L'érosion des littoraux à falaises meubles en Bretagne : aléa, enjeux et gestion du risque

Noémie Basara

▶ **To cite this version:**

Noémie Basara. L'érosion des littoraux à falaises meubles en Bretagne : aléa, enjeux et gestion du risque. Géographie. Université de Bretagne occidentale - Brest, 2019. Français. NNT : 2019BRES0066 . tel-02468907

HAL Id: tel-02468907
https://theses.hal.science/tel-02468907

Submitted on 6 Feb 2020

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.

UNIVERSITE SCIENCES BRETAGNE DE LA MER LOIRE ET DU LITTORAL

UBO Université de Bretagne Occidentale

THESE DE DOCTORAT DE

L'UNIVERSITE
DE BRETAGNE OCCIDENTALE
COMUE UNIVERSITE BRETAGNE LOIRE

ECOLE DOCTORALE N° 598
Sciences de la Mer et du littoral
Spécialité : « *Géographie* »

Par
Noémie BASARA

« L'érosion des littoraux à falaises meubles en Bretagne : aléa, enjeux et gestion du risque »

Thèse présentée et soutenue à l'Institut Universitaire Européen de la Mer, le « 25 novembre 2019 »
Unité de recherche : laboratoire Géomer, LETG UMR 6554 CNRS

Rapporteurs avant soutenance :

Philippe DEBOUDT
Professeur, Université de Lille 1

Freddy VINET
Professeur, Université Paul-Valéry Montpellier 3

Composition du Jury :

Stéphane COSTA
Professeur, Université de Caen Basse-Normandie (président du jury)

Philippe DEBOUDT
Professeur, Université de Lille 1 (rapporteur)

Bernard FICHAUT
Maître de Conférences, Université de Bretagne Occidentale (examinateur)

Alain HENAFF
Maître de Conférences, Université de Bretagne Occidentale (directeur de thèse)

Nicolas LE DANTEC
Ingénieur de recherche, Cerema (co-directeur de thèse)

Nathalie LONG
Chargé de recherche, CNRS, Université de La Rochelle (examinatrice)

Marie-Hélène RUZ
Professeur, Université du Littoral Côte d'Opale (examinatrice)

Freddy VINET
Professeur, Université Paul-Valéry Montpellier 3 (rapporteur)

.

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer mes premiers remerciements à mon directeur de thèse, Alain Hénaff, enseignant-chercheur à l'Université de Brest, ainsi qu'à mon co-directeur, Nicolas Le Dantec, ingénieur de recherche au Cerema. Leur rencontre en stage de fin d'étude fut déterminante puisqu'elle a renforcé mon goût pour la géomorphologie littorale et m'a permis de poursuivre mes études par un doctorat grâce à la confiance qu'ils m'ont accordée. Leurs qualités pédagogiques, scientifiques et humaines m'ont permis d'effectuer ce travail doctoral dans les meilleures conditions. Je les remercie pour leur disponibilité aussi bien au laboratoire que sur le terrain et leurs précieux conseils tout au long de la thèse. Leur gentillesse et leur humour ont participé à rendre le travail agréable et à garder de bons souvenirs, notamment lors des journées passées sur le terrain.

Je remercie également Françoise Gourmelon, directrice de l'UMR 6554 CNRS et Serge Suanez, directeur du laboratoire LETG-Brest, pour leur accueil et pour avoir mis à ma disposition tous les moyens nécessaires pour mener à bien mes recherches.

Je tiens également à remercier Marie-Hélène Ruz, Nathalie Long, Stéphane Costa et Bernard Fichaut pour avoir accepté d'évaluer ce travail et de faire partie de mon jury de thèse. Merci aussi à Freddy Vinet et Philippe Deboudt de me faire l'honneur d'être rapporteurs de cette thèse.

Je souhaite aussi remercier l'équipe du Laboratoire de Dynamique et de Gestion Intégrée des Zones Côtières (LDGIZC) de l'Université du Québec à Rimouski (UQAR) pour leur accueil chaleureux lors de mon séjour de deux mois au Québec. La mise à disposition de leurs travaux de recherche menés sur les falaises meubles depuis plusieurs années et les échanges que j'ai pu avoir avec eux ont participé à l'avancement de ma thèse. Je tiens particulièrement à remercier Guillaume Marie pour m'avoir fait découvert, notamment sur le terrain, les falaises meubles de la côte nord du Québec ainsi que pour ses précieux conseils et son soutien tout au long de la thèse.

Je tiens à remercier les personnes qui m'ont apporté informations et connaissances. Merci à Jean-Philippe Hamon de la DDTM22, Gwenal Hervouët du Conservatoire du Littoral, Michel Aïdonidis de Météo-France, Jean-Marc Terrade de l'association *Interactions Pleine nature,* Michel Guillaume de l'association *Vivarmor* et Annie Marzin de la mairie de Plozévet. Merci aussi aux personnes qui ont mis à ma disposition des photographies et des rapports de bureaux d'étude, notamment Erwan Le Barillec de la DDTM29, Anne-Marie Lemaitre du Cerema, Marie Le Scanve de la Maison du Littoral de Ploumanac'h, Patrick Le Floc'h de la mairie de Pléneuf-Val-André, Yann Gasnier de l'association des *Riverains du Moulin de la Rive* et l'historien Michel Grimaud pour ses archives sur la commune de Pléneuf-Val-André.

Je remercie aussi l'ensemble des gestionnaires (DREAL, DDTM, préfectures, EPCI, communes…) qui ont participé à l'enquête régionale en ligne sur l'identification des besoins dans la gestion du risque d'érosion et ont ainsi contribué à l'avancement de mes travaux de recherche.

Je souhaite adresser également mes remerciements aux propriétaires, notamment Anne et Frédéric, Alain, Yann, Erick et Denis qui ont accepté d'héberger une station météorologique dans leur propriété et ont permis l'accès régulier aux données. Merci aussi à Isabelle Gay, chargée de mission au Conservatoire du littoral, d'avoir permis d'installer une de ces stations à proximité du site de Telgruc-sur-Mer.

Ce travail de recherche est le résultat de multiples interactions qui m'ont beaucoup apporté, tant sur le plan professionnel que personnel. Ainsi, je tiens à remercier chaleureusement :

- Catherine Meur-Ferec pour ses connaissances et ses conseils scientifiques dans l'analyse de la gestion des risques littoraux et Iwan Le Berre pour ses précieuses explications concernant l'utilisation des indicateurs d'enjeux définis dans le cadre du projet OSIRISC ;

- Marion Jaud du Laboratoire Géosciences Océan (LGO) pour avoir partagé ses connaissances sur l'acquisition et le traitement photogrammétrique ;

- Jérôme Ammann, ingénieur de recherche au laboratoire LGO et Véronique Cuq, ingénieur d'études au LETG-Brest pour l'acquisition de photographies aériennes par drone sur les sites d'étude ;

- Étienne Chauveau, Didier Blaise, Pauline Letortu, Erwan Le Cornec et Céline Perherin pour leurs conseils avisés, notamment lors des comités de suivi de thèse ;

- Isabelle Mescoff, Élisabeth Bondu et Élodie Benon pour toutes les démarches administratives durant la thèse ;

- Quentin Coupa-Dufau et Sophie Morisseau pour leur travail mené sur les falaises meubles au cours d'un stage au LETG-Brest ainsi que leur participation aux missions de terrain dont Elysée Gbegnon a également fait partie ;

- l'équipe du laboratoire LETG-Brest et tout particulièrement Laurence David pour ses conseils pour la mise en page du mémoire de thèse et Mathias Rouan qui m'a permis l'accès aux données Météo-France ;

- les doctorants, stagiaires et contractuels du LETG-Brest pour m'avoir accompagnée tout au long de cette aventure, en particulier les stagiaires Étienne, Juliette, Jean-Baptiste et Roza qui ont partagé le même bureau durant la période estivale et ont permis de travailler dans la bonne humeur. Merci à Virginie, Clément, Alexandra, Eugénie, Jeanne et Déborah pour les discussions et anecdotes racontées durant le repas du midi. Merci également à Johan, Marie et Mylène qui ont terminé leur thèse la même année et ont permis un soutien mutuel pendant la période de rédaction ;

- les boulangeries brestoises pour les fameuses chouquettes qui ont accompagné nos missions de terrain et réunions ;

Avec une grande émotion, j'adresse mes remerciements à ma famille et l'ensemble de mes proches qui m'ont toujours soutenu dans mon travail et mes études et ont montré leurs intérêts dans mes travaux de recherche. Je les remercie de leur sollicitude et de leur soutien et je leur exprime ici toute ma gratitude.

Mon dernier remerciement va tout naturellement à Thibault, qui a su m'encourager tout au long de ma thèse. Je tiens à lui exprimer toute ma reconnaissance pour son écoute, ses conseils et ses bonnes attentions qui ont grandement contribué à l'aboutissement de ce travail de recherche et à vivre ma passion pour la géographie.

SOMMAIRE

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS **6**

INTRODUCTION GÉNÉRALE **8**

PARTIE 1 – CONTEXTE SCIENTIFIQUE ET PRÉSENTATION DU CADRE RÉGIONAL ET DES SITES D'ÉTUDE **13**

CHAPITRE 1 : État de l'art sur le risque d'érosion des falaises meubles 14

CHAPITRE 2 : Présentation du cadre régional de la Bretagne 28

CHAPITRE 3 : Bilan régional préliminaire et sélection des sites d'étude 41

CHAPITRE 4 : Cadre morphologique et météo-marin des sites d'étude 60

Conclusion de la Première Partie 86

PARTIE 2 – QUANTIFICATION DU RECUL DES FALAISES MEUBLES SUR DES ÉCHELLES SPATIO-TEMPORELLES IMBRIQUÉES : VERS UNE DÉTERMINATION DES FACTEURS D'ÉROSION **87**

CHAPITRE 5 : Analyse des épisodes de recul en Bretagne aux 20ème et 21ème siècles 88

CHAPITRE 6 : Quantification des taux de recul à l'échelle historique récente (1950-2015) 110

CHAPITRE 7 : Analyse du recul à court terme par suivi photogrammétrique 147

Conclusion de la Deuxième Partie 202

PARTIE 3 – ANALYSE DES ENJEUX MENACÉS : VERS LA CARTOGRAPHIE DU RISQUE **203**

CHAPITRE 8 : Apport de la cartographie géomorphologique dans l'identification des zones à risque et des enjeux menacés par l'érosion des falaises meubles 204

CHAPITRE 9 : Analyse des enjeux et du risque à partir d'indicateurs 227

Conclusion de la Troisième Partie 248

PARTIE 4 – LA GESTION DU RISQUE D'ÉROSION DES FALAISES MEUBLES ET APPROCHE DE LA VULNÉRABILITÉ COTIÈRE **249**

CHAPITRE 10 : Quelques rappels sur l'organisation de la gestion des risques côtiers en France 250

CHAPITRE 11 : Analyse de la gestion et de la vulnérabilité à l'échelle des sites d'étude 255

CHAPITRE 12 : Caractérisation des besoins exprimés par les gestionnaires bretons sur le risque d'érosion des falaises meubles 284

Conclusion de la Quatrième Partie 317

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES **318**

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES **326**

LISTE DES FIGURES **355**

LISTE DES TABLEAUX **360**

TABLE DES MATIÈRES **361**

TABLE DES ANNEXES **366**

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ACB : Analyse Coûts-Bénéfices

ADEME : Agence De l'Environnement et de la Maitrise de l'Énergie

ADES : Accès aux Données sur les Eaux Souterraines

ANCORIM : Atlas Network for Coastal Risks Management

ANEMOC : Atlas Numérique d'États de Mer Océaniques et Côtiers

BD : Base de Données

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

CEPRI : Centre Européen de Prévention des Risques d'Inondation

CEREMA : Centre d'Études et d'expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement

CESER : Conseil Économique, Social et Environnemental Régional

CGDD : Commissariat Général au Développement Durable

CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique

CVI : Coastal Vulnerability Index

DATAR : Délégation interministérielle à l'Aménagement du Territoire et à l'Attractivité Régionale

DDRM : Dossier Départemental sur les Risques Majeurs

DDTM : Direction Départementale des Territoires et de la Mer

DEFRA : Department for Environment, Food and Rural Affairs

DGPR : Direction Générale de la Prévention des Risques

(D)GPS : (Differential) Global Positioning System

DHI : Danish Hydraulic Institute

DICRIM : Document d'Information Communal sur les Risques Majeurs

DIREN : Direction Régionale de l'Environnement

DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

EPAGE : Établissements Publics d'Aménagement et de Gestion des Eaux

EPCI : Établissement Public de Coopération Intercommunale

EPTB : Établissements Publics Territoriaux de Bassin

GEMAPI : Gestion des Milieux Aquatiques et Prévention des Inondations

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat

GIZC : Gestion Intégrée des Zones Côtières

GR : Sentier de Grande Randonnée

GRESARC : Groupe de Recherche sur les Environnements Sédimentaires Aménagés et les Risques Côtiers

IAL : Information des Acquéreurs et Locataires

IFEN : Institut Français de l'Environnement

IGN : Institut Géographique National

INSEE : Institut National de la Statistique et des Études Économiques

LDGIZC : Laboratoire de Dynamique et de Gestion Intégrée des Zones Côtières

LGO : Laboratoire Géosciences Océan

LETG : Littoral, Environnement, Télédétection, Géomatique

LIDAR : Light Detection and Ranging

MATE : Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement

MEDDE : Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie

MEDDTL : Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement

MEEM : Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer

METL : Ministère de l'Équipement, du Transport et du Logement

MNT : Modèle Numérique de Terrain

OSIRISC : projet de recherche "Vers un observatoire intégré des risques côtiers d'érosion submersion"

PAPI : Programme d'Actions de Prévention des Inondations

PCS : Plan Communal de Sauvegarde

PHMA : Plus Hautes Mers Astronomiques

PLU : Plan Local d'Urbanisme

PMVE : Pleine Mer moyenne de Vive-Eau

PPR(L) : Plan de Prévention des Risques (Littoraux)

RMS : Root Mean Square

SCOT : Schéma de Cohérence Territoriale

SHOM : Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

SIG : Système d'Information Géographique

SMVM : Schéma de Mise en Valeur de la Mer

SNGITC : Stratégie Nationale de Gestion Intégrée du Trait de Côte

TLS : Terrestrial Laser Scanning (Scanner Laser Terrestre)

UBO : Université de Bretagne Occidentale

UMR : Unité Mixte de Recherche

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les littoraux sont devenus des territoires à enjeux sociaux et économiques importants depuis que l'Homme s'y est installé de façon croissante au cours des dernières décennies (Turner et al., 1996 ; Nordhaus, 2006). Actuellement, ces territoires (considérés dans la bande côtière, à moins de 100 km de la côte) accueillent les plus grandes métropoles du monde et présentent des densités de population trois fois supérieures à la moyenne mondiale (Small et Nicholls, 2003).

Du fait de la forte occupation du littoral et de la mobilité du trait de côte, les régions côtières sont des territoires particulièrement vulnérables aux risques côtiers d'érosion et de submersion. Dans nombre de secteurs anthropisés, la proximité de la ligne de rivage par rapport aux installations humaines est effectivement devenue un problème majeur dans la mesure où la population et les activités sont menacées par les aléas côtiers de recul du trait de côte (Meur-Ferec, 2006) et de submersion. Cela est particulièrement vrai pour les falaises meubles, formées par du matériel peu cohésif et peu résistant à l'érosion (EUROSION, 2004 ; Breitung et al., 2011 ; Sunamura, 2015). Les falaises meubles s'éroderaient entre deux à six fois plus rapidement que les falaises rocheuses (Prémaillon et al., 2017). Par exemple, des taux de recul supérieurs à 1 m/an ont été mesurés en Allemagne, au Danemark, en Russie, au Japon, en Nouvelle-Zélande ainsi qu'au Canada (Steers, 1951 ; Prior, 1977 ; Sunamura, 1992 ; Bernatchez et Dubois, 2004 ; de Lange et Moon, 2005).

Bien que les falaises meubles soient très répandues dans les hautes et moyennes latitudes ayant connu notamment l'alternance de climats froids et tempérés de la période Quaternaire (Davidson-Arnott, 2010), l'étude de leurs évolutions a, jusqu'alors, fait l'objet d'une plus faible production scientifique en comparaison des côtes d'accumulation, au niveau mondial et notamment au niveau régional de la Bretagne (Fournier et Regnauld, 1991). Ceci s'explique par des vitesses de recul moindres et par la complexité de ces systèmes côtiers dont l'évolution est régie par de multiples processus marins, atmosphériques et continentaux qui se combinent et se succèdent dans le temps et l'espace (Joyal, 2015). Néanmoins, face à la littoralisation des populations et des activités, la compréhension des modalités d'évolution des falaises meubles est devenue primordiale, d'autant plus que le changement climatique devrait affecter, dans les années à venir, la fréquence et l'intensité des tempêtes et des niveaux d'eaux extrêmes (Wang et al., 2008 ; Karl et al., 2009 ; GIEC, 2014). Ces changements impliqueraient une plus forte érosion des côtes (Miller et Douglas, 2004 ; Feagin et al., 2005 ; Nicholls et Cazenave, 2010). Par conséquent, l'évaluation des risques côtiers et leur gestion est identifiée comme un défi majeur pour le 21^{e} siècle (Sciberras, 2002 ; Nicholls et Tol, 2006 ; Chapman, 2014). Ainsi, des recherches sont fondamentales pour améliorer la compréhension des facteurs impliqués dans le recul des falaises meubles, les enjeux menacés et les mesures de gestion pouvant être mises en place face au risque.

Contexte scientifique et choix de la zone d'étude

Le travail de thèse, présenté dans ce mémoire, s'inscrit dans cette problématique. La Bretagne a été choisie comme territoire d'étude, non seulement parce que les falaises meubles y représentent près de 20 % du linéaire côtier breton (Hénaff, 2018), mais aussi parce que leur recul menace de plus en plus d'infrastructures et d'activités humaines (Fournier et Regnauld, 1991 ; Biville et Van Waerbeke, 2003 ; Bonnot-Courtois et al., 2008). Durant les dernières décennies, les enjeux se sont multipliés au sommet et en arrière des versants de falaises meubles. Tandis que la densification de l'occupation du littoral, au 20^{e} siècle, s'est d'abord faite dans les zones basses – plus facilement accessibles et directement au contact de la mer et de ses aménités, moins exposées au vent et avec des coûts de construction moindres – l'urbanisation s'est aussi étendue aux littoraux plus élevés et, en particulier, les falaises meubles. Face à

l'apparition des risques d'érosion liés, non seulement au recul des falaises meubles mais également à la dynamique de l'occupation de ces territoires côtiers, les communes littorales bretonnes sont confrontées à de multiples enjeux en matière de gestion (Bioret, 1985 ; Albinet, 1995 ; Pinot, 1998). Pour autant, le fonctionnement et les modalités de recul de ces formes d'ablation sont bien moins connus que les côtes d'accumulation (Fournier et Regnauld, 1991). Les études menées jusqu'à présent sur les falaises meubles en Bretagne se sont concentrées principalement sur l'estimation des vitesses de recul aux échelles séculaires et pluri-décennales (Pinot, 1993 ; Bonnot-Courtois et Lafond, 1995 ; Biville, 2004 ; Stéphan, 2008) et à la détermination des facteurs responsables du déclenchement des mouvements de terrain (Pinot, 1993 ; Bonnot-Courtois et al., 2008) sans pouvoir quantifier précisément leur part respective.

Le travail présenté dans ce mémoire a donc porté sur l'étude du risque d'érosion des falaises meubles en Bretagne, en privilégiant une approche à différentes échelles spatio-temporelles afin d'identifier les tendances d'évolution et les modalités de recul. Ce travail s'appuie sur les travaux existants menés sur les falaises meubles à l'échelle mondiale et sur quelques travaux régionaux qui concernent la dynamique des falaises meubles en Bretagne. Le travail de thèse a également une vocation appliquée puisqu'il tente de fournir des éléments d'évaluation du risque et de « vulnérabilité » côtière. L'objectif est de fournir des données suffisamment pertinentes sur le risque actuel d'érosion des falaises meubles en Bretagne afin d'aider les politiques de gestion du trait de côte au niveau local et/ou régional. À ce titre, l'analyse du risque s'est appuyée sur les démarches engagées dans les projets de recherche OSIRISC et OSIRISC+ (« *Vers un observatoire intégré des risques côtiers d'érosion submersion* », 2016-2019), financés par la Fondation de France et soutenus par la DREAL Bretagne (Direction Régionale de l'Environnement et de l'Aménagement du territoire et du Logement).

Enfin, la thèse présentée dans ce mémoire se situe dans le prolongement des recherches développées au sein du laboratoire Littoral, Environnement, Télédétection, Géomatique (LETG) Brest-Géomer, depuis plusieurs années, et dont une des vocations est d'étudier la dynamique des côtes à falaise meuble (Biville, 2004 ; Furiga, 2015 ; Basara, 2015 ; Morisseau, 2018). De plus, le travail de thèse apporte des éléments de réponse à un des objectifs énoncés par la Stratégie Nationale de Gestion Intégrée du Trait de Côte qui est de « *Développer l'observation du trait de côte et identifier les territoires à risque d'érosion pour hiérarchiser l'action publique* ».

Définition des grandes problématiques

En dépit des quelques travaux de recherche menés sur la cinématique des falaises meubles en Bretagne, il convient d'admettre que des études complémentaires sont nécessaires à la compréhension et à l'évaluation du risque d'érosion de ces côtes d'ablation et, en particulier, sur les vitesses récentes d'évolution des falaises meubles, les facteurs naturels et anthropiques responsables de leur recul, les principaux enjeux menacés et les niveaux de risque et de vulnérabilité associés. Ainsi, les travaux engagés dans le cadre de la thèse ont poursuivi trois principaux objectifs :

1) Évaluer l'**aléa « recul des falaises meubles »** en quantifiant régionalement la **répartition spatio-temporelle** de l'érosion et en identifiant les **facteurs responsables** ;
2) Déterminer les **principaux enjeux menacés** et les **niveaux de risque** ;
3) Identifier les **outils et mesures de gestion manquants** et faisant augmenter la vulnérabilité des territoires littoraux à falaises meubles en Bretagne.

Pour répondre à ces objectifs, les réflexions menées dans le cadre de ce travail de thèse s'articulent autour de quatre questions principales :

1) Observe-t-on un accroissement des vitesses de recul des falaises meubles au cours du temps ?

2) Le recul des falaises meubles est-il davantage contrôlé par l'action de forçages marins ou de forçages subaériens (précipitations notamment) ?
3) Les principaux enjeux faisant augmenter les niveaux de risque se restreignent-ils aux habitations installées en sommet des falaises meubles ?
4) La gestion du risque d'érosion des falaises meubles est-elle suffisante face aux niveaux de risque ?

Approches méthodologiques

Afin de quantifier le recul des falaises meubles, d'évaluer son évolution dans le temps et de déterminer les modalités de recul, le travail s'appuie sur différentes approches à la fois traditionnelles et innovantes. Il s'agit d'une part, de l'**analyse de photographies aériennes verticales** de l'Institut Géographique National (IGN) (années 1950-2015) et, d'autre part, de l'utilisation de la **photogrammétrie** s'appuyant sur des levés au tachéomètre, réalisés à la fréquence de deux fois par an, sur six sites d'expérimentation. Ces mesures à très haute résolution permettent de fournir des éléments de réponse quant à la répartition spatiale et temporelle des volumes érodés et sur les facteurs responsables de l'érosion sur chacun des sites expérimentaux.

