ne descendant pas assez, et n'étant pas encore habitué à ce travail, ils ne firent ce nettoyage qu'à moitié. Ils sont dans l'obligation de venir pour la marée du 16 septembre, une des plus forte marée de l'année. Ils partirent du fort Enet le 22 août au soir pour se rendre à Rochefort.

Octobre 1868 :

Les courbes des 15, 16 et 17 octobre sont fausses, cela est occasionné par le manque d'eau dans la cunette du marégraphe. La cunette est souvent encombrée de vase et de sard, c'est ce qui empêche l'eau de circuler. Pour que les courbes de basses mers en grande marée soient justes, il faudrait nettoyer la cunette souvent, mais ayant beaucoup d'ouvrage dans le port, on ne peut envoyer à chaque instant une corvée de 15 ou 20 hommes pour ce nettoyage. Ce qui fait qu'à toutes les grandes marées, les courbes des basses mers sont mauvaises.

Août 1869 :

Les ouvriers des travaux hydrauliques sont arrivés au fort Enet le 6 août pour dévaser le puits et le conduit du marégraphe, mais la cunette étant complètement encombrée, ils n'ont pu faire que la moitié du nettoyage. Nous espérons la marée de septembre pour terminer le dévasement. Ils partirent du fort pour se rendre à Rochefort le 12 août. Les courbes des basses mers des 8, 9, 10 et 11 août sont fausses, c'est occasionné par le nettoyage de la cunette du marégraphe. Le conduit était à sec.

Octobre 1869 :

Les ouvriers des travaux hydrauliques sont arrivés au fort Enet le 4 octobre pour nettoyer le puits et le conduit du marégraphe. Ils partirent le 9 octobre, laissant tout dans un état complet de propreté. Le 5 et le 6 octobre, j'ai enlevé le flotteur afin de pouvoir dévaser le puits du marégraphe, c'est pour ce motif qu'il n'y a pas de courbes de basses mers.

Mars 1870 :

Les courbes des 17, 18, 19 et 20 mars sont fausses, cela a été occasionné par le manque d'eau et le dévasement de la cunette du marégraphe. Un peu avant la basse mer, je retirai le flotteur pour dévaser le puits.

Mai 1871 :

Le 5, à 9 heures 30 minutes du matin, je fus dans l'obligation de retirer le flotteur du puits du marégraphe, afin de pouvoir dévaser le puits et la cunette. Je ne remis le marégraphe en marche que le 7 mai à 4 heures 45 minutes du soir.

Janvier 1873 :

Les courbes des basses mers des 27, 28, 29, 30 et 31 Janvier sont fausses. Cela est occasionné par l'encombrement complet de la cunette du marégraphe.

Février 1873 :

Les courbes des basses mers des 1, 2, 3, 12, 13, 14, 15, 16, 26, 27 et 28 Février sont fausses. Cela est occasionné par l'encombrement complet de la cunette du marégraphe. J'ai fait la demande pour faire dévaser la cunette mais le marégraphe devant être transporté au Fort Boyard, tout dévasement a été arrêté.

Mars 1873 :

Les courbes des basses mers des 1, 2, 3, 4, 26, 27, 28, 29, 30 et 31 Mars sont fausses. Cela est occasionné par l'encombrement complet de la cunette du marégraphe et devant sous peu être transporté au Fort Boyard, tout nettoyage a été arrêté.

Avril 1873 :

Les courbes des basses mers des 1, 2, 3, 11, 12, 13, 14, 15, 24, 25, 26, 27, 28, 29 et 30 Avril sont fausses. Cela est occasionné par l'encombrement complet de la cunette du marégraphe.

Juin 1873 :

Le marégraphe d'Enet a été démonté le 3 juin pour être transporté à Boyard. C'est pour ce motif que les observations manquent. Le marégraphe du fort Enet a été démonté le 3 juin à 11 heures du matin pour être transporté au fort Boyard où nous sommes arrivés à 6 heures du soir. L'installation pour l'instrument n'étant pas terminée, on en profite pour nettoyer la pendule du marégraphe.

fort Boyard

Juillet 1873 :

Le Marégraphe d'Enet a été démonté le 3 Juin, pour être placé au Fort Boyard. Il a commencé à fonctionner le 17 Juillet, mais le fil du flotteur cassant à chaque minute, il a fallu chercher à y remédier. J'ai en espérant mis un fil flotteur en corde, qui a fonctionné du 22 au 30 Juillet, époque où l'on est venu changer l'installation des galets, et amoindrir l'amplitude de la vague. Le 11 Août tout était terminé, c'est alors où j'ai mis le Marégraphe en marche, d'après le zéro donné par Monsieur l'Ingénieur hydrographe.

Juillet 1874 :

Le 23 Juillet à midi 38 minutes, je fus dans l'obligation de tirer le flotteur du puits pour le faire réparer. Je mis le marégraphe en marche le 25 Juillet à 8 heure 24 minutes.

Septembre 1874 :

Le 27 Septembre à 11 heures du matin j'ai retiré le flotteur, afin que l'on puisse nettoyer le puits et visiter les galets. Le marégraphe a été remis en marche le 30 septembre à 7 heures 45 minutes du matin, temps vrai.

Mai 1875 :

Le 4 Mai à 8 heures 37 minutes du matin le fil du flotteur a cassé ; et par suite de la longueur du conduit et la grande difficulté de passage, il m'a été complètement impossible de le réparer seul. Il m'a fallu espérer de l'aide. C'est pour ce motif que le marégraphe n'a été remis en marche que le 6 Mai à 2 heures 45 minutes du soir (temps vrai).

Octobre 1875 :

Le fil du flotteur a cassé le 13 octobre à 2 heures 53 minutes du soir, cela fut occasionné par la force de la grosse mer et du mauvais temps. Pendant près de 10 jours la mer a été très grosse et il était impossible d'aller sur les jetées car la lame passait toute entière par-dessus. A plusieurs reprises, j'ai essayé à réparer le fil, mais aussitôt en place, aussitôt cassé. Ce n'est que le 20 octobre à 9 heures 56 minutes du matin, où j'ai pu le réparer complètement et faire fonctionner le marégraphe.

Novembre 1875 :

Les courbes des pleines mers des 11, 12, 13, 14 et 15 novembre manquent. Cela fut occasionné par le grand vent et la grosse mer. Au lieu que le marégraphe forme une courbe pour le moment du pleine mer il a décrit une ligne droite (il a fallu que le fil du flotteur soit engagé). Pendant tous ces jours il y a eu une tempête de Ouest, et de SO, et la mer était très grosse.

Décembre 1875 :

Le Marégraphe a été mis en marche le 22 Décembre à 10 heures 35 minutes. Temps Vrai.

Mars 1876 :

Vu le changement d'observateur et les réparations au Marégraphe, ce dernier n'a pu fonctionner qu'à dater du 19 mars.

Septembre 1876 :

Les observations qui avaient été interrompues par suite de réparations au marégraphe ont recommencées le 15, à 4 heures du soir. Mr l'Ingénieur hydrographe Bouquet de la Grye a placé une nouvelle feuille le 15 au soir, 4 heures.

Les observations qui avaient été interrompues, par suite de réparations au marégraphe, ont repris leur cours dès ce jour là. L'observateur Pillet prend le travail du marégraphe le 16 septembre (décision préfectorale du 6 du même mois).

Octobre 1876 :

Le marégraphe n'a pas fonctionné aux époques ci-après, le fil de fer qui conduit au puits étant sorti du dessus de ses galets :

Le 13 octobre à partir de 1h45 (matin), repris sa marche le 14 à 2h (soir). Cassé à 3h suivant, repris à 4h suivant, cassé à 5h45 suivant, repris à 7h30 suivant, cessé sa marche le 15 octobre à 12h30 (soir), repris à 2h45 (soir), cessé le 16 à 4h45 (matin), repris à 8h45 (matin). Continue à fonctionner excepté une interruption de quelques heures le 17 (2h45 matin à 10h30 suivant).

Novembre 1876 :

Le 2 Novembre le petit fil s'est cassé à 7h40 du matin, le marégraphe se met en marche à 8h12 suivant. Le 11 le même fil s'est cassé à 12h du soir, le marégraphe se met en marche à 0h45m du soir. Le 13 le fil qui conduit au flotteur est sorti de dessus les galets et était engagé à 4h40m du matin par suite de mauvais temps ; le marégraphe a fonctionné à partir de 8h30m. Il s'est arrêté de nouveau à 3h32 soir pour marche à 4h soir. Le 14, le marégraphe s'est arrêté à 4h45 matin, les fils étaient cassés et le poids qui raidit la corde était à terre ; remis le marégraphe en marche à 2h25 soir, seulement, l'état de la mer n'ayant pu permettre d'aller sur la jetée. Le 15 à 9h20 matin, le petit fils se casse, le marégraphe fonctionne à partir de 10h15 suivant.

Décembre 1876 :

Ces arrêts proviennent de la rupture des fils et de leur sortie de dessus les galets. Par les mauvais temps une des plaques qui couvrent l'entrée du puits du flotteur a été enlevée par les coups de mer.

Janvier 1877 :

L'appareil éprouve de temps en temps de fortes secousses, ce qui occasionne un va-et-vient assez sensible au tambour. La grande roue vient butter fréquemment le long de la traverse supérieure du châssis du dit appareil. Le fils qui conduit au flotteur s'échappe souvent de dessus les poulies et se trouve pris entre elles et leur essieu, fil casse journellement à mer basse surtout, le flotteur se trouvant alors suspendu. Le creux des poulies n'est pas assez profond pour retenir le fil.

Février 1877 :

Le 16 février à 9h40, matin, la pendule du marégraphe s'est arrêtée par suite d'une forte secousse que lui a fait éprouver la rupture du fil qui maintient le flotteur ; mise en marche avec 1 minute de retard. Le 17, à midi, elle était d'accord avec le Compteur.

Mars 1877 :

A défaut du flotteur l'état de la mer a pu permettre d'apprécier la hauteur de la pleine mer à l'échelle. Quant à celles des basses mers, cette échelle ne peut servir, vu son état de détérioration, qu'au dessous de 4m...

Avril 1877 :

Le 3 à 11h25 matin, le marégraphe s'arrête, impossible d'aller sur la jetée pour en connaître la cause, la mer déferle dessus ; il reprend sa marche à 10h27 soir ; s'arrête de nouveau le 5 à minuit. Ce n'est que le 10 à 12h08 soir que le temps permet de réparer le fil qui est cassé. A 1h8 suivant, il commence à fonctionner.