La réflexion sur les événements météo-marins les plus morphogènes est menée à partir d'une **analyse historique** de l'aléa érosion des falaises meubles sur l'ensemble du littoral breton, depuis le début du 20e siècle. Cet historique a été croisé avec les conditions météo-marines qui prévalaient lors du déclenchement des mouvements de terrain identifiés. La dimension géomorphologique a été intégrée dans l'analyse.

Les enjeux menacés et les zones à risque sont identifiés, sur les sites d'étude, à partir de la **cartographie géomorphologique** des formations meubles. Pour évaluer la variabilité spatiale du risque, des **indicateurs d'aléa et d'enjeux** basés sur les travaux de recherche du projet OSIRISC, sont utilisés.

L'état actuel de la gestion du risque d'érosion des falaises meubles en Bretagne est aussi abordé par le biais d'**indicateurs**, ce qui permet d'avoir un aperçu des niveaux de vulnérabilité sur les sites d'étude. Par l'intermédiaire d'une **enquête** réalisée auprès des différentes institutions concernées par la gestion du risque d'érosion en Bretagne, les besoins en termes de connaissances et d'outils de gestion sont identifiés.

Le fil conducteur de la démarche est, d'une part, la compréhension des répartitions spatiales et temporelles du recul des falaises meubles et du risque associé et, d'autre part, l'identification des difficultés posées par le risque d'érosion et les moyens de gestion pouvant être mis en œuvre pour y faire face.

L'ensemble des questions abordées se fera selon une approche par **emboitement d'échelles** :

- **spatiales** : de l'ensemble du littoral breton à l'échelle de six sites d'étude ;
- **temporelles** : de la période contemporaine (de la fin du 18e à ce début de 21e siècle) à l'échelle saisonnière (2016-2019) en passant par les échelles décennales à pluri-décennales intermédiaires.

Dans cette thèse, l'**échelle saisonnière** (ou court terme) prend en considération les évolutions sur un pas de temps de quelques mois à quelques années, l'**échelle pluri-décennale** (ou moyen terme) concerne un pas de temps de quelques dizaines d'années et l'**échelle séculaire** (ou long terme) considère les évolutions morphologiques sur quelques centaines d'années. Ces différentes échelles temporelles sont complémentaires et permettent de distinguer ce qui relève, d'une part, d'évolutions durables de ce qui, d'autre part, correspond à des réactions à des événements ponctuels, parfois exceptionnels ou transitoires, qu'ils soient naturels ou d'origine anthropique (ex : rejets d'eaux usées).

Collaborations scientifiques et soutiens financiers et techniques

Ce travail n'aurait pas été possible sans le concours de plusieurs collaborations ayant facilité l'accès à certaines données :

- Météo-France pour l'accès aux données météorologiques (cumul pluviométrique, vitesses et direction du vent) (Convention DIRO/2015/482/00 prorogée le 4 mars 2018).
- les données de houle issues de la base de données HOMERE, créée au sein de l'IFREMER (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer) ;
- le laboratoire LGO UMR 6538 du CNRS pour la mise à disposition de logiciels de traitements photogrammétriques ;
- les fiches méthodologiques sur l'évaluation du risque et de la vulnérabilité des zones côtières, produites dans le cadre du projet de recherche OSIRISC « *Vers un observatoire intégré des risques côtiers d'érosion-submersion* » (2016-2019, projet 1539, soutenu par la Fondation de France).

Ce travail a bénéficié d'une allocation de recherche doctorale de la Région Bretagne et de l'École Doctorale des Sciences de la Mer et du Littoral (EDSML).

Les missions de terrain réalisées en Bretagne ont été financées par la Fondation de France dans le cadre du projet OSIRISC. Les financements accordés par la Direction Europe et International de l'Université de Bretagne Occidentale, complétés par la bourse de mobilité du LabexMer (aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme « Investissements d'avenir » portant la référence ANR-10-LABEX-19) ont permis de couvrir la majorité des frais de missions réalisées durant le séjour de deux mois au Québec. Le LabexMer a également permis de financer les stations météorologiques installées sur les sites d'étude.

Structuration de la thèse

La thèse est structurée en quatre parties qui reprennent les objectifs précédemment définis.

La première partie fait l'objet d'un **état de l'art du risque d'érosion des falaises meubles** afin de cerner les enjeux scientifiques (chapitre 1) et présente le **cadre géographique et géologique** général du littoral breton (chapitre 2). Dans cette partie, est aussi présentée la méthodologie ayant permis de sélectionner les six sites d'expérimentation et de dresser un **bilan régional** des problèmes posés actuellement par le recul des falaises meubles (chapitre 3). La **typologie des falaises meubles** retenue pour le travail de thèse et qui a permis d'orienter le choix des sites est également présentée. Enfin, le **cadre morphologique et hydro-climatique** est détaillé pour chacun des sites d'étude (chapitre 4).

La deuxième partie s'intéresse au **recul des falaises meubles en Bretagne** sur plusieurs échelles temporelles et spatiales imbriquées. Le premier chapitre est consacré à l'**analyse historique** des aléas d'érosion de falaises meubles recensés en Bretagne, aux 20^{e} et 21^{e} siècles (chapitre 5). Par le biais d'une chronique des phénomènes d'érosion, les **conditions météo-marines les plus morphogènes** sont identifiées. Les deux chapitres suivants (chapitres 6 et 7) sont consacrés à la **quantification des taux de recul** sur les sites d'étude. Dans un premier temps, le recul pluri-décennal est mesuré par la comparaison diachronique de photographies aériennes verticales (chapitre 6) et, dans un second temps, le recul interannuel est quantifié par la technique de photogrammétrie associée à des levés tachéométriques sur les sites expérimentaux (chapitre 7). La répartition spatio-temporelle de l'érosion couplée à l'analyse des conditions météo-marines permet de déterminer les **modalités de recul des falaises meubles**.

La troisième partie s'intéresse aux **enjeux menacés** par le recul des falaises meubles sur les sites d'étude. Le premier chapitre s'attache à définir l'**étendue des zones à risque** et les principaux enjeux menacés

par le biais d'une cartographie géomorphologique des formations meubles (chapitre 8) tandis que le second chapitre présente la **variabilité spatiale des niveaux de risque** sur ces sites (chapitre 9). Ceci permet d'apporter des informations utiles à la priorisation des mesures de gestion.

La quatrième partie est consacrée à l'**analyse de l'état actuel de la gestion** du risque d'érosion des falaises meubles en Bretagne. Le premier chapitre rappelle l'organisation générale de la gestion des risques côtiers en France (chapitre 10). Le chapitre suivant s'intéresse à identifier les **mesures de gestion manquantes sur les sites d'étude** et qui font augmenter leur vulnérabilité (chapitre 11). Ce travail s'appuie sur les indicateurs de vulnérabilité développés dans le cadre du projet OSIRISC. Le troisième chapitre s'interroge sur les **besoins en termes de connaissances et d'outils de gestion**, selon les institutions, à l'échelle régionale (chapitre 12). Par le biais d'enquêtes, il s'agit d'analyser les difficultés posées par la gestion du risque d'érosion des falaises meubles en Bretagne et d'en comprendre les origines. À la suite de cette analyse, des préconisations sur la gestion du risque d'érosion des falaises meubles seront émises et une réflexion sera menée sur les mesures de gestion permettant de réduire la vulnérabilité.

PARTIE 1 – CONTEXTE SCIENTIFIQUE ET PRÉSENTATION DU CADRE RÉGIONAL ET DES SITES D'ÉTUDE

L'objectif de cette première partie est de présenter le cadre général dans lequel le travail de thèse a été réalisé.

Le premier chapitre propose un état de l'art sur le risque d'érosion des falaises meubles. Il s'emploie tout d'abord à rappeler les notions relatives au risque et à la vulnérabilité et présente les caractéristiques des côtes à falaise et, notamment, des falaises meubles. Ce chapitre expose le contexte actuel de croissance du risque d'érosion des falaises meubles en Bretagne qui a été choisie comme territoire d'étude, non seulement parce que les falaises meubles y sont répandues mais aussi parce que leur recul menace, depuis plusieurs dizaines d'années, de plus en plus d'infrastructures et d'activités humaines. Cette croissance des risques est liée aux dynamiques convergentes de recul du trait de côte et du rapprochement de la population de la ligne de rivage.

Le second chapitre s'attache à présenter le cadre régional de la Bretagne en proposant un aperçu du contexte géologique, géomorphologique et hydro-climatique des trois façades littorales bretonnes. Il permet d'établir un état de connaissance des différents types de côte présents en insistant sur les modes de mise en place des falaises meubles en Bretagne et permet de comprendre les forçages naturels qui régissent ces systèmes côtiers.

Le troisième chapitre concerne la méthodologie utilisée dans ce travail de thèse et qui a permis de sélectionner les six sites expérimentaux à falaises meubles représentatifs de la situation régionale sur le plan géomorphologique et du point de vue des différents enjeux exposés. Ce chapitre permet de dresser un bilan régional de la diversité des morphologies des falaises meubles, des enjeux menacés et les différents aménagements mis en œuvre pour tenter d'arrêter ou de ralentir leur recul.

Pour finir, le chapitre quatre expose les caractéristiques géomorphologiques et les conditions météo-marines sur chaque site d'étude qui sont déterminantes pour l'étude de la dynamique régressive des falaises meubles.

CHAPITRE 1 : État de l'art sur le risque d'érosion des falaises meubles

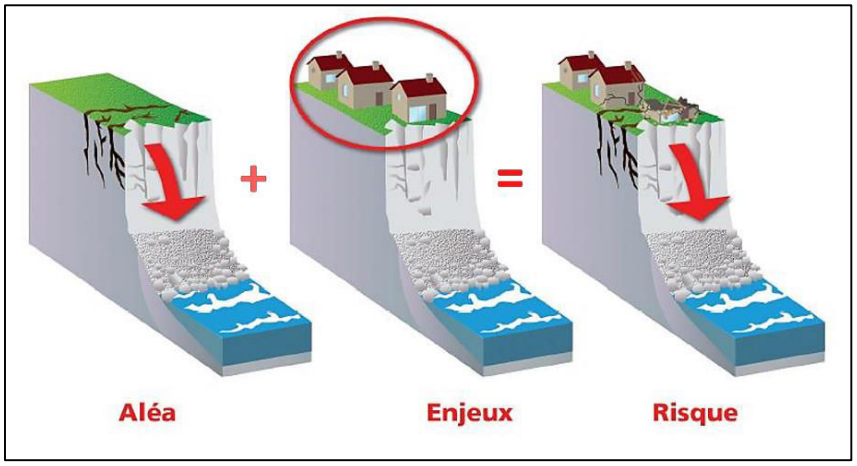
Ce chapitre a pour objectif de faire l'état des connaissances théoriques sur le risque d'érosion des falaises meubles. Il s'attache tout d'abord à définir les principales notions de risque, de vulnérabilité et de trait de côte, utilisées dans la thèse. Il met ensuite l'accent sur la grande diversité géomorphologique des falaises meubles dans le monde et leur recul relativement rapide en comparaison des falaises rocheuses. Enfin, ce chapitre s'emploie à rappeler le contexte actuel de croissance des risques liés au recul des falaises meubles et à la densification de l'occupation du littoral depuis le 19e siècle. Cette synthèse bibliographique justifiera le choix de la région Bretagne comme territoire d'étude de cette thèse et permettra de cerner les enjeux scientifiques.

1.1- Notions de risque et de vulnérabilité

L'étude des risques relève de domaines très variés (géographie, physique, économie…) et fait classiquement appel à des notions telles que l'aléa, les enjeux et la vulnérabilité. En fonction de l'approche prise en compte, les définitions du risque et de la vulnérabilité peuvent varier sensiblement et évoluent au fil des travaux de recherche (Meur-Ferec et Morel, 2004).

Dans le cadre de cette thèse, l'**aléa** est le phénomène d'érosion des falaises meubles qui peut avoir une origine naturelle et/ou humaine et qui entraine nécessairement un recul du front de falaise. Les **enjeux** représentent la valeur humaine et économique des éléments exposés à l'aléa. Enfin, le **risque** résulte, ici, de la conjonction de l'aléa érosion avec les enjeux (Fig. 1). La définition de la vulnérabilité est plus complexe et nous reviendrons en détail sur cette variable-clé dans le chapitre 11 de ce mémoire. En plus d'intégrer les notions d'aléa et d'enjeux, la vulnérabilité traite des pratiques de gestion mises en œuvre face au risque, ainsi que les représentations que s'en font les gestionnaires et les populations concernées. D'après le géographe R. D'Ercole (1994), la vulnérabilité dépend effectivement de facteurs conjoncturels (l'aléa) mais aussi structurels (contexte socio-économique, culturel et fonctionnel) qui vont influencer la capacité de réponse de la société à un aléa et donc en faire varier les effets.

Fig. 1 : Aléa, enjeux et risque d'érosion selon la définition classique (www.observatoire-regional-risques-paca.fr).



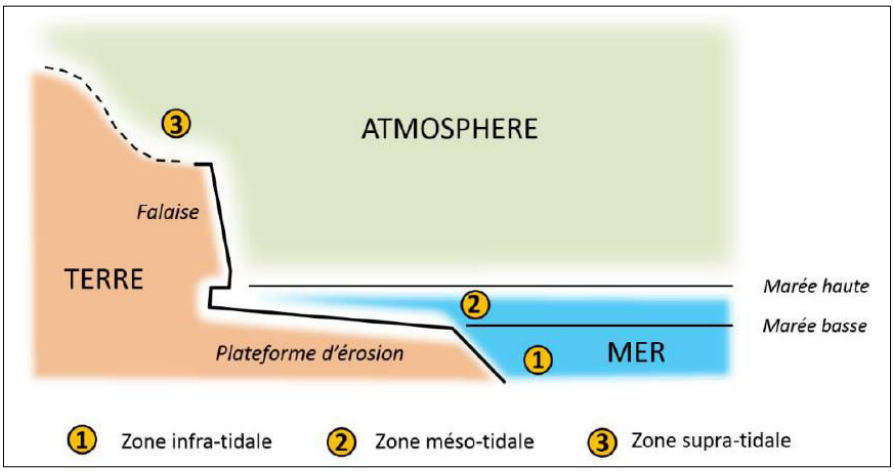
1.2- Les littoraux à falaise et caractéristiques des falaises meubles

1.2.1- Le littoral

La notion de « littoral » désigne, dans son sens large, l'interface de contact entre la terre et la mer (Giuliano, 2015). De nombreuses définitions lui sont accordées selon les domaines qui s'y rattachent (géographiques, océanographiques, biologiques, juridiques…). Dans le cadre de ce travail, le littoral est entendu dans son sens géomorphologique et géographique, c'est-à-dire qu'il renvoie à la nature comme aux pratiques sociales. C'est l'approche globale de cet espace que les géographes littoralistes privilégient (Meur-Ferec, 2006). Ainsi, Bousquet (1990) distingue le littoral de « nature », sous la dépendance de la dynamique et de l'énergie du milieu, le littoral « d'écoumène », habité et mis en valeur par l'homme, et le littoral « d'institution » que régissent les textes législatifs et réglementaires.

Dans sa dimension physique, le littoral de nature correspond à un milieu qui dépend à la fois d'influences terrestres, marines et atmosphériques et donc à une zone où interagissent différents forçages (George et Verger, 2001 ; Meur-Ferec, 2006). Cet espace littoral peut être divisé verticalement selon trois domaines dits supratidal, intertidal et infratidal (Guilcher, 1958) (Fig. 2). La zone **interditale** est associée à l'estran et correspond à la zone de battement des marées (Sunamura, 1992). Le domaine **infratidal** est localisé en dessous du niveau des plus basses eaux. Son extension vers le large est déterminée par l'action des vagues sur le fond qui est elle-même dépendante de la bathymétrie et de l'énergie des agents dynamiques marins (Komar, 1998 ; Dehouck, 2006 ; Grasso, 2009). Cette zone est toujours immergée. À l'inverse, le domaine **supratidal** correspond à une zone toujours émergée mais où se produisent des échanges de matière et d'énergie affectant la morphologie de la côte (ex : transport éolien de sable). Les limites des domaines infratidal et supratidal sont plus imprécises que celle de la zone intertidale car elles sont liées au caractère dynamique et non fixe du milieu littoral.

Fig. 2 : Unités tidales du littoral (Guilcher (1954), modifié de Giuliano (2015)).



Le littoral se différencie du **trait de côte** qui est une interface linéaire correspondant à la ligne de séparation entre la terre et la mer (MEDDTL, 2010). Par exemple, cette interface est définie, selon le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM), comme la laisse des plus hautes mers lors d'une marée astronomique de coefficient 120. Le concept de trait de côte est très souvent utilisé comme base de référence pour le suivi de l'érosion (Dolan et al., 1980 ; Crowell et al., 1999 ; Moore et Griggs, 2002 ; Costa et al., 2004) et suppose d'en définir la localisation par des critères morphologiques et/ou botaniques précis, voire anthropiques quand ce trait de côte est artificialisé (Faye, 2010).

Les formes littorales sont distinguées en deux catégories morphologiques définies en fonction de leurs mises en place :

-les **formes d'accumulation** (ex : plages, dunes, cordon de galets, vasières…) qui résultent du remaniement marin et littoral (vagues, houles, courants et vents) des sédiments, de leur transport et de leur dépôt à la côte (Whitford et Thornton, 1993 ; Masselink et al., 2014) ; ces formes peuvent connaître des phases successives d'accumulation et d'érosion dépendant de leur bilan sédimentaire ;

-les **formes d'ablation** (côtes de dénudation et côtes à falaise rocheuses et meubles et plateformes d'érosion marines) qui naissent de l'érosion du continent par des agents marins ou subaériens et qui ne connaissent que des dynamiques de recul.

1.2.2- Les côtes à falaises

Les côtes à falaise se développent dans des matériaux rocheux mais elles sont aussi formées aux dépends des formations meubles constituées des régolithes (altérites et couvertures sédimentaires superficielles). En dehors de leurs matériaux constitutifs, ces falaises présentent des caractères propres à ce type de versant littoral.

Il convient de rappeler que le terme géomorphologique de « **falaise** », *stricto sensu*, désigne un ressaut non couvert de végétation, en forte pente, de hauteur variable et dû à l'action des vagues (Guilcher, 1954) mais, dans le sens géologique (et parfois dans le langage courant), il est commun de retrouver ce nom pour désigner par exemple, une paroi rocheuse en montagne ou en bordure de rivière.

Dans ce travail, la falaise (rocheuse ou meuble) est entendue dans son sens géographique et géomorphologique c'est-à-dire qu'il s'agit d'un **escarpement abrupt, supérieur à 40°, créé par l'érosion le long d'une côte et situé au contact ou à proximité de la mer**. Dans ce sens, la falaise diffère donc des versants continentaux par le fait que les matériaux accumulés à sa base sont déblayés, au fur et à mesure par la mer, ce qui ne permet pas au versant d'atteindre son profil d'équilibre. La falaise est donc toujours amenée à reculer. De la même manière, le terme falaise ne peut pas être employé pour les dunes qui ont la capacité de se reformer ou d'avancer.

La partie basale de l'escarpement est appelée le « pied » de falaise et la partie sommitale, le « sommet » de falaise. Lorsque l'escarpement est directement en contact avec la mer, la falaise est dite « vive » tandis que, lorsqu'il est éloigné du rivage et n'est plus soumis à l'action marine, on parle de falaise « morte » (Emery et Kuhn, 1982 ; Derruau, 2010) (Fig. 3).

Fig. 3 : Falaises meubles dites « mortes » et « vives » à Pléneuf-Val-André (22).

Photo de gauche : falaise morte car n'évoluant plus sous l'action de la mer et se trouvant en arrière d'habitations ; Photo de droite : falaise vive dont le pied est atteint par la mer.

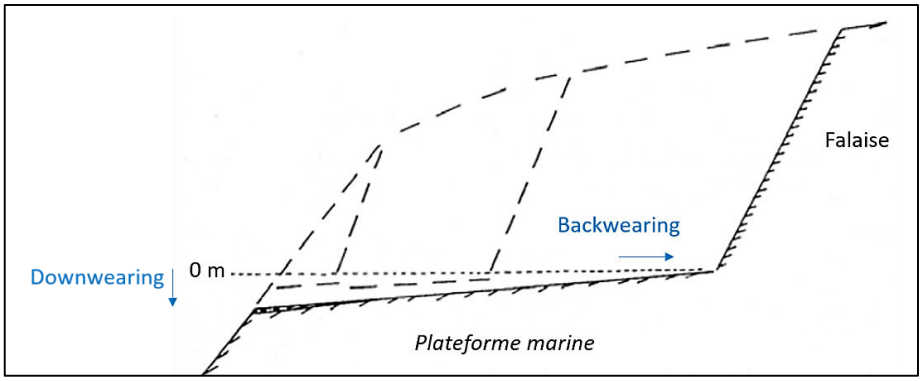
1.2.2.1- Les falaises rocheuses

Le recul des falaises rocheuses s'accompagne généralement, au niveau de leur base, du développement d'une **plateforme d'érosion** littorale (ou platier rocheux) (Trenhaile, 1987 ; Sunamura, 1992 ; Pinot, 1998 ; Trenhaile, 2002 ; Foote et al., 2006 ; Hénaff et al., 2007). Les plateformes d'érosion littorales possèdent une largeur allant de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres. Dans les environnements méso à macro-tidaux, elles présentent une pente globalement continue et comprise entre 1 et 5° (Trenhaile, 2002). Dans ces environnements, les plateformes se développent sous l'action combinée des vagues, de la marée, des processus subaériens et biologiques qui entrainent une érosion de l'ensemble de la zone de marnage (Trenhaile, 1974 ; Regard et al., 2012). L'érosion progressive de la plateforme s'effectue ainsi selon deux composantes (Fig. 4) :

- La composante horizontale (appelée « *backwearing* ») qui correspond au recul de la plateforme vers l'intérieur des terres au fur et à mesure que la falaise recule. Ce recul de la plateforme est dû principalement à l'action directe des vagues qui exploitent les discontinuités structurales et les fragilités de la roche préparées par la bio-érosion (Naylor et Stephenson, 2010).

- La composante verticale (appelée « *downwearing* ») est à l'origine de la formation des reliefs (creux et saillants) rendant la surface de la plateforme rugueuse et accidentée. Cette érosion est due à la combinaison de processus physico-chimiques marins (ex : dissolution, abrasion par les vagues armées de sédiments), subaériens (ex : haloclastie, alternance d'humidification-dessiccation, cryoclastie) et biologiques (ex : dissolution et perforation par les êtres vivants…) (Stephenson et Kirk, 1998 ; Gómez-Pujol et al., 2006 ; Chelli et al., 2010 ; Porter et al., 2010 ; Coombes et al., 2011).

Fig. 4 : Recul d'une falaise et développement corrélatif d'une plateforme marine basale (modifié de Paskoff, 1994).



Si, à l'instar des falaises rocheuses, les falaises meubles sont aussi très souvent précédées à leur base par une plateforme d'érosion littorale, les dynamiques qui commandent les évolutions de ce couple géomorphologique formé par la plateforme et la falaise meuble, diffèrent considérablement. En effet, rares sont les cas où l'élaboration de cette plateforme est contemporaine et corrélative du recul de la falaise meuble car il s'agit d'une plateforme généralement élaborée antérieurement aux dépôts des formations de versant dans lesquelles sont entaillées les falaises meubles. Par conséquent, au regard des falaises rocheuses, les falaises meubles présentent un certain nombre de caractéristiques spécifiques qu'il convient de présenter plus précisément, d'autant plus que la littérature scientifique peut parfois conduire à des ambiguïtés sur leur nature particulière.