Mai 1877 :

La grande roue de l'appareil ne fonctionne pas régulièrement, il existe à l'une des extrémités de l'essieu 5 filets de vis broyés sur une longueur de 7m. Le fil qui maintient le flotteur persiste à s'enlever de dessus les galets. Ce fil casse souvent, il s'oxyde de suite dans le puits et dans la voûte. L'échelle des marées a réellement besoin d'être repeinte ; on ne peut s'en servir qu'à partir d'une hauteur de 5m30. Une demande à réparer et à peindre a été adressée aux Travaux hydrauliques.

Août 1877 :

Ces arrêts proviennent de l'usure des poulies qui supportent l'arbre de la grande roue et dont la réparation a été demandée et en outre de la rupture toujours du fil qui maintient le flotteur.

Décembre 1877 :

Le fil qui conduit au puits et qui maintient le flotteur s'est cassé plusieurs fois dans le courant du mois, ce qui a arrêté le fonctionnement de l'appareil.

Janvier 1878 :

L'appareil n'a pas fonctionné d'une manière régulière à certaines heures à partir du 5 au 19 janvier ; ce n'est qu'à cette dernière date que le temps et l'état de la mer ont permis d'en connaître la cause : un rouet placé le long du fort ne jouait plus sur son essieu.

Juillet 1878 :

Le marégraphe s'arrête le 15 à 2h30 soir, le fil qui maintient le flotteur s'étant cassé ; mis en marche le 16 à 9h28 matin ; s'arrête à nouveau à 11h45 suivant. Le fil d'acier qui retient le crayon s'étant cassé. L'état de la mer ne permit pas de régler l'appareil de suite, ce n'est que le 17 à 10h55 matin que cette opération se fait.

Décembre 1878 :

La courbe du 1^{er} décembre présente quelque irrégularité, dans la soirée. L'appareil s'est arrêté le 30, à 7h36 soir. Mis en marche avec beaucoup de peine le 1^{er} janvier, à 3h30 soir. La mer a été continuellement grosse à l'entrée du barachois où se trouve placé le flotteur ; les observations à l'échelle n'ont pu, par conséquent, être faites.

Janvier 1879 :

Le fil du flotteur qui était cassé depuis le 30 est réparé le 1^{er} janvier 1879, à 3h10 soir.... C'est seulement le 20 que la mer a pu permettre d'aller au puits (le pont qui conduit à la jetée ayant été enlevé par la mer). L'appareil éprouve de fortes secousses quand la mer est grosse.

Août 1879 :

L'appareil a besoin d'être visité. Il existe un peu de jeu entre l'arbre du tambour et l'horloge ; le tapis en drap placé sur ce tambour est hors de service, il ne peut plus être réparé.

Février 1881 :

Le marégraphe n'a pas fonctionné du 1^{er} Février au 19 suivant ; le fil qui maintient le flotteur étant cassé à nouveau. L'observateur qui était allé à Rochefort toucher son mandat et faire ses vivres n'a pu débarquer au fort que le 15 et après 3 voyages inutiles ; vu le temps et l'état de la mer l'appareil n'a été mis en marche que le 19 Février.

Mai 1882 :

Le 5 mai à 11 heures du matin, arrivé au fort et pris le service à midi établi la feuille sur le cylindre et mis en marche. Le 16 à 1 heure 31m55s réglé le marégraphe sur le temps vrai. Du 16 au 17, deux ouvriers de la Direction des Travaux hydrauliques ont été occupés à mettre l'échelle de marées en place. Le 17 à 11 heures 05m mis le marégraphe en concordance avec l'échelle il y avait 0m05c de plus qu'à l'échelle. Le 18 à midi 55m désembrayé, sorti la feuille et pafsé de la toile Emery sur la graduation des heures marquées sur le cylindre, à 1 heure 51m établi la nouvelle feuille et mis en marche. Le 21 à midi je me suis aperçu que le crayon ne correspondait pas avec de la pendule du marégraphe et qu'il était en avance de 20 minutes. Le 22 Monsieur l'Ingénieur en chef et Monsieur ordinaire d'hydrographie de la Chimère sont venus au fort, ils ont cherché à établir la concordance entre l'heure que marque le crayon sur le cylindre et l'heure de la pendule du marégraphe ; ils n'ont pas obtenu de résultats. Le 26 de 2 heures et demie à 5 heures et demie du matin, le crayon a tracé sur le cylindre une ligne parallèle à la hauteur, je ne sais pas ce qui a pu produire cette irrégularité ; cependant après m'être rendu compte j'ai présumé que c'était produit par un nœud d'ajuste du fil du flotteur engagé sur ses galets. Cette irrégularité n'a duré que 3 heures ainsi que le marque la feuille.

Juin 1882 :

Le 10 à 10 heures 30m du matin, l'horloger de la Direction des Travaux hydrauliques est venu au fort pour mettre l'heure du marégraphe en concordance avec l'heure que marque le crayon sur le cylindre et prendre des dispositions pour placer la girouette sur le clocheton du fort. A midi la concordance a été établie, le crayon correspond parfaitement avec l'heure de la pendule du marégraphe. Tout marche bien ; il n'y a que depuis quelques jours que la mer est toujours grosse qui empêche de préciser la hauteur à l'échelle. A 6 heures du soir (le 28) le fil du flotteur s'est rompu par la secousse, à l'horloge, il y a eu 3 heures de rétrograde c'est-à-dire que la pendule marquait 3 heures au lieu de 6 heures et s'était arrêtée. On s'est occupé à changer le fil, à 8 heures, il était en place. Le 29 à 9 heures du matin réglé le marégraphe sur le temps vrai du compteur et à 10 heures réglé le crayon sur l'échelle.

Juillet 1882 :

Le 13 à 7 heures 15m du matin, d'après les ordres de Monsieur Renaud, ingénieur hydrographe de la Chimère, retiré la feuille du dessus le cylindre pour qu'il l'emporte. A 8 heures 2 minutes mis en marche sur la nouvelle feuille.

Septembre 1882 :

Le 26, à 5 heures 30 minutes du matin, je me suis aperçu que le fil du flotteur était engagé après des recherches, j'ai vu qu'il était décapelé de dessus un de ses rouets et sorti de dessus ses galets. Vu la tempête on n'a pu relevé le fil sur ses galets qu'à 4 heures du soir. De ce fait est résulté une différence entre le crayon du marégraphe et l'échelle

qu'on n'a pas pu mettre en concordance, vu l'agitation de la mer qui empêchait de préciser la hauteur à l'échelle, ce n'est que le 1^{er} octobre à 4 heures du soir qu'on a pu régler le marégraphe sur l'échelle, il y avait en plus 0m10c (du 26, 4 heures soir au 1^{er}, 4 heures soir). Dans la marée de la pleine mer du 27 au soir, le tube de l'échelle de marée s'est brisé par la violence de la mer, à la hauteur de 4 mètre 30c au dessus de zéro.

Octobre 1882 :

Le 27, à 1 heure 37 du soir, par la tempête et la violence de la mer, le fil du flotteur s'est rompu et ce n'est que dans la matinée du 29 qu'on a pu avoir accès sur la jetée pour le rétablir, à midi tout était réparé et j'ai mis en marche. Le baromètre dans cette tempête a descendu à 733 millimètres ; un pont levis du fort a été enlevé par la mer.

Novembre 1882 :

Du 28 au 30, le marégraphe a marqué 0m6c de plus que l'échelle. J'ai remarqué que la pleine mer du 10 au matin était en avance de celle du 9, de 0 heure 27 minutes au lieu d'être en retard de cette quantité ou environ. Le 26, à 0 heure 36 m du matin, la corde du poid qui équilibre le flotteur s'est décapelée de dessus son cylindre. A 7 heures 8 m du matin je l'ai relevée et j'ai mis en marche. Le 27 et le 28, les mêmes incidents se sont produits. A force de recherches j'ai trouvé que l'axe de la grande roue, du cinquième et du dixième, par les secousses réitérées produites par les tempêtes, avait sauté des crans de ses galets et s'était porté sur la gauche ; par ce fait le cinquième ne se trouvant plus dans son alignement a occasionné les dérangements ci dessus signalés. Dans tous ces dérangements, le fil du crayon l'a été et il est très difficile d'établir la concordance du marégraphe avec l'échelle des marées. Attendu que cette dernière étant couverte de limon ne marque plus au dessous de cinq mètres et la mer étant toujours très agitée, il m'est impossible de préciser la hauteur à l'échelle et ce n'est qu'approximativement que je puis régler le crayon.

Décembre 1882 :

Du 1^{er} au 11, le marégraphe a marqué 0m6c de plus que l'échelle. Le 11 à 4h du soir, la mer étant moins agitée que depuis un mois j'ai pu régler le crayon sur l'échelle. Depuis le 26 novembre il était en plus de 0m06.

Octobre 1883 :

Du 4 au 7 inclus : par intervalle, le flotteur restait suspendu, je lui ai ajouté du poids, sans obtenir de résultat. A force de recherches, j'ai trouvé un des gallets du support des roues du marégraphe qui ne tournait pas sur son essieu ; je l'ai démonté et bien visité et mis en place. Depuis le 8 aucun dérangement n'a eu lieu.

Novembre 1883 :

Du 20 au 27 : par intervalle, les roues s'arrêtant sur leurs galets, il pourrait se faire que la feuille de la dernière quinzaine laisserait à désirer.

Décembre 1886 :

Dans la nuit du 9 au 10, par la tempête, l'échelle de marée a été emportée par la mer.

Janvier 1887 :

Ce n'est que le 9 janvier au matin que l'on a pu remplacer l'échelle. A 10 heures 45 minutes, après avoir réglé le crayon mis en marche. Il en résulte que du 1^{er} au 9 au matin, il n'y a pas eu de courbes.

Février 1889 :

Le 1^{er}, à 7 heures 39 minutes du soir, par l'humidité le marégraphe s'est arrêté, le 2 au matin lorsque je me suis aperçu, j'ai dédoublé la corde du poid de l'horloge et après l'avoir réglé sur le compteur établi le crayon et à 8 heures 27 minutes du matin, mis en marche.

Août 1889 :

Le 13 août, à 5h 58m du matin, rupture du fil du flotteur. A 2h10 mis l'appareil en marche après avoir changé le fil d'un bout à l'autre, sans avoir pu régler le crayon, l'échelle des marées ayant été enlevée par les ouvriers des travaux hydrauliques, pour être remplacée par une neuve. Le 14 août, à 1 heure 29m du soir, aussitôt que la nouvelle échelle des marées a été mise en place ; j'ai réglé mon crayon et les mis en concordance avec ladite échelle. Depuis tout va très bien.