1.2.2.2- Les spécificités des falaises meubles

La définition la plus communément utilisée décrit les falaises meubles comme des « *escarpements formés par des dépôts faiblement consolidés et qui possèdent une faible résistance à l'érosion* » (Brown, 2008 ; Greenwood et Orford, 2008 ; Barkwith et al., 2014). Dans la littérature anglo-saxonne, les falaises meubles sont désignées sous le terme de « *soft cliff* » mais aussi par les termes « *coastal bluff* » et « *unconsolidated cliff* »

(Quigley et al., 1977 ; Amin et Davidson-Arnott, 1995 ; Collins et Sitar, 2008 ; Davidson-Arnott, 2010 ; Bernatchez et al., 2011 ; Boucher-Brossard et al., 2017). C'est donc avant tout la lithologie mais aussi la résistance à l'érosion qui sont utilisées pour définir les falaises meubles. Ainsi les falaises seraient considérées comme meubles si elles possèdent une résistance à la compression inférieure ou égale à 5 MPa (Collins et Sitar, 2008 ; Sunamura, 2015). Toutefois, la définition des falaises meubles à partir de leur nature lithologique ou de leur résistance à l'érosion peut créer une certaine ambiguïté avec d'autres types de côte. En effet, certains auteurs comptent les falaises meubles parmi les côtes rocheuses (Griggs et al., 1994 ; Finkl, 2004 ; Walkden et Dickson, 2008). À l'inverse, le rapport EUROSION (2004) qui fait état de la proportion des falaises meubles sur le linéaire côtier des pays de l'Union Européenne, inclut les falaises rocheuses calcaires parmi les côtes à falaises meubles. Pour autant, les falaises meubles présentent des modalités d'évolution différentes de celles des falaises rocheuses car elles sont conditionnées par le nettoyage des formations héritées (Davidson-Arnott, 2010). En Bretagne, plusieurs travaux réalisés sur l'érosion des falaises meubles considèrent que ce sont des falaises entaillées dans les formations quaternaires héritées du fait de leur forte représentativité spatiale dans la région (Pinot, 1998 ; GRESARC, 2004 ; Stéphan, 2008). Or, les côtes à falaises meubles peuvent être formées par des lithologies de tout âge géologique (Pye et French, 1993). On retrouve effectivement des falaises meubles formées par des marnes secondaires sur la côte du Pays Basque mais aussi des falaises meubles d'argiles jurassiques et tertiaires au sud de l'Angleterre (Fig. 7). Tout comme le Quaternaire, le Mésozoïque et le Cénozoïque sont caractérisés par des variations climatiques et eustatiques qui ont participé à la morphogénèse des falaises meubles (Biville, 2004).

La définition retenue dans ce mémoire de thèse pour caractériser les **falaises meubles régionales** est un **escarpement situé au contact de la mer qui correspond à un état transitoire entre une côte à dénudation et une falaise rocheuse** (Fig. 5 et Fig. 6). Cet escarpement peut être formé (en totalité ou en partie) par du matériel meuble mais cohésif. En Bretagne, le matériel meuble correspond à des formations quaternaires ou à des altérites, héritées d'une longue histoire géologique marquée par différentes phases de dépôts et d'érosion (Davidson-Arnott, 2010 ; Laforge et Huet, 2013 ; Rodet, 2013). Ainsi, les matériaux constitutifs des falaises meubles peuvent avoir une origine marine, fluviatile, éolienne ou continentale (ex : plages anciennes, loess, alluvions, altérites, colluvions). Ces formations ont été taillées en falaise par la mer, lors des phases de transgression marine, durant le Quaternaire. L'érosion et le recul des falaises meubles correspondent donc au « nettoyage » de la couverture meuble héritée en période de transgression marine (Fig. 6). Lorsque le processus de dénudation et le retrait de la falaise aboutissent au nettoyage complet de la couverture meuble, le substratum rocheux sous-jacent est alors porté à l'affleurement et les processus de formation d'une falaise rocheuse peuvent alors s'exercer. Par conséquent, théoriquement, le devenir d'une falaise meuble est, à (long) terme, sa disparition et son remplacement progressif par une falaise rocheuse (Fig. 6).

Fig. 5 : Vue de profil des différentes géomorphologies de falaises meubles selon le degré de nettoyage de la couverture meuble héritée (modifié de Biville, 2004).

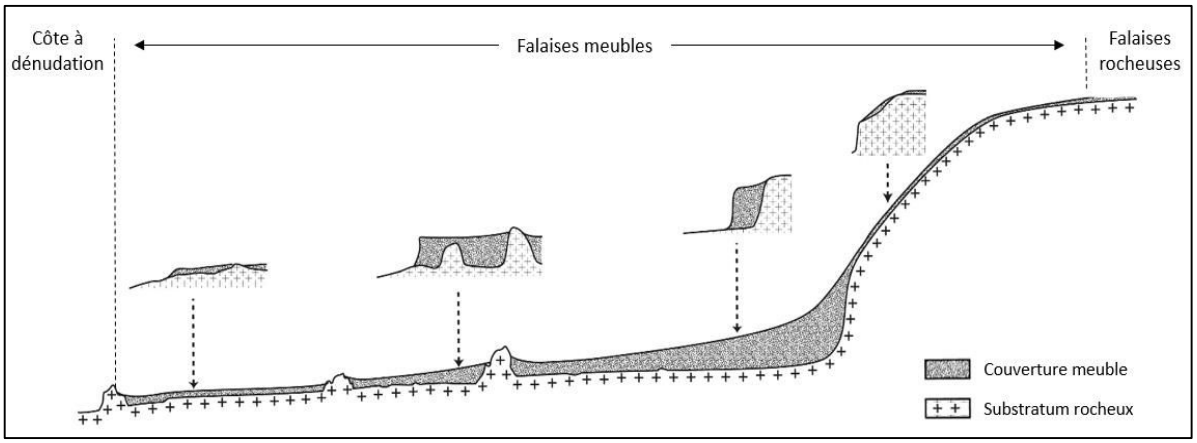
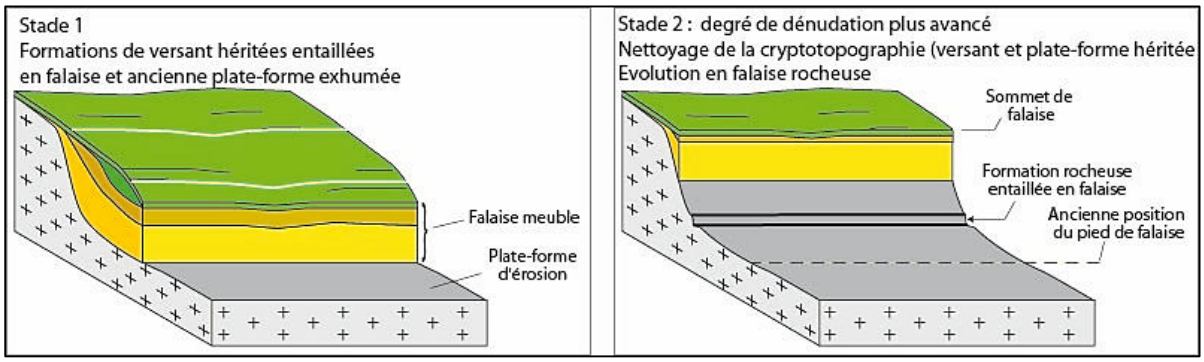


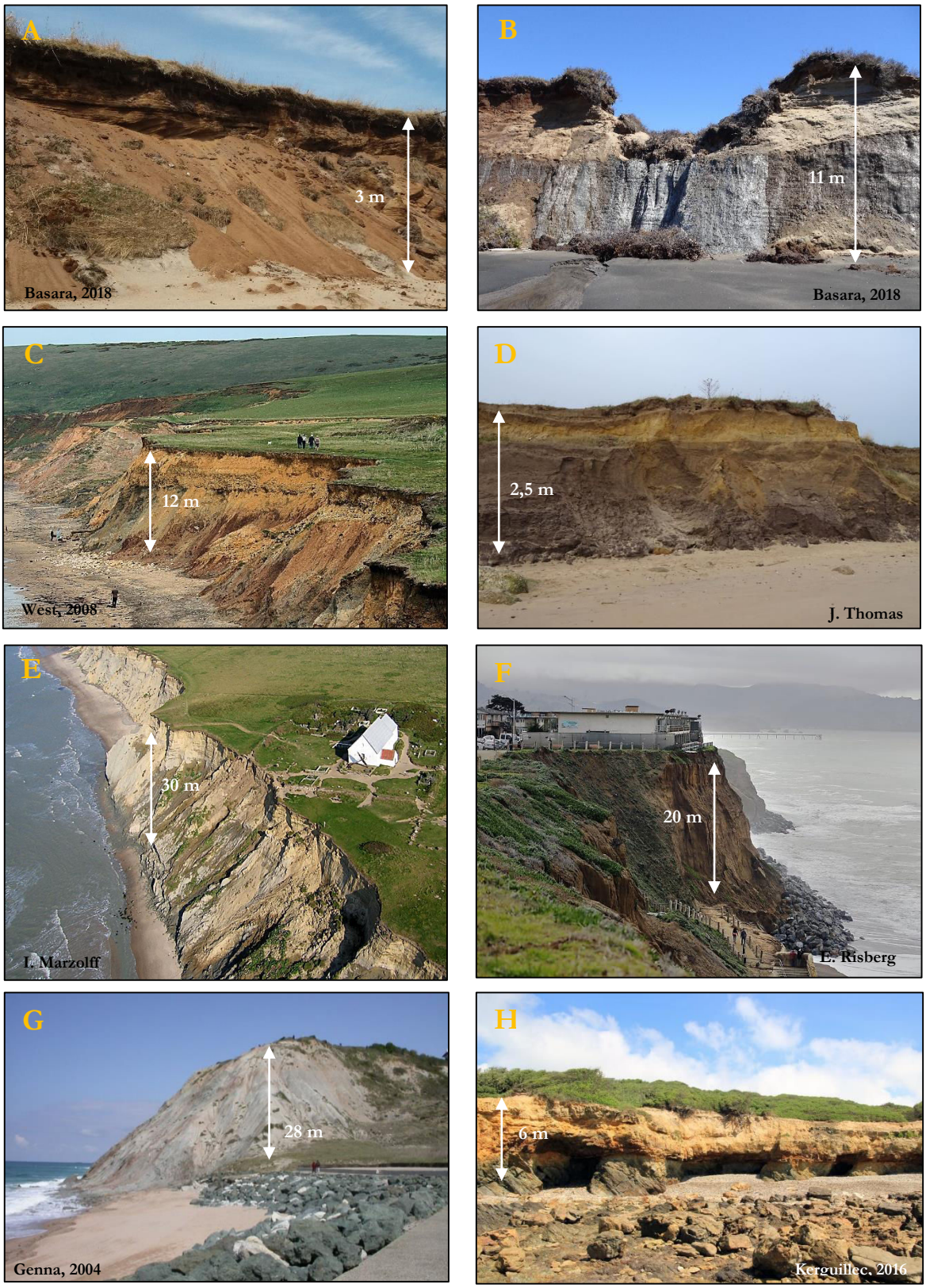
Fig. 6 : Évolution et recul d'une falaise meuble par le nettoyage des formations de versant (réalisation : A. Hénaff, 2018).



La distribution globale des falaises meubles est encore assez mal connue, les falaises meubles ayant été étudiées plus généralement dans les régions du monde où leur érosion pose des problèmes aux occupations anthropiques. À l'échelle mondiale, les falaises meubles sont très répandues dans les hautes et moyennes latitudes ayant connu notamment l'alternance de climats froids et tempérés de la période Quaternaire (Davidson-Arnott, 2010) (Fig. 7). Ainsi, on peut observer des falaises meubles sur les trois façades maritimes du Canada, sur la côte nord-ouest des États-Unis (ex : Californie) et sur la côte sud de la Nouvelle-Zélande (Fig. 7). Dans l'Europe de l'Ouest, les falaises meubles sont fréquentes sur de nombreuses portions de côte comme à l'est et au sud de l'Angleterre (par exemple, le secteur de côte d'Holderness dans le Yorkshire ou la côte de la région de Christchurch) et sont très communes dans les îles britanniques formées le plus souvent de tills glaciaires comme l'île de Wight (Stuiver, 2013). Elles sont également présentes sur une partie du littoral irlandais et de la côte baltique du Danemark et de l'Allemagne (Davidson-Arnott, 2010). En France, elles se localisent principalement sur la côte armoricaine (Hénaff et al., 2018) mais aussi sur les côtes vendéennes (Albinet, 2016) et basques (Genna, 2004), en lien avec l'histoire géologique récente de ces régions.

La variété des dépôts dans lesquels les falaises meubles sont constituées explique, en partie, la diversité des situations morphologiques et topographiques (Meynier, 1959 ; Giot et Monnier, 1972 ; Monnier et Bigot, 1987) (Fig. 7). Une falaise meuble peut, de ce fait, revêtir de nombreuses formes (profil, pentes et dimensions, présence ou absence d'affleurement rocheux basal) selon la nature des matériaux hérités, le stade de dénudation et les processus d'érosion impliqués. La diversité lithologique est aussi à l'origine de vitesses de recul différentes et donc d'un niveau d'aléa plus ou moins élevé selon les secteurs.

Fig. 7 : Exemples de falaises meubles dans le monde.



A : falaise de sable de Val-Marguerite (Québec). B : falaise de sable et de silt marin de Rivière-Saint-Jean (Québec) ; C : falaise d'alluvions pléistocènes de l'île de Wight (Royaume-Uni) ; D : falaise de sable et d'argile de Fraisthorpe (Royaume-Uni) ; E : falaise d'argile et de silt de Marup Kirke (Danemark) ; F : falaise d'alluvions et de sable de Pacifica (Californie) ; G : falaise de marne de Bidart (Pays basque, France) ; H : falaise de micaschistes altérés, surmontés de sables quaternaires à Jard-sur-Mer (côte vendéenne, France).

Vitesses de recul

Du fait de la moins grande cohésion des matériaux dont elles sont formées, les falaises meubles reculent rapidement en comparaison des falaises rocheuses (Woodroffe, 2002). Les taux de recul des falaises meubles sont généralement compris entre 0,1 et 1,0 m/an (Masselink et al., 2014 ; Sunamura, 2015) mais ils peuvent également être plus élevés (Dubois, 1999 ; Davidson-Arnott, 2010). À titre d'exemple, des taux de recul de 1,30 et de 1,97 m/an ont été mesurés sur des falaises meubles silto-sableuses, au nord du Québec (période 1948-2005) (Bernatchez et Dubois, 2008). En Europe, les falaises anglaises de la côte d'Holderness, composées d'argile (till glaciaire), sont une des côtes à falaises meubles reculant le plus rapidement avec des retraits pouvant atteindre 4,70 m/an (période 1993-2010) (Woodroffe, 2002 ; Quinn et al., 2009 ; Brooks et al., 2012). Des taux de recul supérieurs à 1 m/an ont également été mesurés en Allemagne, au Danemark, en Russie, au Japon ainsi qu'en Nouvelle-Zélande (Prior, 1977 ; Sunamura, 1992 ; de Lange et Moon, 2005).

Si l'existence même des falaises meubles est intrinsèquement liée à leur recul progressif, plusieurs travaux de recherche menés sur des littoraux à falaises meubles montrent une accélération de l'érosion depuis plusieurs dizaines d'années (ex : Pinot, 1998 ; Bernatchez et al., 2012). Cette accélération récente de l'érosion serait consécutive de la poursuite de la transgression postglaciaire à laquelle s'additionne, à partir de la fin du 19^{e} siècle, sa légère accélération en lien avec le réchauffement climatique global (Pirazzoli, 1993 ; Dubois, 1999 ; Paskoff, 2001) et l'intervention de facteurs anthropiques (Bernatchez et Dubois, 2004). Associé à ces forçages, le contexte contemporain, aux latitudes tempérées notamment, de déficit ou de pénurie sédimentaire (Paskoff, 1985 ; Miossec, 1987) contribue également à amoindrir les volumes des accumulations littorales présentes au pied de ces falaises. Leur rôle d'atténuation de l'énergie des vagues est ainsi diminué. De plus, à l'action naturelle des processus d'origine marine et subaérienne, s'est superposée l'action humaine. Cette influence anthropique se fait, par exemple, par les extractions de sédiments côtiers, la modification de la perméabilité des sols ou l'artificialisation du trait de côte (Paskoff, 1985 ; Pinot, 1998 ; Bernatchez, Fraser et Lefaivre, 2008 ; Hapke et al., 2013). Les causes de l'érosion des falaises meubles sont donc nombreuses et l'addition de ces facteurs contribue à accélérer le recul et à augmenter l'aléa érosion.

C'est pour cette raison et parce que le recul des falaises meubles menace de plus en plus d'infrastructures installées sur le littoral (Fig. 8), qu'il y a, depuis une dizaine d'années, un regain d'intérêt pour l'étude des falaises côtières et en particulier des falaises meubles (Sunamura, 2015). Ainsi, les rythmes de recul des falaises meubles sont bien documentés dans les secteurs où le recul des falaises menace de nombreuses infrastructures comme aux États-Unis (Edil et Vallejo, 1980 ; Carter et Guy Jr, 1988 ; Komar et Shih, 1993 ; Griggs, 1994 ; Moore et al., 1999 ; Collins et Sitar, 2008), au Canada (Carter et Guy Jr, 1988 ; Hequette et Barnes, 1990 ; Daigneault, 2001 ; Bernatchez et Dubois, 2004) ou encore au Royaume-Uni (Steers, 1951 ; Cambers, 1976 ; Robertson, 1990 ; Pethick et al., 1996 ; Bray et Hooke, 1997 ; Lee, 2008 ; Brooks et al., 2012 ; Stuiver, 2013).

Fig. 8 : Enjeux menacés par le recul des falaises meubles dans le monde.

A et B : résidences individuelles et collectives à Pacifica (Californie) ; C et D : camping et mobil-homes à Longbeach Leisure Park (Royaume-Uni) ; E : résidence à Easton (Royaume-Uni) ; F : route à Oamaru (Nouvelle-Zélande).

En Bretagne, les enjeux au sommet et en arrière des falaises se sont également multipliés durant le 20e siècle (Fournier et Regnauld, 1991) et sont toujours en augmentation. Ainsi, les enjeux humains et bâtis exposés au recul des falaises meubles posent désormais de nombreux problèmes de gestion (Biville et Van Waerbeke, 2003). De plus, les falaises meubles bretonnes souffrent d'un déficit de connaissance à la fois sur l'aléa érosion et sur les enjeux menacés. C'est pourquoi, la Bretagne a été choisie comme territoire d'étude dans cette thèse. Avant d'étudier les conditions climatiques et météorologiques spécifiques au littoral breton, il convient de rappeler le contexte de croissance des risques en Bretagne qui sont liés, conjointement, au recul des falaises meubles et à la croissance de l'urbanisation et des activités humaines sur le littoral.

1.3- La problématique du risque d'érosion des falaises meubles en Bretagne

La Bretagne possédant à elle seule un tiers du linéaire côtier national (DREAL Bretagne, 2013) est particulièrement concernée par le problème du recul du trait de côte et notamment, des falaises meubles qui représentent un peu plus de 20 % de son linéaire (Hénaff et al., 2018). En Bretagne, les problèmes liés au recul des falaises meubles existent déjà depuis une dizaine d'années (Pinot, 1998). De nombreux vestiges témoignent de la régression de ces falaises tout au long de la période historique.

1.3.1- Les témoins du recul des falaises meubles en Bretagne

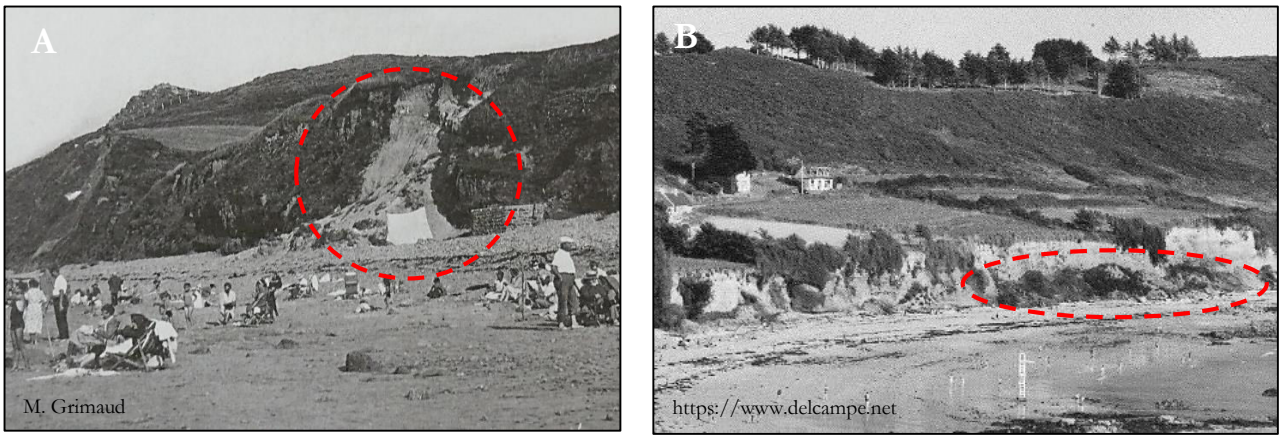
En Bretagne, de nombreuses marques attestent du recul des falaises meubles. Les blockhaus du mur de l'Atlantique font partie, bien évidemment, de ces témoins de l'évolution récente du littoral (Clus-Auby, 2003). Bâtis en arrière du rivage, sur les dunes littorales, mais aussi en sommet de falaise dans les années 1940-1942, on les rencontre aujourd'hui basculés sur les plages ou à flanc de falaise (Fig. 9).

Fig. 9 : Blockhaus présent en sommet de falaise à Pléneuf-Val-André (photo de gauche) et basculé en avant des falaises meubles à Pouldreuzic (photo de droite).

Des photographies anciennes (Fig. 10) et de nombreux écrits du début du 20e siècle témoignent également des phénomènes d'érosion de falaises meubles à cette époque : « *Dans le fond de la baie, les falaises qui gardent Tournemine et Saint-Laurent-de-la-Mer ont été une nouvelle fois creusées par la mer déchaînée. Des éboulements importants se sont produits […] Les éboulis jalonnent toute une partie de la plage. On en note de moins graves à Saint-Laurent, près du préventorium mais la situation des villas et maisons juchées sur la falaise est de plus en plus critique, surtout à Tournemine* » (Article Le Télégramme du 6 avril 1962, Archives Départementales des Côtes-d'Armor).

D'abord étudiées pour la richesse d'informations stratigraphiques contenues dans les formations sédimentaires (Meynier, 1959 ; Hallégouët, 1971 ; Giot et Monnier, 1972 ; Monnier, 1979 ; Hallégouët et Van Vliet-Lanoë, 1986 ; Bigot et Monnier, 1987), les falaises meubles ont ensuite fait l'objet de plus d'attention concernant leur recul et le risque associé (Fournier et Regnauld, 1991 ; Hallégouet et Hénaff, 1993 ; Pinot, 1993 ; Bonnot-Courtois et Lafond, 1995 ; Bousquet-Bressolier et Bonnot-Courtois, 1998). Pinot (1993) et Bousquet-Bressolier et Bonnot-Courtois (1998) utilisent notamment des documents anciens décrivant la topographie ou le paysage de l'époque telles les cartes des Ingénieurs Géographes du 18e siècle et les plans cadastraux du 19e siècle pour retracer l'évolution de portions de côte en Bretagne. À partir de ces documents, Pinot (1993) estime le recul des falaises meubles sur la côte septentrionale de la Bretagne à environ 0,2 m/an sur les deux derniers siècles.