Août 1895 :

Du 23 au 28 : réparation pour le puits

Avril 1897 :

Le 4, une des plaques en fer couvrant le puits a été enlevée par la mer à 3 h30 matin. Elle a été remplacé à 6 h.

Janvier 1899 :

Le puits du flotteur a besoin d'être curé, une demande a été faite à ce sujet. Les basses mers des 12, 13, 14 et 15 ne sont qu'approximatives, le flotteur ayant échoué sur la vase avant que la mer ne soit tout à fait basse.

Février 1899 :

Les basses mers des 10, 11, 12, 13 et 14 ne sont qu'approximatives. Le mauvais temps continu n'a pas permis aux ouvriers de la direction des travaux hydrauliques de pouvoir curer le puits, ils y sont descendus et ont constaté qu'il y avait un mètre de vase et sable.

Décembre 1899 :

Le 29, à midi 15 m, la couverture du puits du marégraphe a été enlevée par la mer, à partir de ce moment et pendant plusieurs heures, le puits a été constamment rempli d'eau par les lames qui couvraient la jetée, le marégraphe n'a plus fonctionné. L'échelle des marées a été également emportée. Le 30, nous nous sommes aperçus que le puits se démolissait dans son milieu, plusieurs pierres étaient déjà parties, il était à craindre, si le mauvais temps avait continué, qu'il se démolisse entièrement et que le bout de la jetée tombe à la mer. Le 31, le temps devenu meilleur et la mer plus calme, on est descendu dans le puits où on a constaté que les murs disjoints laissaient l'eau s'infiltrer en grande quantité, les marches en cuivre pour y descendre ont besoin d'être scellées. Le mauvais état des murs en parti démolis en dedans et en dehors et se désagrégeant toujours davantage n'ont pas permis de remettre le flotteur à l'eau parce que à la moindre mer, son fil aurait cassé.

Février 1900 :

Le 1^{er}, deux ouvriers et un contre maître chef des travaux hydrauliques sont arrivés au fort par la canonnière de service pour se rendre compte des dégâts occasionnés par la tempête du 29 décembre 1899. Ils ont pris des dispositions pour pouvoir les réparer à la grande marée de mars, la couverture du puits ainsi que l'échelle des marées seront mis en place et il est probable s'il ne survient pas de mauvais temps que le marégraphe pourra fonctionner à la fin de la maline, c'est-à-dire, le 5 ou 6 mars prochain.

Mars 1900 :

Aucun ouvrier n'est venu travailler au puits du marégraphe pendant les grandes marées du 1^{er} au 6 mars.

Avril 1900 :

Aucun ouvrier n'est venu travailler au puits du marégraphe pendant les grandes marées du 29 mars au 3 avril.

Mai 1900 :

Aucun ouvrier n'est venu travailler au puits du marégraphe pendant les grandes marées du 28 avril au 2 mai.

Juin 1900 :

Le 26 juin, 2 ouvriers et un surveillant technique des travaux hydrauliques sont arrivés au Fort par la canonnière de service, aussitôt le bas d'eau ils se sont mis à boucher autant que possible les joints des murailles du puits du marégraphe en dehors et en dedans, ils ont continué à travailler chaque basse mer de jour et de nuit. Ils ont mis en place la couverture du puits ainsi que l'échelle des marées, et sont retournés à Rochefort par la canonnière du 3 juillet. Quoique les travaux de réparation du puits ne soient pas terminés, les principales voies d'eau étant fermées et la belle saison aidant, j'ai remis le flotteur à l'eau et le marégraphe à recommencer à fonctionner le 2 juillet à midi. La réparation du puits sera continuée et achevée aux grandes marées d'août et de septembre prochain.

Août 1900 :

Le 7, les ouvriers des Travaux hydrauliques, accompagnés d'un surveillant technique, sont arrivés au Fort. Le lendemain, aussitôt basse mer, des maçons et des manœuvres se sont mis à réparer le puits du marégraphe et ont continué ce travail, chaque basse mer de jour et de nuit jusqu'au 18 août inclus où il a été terminé. A partir du 16, le marégraphe s'est arrêté plusieurs fois, les poulies où passe le fil du flotteur étant couvertes de sable et de poussière de pierre ; à la fin des travaux on les a nettoyées avec soin et huilées, depuis le 20 le marégraphe a toujours bien fonctionné.

Mars 1901 :

Le 26, le puits du marégraphe a besoin d'être curé ? Dans les basses mers des 22, 23 et 24, le flotteur est resté à sec 0m10 à 0m20 environ au dessus du bas d'eau, ces basses mers ne sont donc qu'approximatives. Le puits réparé l'année dernière se démolit de nouveau, deux pierres se sont détachées, plusieurs autres se désagrègent et menacent de tomber également à la mer au premier mauvais temps. Une note a été envoyée, à ce sujet, à la Direction des Travaux hydrauliques.

Août 1901 :

Le 14, l'horloger des Travaux hydrauliques a réparé et nettoyé le marégraphe qui a été arrêté à 6h du matin et remis en marche le 16 à midi, après avoir changé la feuille. Il reste encore à réparer la poulie placée au dessus du puits, qui conduit le flotteur, cette réparation nécessite son envoi à Rochefort. Il y a aussi le puits à curer. Ces travaux seront effectués à la grande marée de la fin du mois de septembre.

Septembre 1901 :

Du 30 à 9h du matin au 5 octobre, le marégraphe a été arrêté pour curer le puits, y effectuer divers travaux et réparer la poulie du fil du flotteur au dessus du puits. Les 6 et 7 octobre, l'état de la mer grosse n'ayant pas permis de pouvoir régler le marégraphe, le crayon n'a été mis en marche que le 8 à midi.

Octobre 1902 :

Les 20, 21 et 22, quatre ouvriers de la Direction des Travaux hydrauliques ont rejointoyé les pierres du puits du marégraphe et en ont remplacé deux qui étaient tombées à la mer.

Décembre 1902 :

A partir du 13 décembre, le puits du marégraphe en très mauvais état, ne donne plus les basses mers au dessous de 1m60, aujourd'hui, 15 janvier 1903, le flotteur ne descend pas au dessous de 1m65. Toutes les heures et hauteurs des basses mers précédées d'une astérisque sont fausses.

Février 1903 :

Le puits du marégraphe est en partie démoli; à l'extérieur plusieurs pierres détachées sont tombées à la mer. Toutes les heures et hauteurs des basses mers précédées d'un astérisque sont fausses.

Avril 1903 :

Marégraphe en réparation du 1^{er} au 30 avril 1903.

Mai 1903 :

Pas d'échelle de marée pendant le mois de mai. Le flotteur ne descend qu'à 1m69 du fonds du puits.

Juin 1903 :

Pas d'échelle de marée pendant le mois de juin. Le flotteur ne descend qu'à 1m69 du fonds du puits.

Juillet 1903 :

Pas d'échelle de marée pendant le mois de juillet. Le flotteur ne descend qu'à 1m30 du fonds du puits.

Août 1903 :

Le flotteur ne descend qu'à 1m65 du fonds du puits.

Janvier 1904 :

Les 13, 14 et 15, l'appareil Chazallon aurait besoin d'être réparé les huiles étant complètement gommées. De trois heures à sept heures du matin, le flotteur ayant resté suspendu pendant ces quatre heures, a tracé sur la feuille des courbes trois angles de 28 centimètres chacun, cet arrêt du flotteur se produit très souvent et principalement pendant les marées de nuit. Le 14, l'échelle des marées a été emportée par la mer à midi vingt minutes du soir. Pendant les mauvais temps des mois de décembre 1903 et janvier 1904, la digue Est a été fortement endommagée par la mer très grosse, on remarque en effet un trou béant de 3 mètres 25 à 30 centimètres de longueur, de 2mètres 15 centimètres de hauteur et de 1 mètre 10 centimètre de profondeur ce qui fait (la brèche étant en face du puits du flotteur) rentrer la muraille en dedans du puits et produit des arrêts continus. Si le fil attaché au flotteur venait à se rompre il est même impossible de descendre dans le puit pour le réparer, sans risquer de graves accidents. Les barreaux de l'échelle y correspondant étant descellés du mur.

Depuis février 1904 : pas d'échelle de marée

Février 1904 :

L'éboulement de la digue Est continue, la brèche faite par la mer s'agrandissant de plus en plus, tend à faire rentrer le reste de la maçonnerie en dedans du puits, ce qui pourrait, au prochain mauvais temps, faire complètement écrouler la dite digue et entrainer le flotteur dans sa chute. L'appareil Chazallon s'arrête très souvent aurait besoin urgent d'être complètement nettoyé.

Mars 1904 :

Le flotteur ne descend qu'à 1m65 du fonds du puits.

Septembre 1904 :

Le 8, vers trois heures du matin, un éboulement de pierre tombant dans l'intérieur du puits a fait rompre les fils conducteur du flotteur et du charriot, ces fils n'ont été remplacés que le 10 à 3 heures de l'après midi pour cause de départ à Rochefort pour accompagner les courbes des mois précédents. Les courbes du 8 au 10 ont été rectifiées approximativement ayant reçu les ordres de Monsieur le Directeur de l'Observatoire qu'après rectification faites.

Octobre 1904 :

Du 1er au 11, pas d'échelle des marées. Le 10, à 8 heures 45 minutes du matin, arrêt du flotteur pour réparation intérieure du puits, par les Travaux Hydrauliques. Le 11, à 6 heures 25 minutes du matin, démontage complet de l'appareil Chazallon pour nettoyage, mise en place de l'échelle des marées à 12 heures 17 minutes du soir. Le 15, remontage de l'appareil Chazallon et mise en marche du marégraphe.

Novembre 1904 :

Le flotteur ne descend qu'à 1m78 du fonds du puits.

Décembre 1904 :

Du 9 au 10, l'échelle des marées a été emportée par la mer pendant la nuit.

Janvier 1905 :

Du 18 au 19, les fils du flotteur et du guide crayon ont été rompus pendant la nuit, n'ayant pas d'échelle de marées, ai réglé appareil Chazallon d'après l'annuaire, après réparations faites.

Juin 1906 => Juin 1907 :

Retirer le flotteur du puit pour réparation de la jetée et du puit qui sont en très mauvais état.

Décembre 1907 :

Nettoyage de l'appareil marégraphique et des instruments scientifiques après désinfection des locaux par suite de très longue maladie suivie de mort de l'observateur Monneraud.

Janvier 1908 :

Du 16 au 31 le puits a rempli très irrégulièrement. (Note perso de TG : gros problèmes de puits...)

1908 et 1909 : Très mauvais fonctionnement du puits.

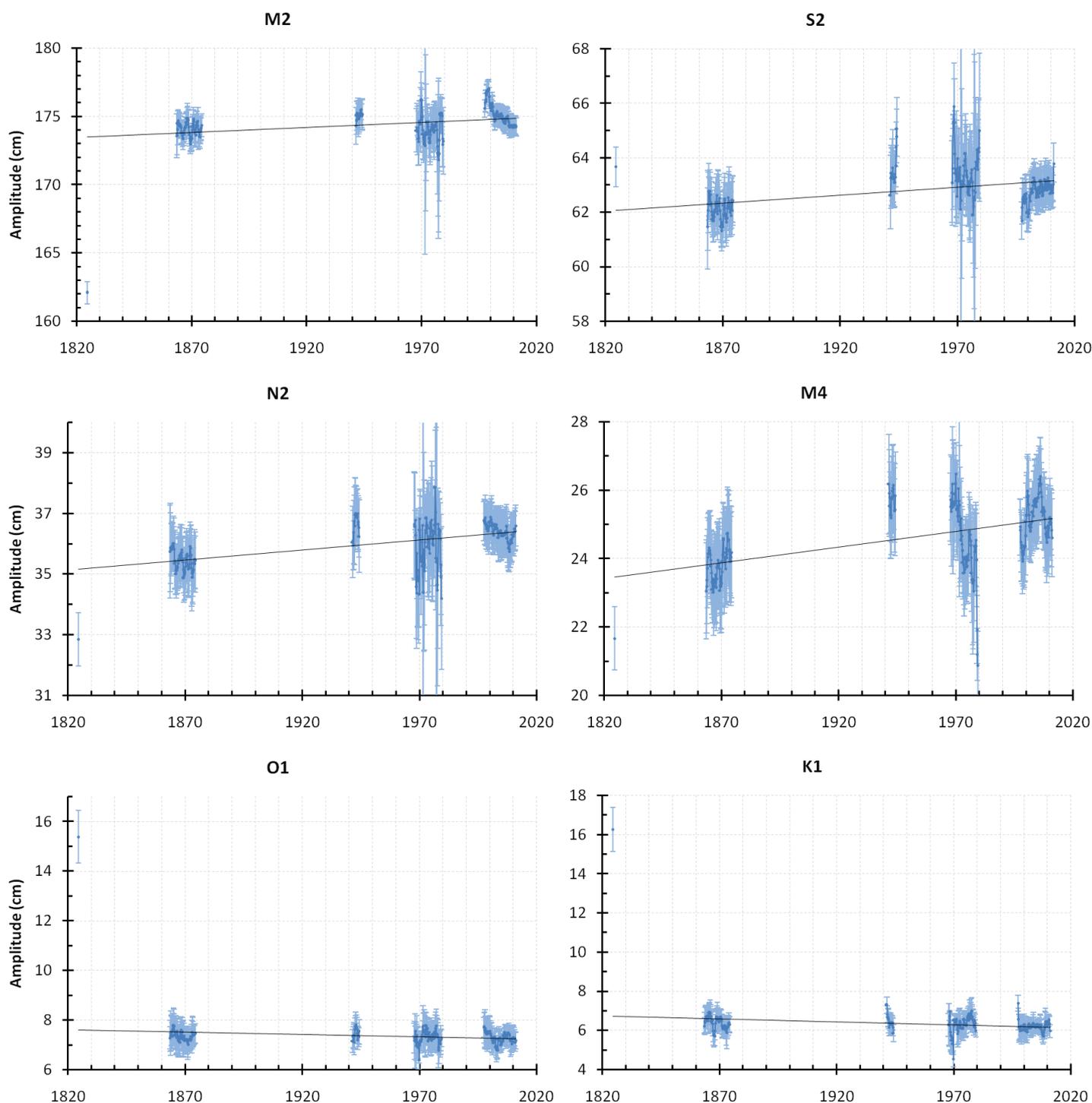
Mai 1909 :

Le 16, enlevée la carte, marégraphe supprimé.

Annexe G : Evolution à long-terme des ondes de marée

Complément du paragraphe VI.1.1.4. Evolution à long terme

La Rochelle (1824-2011) : amplitudes

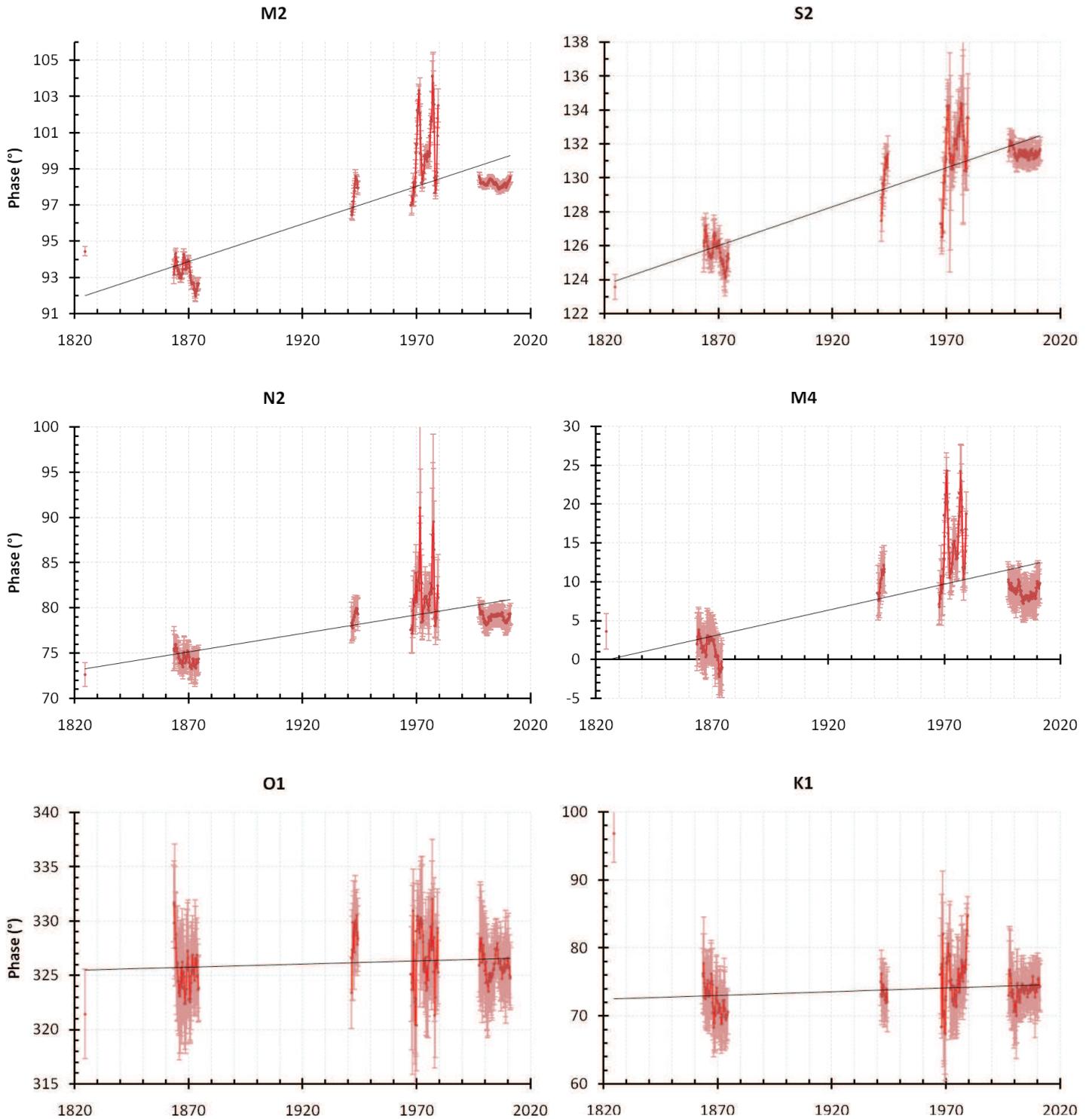


Amplitudes des ondes M2, S2, N2, M4, O1 et K1 pour la série La Rochelle - La Pallice sur la période 1824-2011

	M2	S2	N2	M4	O1	K1
Tendance (mm/an)	+ 0,15	+ 0,05	+ 0,08	+ 0,10	- 0,07	- 0,10
Ecart-type (mm/an)	0,05	0,02	0,01	0,04	0,03	0,04

Tendances et écarts-type de l'évolution des amplitudes des ondes pour la série La Rochelle - La Pallice (1824-2011)