Fig. 10 : Photographies anciennes montrant la présence de masses glissées au pied de falaises meubles.



A : falaise de la plage des Vallées à Pléneuf-Val-André (années 1930) ; B : falaise de Pors-Mabo à Trébeurden (années 1960).

Enfin, des vestiges plus anciens mettent aussi en évidence le recul des falaises meubles depuis plusieurs siècles et millénaires en Bretagne. Par exemple, des vestiges paléolithiques (pièces lithiques) témoignant d'une occupation humaine antérieure au dernier interglaciaire ont été retrouvés à la base des falaises de la plage des Vallées, à Pléneuf-Val-André (22) (Leclerc et Milon, 1925 ; Huet, 2010 ; Bahain et al., 2012 ; Danukalova et al., 2015). De même, au Moulin de la Rive, à Locquirec (29), des objets datant de l'âge du Fer (débris de cuisine et tessons de céramique), ont été découverts au niveau de la paléodune coiffant la partie supérieure de la falaise meuble (Giot et al., 1958 ; Daire et al., 2014). Ces sites paléolithiques retrouvés au niveaux des abrupts ou aux pieds de falaises meubles sont très nombreux en Bretagne (Hinguant, 1997 ; Hinguant, 1998 ; Monnier et al., 2011 ; Monnier et al., 2016). La position actuelle de ces sites paléolithiques témoigne de l'augmentation du niveau marin et du recul des falaises meubles depuis l'époque de ces occupations humaines (Fig. 11).

Fig. 11 : Gisement paléolithique retrouvé sur l'estran et en avant des falaises meubles de la plage des Vallées, à Pléneuf-Val-André (Huet, 2010).

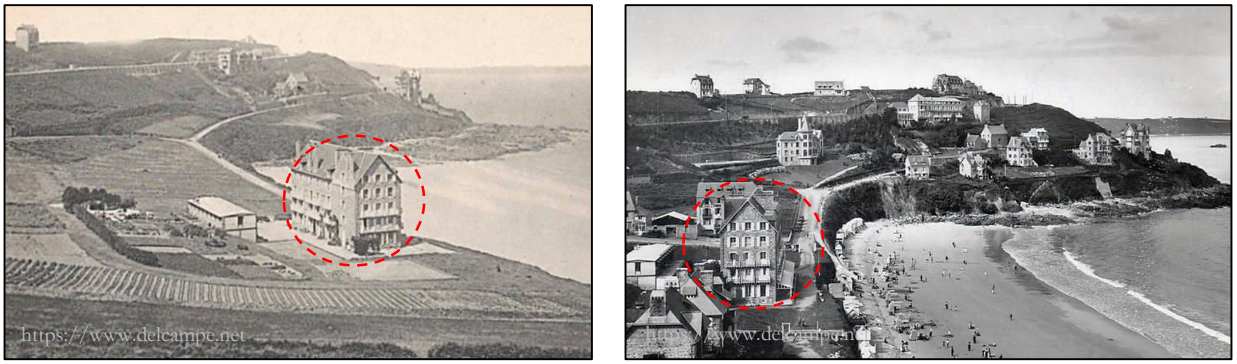
Ces vestiges et témoignages du recul des falaises meubles en Bretagne confirment la régression du rivage tout au long de la période historique et des périodes postglaciaire et holocène.

1.3.2- Augmentation des enjeux

Les travaux des historiens et géographes révèlent que la densification de l'occupation du littoral en Bretagne est relativement récente (Miossec, 1986). Ainsi, jusqu'à la fin du 18e siècle, les côtes bretonnes, comme la plupart des côtes européennes, étaient peu occupées et pouvaient être qualifiées de « *territoire du vide* » (Corbin, 1988). Le rivage et la mer suscitaient souvent un sentiment de crainte et d'hostilité. Seules les activités nécessitant la proximité de la mer (ex : pêche, transport maritime, installations militaires) étaient à l'origine d'une occupation du littoral.

À partir du 19e siècle, la représentation du littoral change (Cabantou et al., 2005) et l'essor, en France, des chemins de fer qui relient Paris aux côtes françaises, contribue à développer le tourisme balnéaire, à l'image de stations comme Dinard ou Erquy (Clairay et Vincent, 2008). À la suite de l'amélioration des transports au 19e siècle, puis à l'émergence du tourisme de masse vers les années 1960, le littoral breton, comme de nombreux autres littoraux dans le monde, subit le phénomène d'haliotropisme et son occupation se densifie selon une évolution spatiale hétérogène (Weissenberger et al., 2016). Les villas aristocratiques bâties le long des côtes font progressivement place à des constructions plus denses (Fig. 12).

Fig. 12 : Densification de l'urbanisation du sommet des falaises meubles de Trestrignel, à Perros-Guirec (22), entre le début et la moitié du 20e siècle (l'hôtel entouré en rouge sert à se repérer).



Cette densification de l'occupation du littoral se manifeste par une croissance de la population qui s'accélère fortement après la Seconde Guerre mondiale (Ramonet, 2010). Ainsi, sur la période 1962-1975, la population des communes littorales de la région Bretagne aurait augmenté de 6 %, puis de 8 % sur la période 1975-1999, pour compter 1 121 254 habitants en 1999 (Chamseddine et Dupont, 2013). Du « *territoire du vide* » (Corbin, 1988), les côtes sont devenues « *territoire de trop plein* » dans les décennies 1960-1980, voire un « *territoire d'empoigne* » dans les années 1990 (Paskoff, 1993) du fait des conflits d'intérêt qui se manifestent entre activités concurrentes sur les territoires littoraux.

L'écart autrefois préservé entre les bourgs situés dans les terres et le trait de côte s'est donc, dans de nombreux endroits, considérablement réduit : les constructions ont été rapprochées le plus près possible du rivage pour profiter au maximum des aménités offertes par la mer (Meur-Ferec et Morel, 2004). Toutefois, la densification de l'occupation du littoral breton au 20e siècle s'est faite de manière hétérogène, les aménageurs privilégiant d'abord les zones basses car étant plus accessibles, moins exposées au vent et avec des coûts de constructions moindres en comparaison des littoraux élevés. Ainsi, hormis les bâtiments militaires et les exploitations agricoles, les falaises meubles ont été pendant longtemps peu occupées (Fournier et Regnauld, 1991). Cependant, depuis plusieurs dizaines d'années, face à la saturation et au prix des surfaces des côtes basses ainsi qu'aux nouvelles réglementations (ex : plans de prévention des risques, protections environnementales), les sommets de falaise font de plus en plus l'objet de convoitises et sont affectés par une urbanisation croissante. Ainsi, après avoir occupé l'ensemble des côtes basses, l'urbanisation a progressivement gagné les versants plus élevés, dont les falaises meubles, bénéficiant de la « vue sur mer ».

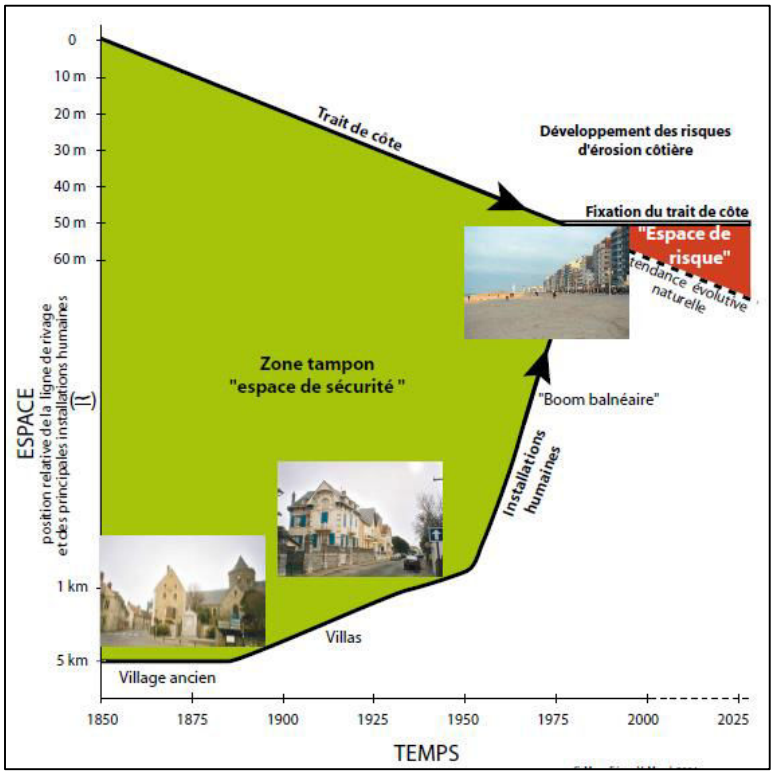
Cette densification de l'occupation du littoral se poursuit aujourd'hui et se traduit par une artificialisation des terres très consommatrice d'espace (Babillot, 2000). Les surfaces agricoles sont remplacées progressivement par des résidences principales ou secondaires (DATAR, 2004). Ainsi, en seulement 20 ans (période 1985-2005), la Bretagne a doublé ses surfaces artificialisées et la bande littorale (bande des 500 m depuis le rivage) serait particulièrement concernée (Connan et al., 2010). En 2005, dans quarante des 271 communes maritimes, la bande littorale est ainsi urbanisée sur plus de la moitié de sa superficie.

La Bretagne est donc devenue une région attractive et les communes littorales sont celles évoluant le plus rapidement. Au 1er janvier 2019, dans les communes littorales bretonnes, la densité de population est de 237,6 hab/km^2, soit près de deux fois supérieure à la densité moyenne régionale (121,5 hab/km^2). De plus, la réduction du temps de parcours entre Paris et la Bretagne, avec l'arrivée de la Ligne à Grande Vitesse (LGV) en 2017, pourrait amplifier le solde migratoire et l'arrivée de nouveaux habitants (Moulinier et Poupard, 2017).

1.3.3- L'émergence du risque

C'est par les deux dynamiques convergentes, le recul du trait de côte et le rapprochement de la population de la ligne du rivage, que les risques côtiers d'érosion sont apparus en Bretagne. Le schéma ci-dessous (Fig. 13) met en évidence, à l'échelle des deux derniers siècles, ces deux dynamiques convergentes. Cette observation n'est pas valable uniquement pour les falaises meubles bretonnes mais également pour la grande majorité des littoraux anthropisés du monde (Meur-Ferec, 2006).

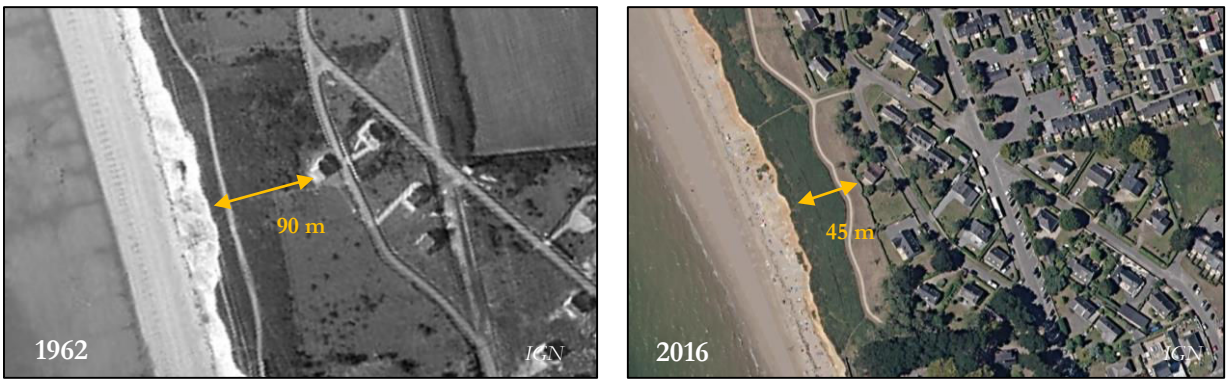
Fig. 13 : L'émergence des risques littoraux : dynamiques convergentes du trait de côte et de l'occupation du rivage (Meur-Ferec, 2006).



La comparaison de photographies aériennes verticales, prises durant le 20e et le 21e siècles, témoigne du fort rapprochement de la ligne de rivage et des zones anthropisées (Fig. 14). Ainsi, sur le site de la Mine

d'Or, à Pénestin (56), des habitations construites à 90 mètres du rivage, il y a environ 50 ans, se retrouvent aujourd'hui à moins de 45 mètres du sommet de falaise.

Fig. 14 : Rapprochement du sommet de falaise de la plage de la Mine d'Or, à Pénestin, avec les zones urbanisées, entre 1962 et 2016.



Ainsi, la dynamique régressive de nombreux linéaires côtiers en Bretagne rattrape actuellement l'urbanisation installée trop près de côtes à falaises meubles. L'apparition des risques d'érosion liés, non seulement à la mobilité du trait de côte, mais également à la dynamique des populations, est accompagnée par l'émergence de revendications associatives et individuelles concernant les usages du littoral. Ainsi, les premiers contentieux sur l'appropriation des chemins littoraux, en Bretagne, font leur apparition dès les années 1970 (DREAL Bretagne, 2013).

L'émergence des risques d'érosion de falaises meubles a eu aussi pour conséquence la mise en place de nombreux ouvrages de défense contre la mer (Bioret, 1985) (Fig. 15). Face au recul des falaises, la réaction des propriétaires riverains a, effectivement, été de protéger leurs biens en essayant de fixer le littoral contre son érosion naturelle. Les zones à risque se sont alors développées et sont maintenues en permanence, de manière artificielle, dans une stabilité qui est très coûteuse (Albinet, 1995). Actuellement, cet équilibre instable pose des questions de société et d'environnement. Les ouvrages construits pour fixer le trait de côte sont aujourd'hui controversés car ils perturbent le fonctionnement naturel des littoraux. Selon une étude menée par l'Institut Français de l'Environnement (IFEN), en 2004, 21,8 % du littoral breton serait concerné par la présence d'ouvrages de défense contre la mer. Toutefois, avec l'émergence récente des principes de Gestion Intégrée des Zones Côtières (GIZC), la gestion des risques côtiers ne se fait plus seulement par une maîtrise de l'aléa (Deboudt, 2010) mais aussi par la limitation des enjeux et le développement d'outils de prévention du risque.

Fig. 15 : Enrochement mis en place au pied des falaises meubles de la Mine d'Or à Pénestin, dans les années 1970.

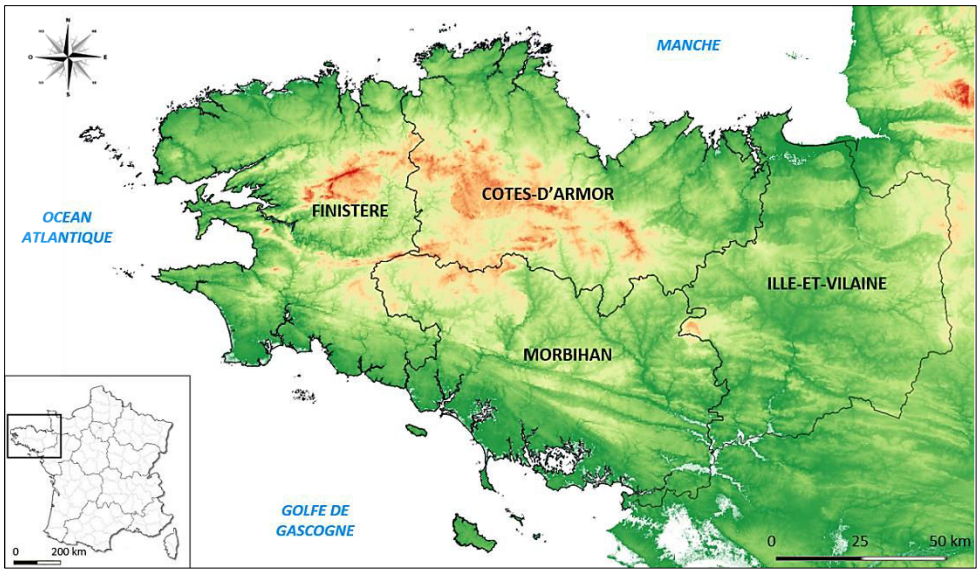
CHAPITRE 2 : Présentation du cadre régional de la Bretagne

Ce chapitre a pour objectif de définir le cadre géographique général du trait de côte de la Bretagne et, spécifiquement, des falaises meubles qui le composent. Cette première description repose sur un bref historique géologique, avec un focus sur la mise en place des dépôts quaternaires, nécessaire à la compréhension du contexte morphodynamique actuel. Cette description générale est complétée par une présentation des différents paramètres météorologiques (températures, vents, précipitations) et hydrodynamiques (marées, houles) qui participent au façonnement des falaises meubles bretonnes.

2.1- Contexte géographique

La Bretagne, située à la pointe ouest de la France est composée de trois façades maritimes (Fig. 16) : une façade nord bordée par la Manche, une façade ouest ouverte sur l'océan Atlantique et une façade sud ouverte à la fois sur l'océan Atlantique et le golfe de Gascogne. La Bretagne administrative se compose de quatre départements ayant tous une façade littorale plus ou moins importante : le Finistère, les Côtes-d'Armor, le Morbihan et l'Ille-et-Vilaine. D'une longueur de 2 470 km (référentiel Histolitt© IGN-SHOM, 2009), le linéaire breton s'étend de la baie du Mont-Saint-Michel, au nord-est, à l'estuaire de la Vilaine, au sud. Il représente un tiers des côtes françaises (Belleguic et al., 2012), faisant de la Bretagne la région de la France métropolitaine possédant le plus long littoral.

Fig. 16 : Localisation de la Bretagne et de ses départements.

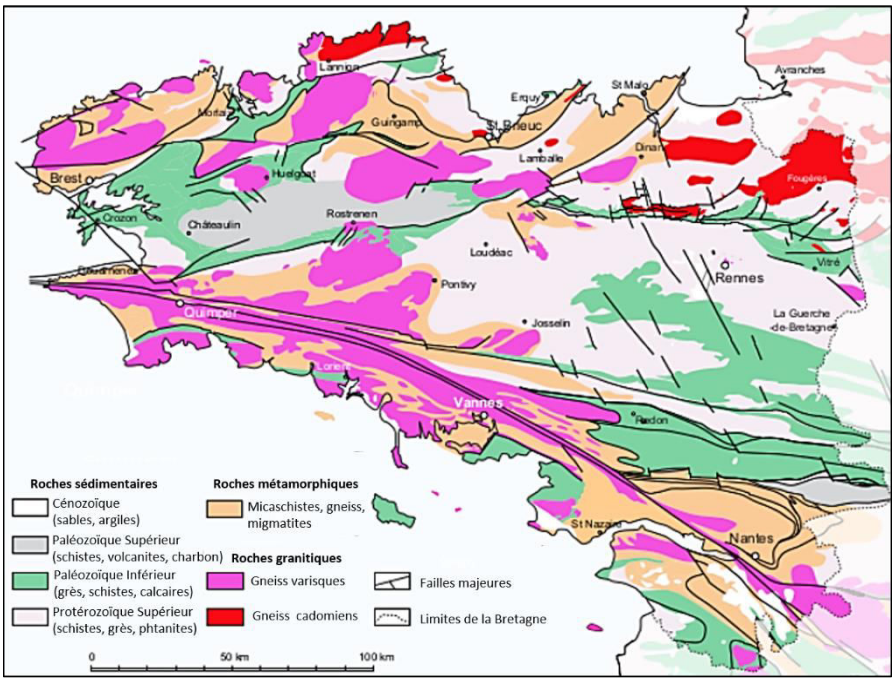


Les falaises meubles sont relativement bien représentées puisqu'elles s'étendent sur près de 20 % du linéaire côtier breton (Hénaff et al., 2018). Ainsi, les falaises meubles sont présentes sur 157 des 271 communes littorales bretonnes, soit sur plus de la moitié d'entre elles. Toutefois, la proportion de falaises meubles se répartit de manière hétérogène sur les quatre départements bretons : 49 % pour le Finistère, 40 % pour les Côtes-d'Armor, 8 % pour le Morbihan et 3 % pour l'Ille-et-Vilaine. Cette répartition est liée, d'une part, à la longueur de la façade littorale de chaque département et, d'autre part, à l'histoire géologique récente de la région (Monnier, 1980 ; Hallégouët et Van Vliet-Lanoë, 1986).

2.2- Histoire géologique

La Bretagne correspond à la partie la plus occidentale du Massif armoricain. Ses caractéristiques litho-structurales sont issues d'une histoire géologique longue et complexe, marquée notamment par une phase d'érosion continentale et marine au cours des 300 derniers millions d'années et qui explique le tracé général, très découpé, des côtes actuelles (Guilcher, 1948 ; Garreau, 1979 ; Bournérias et al., 1985 ; Lardeux et Audren, 1996 ; Ballèvre et al., 2013).

Fig. 17 : Carte géologique simplifiée de la Bretagne (modifié de F. Paris, 2018).



Le Massif armoricain est constitué d'un socle de roches sédimentaires datant de la fin du Précambrien et d'une couverture Paléozoïque étagée du Cambrien au Carbonifère (Fig. 17). Ce socle s'étend jusqu'au milieu de la Manche (100 à 150 m de profondeur) et jusqu'à la plaine abyssale de l'Atlantique (vers 4 000 m de profondeur). La morphologie actuelle de la Bretagne résulte principalement de la grande phase d'aplanissement post-hercynienne. L'érosion et l'altération des roches constituant le socle se sont effectuées notamment grâce à des climats humides tropicaux alternant avec des périodes tempérées ou froides pendant le Tertiaire (Lardeux et Audren, 1996). Ensuite, entre la fin du Tertiaire et le début du Quaternaire, des déformations tectoniques liées à l'orogénèse alpine, entrainent un mouvement de « bascule » du Massif armoricain (Mercier, 2013) qui se traduit par un soulèvement de la partie septentrionale du massif au dépend de la partie méridionale qui elle, s'affaisse. Ceci explique que le littoral nord de la Bretagne est plus élevé que le littoral sud. Enfin, au Quaternaire, avec l'alternance des périodes glaciaires et interglaciaires, les vallées sont creusées profondément lorsque le niveau marin est bas et ces périodes froides sont accompagnées par la mise en place de dépôts périglaciaires venant recouvrir l'ensemble des reliefs (Morzadec-Kerfourn, 1974). Un focus sur cette dernière période géologique est présenté dans la section qui vient afin de mieux saisir le contexte de mise en place des formations quaternaires qui est à l'origine de la diversité des côtes à falaises meubles en Bretagne.

Le contexte de mise en place des formations meubles quaternaires en Bretagne

Au Pléistocène, la Bretagne est caractérisée par l'alternance, régulière, de climats tempérés humides et parfois plus chauds que l'actuel, et de climats de type périglaciaire, froids et secs, entrecoupées d'oscillations climatiques mineures et de courte durée (Monnier et Morzadec-Kerfourn, 1982 ; Biville,

2004 ; Monnier et al., 2016). Ces cycles s'accompagnent d'importantes variations du niveau marin, comprises entre -120 m et +25 m au-dessus du niveau actuel (Fig. 18). De nombreuses formes retrouvées sur le continent telles des plages fossiles ou des dépôts périglaciaires, témoignent de ces importantes variations eustatiques (Fig. 19). Les dépôts pléistocènes conservés dans le Massif armoricain, notamment dans la baie de Saint-Brieuc, permettent de retracer l'histoire des trois derniers cycles glaciaires-interglaciaires (Laforge et Huet, 2013) (Fig. 18). Les sédiments périglaciaires antérieurs ont été nettoyés par la transgression qui s'est produite aux alentours de 320 000 ans et qui avait un niveau légèrement supérieur à l'actuel.