La Rochelle (1824-2011) : phases

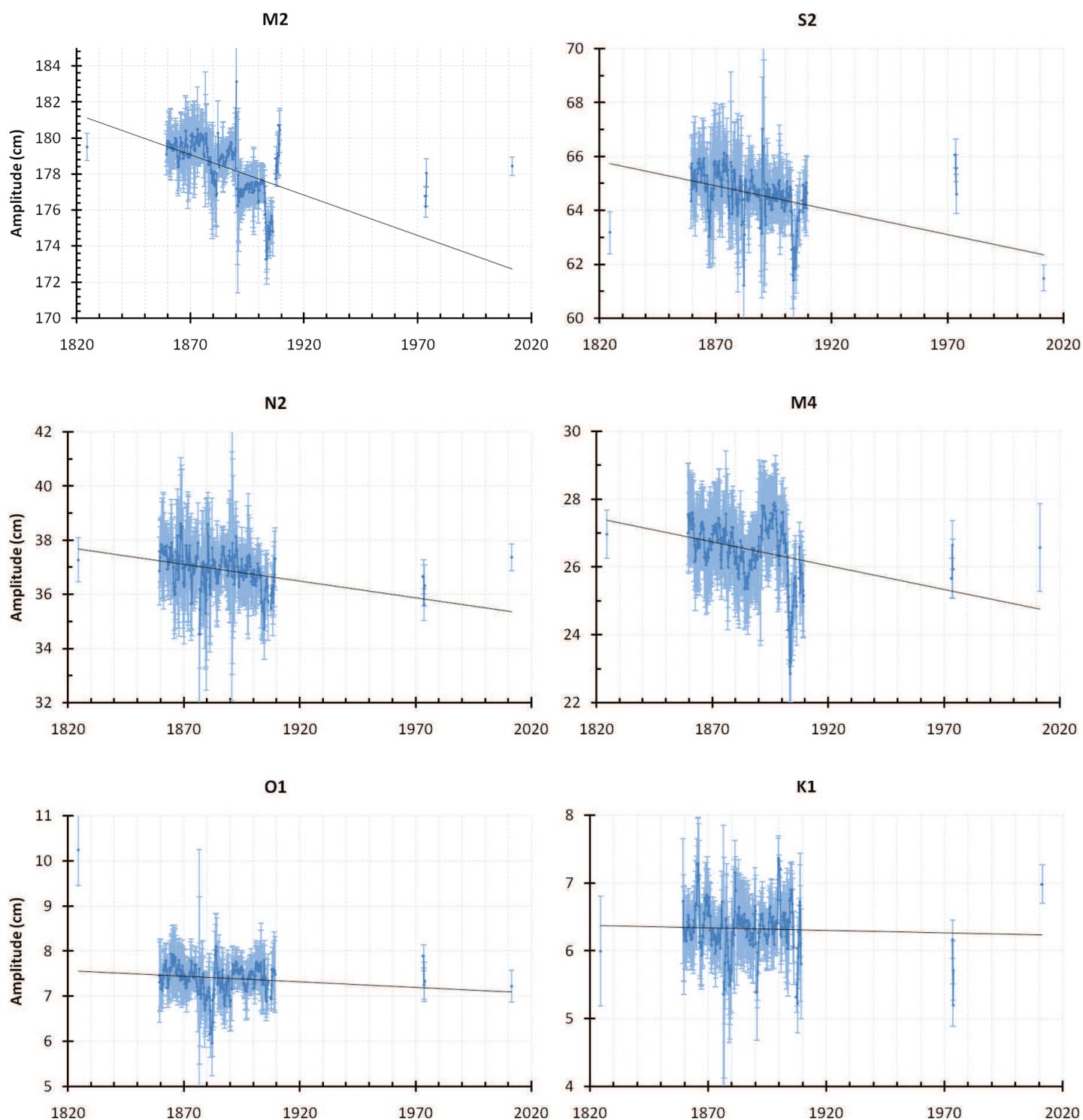


Phases des ondes M2, S2, N2, M4, O1 et K1 pour la série La Rochelle - La Pallice sur la période 1824-2011

	M2	S2	N2	M4	O1	K1
Tendance (mm/an)	+ 0,040	+ 0,046	+ 0,041	+ 0,06	+ 0,008	0,00
Ecart-type (mm/an)	0,004	0,003	0,005	0,01	0,005	0,01

Tendances et écarts-type de l'évolution des phases des ondes pour la série La Rochelle - La Pallice (1824-2011)

Aix-Enet-Boyard (1824-2011) : amplitudes

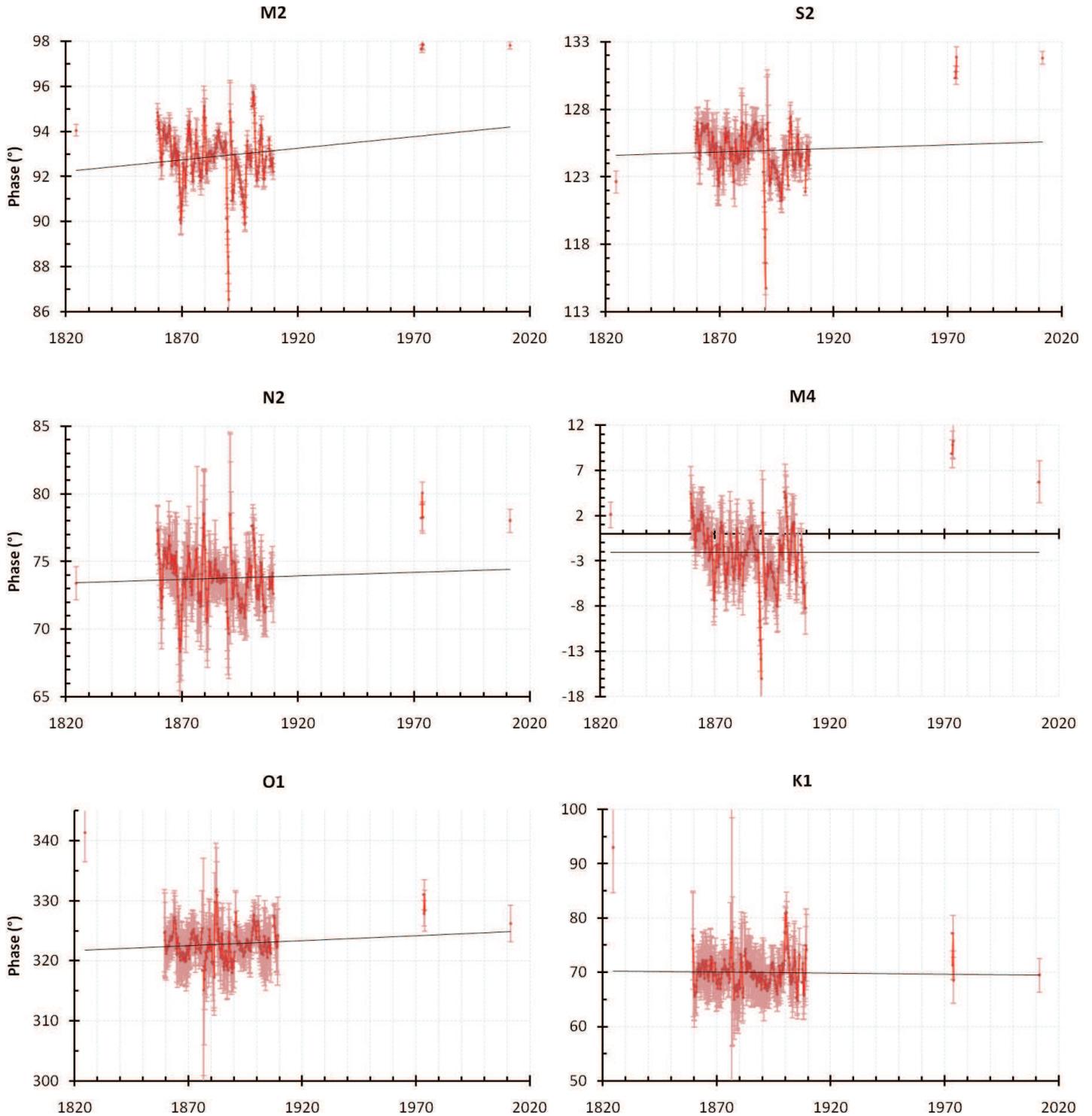


Amplitudes des ondes M2, S2, N2, M4, O1 et K1 pour la série Aix-Enet-Boyard sur la période 1824-2011

	M2	S2	N2	M4	O1	K1
Tendance (mm/an)	- 0,24	- 0,14	- 0,06	- 0,08	- 0,05	+ 0,01
Ecart-type (mm/an)	0,07	0,04	0,03	0,04	0,02	0,02

Tendances et écarts-type de l'évolution des amplitudes des ondes pour la série Aix-Enet-Boyard (1824-2011)

Aix-Enet-Boyard (1824-2011) : phases

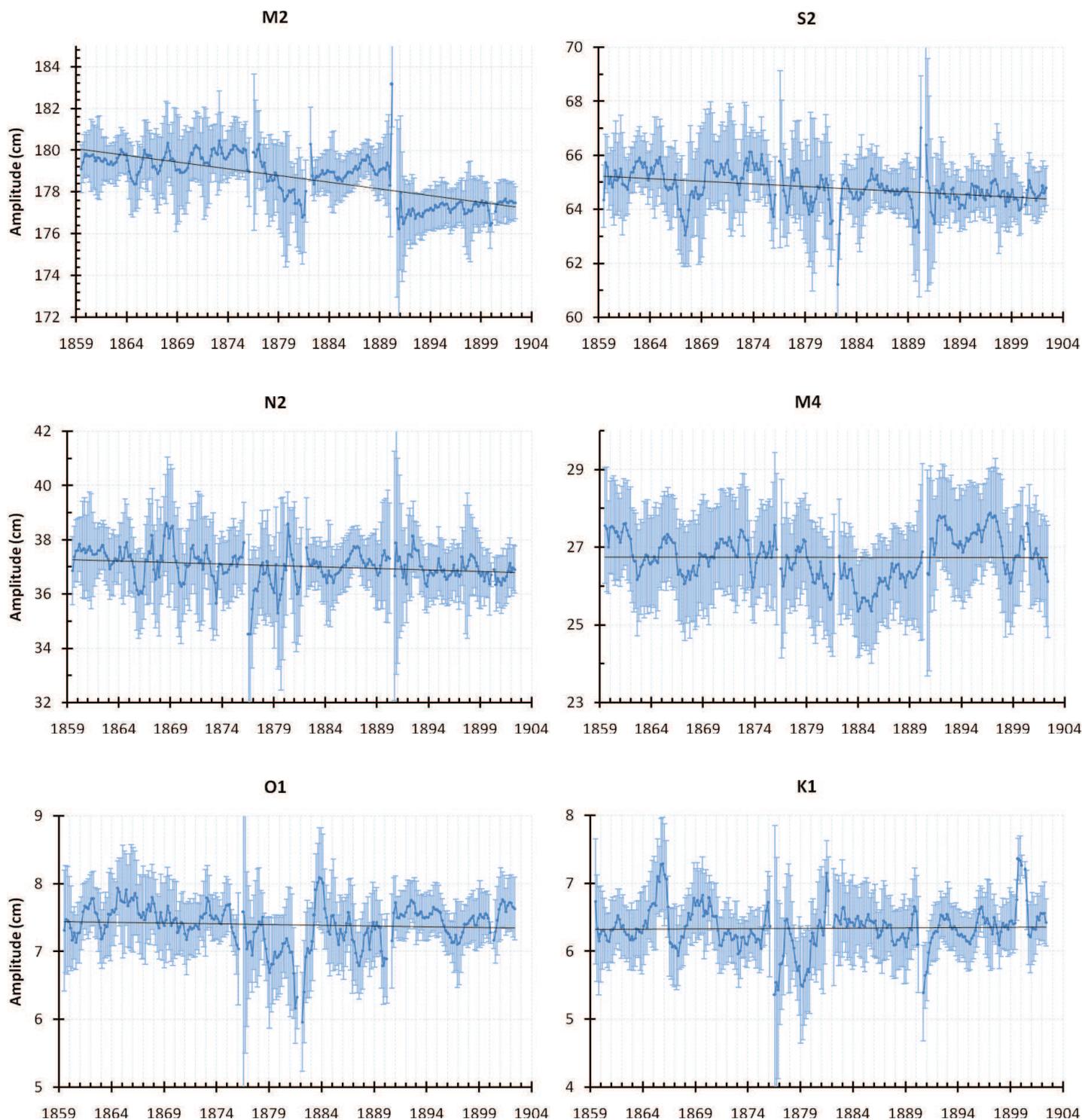


Phases des ondes M2, S2, N2, M4, O1 et K1 pour la série Aix-Enet-Boyard sur la période 1824-2011