Fig. 18 : Reconstitution des variations du niveau marin en Atlantique Nord (en trait plein) et pour l'est du Pacifique (en pointillés) et chronologie isotopique (interglaciaire en gris et glaciaire en blanc) (modifié de Laforge et Huet, 2013).

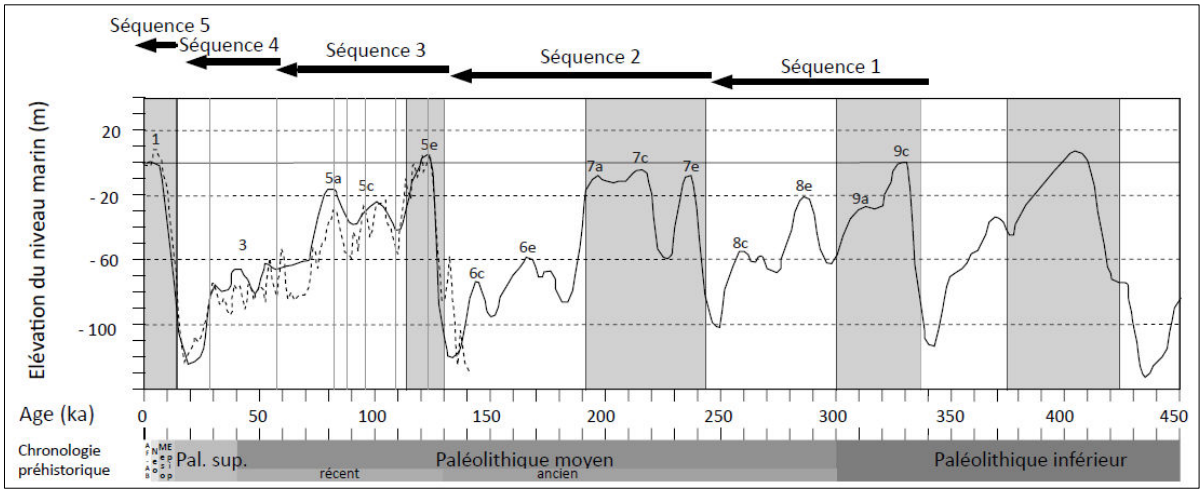
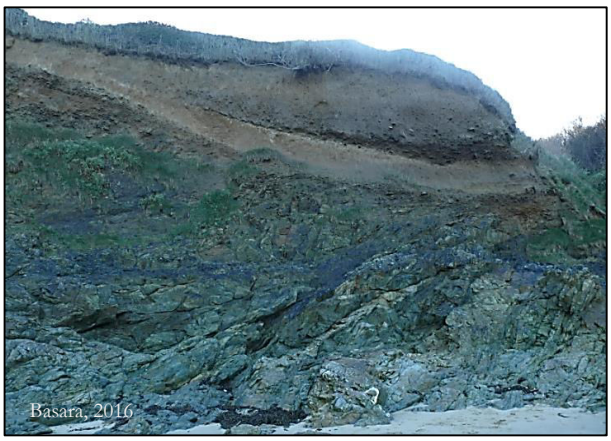


Fig. 19 : Plages anciennes et dépôts périglaciaires fossilisés dans des falaises meubles en Bretagne.



Plage ancienne et dépôts de pente reposant sur une plateforme rocheuse située à 2 m au-dessus du niveau des plus hautes mers actuelles (Planguenoual, 22).

Différents cordons de galets anciens se distinguant par la taille et la couleur des sédiments et témoignant de transgressions passées (Trélévern, 22).

Les falaises meubles bretonnes résultent donc de l'histoire de ces cycles glaciaires-interglaciaires et notamment du dernier cycle dont la mise en place des dépôts meubles constituant actuellement les falaises de Bretagne peut être décrite selon un modèle théorique de formation (Fig. 20) :

A et **B** : Pendant le précédent interglaciaire, la mer est montée à un niveau légèrement supérieur au niveau actuel (environ 3 à 4 m au-dessus). Elle a alors érodé la roche en place créant ainsi une plateforme d'érosion littorale. Elle a également déposé sur cette plateforme des galets et des sables marins qui sont visibles aujourd'hui vers le bas des falaises. Ces dépôts marins peuvent s'étendre dans les terres jusqu'à de bonnes distances et des altitudes légèrement supérieures à celles des galets actuels (parfois jusqu'à 6 m

plus haut) (Pinot, 1998). À la même période, sur le haut des versants, une abondante végétation de climat tempéré chaud crée des sols épais et riches en humus.

C : Lors du refroidissement qui a marqué le début de la glaciation Weichsélienne (il y a 70 000 ans), la mer a commencé à se retirer. Le froid réduisant la capacité de la végétation à retenir les sols, les fortes précipitations les ont érodés et les dépôts marins ont donc été recouverts par des colluvions issues du démantèlement des sols amont.

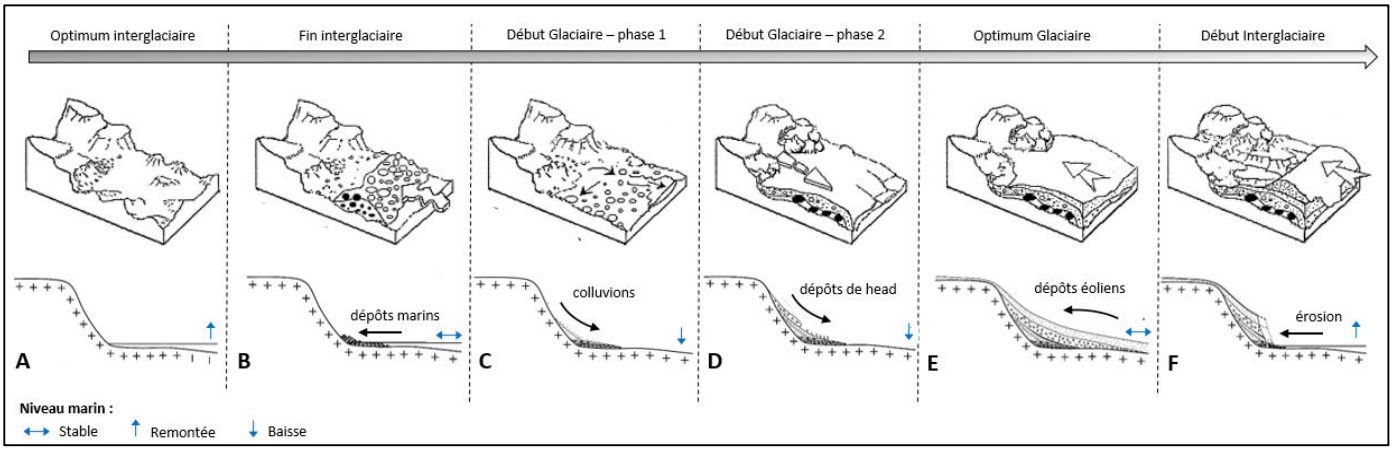
D : Avec le renforcement du froid, les roches se sont fracturées par des processus cryoclastiques qui ont formé de nombreux débris anguleux hétérométriques. Il se forme aussi un niveau continuellement gelé dans le sous-sol qui, lors des dégels superficiels printaniers, fournit de grandes quantités d'eau en surface qui contribuent à former des coulées de head glissant en masse sur les versants, principalement par solifluxion et gélifluxion. Ces coulées remobilisent parfois des dépôts plus anciens, vestiges de périodes interglaciaires ou glaciaires passées.

E : Lorsque la calotte glaciaire continue à se développer, jusqu'à venir à 300 km environ des côtes actuelles du nord de la Bretagne, un climat toujours très froid mais plus sec s'installe sur la région. Les vents glacés soufflant depuis la Manche apportent poussières, limons et argiles formant le loess qui constitue actuellement les falaises nord de la Bretagne. Ce dépôt est caractéristique du maximum de la glaciation qui a eu lieu environ entre 21 000 et 19 000 ans, lorsque la mer a connu un recul de plus de 120 mètres par rapport au niveau marin actuel (Laforge et Huet, 2013).

F : Aux alentours de 18 000 à 14 000 ans, l'amélioration climatique engendre la fonte des inlandsis et des glaciers continentaux et entraine donc une remontée rapide du niveau marin. Lors de sa remontée, des dunes s'installent au sommet des rivages et la mer commence à entailler les reliefs alors continentaux. Lors de cette transgression, la mer envahit progressivement le paysage continental hérité d'une longue histoire géologique formé par un manteau de dépôts sédimentaires issus des cycles glaciaires-interglaciaires précédents.

En ennoyant à nouveau d'anciens rivages, la mer a donc dégagé en partie la couverture meuble héritée. Cette dynamique n'est pas achevée et les littoraux actuels ne représentent qu'une étape dans la formation d'un nouveau rivage. Les falaises façonnées dans ces matériaux meubles sont un témoin important de cette phase de transition actuelle.

Fig. 20 : Modèle simplifié de la formation d'une falaise meuble au cours d'un cycle glaciaire-interglaciaire (modifié de Regnault, 2003 et Biville, 2004).



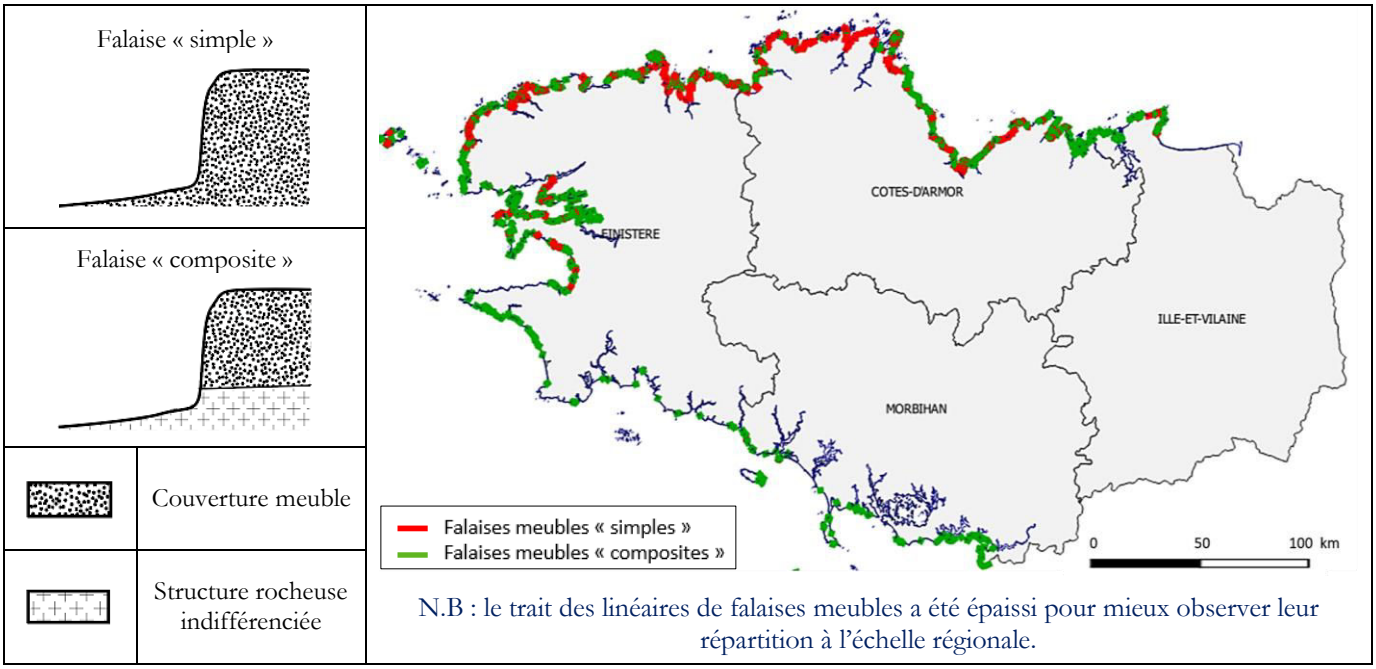
2.3- Contexte géomorphologique

L'histoire géologique précédemment décrite est à l'origine de la diversité des côtes bretonnes et notamment, des falaises meubles. Selon les travaux de A. Hénaff (2003), le linéaire breton est constitué de 42 % de falaises rocheuses, de 23 % d'accumulations littorales, de 20 % de falaises meubles et de 7 % de côtes rocheuses basses, les 8 % restant correspond au linéaire côtier artificialisé. Sur les 20 % de falaises meubles, une variété de morphologies peut être observée (Bonnot-Courtois et al., 2008). Ainsi, Biville (2004) choisit de distinguer les falaises meubles bretonnes selon deux types : les falaises « simples », taillées entièrement dans des formations quaternaires et les falaises « composites », taillées dans des roches cohérentes et surmontées de formations quaternaires (Fig. 21). Les falaises composites expriment donc un degré de dénudation de la couverture meuble héritée plus avancé que celui des falaises dites « simples ».

La répartition des falaises meubles en Bretagne selon leur typologie (simple/composite) (Fig. 21) est connue à partir de la cartographie et la numérisation de ces falaises qui s'appuient sur les travaux de M. Biville (2004) menés sur la côte nord de la Bretagne, et sur une analyse permettant de recenser les falaises meubles sur le linéaire côtier breton restant. Ce recensement s'est effectué à partir d'observations de terrain, réalisées notamment au début de la thèse dans le cadre d'un bilan régional préliminaire qui sera décrit dans le chapitre suivant. Le recensement s'appuie également sur de précédents travaux menés sur les falaises meubles en Bretagne (ex : Pinot, 1993, 1997 ; Bonnot-Courtois et Lafond, 1995 ; GRESARC, 2004) et de photographies du littoral, notamment celles présentes sur le site http://www.plages.tv, permettant de visualiser la géomorphologie de la côte.

Les falaises meubles se localisent principalement sur la côte nord-ouest de la Bretagne et les falaises « simples » y sont particulièrement représentées. À l'inverse, sur la côte méridionale, les falaises meubles sont moins fréquentes et correspondent majoritairement à des falaises « composites ».

Fig. 21 : Typologie des falaises meubles bretonnes (Biville, 2004) et répartition sur le linéaire côtier breton.



N.B : le trait des linéaires de falaises meubles a été épaissi pour mieux observer leur répartition à l'échelle régionale.

Afin de comprendre la répartition des falaises meubles sur le linéaire côtier breton, il est nécessaire d'étudier la nature et l'origine des matériaux meubles qui les composent.

Les matériaux constitutifs de la couverture meuble des falaises bretonnes

La couverture meuble constituant les falaises bretonnes peut être formée par des matériaux de nature très variée. Ces différentes formations sont présentées succinctement ci-dessous afin de comprendre leur origine et leur répartition spatiale à l'échelle régionale :

● Les **paléosols** correspondent à des sols qui se sont développés sur des formations variées (Biville, 2004). Ces paléosols témoignent de périodes relativement tempérées à chaudes nécessaires à leur formation (Monnier et al., 2016). Sur le littoral breton, les paléosols sont souvent difficiles à observer en raison de leur faible épaisseur, de leur érosion ou de leur remaniement lors de la mise en place des dépôts postérieurs. Toutefois, des paléosols bien conservés sont visibles sur certains affleurements de falaises meubles comme c'est par exemple le cas à Ploumanac'h ou à Paimpol (Fig. 22A).

● Le **head** correspond à un dépôt de pente hérité, d'épaisseur variable, formé sous climat périglaciaire froid et humide, mis en place sur les versants lors des phases de gel-dégel saisonniers par l'action combinée de plusieurs processus de transport dont la solifluxion (Lautridou, 1985). Il est formé par des blocs hétérométriques plus ou moins anguleux, enveloppés dans une matrice essentiellement limoneuse, généralement de couleur ocre (Fig. 22B). En Bretagne, le head est plus développé sur la côte septentrionale en raison des conditions hydriques et de gel plus favorables durant les périodes froides.

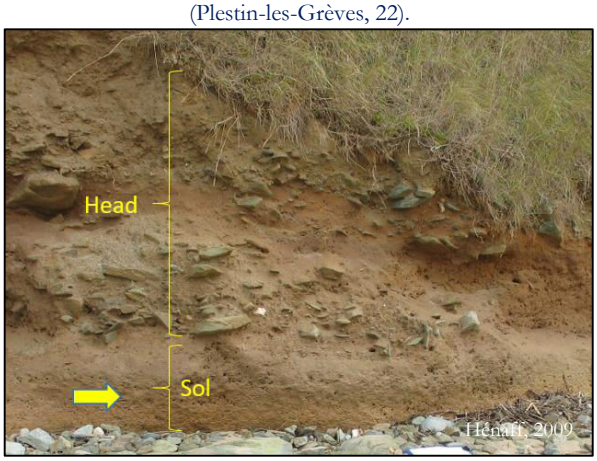
● Les **colluvions limoneuses** sont des formations superficielles de versant dont la genèse se rapproche de celle des heads mais, elles se différencient par un faciès majoritairement limoneux constitués rarement par des blocs (Hallégouët et Van Vliet-Lanoë, 1986) (Fig. 22C).

● Les **dépôts littoraux** présents dans les falaises meubles témoignent de phases de niveaux marins proches de l'actuel ou nettement au-dessus, lors des périodes interglaciaires ou des interstades. Ils se présentent sous forme de cordons de galets, de dunes ou de dépôts sableux de plage (Fig. 22D et Fig. 22E). Les dépôts littoraux ont été rapidement fossilisés par le recouvrement des dépôts de versant lors des périodes de refroidissement (Pinot, 1993). Les cordons de galets fossiles sont généralement mieux conservés que les horizons sableux, plus facilement mobilisables. Les dépôts littoraux anciens s'observent sur l'ensemble des côtes bretonnes (Stéphan, 2008).

● Les **loess** sont composés principalement de limons (60 à 80 %) avec une proportion modérée d'argile et de sable fin (Jamagne et al., 1981)(Fig. 22F). Ils correspondent à des sédiments apportés par des vents d'orientation nord-ouest/sud-est, à partir des paléo-estuaires et des zones exondées de la Manche, durant le Quaternaire (Fig. 23). Ceci explique leur localisation actuelle en Bretagne : ils sont localisés principalement le long de la côte septentrionale et sont absents des côtes méridionales (Monnier et al., 2016). Sur la côte nord, l'épaisseur des dépôts diminue progressivement de l'est vers l'ouest, dépassant fréquemment les quatre mètres dans la baie de Saint-Brieuc et ne représentant plus que 1 ou 2 mètres dans le pays du Léon (Finistère nord). Le loess correspond donc à une formation se déposant dans un contexte de climat froid et aride. Sur les côtes bretonnes, ces dépôts de loess sont associés aux deux dernières grandes glaciations.

Fig. 22 : Formations quaternaires constituant les falaises meubles bretonnes.

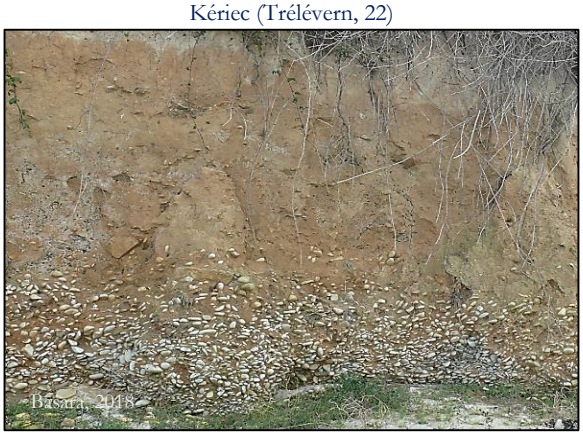
A : Paléosol visible à la base des falaises meubles du Hogolo (Plestin-les-Grèves, 22).



B : Coulées de head formant les falaises de Pors-Mabo (Trébeurden, 22)

C : Colluvions limoneuses successives formant les falaises de Tournemine (Plérin, 22)

D : Cordons de galets anciens visibles à la base des falaises de Kériec (Trélévern, 22)



E : Dépôts de dune interstratifiés et remaniés par des coulées de head (plage des Vallées, Pléneuf-Val-André, 22)

F : Dépôt de loess (formation claire) intercalé dans des colluvions et formant les falaises de l'Hôtellerie (Hillion, 22)

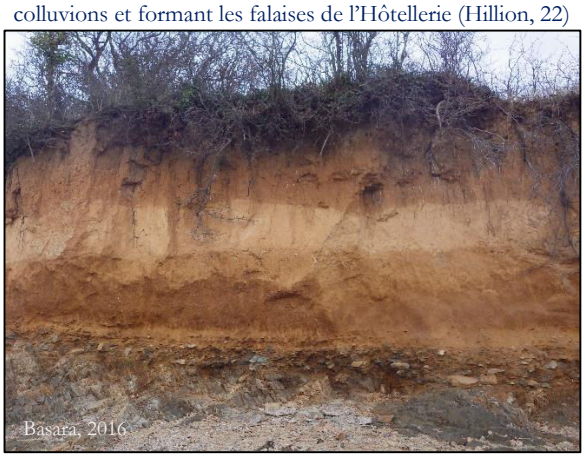
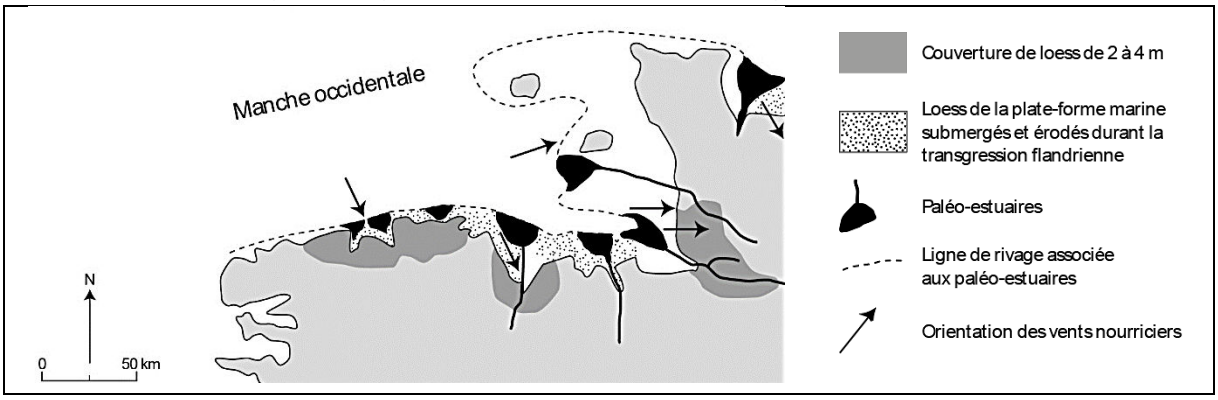


Fig. 23 : Origine et localisation du loess en Bretagne (Biville, 2004).



● Les **formations fluviatiles** sont peu abondantes sur le littoral breton mais peuvent aussi constituer des portions de falaises meubles qui sont actuellement sujettes à l'érosion (Fig. 24A). De telles formations sont visibles au sein des falaises meubles de la Mine d'Or à Pénestin et des falaises de Cromenac'h à Billiers. Ces dépôts meubles affleurent avec une épaisseur pouvant atteindre les 8 mètres.

● Les **altérites** correspondent à l'ensemble des matériaux issus de l'altération du substrat rocheux sans transport notable du résidu d'altération (Egal et al., 1995) (Fig. 24B). Ils peuvent correspondent à des arènes au sein desquelles les structures de la roche mère ont été conservées (isaltérites) ou ont disparu suite à la corrosion chimique des roches (apparition d'argiles) - elles sont alors appelées allotérites. Du fait de leur concentration élevée en minéraux argileux et de leur faible compacité, ces altérites représentent des matériaux meubles relativement sensibles à l'érosion marine et subaérienne. Le Massif armoricain est recouvert d'altérites sur une grande partie de sa superficie (Brault, 2002) et dans les falaises bretonnes, elles apparaissent fréquemment avec des degrés divers d'altération et d'épaisseurs : elles peuvent constituer aussi bien la base des falaises meubles que former l'ensemble du versant. L'altération s'exprime différemment selon le type de lithologie. Les altérites les mieux représentées, en termes d'épaisseur, sont celles développées sur les formations rocheuses les moins résistantes à l'altération, notamment les micaschistes et les diorites pour ce qui est du soubassement breton. Ces manteaux d'altération épais ont été élaborés lors de longue période d'émersion sous des climats chauds et humides, principalement durant le Crétacé et le Tertiaire (Mougin et al., 2008). La période Quaternaire n'a donné que des altérations d'épaisseur négligeable par rapport aux altérations antérieures.

Fig. 24 : Formations meubles non-quaternaires composant les falaises bretonnes.

A : Formations fluviatiles tertiaires composant la falaise de la Mine d'Or (Pénestin, 56).

B : Micaschistes altérés de la falaise de la plage des Granges (Billiers, 56) montrant une progression du profil d'altération (isaltérites vers allotérites).

La plus forte proportion des falaises meubles dites « simples » sur la côte nord de la Bretagne est donc liée à l'origine des formations les constituant, notamment les loess et les dépôts de versant. La variété

des modes d'élaboration, de transport et de dépôt des matériaux confère aux falaises meubles bretonnes une diversité de géomorphologie et de résistance à l'érosion (Hallégouët et Van Vliet-Lanoë, 1986).

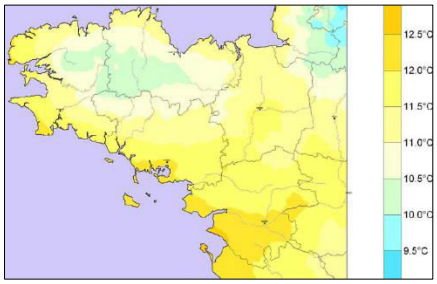
Outre le contexte géologique et morpho-structural déterminant la dynamique et la morphologie des falaises meubles, les paramètres météorologiques et hydrodynamiques participent à l'évolution de ces falaises. Les conditions météo-marines auxquelles sont soumises les côtes bretonnes sont décrites dans les sections suivantes.

2.4- Contexte météorologique et climatique

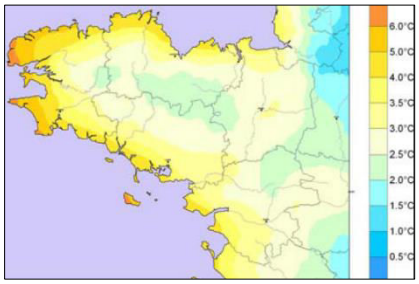
La Bretagne, bordée par la Manche au nord et l'océan Atlantique à l'ouest et au sud, est sous l'influence d'un régime « océanique tempéré » (Savelli et al., 2015). Le climat du territoire breton est défini par des normales établies en calculant la moyenne de chaque paramètre météorologique sur 30 ans. Selon les données Météo-France, sur la normale 1971-2000, le climat des côtes bretonnes est caractérisé par :

1) La douceur et la faible amplitude saisonnière des températures mensuelles. En effet, les températures moyennes, à la station météorologique de Brest-Guipavas (station de référence considérée représentative des conditions météorologiques sur le littoral breton) sont de 7°C en hiver et de 17°C en été. En raison des variations latitudinales, les températures moyennes augmentent légèrement du nord au sud, la différence étant d'autant plus marquée durant l'été (Fig. 25). Les variations de température au cours d'une même journée sont généralement faibles. Elles peuvent cependant avoisiner les 20 °C lors des journées de printemps où le ciel est bien dégagé.

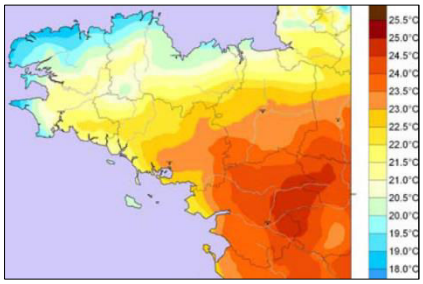
Fig. 25 : Normale des températures en Bretagne sur la période 1971-2000 (d'après Bretagne-environnement, source : données Météo-France).



Températures quotidiennes



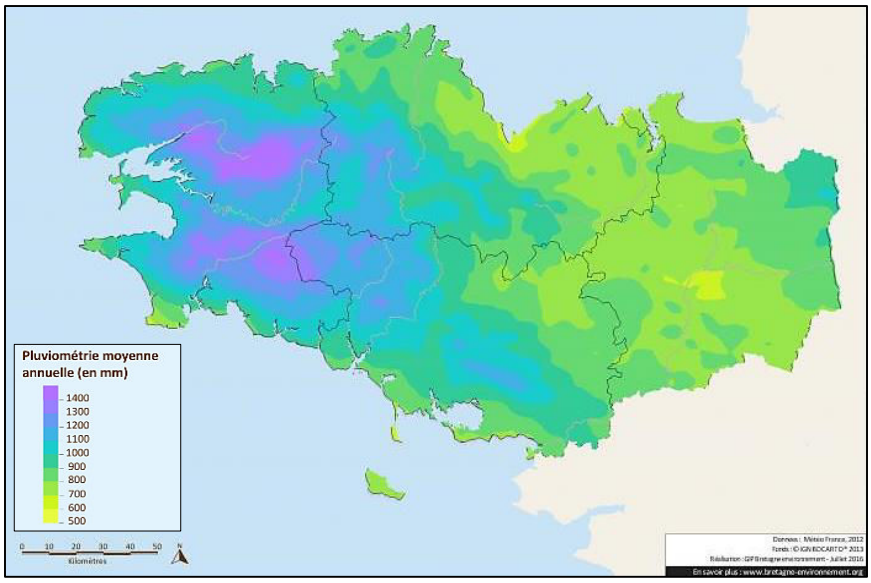
Températures minimales quotidiennes d'hiver



Températures maximales quotidiennes d'été

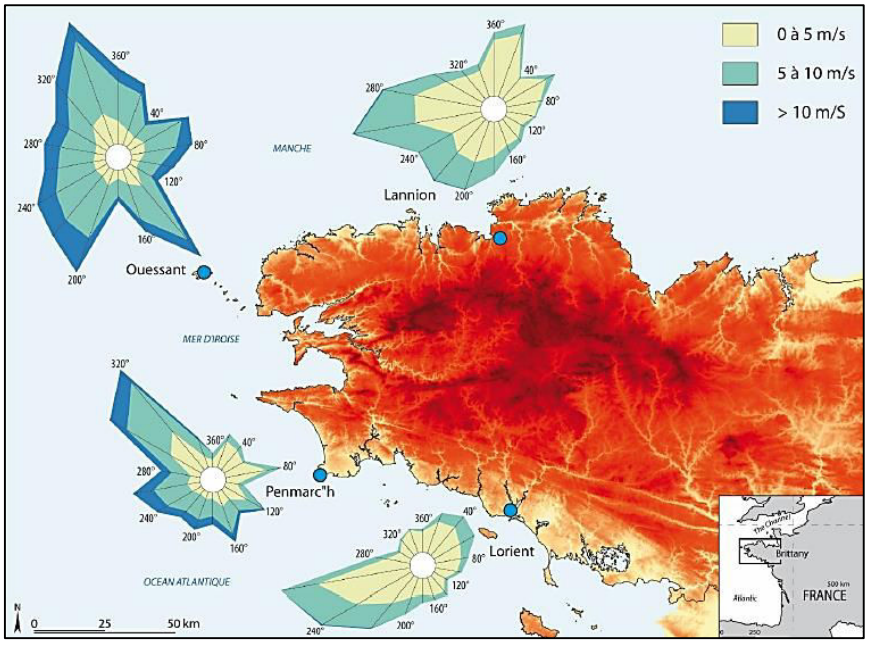
2) Des précipitations inégalement réparties, variant de 600 mm par an dans la baie de Saint-Brieuc à 1100 mm par an dans la rade de Brest (Fig. 26). La côte ouest de la Bretagne est globalement plus arrosée. Les cumuls annuels sont répartis pour deux tiers sur les saisons automne-hiver et le tiers restant sur les saisons printemps-été.

Fig. 26 : Normale du cumul pluviométrique annuel en Bretagne sur la période 1971-2000 (d'après Bretagne-environnement, source : données Météo-France).



3) La fréquence et la violence des vents (seulement 10 % des vents sont de force très faible, voire nulle) avec un vent moyen annuel de 7,5 m/s à Brest, les vents les plus forts étant observés en période hivernale. Toutefois, les conditions de vents diffèrent suivant les trois façades maritimes de la Bretagne (Fig. 27) (Blaise, 2017) : à l'ouest, les vents sont généralement plus forts que sur les deux autres façades bretonnes et soufflent principalement de secteur sud-ouest à nord-ouest. Sur la façade méridionale, les vents sont majoritairement ouest-sud-ouest. Sur la côte septentrionale, les vents soufflent principalement de secteurs sud-sud-ouest à ouest-nord-ouest. Sur cette façade, les vents d'afflux ne sont donc pas majoritaires contrairement aux deux autres façades. Cependant, la morphologie très découpée de la côte bretonne implique que les situations d'exposition à l'échelle locale sont très différentes. De ce fait, quel que soit le secteur, un vent est d'afflux pour au moins une portion de côte en Bretagne (Cariolet, 2011).

Fig. 27 : Direction et intensité moyennes des vents sur le littoral breton entre 2003 et 2013 (d'après Blaise, 2017 ; source : données Météo-France).



2.5- Contexte hydrodynamique

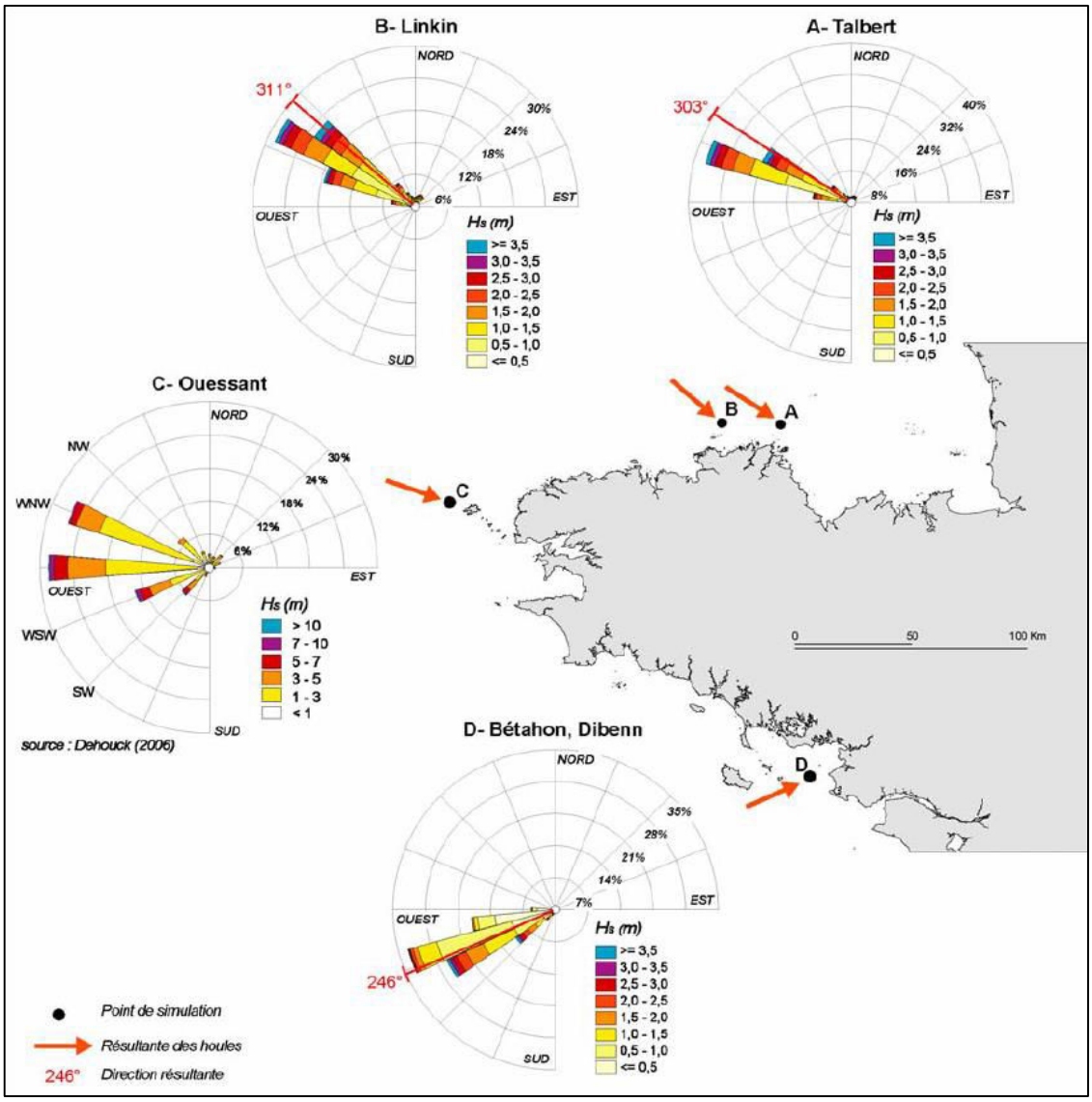
2.5.1- Caractéristiques des houles sur le linéaire breton

Les conditions de houle, aux larges des côtes bretonnes, sont connues grâce aux données issues du modèle de vagues ANEMOC (Atlas Numérique d'États de Mer Océaniques et Côtiers) (Fig. 28). Ce modèle simule les conditions d'agitation marine au large des côtes françaises de la Manche et de l'Atlantique et donne des informations sur la hauteur et la direction des houles (Benoit et Lafon, 2005 ; Benoit et al., 2008).

Ce modèle montre que les houles atteignant les côtes bretonnes proviennent principalement d'un quadrant sud-ouest à nord-ouest, les houles les plus fréquentes étant de secteur nord-ouest (Fig. 28). La hauteur des houles significatives diminue progressivement, d'ouest en est, le long de la côte septentrionale (Blaise, 2017) : elle passe progressivement de 9 à 4 mètres au large des côtes du Finistère nord jusqu'à des hauteurs moyennes inférieures à 2 mètres dans la baie du Mont-Saint-Michel. Ceci provient de l'amortissement des houles océaniques sur la plateforme continentale lors de leur entrée en Manche. Elles perdent alors une partie de leur énergie et, à l'approche des côtes, elles ont tendance à s'orienter perpendiculairement au rivage (Stéphan, 2011). De plus, en raison de la présence des îles britanniques, le fetch (distance sur la mer sur laquelle souffle le vent) est moins important en Manche et les houles sont, par conséquent, moins fortes (Cariolet, 2011).

Sur la côte méridionale, la direction des houles est principalement de secteur ouest-sud-ouest et, de même que pour la façade nord, la hauteur des houles diminue rapidement vers l'est, car elles sont amorties par la plateforme continentale peu profonde dans ce secteur et par la présence de nombreuses îles et îlots sud-bretons. Les hauteurs de houles significatives passent progressivement de 8 mètres, au large des côtes du Finistère sud, jusqu'à des hauteurs moyennes inférieures à 2 mètres dans le golfe du Morbihan.

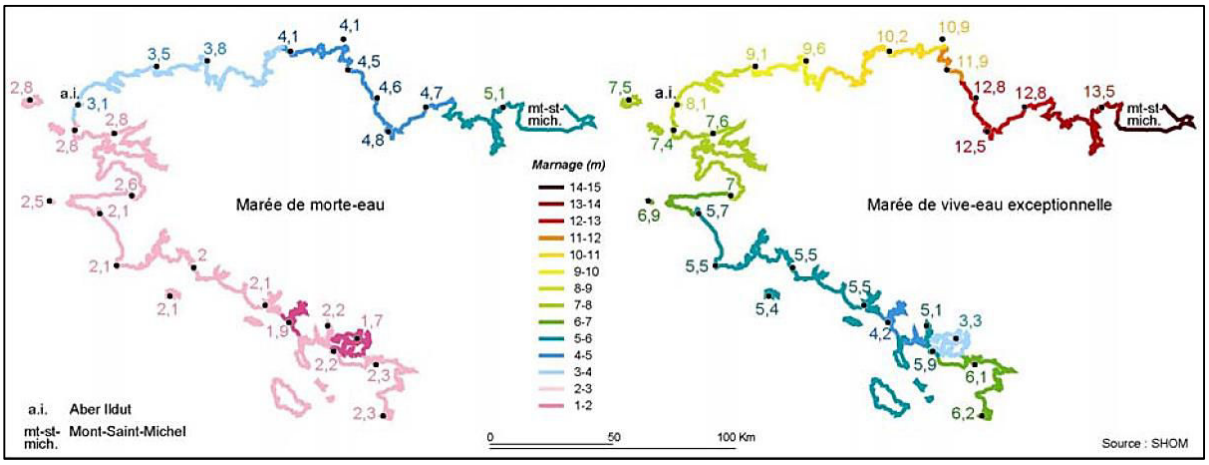
Fig. 28 : Rose des houles annuelles obtenues au large de la Bretagne, à partir des données issues du modèle ANEMOC pour la période 1979-2002 (Stéphan, 2008).



2.5.2- Conditions marégraphiques

Le littoral breton se situe dans un régime marégraphique macrotidal à mégatidal. Le marnage (hauteur entre le niveau des basses mers et des pleines mers), lors d'un coefficient de 120, varie de 3,3 mètres à Vannes jusqu'à 14 mètres dans la baie du Mont-Saint-Michel (Fig. 29). Sur la façade septentrionale de la Bretagne, le marnage augmente progressivement vers l'est en raison de l'amplification de l'onde de marée lors de sa propagation en Manche, du fait de la bathymétrie et de la géométrie du bassin (Schroëtter et Blaise, 2015). Le régime de marée en Bretagne est semi-diurne, c'est-à-dire que deux pleines mers et deux basses mers ont lieu chaque jour.

Fig. 29 : Amplitude du marnage en Bretagne, lors d'un coefficient de marée de 120 (Source : SHOM ; réalisation : Stéphan (2008)).



Conclusion intermédiaire

Cette première description générale a permis de rendre compte de la nature très diversifiée du littoral de la Bretagne. La description géologique et géomorphologique montre la dichotomie qu'il existe entre la côte nord, relativement élevée et la côte sud, formée par des littoraux bas. L'alternance des périodes glaciaires et interglaciaires du Quaternaire a façonné les côtes à falaises meubles que nous connaissons actuellement, en recouvrant le socle d'une couverture de dépôts meubles puis en entaillant ces reliefs par la transgression marine. Cette couverture meuble est formée de dépôts de nature très variée qui peuvent recouvrir entièrement le versant ou surmonter une base rocheuse.

La présence de l'océan et la situation péninsulaire de la Bretagne lui confèrent un climat tempéré caractérisé par des températures douces, des précipitations abondantes, à l'échelle de l'année, et des vents soutenus. L'étude des conditions météo-marines met en avant le caractère exposé des côtes bretonnes, et notamment le littoral ouest et nord-ouest de la Bretagne faisant face aux houles atlantiques et aux vents dominants.

CHAPITRE 3 : Bilan régional préliminaire et sélection des sites d'étude

Afin de caractériser le risque d'érosion des falaises meubles en Bretagne, une analyse pertinente de ses composantes, à savoir les processus physiques entrant en jeu dans les phénomènes d'érosion, les enjeux menacés et les moyens de gestion mis en place, doit se faire à une échelle locale de sites expérimentaux. Elle suppose donc au préalable de procéder à la sélection de sites de falaises meubles qui seront considérés comme représentatifs, dans la mesure du possible, de diverses situations rencontrées en Bretagne afin d'y mener l'analyse croisée des aléas, des enjeux et de la gestion. L'analyse de l'aléa demande de s'appuyer sur le suivi de l'évolution du littoral et des paramètres environnementaux et anthropiques. L'analyse des enjeux nécessite une connaissance détaillée des éléments anthropiques risquant d'être endommagés par l'aléa. Enfin, les moyens de gestion doivent y être précisément inventoriés et analysés. La sélection doit donc prendre en compte la géomorphologie des falaises qui représente un facteur de prédisposition important conditionnant leurs modalités de recul (Benumof et Griggs, 1999 ; Bezerra et al., 2011 ; Sunamura, 2015), mais aussi prendre en compte les enjeux menacés ainsi que les moyens de gestion mis en œuvre afin d'analyser les risques côtiers dans leur ensemble (Welle et Birkmann, 2015).

L'objectif de ce chapitre est de décrire la méthodologie employée pour sélectionner une demi-douzaine de sites considérés comme représentatifs des falaises meubles régionales sur le plan géomorphologique et du point de vue des différents enjeux exposés.

Cette partie a pour objectif de répondre aux questions suivantes :
- Comment sélectionner des sites d'étude représentatifs du risque d'érosion des falaises meubles à l'échelle régionale ?
- Quelle typologie peut-on employer pour évaluer la représentativité géomorphologique des sites ?
- Quelles sont les informations apportées par le bilan régional ?

La première partie présentera la méthodologie de sélection des sites. Elle est basée sur un travail bibliographique, une reconnaissance de terrain puis l'utilisation d'un tableau de sélection reprenant les observations et les informations recensées. Dans ce chapitre, sera également présentée la typologie de falaises meubles qui a été définie et sur laquelle s'est appuyé le travail de sélection. La deuxième partie présentera les sites retenus à partir de cette méthodologie de sélection ainsi que les observations issues du bilan régional qui permettent de rendre compte de la diversité des morphologies des falaises meubles, des enjeux menacés et les différents aménagements employés pour arrêter ou ralentir leur recul. Pour terminer, cette méthodologie de sélection est discutée tant des points de vue des intérêts scientifiques que techniques, en la replaçant dans un contexte plus général de sélection de sites d'expérimentation ou d'analyse globale d'un territoire.

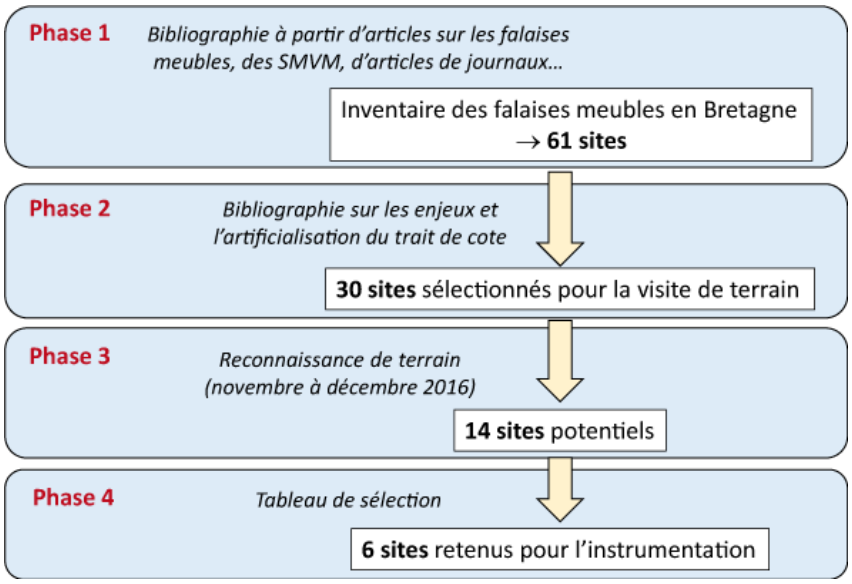
3.1- Méthodologie de sélection des sites

3.1.1- Les grandes étapes de la méthodologie de sélection

La méthodologie de sélection utilisée peut se résumer en quatre grandes étapes (Fig. 30) qui seront détaillées ci-après. Cette méthodologie s'appuie, tout d'abord, sur un travail bibliographique et une description des caractéristiques physiques et géographiques des milieux. Celle-ci est ensuite complétée

par une reconnaissance de terrain. La dernière étape repose sur un tableau de sélection utilisant les observations et les informations recensées.