	M2	S2	N2	M4	O1	K1
Tendance (°/an)	+ 0,021	+ 0,030	+ 0,019	+ 0,03	0,00	- 0,03
Ecart-type (°/an)	0,006	0,008	0,008	0,02	0,02	0,02

Tendances et écarts-type de l'évolution des phases des ondes pour la série Aix-Enet-Boyard (1824-2011)

Aix-Enet-Boyard (1859-1902) : amplitudes

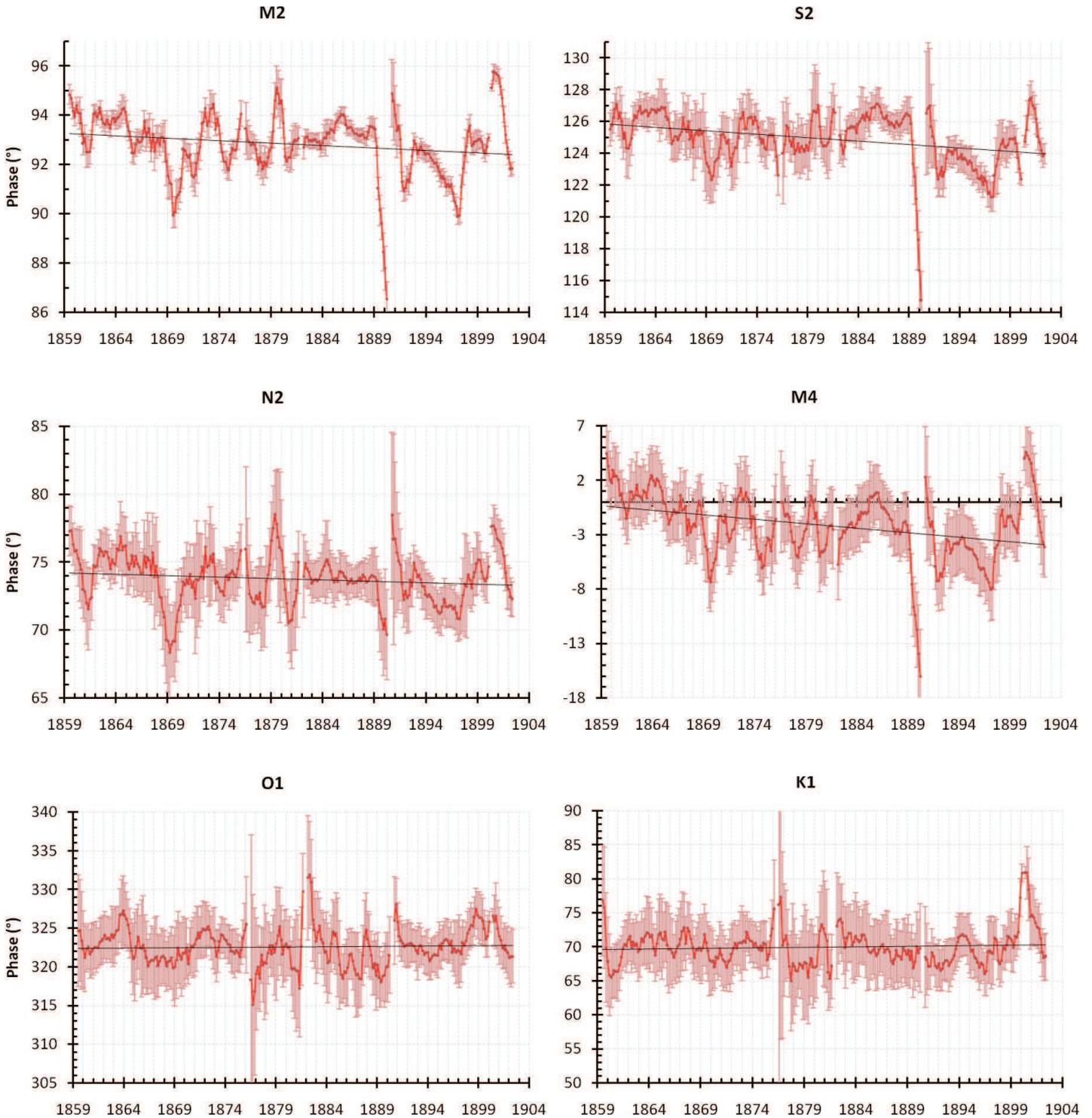


Amplitudes des ondes M2, S2, N2, M4, O1 et K1 pour la série Enet-Boyard sur la période 1859-1902

	M2	S2	N2	M4	O1	K1
Tendance (mm/an)	- 0,64	- 0,20	- 0,11	0,00	- 0,03	+ 0,01
Ecart-type (mm/an)	0,08	0,05	0,05	0,06	0,03	0,03

Tendances et écarts-type de l'évolution des amplitudes des ondes pour la série Enet-Boyard (1859-1902)

Aix-Enet-Boyard (1859-1902) : phases



Phases des ondes M2, S2, N2, M4, O1 et K1 pour la série Enet-Boyard sur la période 1859-1902

	M2	S2	N2	M4	O1	K1
Tendance (°/an)	- 0,02	- 0,05	- 0,02	- 0,09	+ 0,01	+ 0,02
Ecart-type (°/an)	0,01	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03

Tendances et écarts-type de l'évolution des phases des ondes pour la série Enet-Boyard (1859-1902)

Annexe H : Exemple de fichier de constantes harmoniques calculées par *mas*

Contenu du fichier « *Fort_Boyard.har* », résultat de l'analyse harmonique réalisé par *mas* à partir de l'action 1 3 5 13 « *Analyse harmonique avec la liste donnée (listea)* ». Le fichier d'entrée contient un an de mesures de hauteurs d'eau enregistrées au fort Boyard (année 1887, 2.3% de lacunes).

```

1 752 +45595700 -001124800+010Fort_Boyard          1887 10      355      0 9
Niv Moy  376.47  0.00 ZZZZZZZ
Sa       1.42297.56 ZAZZZZZ
Ssa      1.97131.60 ZZZZZZZ
Sta      2.06127.34 ZCZCZZY
MSm      2.68223.31 ZAXAZZZ   76  ZAXAYZB   63  ZAXAAZB
Mm       1.98293.19 ZAZYZZZ   65  ZAZYAZB   53  ZAZAZZB
        1.16143.69 ZABYZZB
Msf      0.37303.78 ZBXZZZZ
Mf       2.79296.56 ZBZZZZZ   414  ZBZZAZZ   43  ZBZXZZZ   38  ZBZZBZZ
MStm     2.32183.10 ZCXAZZZ   393  ZCXAAZZ
Mfm      0.10 73.38 ZCZYZZZ
MSqm     0.98305.46 ZDXZZZZ   417  ZDXZAZZ
        0.26276.93 AVZCZZY
        0.26169.08 AVBAZZY
        0.17356.32 AVDYZZY
2Q1      0.08185.59 AWZBZZY
SIGMA1   0.56218.97 AWBZZZY   191  AWBZYZY
        0.36206.68 AWCZZZY
Q1       2.20262.85 AXZAZZY   188  AXZAYZY
RH01     0.53282.72 AXBYZZY   190  AXBYZY
        0.29289.82 AXCZYZY
        0.07 98.21 AYXBZZA
        0.22307.41 AYYZZAA
O1       6.71320.27 AYZZZZY   189  AYZZYZY
        1.45308.40 AYAZZZY
MP1      0.37 17.69 AYBZZZA   224  AYBZAZY
NO1     1.06346.25 AZZAZZA   361  AZZZZZA   199  AZZAAZA   68  AZZZYZA
KHI1     0.12 62.16 AZBYZZA
PI1      0.17 96.52 AAWZZAY
P1       2.21 60.02 AAXZZZY
S1       0.70 80.40 AAYZZZZ
K1       6.35 68.05 AAZZZZA   136  AAZZAZA   20  AAZZYZY
PSI1     0.34128.83 AAZZZZA
PHI1     0.14 11.78 AABZZZA
THETA1   0.32138.96 ABXAZZA   193  ABXAAZA
J1       0.44107.13 ABZYZZA   199  ABZYAZA
SO1      0.41 69.03 ACXZZZA   204  ACXZAZA
OO1      0.37199.79 ACZZZZA   636  ACZZAZA   148  ACZXZZA
        0.10190.26 ADXYZZA   750  ADXAZZA
KQ1      0.07351.35 ADZYZZA
2MN2S2   0.06235.73 BUDAZZZ
2NS2     0.23 44.54 BVBBZZZ
OQ2      0.37 38.98 BWZAZZZ
MNS2     1.75 56.03 BWBAZZZ   134  BWBAYZZ
        0.20112.87 BWCAZZY
MNK2S2   0.32 98.72 BWDAZZZ
2MS2K2   0.19229.20 BXXZZZZ
2N2      5.25 54.49 BXZBZZZ
MU2 2MS2 6.46 62.48 BXBZZZZ
        0.44 84.04 BXCZZZY
        0.21 45.37 BYXCZZB
        0.85 96.16 BYYAZAB   467  BYZYXZB
N2       37.37 73.55 BYZAZZZ   37  BYZAYZB
        0.67 83.98 BYAAZYZ   750  BYBYZB   625  BYAZZZB