Fig. 30 : Déroulement du travail de recensement des falaises meubles et de sélection des sites d'étude.



3.1.2- Inventaire des falaises meubles en Bretagne

Le recensement et la géolocalisation des falaises meubles, à l'échelle de la Bretagne, ont été réalisés à partir de différentes sources :

- des **études réalisées sur les falaises meubles dans le département des Côtes-d'Armor.** Parmi ces études, ont été utilisées, en particulier, la cartographie au 1/25 000 de l'aléa d'érosion des falaises meubles (Bonnot-Courtois et al., 2008), la synthèse des données des Schémas de Mise en Valeur de la Mer (SMVM) du Pays de Trégor-Goëlo (Pinot, 1993, 1997) et de la baie de Saint-Brieuc (Bonnot-Courtois et Lafond, 1995) et des observations de terrain réalisées sur une grande partie du linéaire des Côtes-d'Armor (Bonnot-Courtois et Lançon, 2004) ou, plus largement, sur la côte septentrionale de la Bretagne (Biville, 2004) ;

- le **croisement des informations fournies par les cartes géologiques** du BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) **et topographiques** de l'IGN (Institut Géographique National). Cette analyse permet notamment de localiser les falaises meubles constituées par des formations périglaciaires (recoupement d'une topographie littorale élevée et de la présence de formations périglaciaires) ;

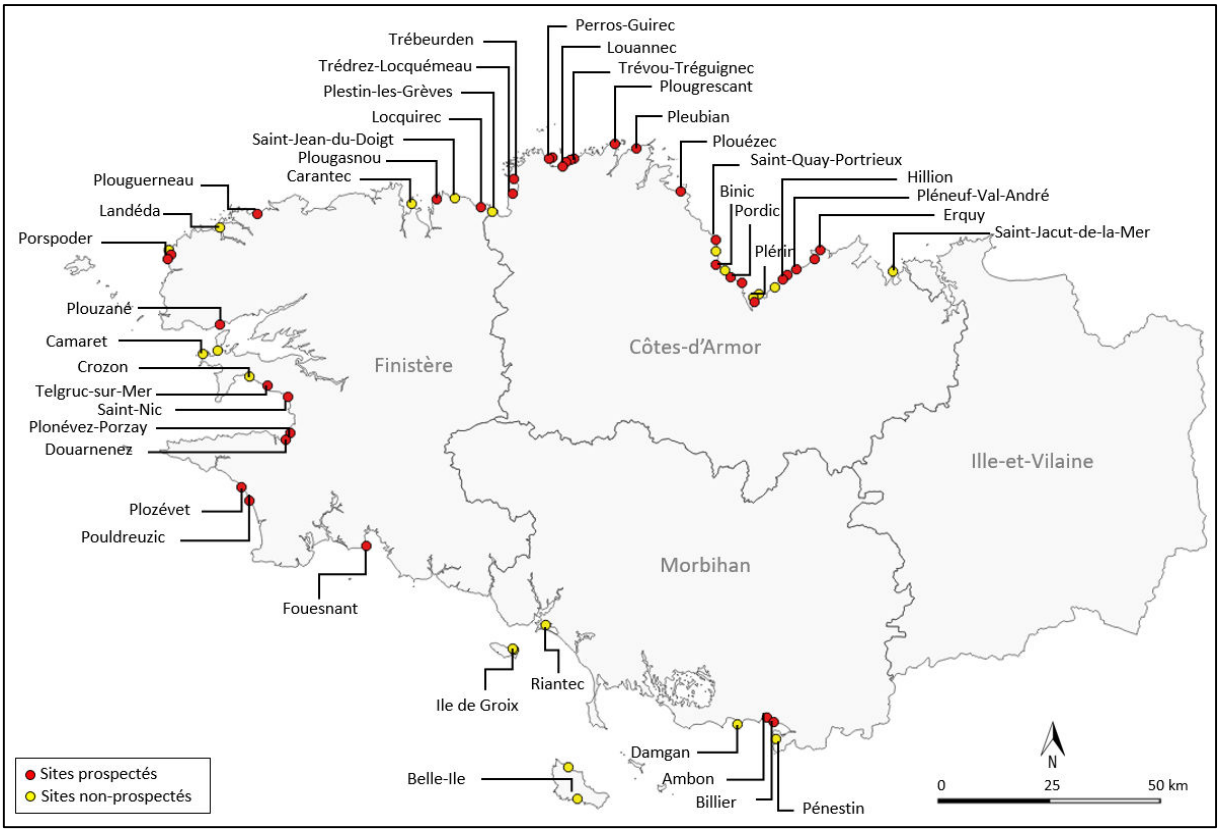
- le **recensement d'aléas érosion** et/ou d'instabilité de falaises rapportés dans des **articles de quotidiens régionaux** notamment *Le Télégramme* et *Ouest-France* disponibles sur le site Europresse (début des archives datant respectivement du 28/07/2001 et du 01/12/2003) ;

- d'**études et de cartographies m**enées par le Groupe de Recherche sur les Environnements Sédimentaires Aménagés et les Risques Côtiers (GRESARC) et le Laboratoire de Géomorphologie et Environnement Littoral de Dinard sur des secteurs à falaise qui représentent des enjeux significatifs d'ordre humain, économique et/ou patrimonial (GRESARC, 2004) ;

- des **photographies du littoral**, notamment celles présentes sur le site http://www.plages.tv, permettant de visualiser la géomorphologie de la côte préalablement aux visites de terrain.

Ce travail a abouti à l'identification de 61 sites de falaises meubles (Fig. 31), localisés principalement dans les départements du Finistère et des Côtes-d'Armor, ce qui est cohérent avec la répartition régionale des falaises meubles (cf. sous-chapitre 2.3).

Fig. 31 : Localisation des sites à falaises meubles identifiés en Bretagne lors de la première étape de repérage.

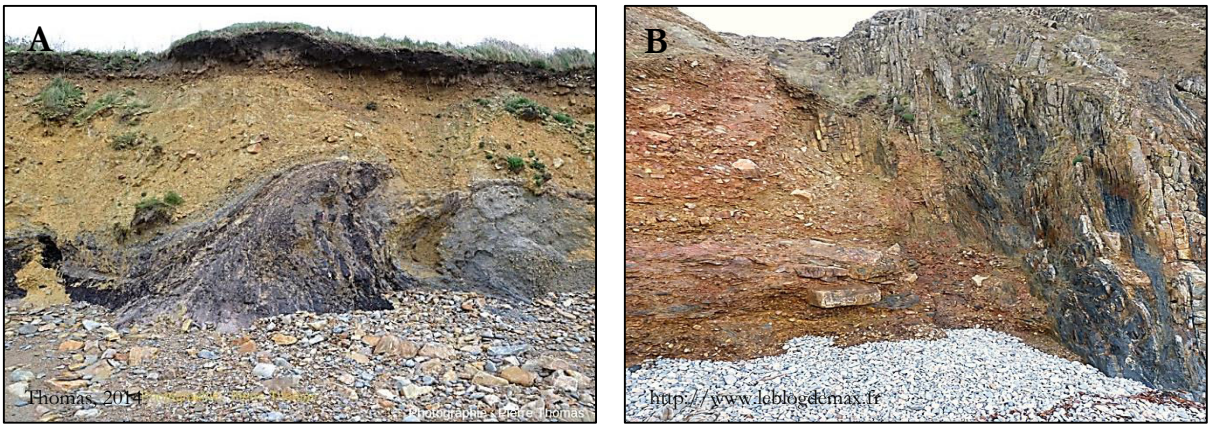


3.1.3- Sélection des sites à prospecter

Avant toute visite de terrain, la caractérisation précise des enjeux potentiels, de la géologie, de la présence d'ouvrages de défense contre l'érosion et des différents aléas érosion recensés a été réalisée de manière systématique sur ces 61 sites à partir de l'analyse de photographies aériennes et des informations extraites des documents qui ont servi à leur identification.

Cette seconde étape de description permet de présélectionner des sites potentiellement intéressants pour la mise en place d'un suivi, c'est-à-dire, qui présentent à la fois un intérêt sur le plan géomorphologique, sur les enjeux exposés et où une cinématique récente a été observée. Ce travail permet ainsi de réduire le nombre de sites à prospecter à 30 sites (Fig. 30). Les sites exclus correspondent à ceux dont la géomorphologie est jugée trop spécifique et insuffisamment représentative des falaises meubles en Bretagne. C'est par exemple le cas des falaises de Trez-Rouz et de l'anse de Kerguillé à Crozon (Fig. 32). Les premières sont constituées dans des formations quaternaires avec un diapir tourbeux à la base tandis que les falaises meubles présentes dans l'anse de Kerguillé sont formées d'une plage ancienne composée de galets soudés par des oxydes de fer. Des exemples comparables à ces falaises meubles sont rares en Bretagne. D'autres sites ont également été exclus en raison d'une absence d'enjeux (pas de résidence ni d'activité à proximité, plage non-touristique…) ou d'un littoral devenu très artificialisé (fixation du trait de côte sur l'ensemble du linéaire par un enrochement, un perré…).

Fig. 32 : Sites non retenus car présentant une géomorphologie particulière non représentative des falaises meubles régionales.



A : Falaise meuble constituée dans des formations quaternaires avec un diapir tourbeux à la base (Trez-Rouz, Crozon (29)) ;
B : Falaise meuble formée d'une plage ancienne composée de galets soudés par des oxydes de fer (Anse de Kerguillé, Crozon).

Bien que les cartes de l'IGN au 1/25 000, les cartes géologiques du BRGM et les photographies aériennes verticales (IGN) permettent d'avoir un aperçu visuel des sites, le travail de reconnaissance de terrain est une étape indispensable à la sélection des sites d'expérimentation. Celle-ci permet, en effet, de compléter les informations acquises par la bibliographie sur les caractéristiques physiques des sites.

3.1.4- Reconnaissance de terrain : vers la définition d'une typologie des falaises meubles

3.1.4.1- Méthodologie adoptée sur le terrain

En plus de confirmer les informations issues de la bibliographie, la reconnaissance de terrain permet d'apporter des informations supplémentaires sur la géomorphologie et l'état des structures de protection ainsi que de repérer des formes d'érosion témoignant d'une cinématique récente.

La reconnaissance de terrain est basée sur des observations *in situ* et des descriptions de chaque site au moyen de fiches de terrain renseignant les différentes caractéristiques physiques du milieu (Annexe 1). Sont décrits la morphologie de la falaise et de la plage, l'orientation du linéaire, les formes d'érosion en présence, le degré d'altération de la roche, les types d'enjeux menacés, la présence de panneaux d'information sur l'érosion et les types d'ouvrage côtier présents. De plus, certains des aspects techniques et pratiques comme la facilité d'accès au site ou la présence d'une végétation abondante, ont été notés car ces paramètres sont importants à prendre en compte dans la sélection des sites d'expérimentation en vue des mesures répétées qui devront y être pratiquées pour le suivi.

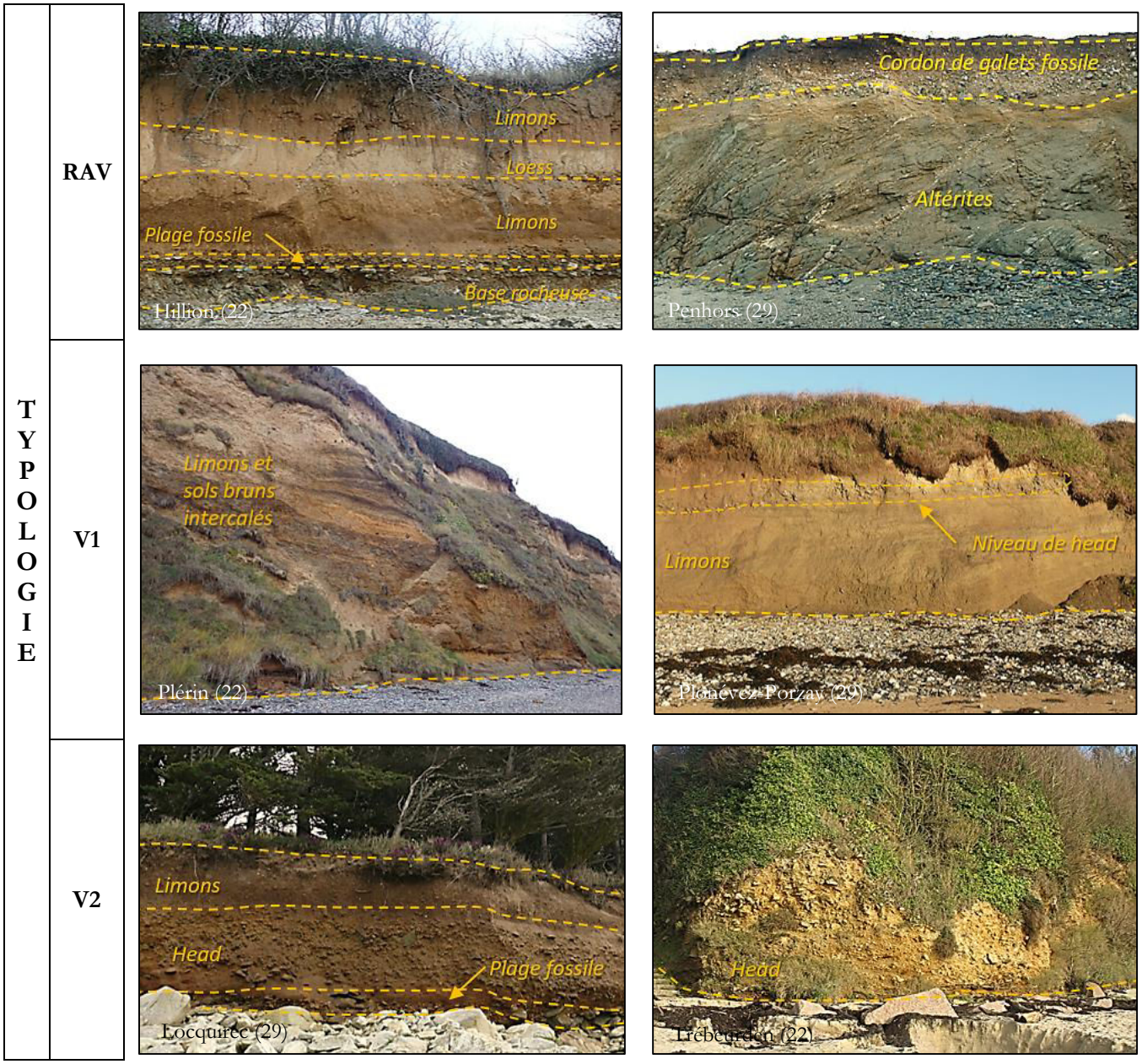
Lors de cette étape, la gestion des sites est étudiée, dans un premier temps, par une approche très générale. Elle est en effet basée sur la seule appréciation visuelle de la stratégie adoptée par la commune (« laisser-faire » ou « fixation ») qui est interprétée selon la présence ou non d'ouvrages de défense contre la mer. Cette caractérisation binaire et simplifiée ne permet pas de connaitre les particularités de la gestion des sites, comme le choix d'un raccordement des eaux usées, la présence d'actions de prévention ou de concertation sur les risques côtiers. Ces informations nécessitent des études plus approfondies (prise de contact avec les gestionnaires du site et entretiens). Elles sont par conséquent plus chronophages et le recueil d'informations plus précises sera effectué ultérieurement sur les sites d'étude retenus. La contrainte de temps explique donc le choix méthodologique concernant l'analyse simplifiée de la gestion pour la sélection de sites.

3.1.4.2- Typologie de falaises meubles

La campagne de terrain a permis d'identifier différentes morphologies se distinguant notamment par la nature et la structure des matériaux. Ainsi, à la suite de cette campagne, trois types de falaise ont été distingués (Fig. 33) :

- les **falaises de type « RAV »** *(Roche-Altérites-dépôts de Versant)* formées d'une base rocheuse plus ou moins altérée puis de dépôts de versant d'épaisseur variable ;
- les **falaises de type « V1 »** (*dépôts de Versant fins)* correspondent à des falaises de dépôts quaternaires formés majoritairement de sédiments fins ; ce sont principalement des limons de colluvionnement et des loess ;
- les **falaises de type « V2 »** (*dépôts de Versant grossiers)* correspondent également à des falaises meubles de dépôts de versant mais, à l'inverse des falaises précédentes, les dépôts sont majoritairement grossiers et formés surtout par des heads.

Fig. 33 : Falaises de type RAV, V1 et V2 observées lors de la reconnaissance de terrain.



Remarque : les horizons principaux sont représentés sur chacune des photographies ci-dessus.

En comparaison de la typologie définie par M. Biville (cf. chapitre 2), cette typologie permet de faire la distinction entre les falaises formées par des dépôts quaternaires fins et grossiers et tient alors compte de la granulométrie des formations qui a une influence sur l'érosion des falaises meubles (Bray et Hooke, 1997). Ainsi, les falaises de type RAV correspondent aux falaises dites « composites » et les falaises V1 et V2 correspondent aux falaises dites « simples » définies par la typologie de M. Biville (2004).

3.1.5- Sélection des sites expérimentaux

La faisabilité d'un suivi géomorphologique des falaises meubles régionales s'appuyant sur la mesure périodique de leur topographie et, conjointement, l'observation continue ou régulière de paramètres environnementaux, conduit à ne devoir retenir qu'une demi-douzaine de sites. Ceux-ci doivent être instrumentés en les équipant d'un réseau de clous topographiques destiné aux calages géodésiques des levers successifs. Des capteurs environnementaux doivent également accompagner ces mesures dans l'objectif d'évaluer l'influence des différents facteurs érosifs. Il a donc été choisi de ne garder, au maximum, que trois sites dans chacune des catégories géomorphologiques décrites ci-dessus afin de permettre des comparaisons.

L'intérêt d'un site étant en partie subjectif, l'élaboration d'un tableau de sélection permet de rationaliser le procédé d'évaluation et de rendre la sélection plus objective. Cet outil permet de réduire le nombre de sites susceptibles de faire l'objet d'un suivi. Ainsi, un système de notation pour les principaux paramètres - cinématique potentielle et enjeux - liés au risque d'érosion est utilisé (Tab. 1). Des paramètres secondaires comme le nombre d'habitants de la commune ou la présence de données antérieures sur la dynamique des falaises viennent alimenter la note totale en la modulant à la hauteur de 1 point. Les deux principaux paramètres (cinématique potentielle et enjeux) sont notés sur une échelle allant de 0 (absence) à 3 (élevé) représentée par des symboles « + ». Pour les enjeux, la présence d'habitations localisées à moins de 40 mètres a paru être un critère d'exposition important et est donc noté 2 pour une à deux maisons menacées ou noté 3 pour plus de deux maisons. À l'inverse, la présence seule d'un champ agricole ou d'un sentier côtier pouvant être déplacé est notée 1 car ils ne présentent pas de menace directe pour la vie humaine.

Il semble pertinent de considérer le nombre d'habitants de la commune car, même s'il n'est pas directement relié au site, il peut avoir une influence sur la fréquentation de ce dernier (McLaughlin et Cooper, 2010). Le nombre d'habitants détermine également les obligations de la commune en termes de gestion des eaux usées qui peuvent avoir un impact sur l'érosion des falaises lorsqu'elles sont rejetées directement dans le milieu naturel (Bonnot-Courtois et Lafond, 1995 ; Pinot, 1998). Les communes de plus de 2000 habitants ont effectivement l'obligation de réaliser un programme d'assainissement collectif selon la directive ERU (Eaux Résiduaires Urbaines) n° 91/271/CEE du 21 mai 1991. Il a donc été choisi de retenir ce seuil de 2000 habitants à partir duquel un point supplémentaire est attribué au site.

Pour la cinématique apparente, la notation est basée sur les indicateurs d'érosion observés sur le terrain et sur la comparaison des photographies aériennes verticales des années 1960 avec celles des années 2000 grâce à l'outil « *Remonter le temps* » du site web de l'IGN. Cet outil permet d'avoir un aperçu de la cinématique de la falaise sur 50 ans. La note de 1, 2 ou 3 est attribuée au site selon que le taux de recul à moyen terme estimé est compris respectivement dans les classes de vitesse 0,10-0,20 m/an, 0,20-0,30 m/an ou est supérieur à 0,30 m/an. Sur les photographies aériennes verticales, le recul n'est pas toujours perceptible, notamment sur les sites dont la vitesse de recul est inférieure à 0,20 m/an. C'est pourquoi, dans le cas où le recul à moyen terme n'a pu être estimé sur le site, celui-ci obtiendra un point seulement si des formes d'érosion y ont été observées lors de la reconnaissance de terrain. Des sites dont la cinématique à l'échelle moyen terme est considérée comme très lente (recul inférieur à 5 mètres sur le dernier demi-siècle, soit inférieur à 0,10 m/an) sont exclus car il est plus judicieux de travailler d'abord

sur des sites actifs si l'on veut s'intéresser aux modalités du recul récent. Toutefois, malgré leur cinématique apparente plus faible, le risque d'érosion continue d'exister sur ces territoires si des enjeux sont exposés. La dynamique régressive des falaises meubles est effectivement non linéaire ; elle se fait souvent par « à-coup » (Pinot, 1998). Des falaises reculant lentement sur une longue période peuvent être affectées ponctuellement par un important mouvement de terrain. Le tableau de sélection prend également en compte l'existence d'études ou de mesures antérieures. Elles permettent d'avoir une source d'informations complémentaires et/ou une plus grande profondeur temporelle des données et des mesures. La note maximale qui peut est attribuée à un site, dans le tableau de sélection, est de 9.

Tab. 1 - Tableau de sélection des sites (en rouge, les communes des sites qui ont été retenues).

Dép	**Commune**	Type	**Cinématique apparente et potentielle**	**Enjeux**	Nombre d'habitants sup à 2000	Données antérieures	Autres avantages (+1) ou contraintes (-1)	Exclusion	Note totale
22	**Plougrescant**	**V1**	+++	++		+			**6**
29	**Telgruc-sur-Mer**		+	++		+	+1 : financement ZABrI *		**5**
22	**Pléneuf-Val-André**		++	++	+		+1 : grand linéaire		**6**
22	Erquy		+++		+			**Pas d'enjeux majeurs**	**4**
22	Plérin		+	++	+				**4**
29	**Locquirec**	**V2**	+	++		+	+1 : présence d'un piézomètre		**5**
22	**Trédrez-Locquémeau**		+	++		+			**4**
22	Trébeurden		+	++	+		+1 : Appui de la commune (données…)	**Végétation trop abondante**	**5**
22	Perros-Guirec		+	++	+		-1 : accès difficile		**3**
29	**Plozévet**	**RAV**	+	+++	+	+	+1 : grand linéaire		**7**
56	Ambon		+++	+			-1 : éloigné		**3**
22	Trévou-Tréguignec		+	++					**3**
22	Pénestin		+++	++	+	+	-1 : éloigné		**6**
22	Saint-Quay-Portrieux		+	+++	+	+		**Projet de confortement**	**6**

**ZABrI : Zone Atelier Brest-Iroise*

Un critère d'exclusion a également été ajouté afin d'écarter des sites non adaptés à la mise en place d'un suivi. C'est le cas de ceux présentant de futurs projets de confortement et d'artificialisation du front de falaise comme le site de la Comtesse à Saint-Quay-Portrieux. C'est aussi le cas lorsqu'une végétation trop abondante masque le front de falaise à l'instar du site de Pors-Mabo à Trébeurden. La présence de végétation est effectivement contraignante dans le cadre de la mise en place d'un suivi des sites par photogrammétrie (ex : mobilité des branches ou des feuilles) qui empêche une bonne corrélation des images par les algorithmes (Jaud, 2011).