```

NU2	7.28 77.12	BYBYZZZ						
	0.36 86.94	BYCYZYZ						
2KN2S2	0.67121.34	BYDAZZZ						
gma2	0.59345.86	BZXBZZB						
M(SK)2	1.88114.85	BZYZZAB						
M2	179.54 93.04	BZZZZZZ	37	BZZZYZB				
M(KS)2	1.73133.29	BZAZZZY						
MKS2	0.23283.86	BZBZZZZ						
2KM2S2	0.32 63.85	BZDZZZZ						
LBD2	1.81 73.04	BAXAZZZ						
2SN(MK)2	0.30259.44	BAVAZZZ						
L2 2MN2	4.01 84.60	BAZYZZB	35	BAZYYZZ				
	0.53169.13	BABYZZZ						
2SK2	0.23112.13	BBVZZZZ						
T2	3.43114.84	BBWZZAZ						
S2	64.76125.55	BBXZZZZ	2	BBXZYZZ				
R2	0.34192.15	BBYZZYB						
K2	18.33124.91	BBZZZZZ	297	BBZZAZZ	32	BBZZBZZ	13	BBZZYZB
	0.59109.97	BBAZZYZ						
	0.29166.09	BBBZZZZ						
MSnu2	0.35256.74	BCVAZZZ						
MSN2	0.62258.49	BCXYZZZ						
KJ2	0.80170.00	BCZYZZZ	438	BCZYAZZ				
2KM(SN)2	0.22302.45	BCBYZZZ						
	0.12276.97	BDUZZZA						
2SM2	0.46321.65	BDVZZZZ						
	0.18293.92	BDWZZZA						
SKM2	0.32271.48	BDXZZZZ	268	BDXZAZZ				
	0.18139.95	BDZZZZZ	571	BDZZAZZ				
2SNU2	0.24215.05	BETAZZZ						
2SN2	0.20 30.85	BEVZZZZ						
SKN2	0.11269.22	BEXYZZZ						
3S2M2	0.30103.78	BFTZZZZ						
2SK2M2	0.08214.37	BFVZZZZ						
	0.06 84.07	CVBAZZY						
	0.20204.37	CWZBZZY						
	0.14234.23	CWBZZZY						
MQ3	0.38239.91	CXZAZZY	149	CXZAYZY				
	0.18243.34	CXBYZZY						
	0.06227.24	CYXBZZY						
2MK3	1.02244.73	CYZZZZY	149	CYZZYZY	51	CYZBZZA		
2MS3	0.45211.84	CYAZZZB						
2MP3	0.18 54.65	CYBZZZA						
	0.20180.64	CZXAZZA						
M3	3.42150.16	CZZZZZB	56	CZZZYZZ				
	0.15 79.37	CZBYZZZ						
SO3	0.65 11.42	CAXZZZY						
MS3	1.48 46.30	CAYZZZB						
MK3	0.45300.26	CAZZZZA	119	CAZZAZA				
	0.20274.99	CAAZZZA						
	0.08234.34	CABZZZA						
2MQ3	0.31115.32	CBZYZZA	636	CBZAZZA	394	CBZZZZB	364	CBZAAZA
SP3	1.21 33.11	CCVZZZY						
S3	0.39 50.71	CCWZZZB						
SK3	1.12 34.40	CCXZZZA	121	CCXZAZA				
K3	0.33 4.43	CCZZZZA	452	CCZZAZA				
	0.11 96.28	CDXYZZA						
	0.15180.81	CDZYZZA	550	CDZYAZA				
2SO3	0.11214.83	CEVZZZA						
	0.17331.81	DVBBZZZ						
4M2S4	0.11 9.76	DVDZZZZ						
3NM4	0.36104.28	DWZCZZZ						
2MNS4	1.39 59.32	DWBAZZZ						
2MnuS4	0.70 88.17	DWDYZZZ						
N4	1.99254.49	DXZBZZZ						
3MS4	1.74 97.57	DXBZZZZ						
MN4	11.79309.49	DYZAZZZ	73	DYZAYZB				
Mnu4	3.02316.52	DYBYZZZ						
	1.45143.49	DZXBZZZ						
MA4	0.74257.06	DZYZZZZ						

M4	26.63357.63	DZZZZZZ	74	DZZZZYZB		
2MRS4	0.56 25.96	DZAZZZY				
2MKS4	0.90176.07	DZBZZZZ				
SN4	1.55 87.90	DAXAZZZ				
3MN4	2.45194.35	DAZYZZZ				
2SMK4	0.19218.85	DBVZZZZ				
MT4	0.14114.78	DBWZZAZ				
MS4	10.09 87.71	DBXZZZZ	34	DBXZZYZB		
MK4	2.57 90.11	DBZZZZZ	295	DBZZAZZ	48	DBZZYZB
2SNM4	0.66302.37	DCVAZZZ				
2MSN4	1.41286.02	DCXYZZZ				
2MKN4	0.24288.50	DCZYZZZ				
ST4	0.89332.40	DDUZZAZ				
S4	0.83242.86	DDVZZZZ				
SK4	0.84250.11	DDXZZZZ	299	DDXZAZZ		
K4	0.42304.13	DDZZZZZ	650	DDZZAZZ		
	0.09194.34	EVZCZZY				
	0.16 73.63	EVBAZZY				
	0.17 95.35	EWZBZZY				
2MQ5	0.27110.82	EXZAZZY				
	0.09143.59	EXBYZZY				
	0.12281.14	EYXBZZY				
3MK5	0.55145.96	EYZZZZY	123	EYZZBZZA	110	EYZZYZY
3MP5	0.15305.59	EYBZZZA				
NSO5	0.20217.25	EZXAZZY				
M5	0.28196.83	EZZAZZA				
	0.12281.07	EAWZZAY				
2MP5	0.55256.44	EAXZZZY				
2MK5	0.75239.06	EAZZZZA	146	EAZZZYZY	99	EAZZAZA
	0.05291.86	EAAZZYA				
	0.14225.57	EBVAZZY				
	0.15340.02	EBXAZZA				
	0.16 48.15	EBZAZZA	477	EBZAAZA	442	EBZYZZA
MSP5	0.23 10.39	ECVZZZY				
MSK5	0.12288.59	ECXZZZA				
	0.13 73.61	ECZZZZA	435	ECZZAZA		
	0.20 61.68	EDXYZZA				
	0.13 76.77	EDZYZZA	571	EDZYAZA		
2SP5	0.09297.25	EESZZZY				
2SK5	0.53152.60	EEVZZZA				
(SK) K5	0.09171.87	EEXZZZA				
2 (MN) S6	0.16 11.93	FVBBZZZ				
5M2S6	0.17262.41	FVDZZZZ				
N6	0.09 89.29	FWZCZZZ				
3MNS6	0.74 53.32	FWBAZZZ				
3MnuS6	0.23 28.75	FWDYZZZ				
2NM6	0.45251.01	FXZBZZZ				
4MS6	0.68 86.03	FXBZZZZ	113	FXBZZYZB		
2MSNK6	0.13 75.73	FYXAZZZ				
2MN6	1.49281.59	FYZAZZZ	109	FYZAYZB		
2Mnu6	0.40293.06	FYBYZZZ	128	FYBAZZZ		
2NS6	0.34166.47	FZXBZZZ				
MA6	0.25191.04	FZYZZZZ				
M6	2.58296.96	FZZZZZZ	108	FZZZZYZB		
3MKS6	0.07208.47	FZBZZZZ				
MTN6	0.08212.89	FAWAZAZ				
MSN6	0.26294.45	FAXAZZZ				
4MN6	0.39139.24	FAZYZZZ				
MKnu6	0.16337.31	FABYZZZ				
	0.10145.49	FBVBZZZ				
2MT6	0.31307.92	FBWZZAZ				
2MS6	2.37329.75	FBXZZZZ	72	FBXZZYZB		
2MK6	0.73331.80	FBZZZZZ	300	FBZZAZZ		
	0.09 85.62	FBBZZZZ				
2SN6	0.14185.40	FCVAZZZ				
3MTN6	0.15169.93	FCWYZAZ				
3MSN6	0.81198.38	FCXYZZZ				
3MKN6	0.20207.46	FCZYZZZ	400	FCZYAZB		
MST6	0.22234.97	FDUZZAZ				
2SM6	0.58 41.22	FDVZZZZ				

MSK6	0.42	30.27	FDXZZZZ	302	FDXZAZZ
2 (MS) N6	0.09242	0.06	FEVZZZZ		
2MSKN6	0.08257	4.42	FEXYZZZ		
	0.06330	0.20	GVBZZZY		
	0.06111	0.89	GVDYZZY		
	0.10	33.78	GWZBZZY		
	0.09	1.66	GWBZZZY		
3MQ7	0.11	89.36	GXZAZZY		
4MK7	0.05136	0.32	GYZZZZY		
	0.08	64.23	GYAZZYY		
MNSO7	0.08272	0.11	GZXAZZY		
MNKO7	0.14202	0.66	GZZAZZA		
3MS7	0.09228	0.35	GAYZZZB		
3MK7	0.05188	0.44	GAZZZZA		
	0.07357	0.52	GAZZZYA		
	0.09132	0.09	GBVAZZY		
	0.07237	0.82	GBXAZZA		
	0.07277	0.81	GBZAZZA		
MSKO7	0.07122	0.37	GCXZZZA		
	0.10227	0.51	GCZZZZA		
	0.07283	0.87	GDXYZZA		
	0.12	78.38	GDZYAZA		
	0.08306	0.87	GETZZZY		
	0.05248	0.82	GEVZZZA		
	0.10230	0.27	GEXZZZA		
4MNS8	0.09286	0.29	HWBAZZZ		
	0.22294	0.67	HXBZYZZ		
2 (MN) 8	0.25117	0.06	HXZBZZZ		
5MS8	0.21145	0.08	HXBZZZZ		
3MSNK8	0.08246	0.52	HYXAZZZ		
3MN8	0.69166	0.28	HYZAZZZ	142	HYZAYZB
3Mnu8	0.13213	0.77	HYBYZZZ		
	0.06292	0.34	HZXBZZZ		
M8	0.84206	0.69	HZZZZZZ	141	HZZZYZB
	0.06	38.86	HZAZZYZ		
4MKS8	0.11	41.42	HZBZZZZ		
2MSN8	0.44243	0.51	HAXAZZZ		
	0.08288	0.35	HABYZZZ		
2 (NS) 8	0.11	14.46	HBVBZZZ		
3MT8	0.05128	0.19	HBWZZAZ		
3MS8	0.87276	0.53	HBXZZZZ	108	HBXZYZB
3MK8	0.25294	0.07	HBZZZZZ	297	HBZZAZZ
MSNK8	0.14143	0.26	HCXAZZZ		
2 (MS) 8	0.34342	0.50	HDVZZZZ		
2MSK8	0.20352	0.52	HDXZZZZ	303	HDXZAZZ
3M2SN8	0.06201	0.92	HEXYZZZ		
3SM8	0.22	35.13	HFTZZZZ		
2SMK8	0.12	56.85	HFVZZZZ		
4MN10	0.07188	0.05	JYZAZZZ		
3MSN10	0.07205	0.97	JAXAZZZ		
4MS10	0.09229	0.14	JBXZZZZ		
2 (MS) N10	0.06277	0.55	JCVAZZZ		
	0.06313	0.16	JCZYZZZ		
3M2S10	0.09277	0.56	JDVZZZZ		
3MSK10	0.05343	0.23	JDXZZZZ		
2SMKN10	0.06	29.27	JEVAZZZ		
3S2M10	0.05341	0.40	JFTZZZZ		
5MN12	0.10	99.47	LYZAZZZ		

Annexe I : Exemple de fichier de constantes harmoniques calculées par *t_tide*

Résultat de l'analyse harmonique réalisé par *t_tide*. Le fichier d'entrée contient un an de mesures de hauteurs d'eau enregistrées au fort Boyard (année 1887, 2.3% de lacunes).

tidal amplitude and phase with 95% CI estimates

tide	freq	amp	amp_err	pha	pha_err	snr
*SSA	0.0002282	4.5778	3.052	120.91	40.60	2.2
MSM	0.0013098	2.6527	3.353	234.66	67.30	0.63
MM	0.0015122	1.7328	2.763	286.50	101.50	0.39
MSF	0.0028219	0.5553	2.308	284.37	210.69	0.058
MF	0.0030501	2.1015	2.835	321.33	93.55	0.55
ALP1	0.0343966	0.1422	0.336	194.31	148.66	0.18
2Q1	0.0357064	0.0985	0.308	141.60	195.97	0.1
*SIG1	0.0359087	0.6082	0.385	223.72	41.52	2.5
*Q1	0.0372185	2.2309	0.449	265.95	10.93	25
*RHO1	0.0374209	0.5458	0.421	271.34	47.13	1.7
*O1	0.0387307	6.7959	0.417	319.43	3.86	2.7e+002
*TAU1	0.0389588	0.3230	0.300	8.22	51.76	1.2
BET1	0.0400404	0.1686	0.354	180.46	136.60	0.23
*NO1	0.0402686	1.0974	0.293	357.37	17.23	14
CHI1	0.0404710	0.1220	0.298	75.99	155.99	0.17
*P1	0.0415526	2.1719	0.371	58.95	9.28	34
*P1	0.0415526	2.1007	0.373	74.36	9.98	32
*K1	0.0417807	6.3478	0.452	67.29	3.54	2,00E+02
PHI1	0.0420089	0.1068	0.233	55.04	179.52	0.21
THE1	0.0430905	0.2603	0.389	115.74	94.07	0.45
J1	0.0432929	0.3328	0.392	107.45	78.25	0.72
SO1	0.0446027	0.3116	0.364	80.35	83.16	0.73
*OO1	0.0448308	0.4422	0.437	189.21	66.84	1
UPS1	0.0463430	0.1816	0.428	57.11	150.14	0.18
OQ2	0.0759749	0.3660	0.686	32.73	135.18	0.28
*EPS2	0.0761773	1.4949	0.873	47.15	31.51	2.9
*2N2	0.0774871	5.1023	0.868	47.61	10.19	35
*MU2	0.0776895	6.3124	0.877	60.03	7.15	52
*N2	0.0789992	37.3456	0.882	73.80	1.36	1.8e+003
*NU2	0.0792016	7.0883	0.780	77.55	6.75	83
*M2	0.0805114	179.4325	0.890	93.13	0.26	4.1e+004
MKS2	0.0807396	0.3216	0.859	285.15	152.98	0.14
*LDA2	0.0818212	1.7313	0.767	72.47	30.19	5.1
*L2	0.0820236	4.7722	1.040	86.35	11.74	21
*S2	0.0833333	64.7009	0.863	125.55	0.87	5.6e+003
*K2	0.0835615	18.4424	1.066	125.18	3.11	3,00E+02
*K2	0.0835615	17.6084	1.109	147.95	3.91	2.5e+002
MSN2	0.0848455	0.6155	0.686	256.84	77.03	0.81

ETA2	0.0850736	0.8058	1.133	173.40	87.03	0.51
*MO3	0.1192421	1.0085	0.403	248.32	25.60	6.3
*M3	0.1207671	3.4228	0.323	330.27	5.79	1.1e+002
*SO3	0.1220640	0.7185	0.387	16.80	35.44	3.5
*MK3	0.1222921	0.4958	0.343	297.01	45.90	2.1
*SK3	0.1251141	1.0417	0.406	31.84	21.72	6.6
*MN4	0.1595106	12.1334	1.148	309.42	5.28	1.1e+002
*M4	0.1610228	26.4776	1.030	357.91	2.28	6.6e+002
*SN4	0.1623326	1.5891	1.147	99.96	44.22	1.9
*MS4	0.1638447	10.1063	1.129	87.71	6.59	80
*MK4	0.1640729	2.6608	1.488	93.17	29.99	3.2
S4	0.1666667	0.7970	1.005	241.56	85.87	0.63
SK4	0.1668948	0.8318	1.181	257.57	96.52	0.5
*2MK5	0.2028035	0.7627	0.317	236.42	22.07	5.8
*2SK5	0.2084474	0.5725	0.321	145.03	30.15	3.2
*2MN6	0.2400221	1.5389	0.318	281.28	13.10	23
*M6	0.2415342	2.5713	0.338	296.03	7.19	58
*2MS6	0.2443561	2.3505	0.399	330.63	8.63	35
*2MK6	0.2445843	0.6960	0.365	327.17	32.09	3.6
*2SM6	0.2471781	0.6238	0.318	41.50	33.77	3.9
MSK6	0.2474062	0.3261	0.377	19.21	73.02	0.75
3MK7	0.2833149	0.0586	0.109	206.97	132.76	0.29
*M8	0.3220456	0.9037	0.100	207.58	6.14	82
M10	0.4025570	0.0350	0.069	200.66	134.67	0.25

Evolution des composantes du niveau marin à partir d'observations de marégraphie effectuées depuis la fin du 18^e siècle en Charente-Maritime

Les estimations de la remontée générale du niveau de la mer, de l'ordre de 17 ± 2 cm sur le siècle dernier, masquent une réalité très variable d'une région à l'autre. Qu'en est-il du littoral charentais ? Des séries temporelles de plus de 40-50 ans sont souvent indispensables pour tirer des tendances fiables à long terme sur les composantes du niveau marin : niveau moyen de la mer, ondes de marée et effets météorologiques. Or, de nombreux lots de mesures marégraphiques du littoral charentais « sommeillaient » dans les centres d'archive français, i.e. : La Rochelle-Vieux port (1775-1892), La Rochelle-La Pallice (1885-auj.), île d'Aix (1824-auj.), fort Enet (1859-1873), fort Boyard (1873-1909) et Cordouan (1812-1994). Les objectifs de nos travaux de recherche étaient multiples : inventorier, sauvegarder et numériser des lots de mesures historiques du niveau marin, puis construire des séries temporelles recomposées à partir de ces lots de mesures hétérogènes, temporellement et spatialement, et enfin les exploiter pour mieux décrire et comprendre l'évolution à long terme du niveau de la mer. La qualité des trois séries construites (La Rochelle : 1775-auj. ; Aix-Enet-Boyard : 1824-auj. ; et Cordouan : 1812-1994) a ensuite été éprouvée en détail afin d'évaluer le niveau de précision de notre reconstruction. A partir de ces séries inédites, nous avons pu étudier l'évolution des composantes du niveau marin. Suite à ces travaux, nous fournissons un inventaire le plus exhaustif possible détaillant les mesures de 25 observatoires de Charente-Maritime, de 1775 à aujourd'hui. Les données des séries temporelles ainsi que des éléments permettant d'apprécier leur qualité seront bientôt disponibles en ligne sur REFMAR (refmar.shom.fr), SONEL (www.sonel.org) et au PSMSL (www.psmsl.org). Nos résultats positifs nous ont permis de reconstruire une série encore plus globale, celle du pertuis d'Antioche, à partir des moyennes mensuelles du niveau marin des séries de La Rochelle et d'Aix-Enet-Boyard. Parmi les résultats marquants obtenus, le niveau moyen de la mer s'est élevé de $+1,37 \pm 0,08$ mm/an dans le pertuis d'Antioche sur la période 1860-2010. Ce résultat est cohérent avec Liverpool ($+1,2 \pm 0,1$ mm/an sur la période 1858-1997 [Woodworth, 1999a]) et avec les récents résultats suggérant que l'élévation du niveau marin sur les côtes atlantiques européennes est moins importante qu'au niveau mondial ($+1,7 \pm 0,3$ mm/an sur la période 1870-2004 [Church & White, 2006]).

Mots clés : niveau marin, marée, surcotes, marégraphes, nivellement, données historiques, Charente-Maritime

Changes in sea level components from tide gauge data since the end of the 18th century along the Charente-Maritime French Atlantic coast

Global sea level rise, which is estimated at 17 ± 2 cm over the last century, does not reflect the differences of the sea level evolution between places across the world. What is the situation along the Charente-Maritime French Atlantic coast? Time series covering a period of at least 40-50 years are vital to establish reliable long-term trends of sea level components: mean sea level, tidal constituents and meteorological effects. Many tide gauge data sets of the Charente-Maritime coast have recently been rediscovered in archives: La Rochelle-Vieux port (1775-1892), La Rochelle-La Pallice (1885-today), île d'Aix (1824-today), fort Enet (1859-1873), fort Boyard (1873-1909) and Cordouan (1812-1994). The aims of this thesis were firstly to inventory, to rescue and to digitize historical sea level data sets. Secondly, those data sets were put back together in order to construct continuous time series, which have been analysed and led to a better description of long-term sea level changes. In this way, three time series were constructed (La Rochelle: 1775-today; Aix-Enet-Boyard: 1824-today; and Cordouan: 1812-1994) and have been deeply examined to assess the construction validity and quality. From these new time series, we could estimate changes of sea level components. Thanks to this research work, we have been able to provide an inventory as exhaustive as possible, with detailed measurements of twenty five Charente-Maritime's stations from 1775 to nowadays. All those data will be soon available on REFMAR (refmar.shom.fr), SONEL (www.sonel.org) and PSMSL (www.psmsl.org) websites. From those positive results, we have been able to reconstruct a more global time series (Pertuis d'Antioche) from the monthly mean sea levels of La Rochelle and Aix-Enet-Boyard. Among our results, we can highlight that the mean sea level trend on Pertuis d'Antioche is estimated at $+1.37 \pm 0.08$ mm/year, from 1860 to 2010. This result is consistent with Liverpool's trend ($+1.2 \pm 0.1$ mm/year from 1858 to 1997 [Woodworth, 1999a]) and also with recent results suggesting that sea level rise along the European Atlantic coasts is slower than global sea level rise ($+1.7 \pm 0.3$ mm/year from 1870 to 2004 [Church & White, 2006]).

Keywords: sea level, tide, storm surges, tide gauges, leveling, historical observations, Charente-Maritime (France)



UMR 6250 LIENSs (Littoral, Environnement et Sociétés)
2 rue Olympe de Gouges, 17000 LA ROCHELLE