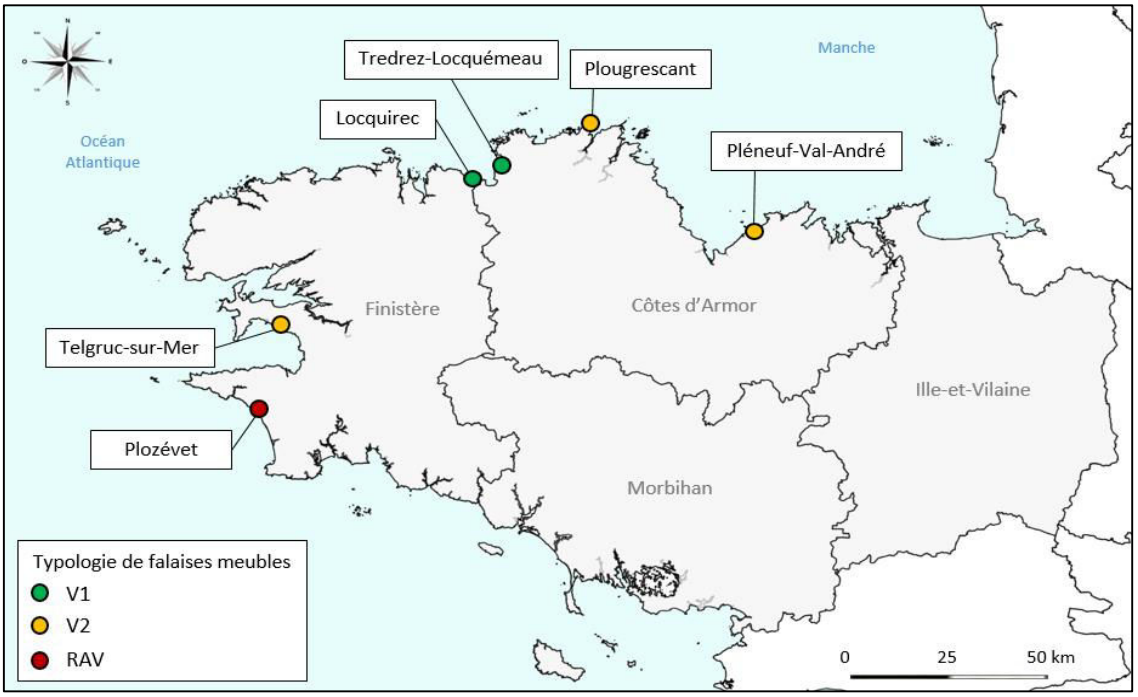
La méthodologie de sélection des sites permet donc de réaliser un bilan régional des falaises meubles donnant une vision générale des situations rencontrées. Cette méthodologie qui peut se résumer en quatre grandes étapes (Fig. 30) présente l'avantage de dresser en un temps raisonnable un bilan des problèmes posés par le risque d'érosion des falaises meubles et, grâce à l'étape préalable de bibliographie, de réduire le nombre de sites à visiter, rendant ainsi l'analyse moins chronophage.

3.2- Résultats du bilan régional

3.2.1- Sites retenus

À partir du tableau de sélection, en tenant compte des notes obtenues, de la typologie de falaise et des sites exclus pour des contraintes scientifiques et/ou techniques, six sites ont été retenus (Fig. 34) : trois sites V1, deux V2 et un RAV.

Fig. 34 : Localisation des sites retenus en Bretagne.



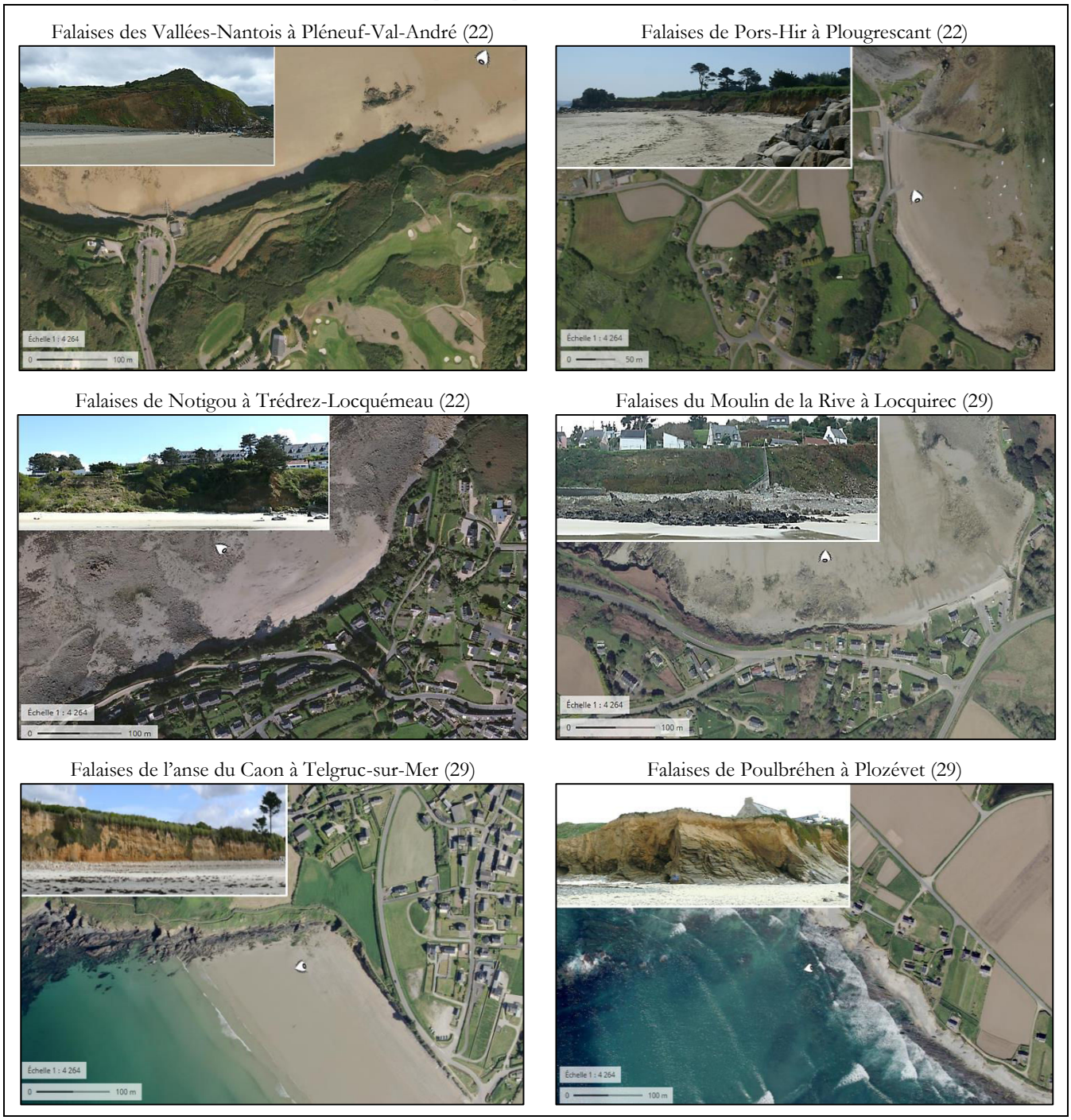
Au regard des critères retenus et des nombreuses visites de terrain effectuées sur le littoral régional, les sites retenus apparaissent refléter correctement la diversité régionale des falaises meubles en termes de géomorphologie, d'enjeux et de stratégies de gestion du point de vue des structures de défense mises en place, sachant que les sites sélectionnés sont en majorité peu ou pas aménagés (Tab. 2, Fig. 35).

Tab. 2 - Caractéristiques physiques et géographiques des sites retenus.

Départ-tement	Commune Nom du site	Site d'étude	Longueur du linéaire étudié	Type Falaise	Hauteur de falaise	Expos-ition	Enjeux	Stratégie de gestion
22	Pléneuf-Val-André	Les Vallées-Nantois	525 m	V1	5 à 29 m	N	Golf Sentier côtier	Laisser-faire
22	Plougrescant	Pors-Hir	220 m	V1	3 à 4 m	ENE	2 habitations Route comm.	Fixation
22	Trédrez-Locquémeau	Notigou	145 m	V2	14 à 17 m	NW	1 habitation Route comm.	Laisser-faire
29	Locquirec	Le Moulin de la Rive	260 m	V2	7 à 12 m	N	4 habitations Route dép.	Fixation
29	Telgruc-sur-Mer	L'anse du Caon	100 m	V1	4 à 14 m	W	Route dép. Champ agricole Sentier côtier	Laisser-faire
29	Plozévet	Poulbréhen	160 m	RAV	4 à 6 m	SW	5 habitations Sentier côtier	Laisser-faire

N.B : Les caractéristiques des sites seront développées en détail dans le chapitre suivant.

Fig. 35 : Vues horizontales et aériennes (photographies aériennes de l'IGN de 2016) des six sites retenus.



Le tableau de sélection (Tab. 1) montre une note totale moyenne pour les falaises meubles V1 de 5,2, pour les falaises V2 de 4,3 et pour les falaises RAV de 5,0. La note totale majoritairement plus élevée des falaises meubles V1 en comparaison des falaises V2 et RAV s'explique par une cinématique apparente généralement plus forte. La cinématique moyenne (sur une valeur maximale de 3) est effectivement de 2,3 points pour les V1, de 1 point pour les V2 et de 1,6 point pour les RAV. Il est important de noter que ces moyennes effacent des dispersions au sein d'un même type géomorphologique et sont basées sur un très faible échantillonnage qui implique un biais dans les caractéristiques moyennées. Toutefois, on considère que l'échantillonnage utilisé est représentatif des falaises meubles en Bretagne grâce à la méthodologie de sélection adoptée.

Parmi les **falaises meubles V1**, trois sites (possédant une note totale de 5 ou 6) ont été retenus : Telgruc-sur-Mer (anse du Caon), Plougrescant (anse de Pors-Hir) et Pléneuf-Val-André (plages des Vallées et de Nantois). Chacun de ces sites présente des enjeux exposés à court terme par le recul de la falaise (ex : route, habitations, plage touristique). L'un des intérêts d'étudier ces sites V1 ensemble est qu'ils présentent des différences en termes de géomorphologie : falaises hautes pour Pléneuf-Val-André (jusqu'à 29 m), intermédiaires pour Telgruc-sur-Mer (de 4 à 14 m) et basses pour Plougrescant (de 3 à 4 m).

Parmi les **falaises V2**, deux sites (ayant obtenu la note totale de 4 ou 5) ont été retenus : Locquirec (anse du Moulin de la Rive) et Trédrez-Locquémeau (plage de Notigou). Chacun de ces sites présente des enjeux (habitations et route). L'intérêt d'étudier ces deux sites V2 ensemble est qu'ils présentent une exposition différente aux agents marins et subaériens : le site de Locquirec se situe dans une anse très exposée aux houles venant de la Manche tandis que le site de Trédrez-Locquémeau, légèrement orienté vers l'ouest, présente une situation côtière plus protégée dans la baie de Lannion. Ces sites pourront être comparés aux falaises meubles à dépôts de versant fins, V1, pour étudier l'influence des constituants et de la granulométrie des formations quaternaires sur l'évolution des falaises.

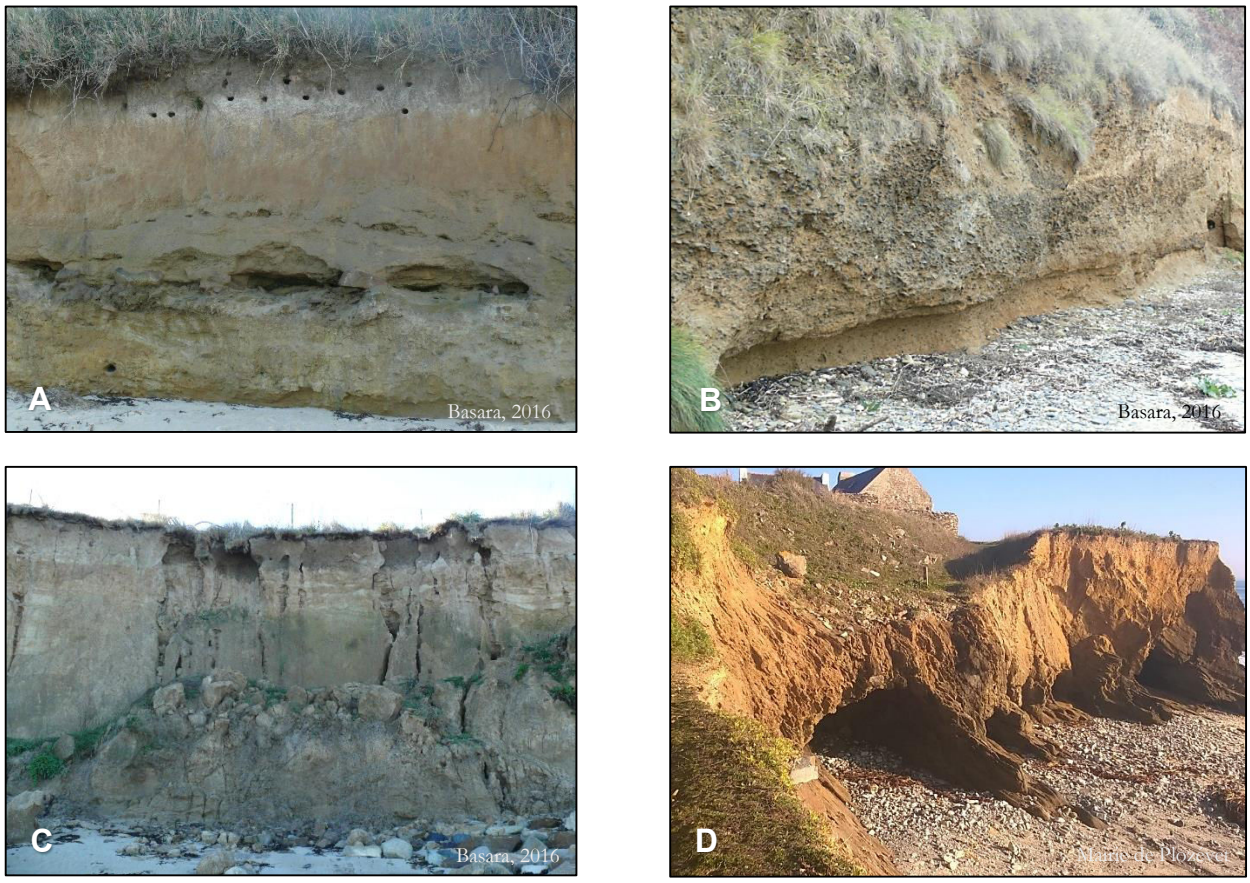
Parmi les **falaises RAV**, il a été choisi de ne retenir qu'un seul site d'expérimentation : la falaise de Poulbréhen à Plozévet (noté 7). Les autres sites RAV sont apparus trop contraignants en raison de leur éloignement (distance supérieure à 200 km du laboratoire, peu adaptée aux observations répétées sur le terrain) ou d'une faible cinématique apparente permettant, difficilement, d'observer des mouvements de terrain à l'échelle des trois années de thèse. Néanmoins, le site de Plozévet, formé principalement par des micaschistes altérés, est suffisamment représentatif des falaises RAV pour être comparé aux autres types de falaise (V1 et V2). Les micaschistes figurent effectivement parmi les altérites les plus représentées en Bretagne et les plus développées, du fait de leur moindre résistance à l'altération que les granites (Chauris, 2011 ; Schroëtter et al., 2017). Par conséquent, les falaises meubles formées par ces altérites sont associées à de plus forts taux de recul (Prémaillon et al., 2017). Par ailleurs, le site de Plozévet présente un intérêt en termes d'analyse du risque car des enjeux sont exposés à court terme au sommet de la falaise (habitations, sentier côtier et route).

Enfin, il est important de remarquer que les sites retenus présentent des états d'anthropisation différents (ex : enrochement d'une partie de la falaise, canalisation des eaux usées non raccordée, construction et imperméabilisation plus ou moins forte des sols en sommet de falaise). Ces paramètres devront également être pris en compte lors de la comparaison des sites pour la discrimination des processus responsables de l'érosion.

3.2.2- Création d'une base de données spatialisées et inventaire des formes d'érosion

Les différentes observations de terrain et les connaissances existantes sur la cinématique de recul des falaises, les enjeux exposés ou les types d'ouvrages de protection, ont été géoréférencées dans un SIG (Système d'Information Géographique). Les nombreuses formes d'érosion observées grâce à l'étape de reconnaissance de terrain ont également été recensées (Fig. 36). Le géoréférencement des observations sur l'état physique des sites amène à la construction d'une base de données, indispensable à une bonne analyse de l'aléa à l'échelle régionale. Cette base de données sera exploitée et présentée en détail notamment dans le chapitre 8 consacré à la cartographie des zones à risque sur les sites d'étude.

Fig. 36 : Formes d'érosion observées lors de la reconnaissance de terrain.



A : trous de nidification d'hirondelle en sommet de falaise et trous de suffosion dans la partie médiane (plage du Guen, Erquy) ; B : encoche marine et érosion différentielle (plage de Tournemine, Plérin) ; C : entonnoir de suffosion et talus d'effondrement en pied de falaise (plage de Pors-Hir, Plougrescant) ; D : sous-cavage dans les micaschistes altérés (anse de Poulbréhen, Plozévet).

3.2.3- Mise en évidence de la diversité des falaises meubles, des enjeux menacés et de la gestion

La méthodologie de sélection des sites a permis de mettre en évidence la diversité des falaises meubles autant sur le plan géomorphologique que sur ceux des enjeux menacés et des stratégies de gestion. Bien que les falaises ont été classées selon 3 types géomorphologiques, on note une grande diversité dans les morphologies observées, qui est fortement liée à la variété de la nature des matériaux (Fig. 37) (cf. sous-chapitre 2.3). De plus, on peut observer des catégories morphologiques mixtes sur un même linéaire de falaises meubles, en lien avec des variations de dépôts sédimentaires. C'est le cas, par exemple, de la falaise de la plage du Guen à Erquy (22) qui présente un type géomorphologique V2 dans sa partie ouest, qui se transforme progressivement en type V1 en se dirigeant vers l'est. La géomorphologie peut donc varier spatialement sur de très petites distances. Le bilan régional a également mis en évidence des géomorphologies particulières, certes peu fréquentes, mais qu'il ne faut cependant pas négliger car ces formes expliquent la complexité de la compréhension générale de l'aléa d'érosion et des modalités de recul des falaises meubles.

Fig. 37 : Photographies illustrant la diversité de la nature et de la géomorphologie des falaises meubles bretonnes.

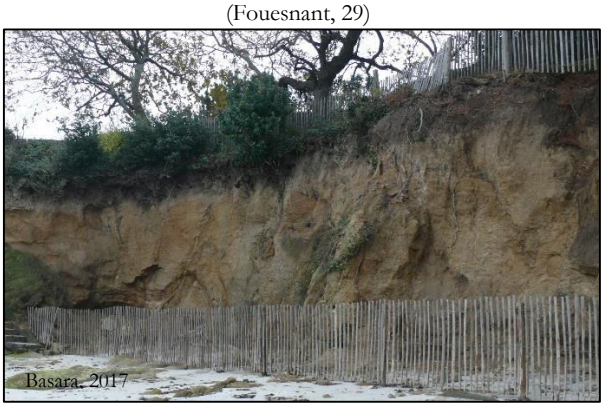
Falaise formée par une plage ancienne à sa base, surmontée de dépôts de versant (Camaret-sur-Mer, 29)

Falaise meuble limoneuse formée par des limons de colluvionnement (Trélévern, 22)

Falaise meuble formée par des altérites du granite et de formations superficielles (Ploemeur, 56)

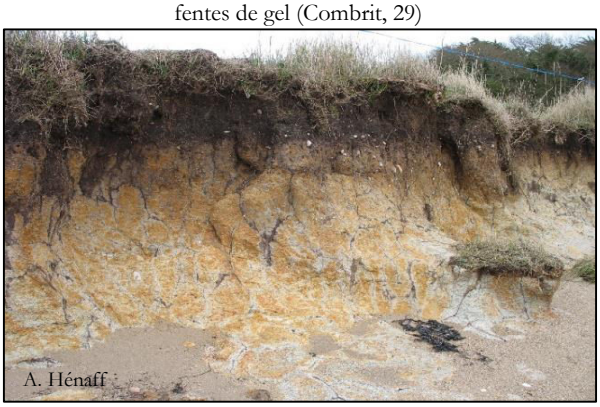
Dune perchée de plusieurs mètres d'épaisseur surmontant des dépôts de head (Locquirec, 29)

Falaise meuble érodée dans les altérites du granite (Fouesnant, 29)



Falaise meuble constituée de micaschistes altérés à la base et surmontés par un ensemble de dépôts fluviatiles (Pénestin, 56)

Falaise constituée de dépôts périglaciaires argileux montrant des fentes de gel (Combrit, 29)



Dépôts de versant recouvrant des quartzites (Camaret, 29)

Selon les sites, la disposition des formations meubles avec le substratum peut varier. Celle-ci dépend notamment de sa distance par rapport aux sources de matériaux meubles, du relief mais aussi de la lithologie du substratum. Des observations complémentaires concernant la diversité de la géomorphologie des falaises meubles sont présentées en Annexe 2.

Le bilan régional montre également une diversité d'enjeux menacés à des degrés divers selon l'échelle de temps considérée (Fig. 38). On constate que le recul des falaises meubles en Bretagne menace aussi bien des habitations, que des bâtiments, des terrains agricoles, des routes et des lieux à vocation touristique ou de loisirs (ex : campings, hôtels, sentier littoral).

La diversité des enjeux et des morphologies de falaises et la combinaison des processus participant à leur évolution peuvent expliquer, en partie, la variété des techniques employées pour tenter de ralentir ou de stopper le recul (Fig. 39 à Fig. 42). On peut, en effet, observer un large panel de techniques mises en œuvre. Le choix des solutions préconisées est le plus souvent motivé par les résultats des diagnostics réalisés localement sur les origines des processus impliqués dans l'érosion des falaises. D'une manière schématique, lorsque l'origine du recul est attribuée aux processus marins, la durcification du versant est généralement retenue : enrochements, projection de béton, murs… (Fig. 39 et Fig. 40). Lorsque les eaux continentales sont incriminées, des techniques de drainage des sols et du versant peuvent alors être utilisées (Fig. 42). Cette vision binaire s'avère trop simple au regard de la complexité de l'aléa recul de falaises. C'est justement la déconvolution des processus responsables de la fragilisation des falaises et du déclenchement des mouvements de terrain qui constitue un verrou majeur dans la compréhension de l'aléa recul de falaise. Quoique nombreuses, et pourtant relativement coûteuses, les études de sites ne sont généralement pas suffisantes pour lever ce verrou, notamment parce qu'elles sont trop souvent réalisées en réponse à des situations d'urgence après un épisode de recul significatif et sur de courtes durées ne permettant pas d'appréhender la dimension temporelle du phénomène (Veyret, 2016). Enfin, s'il n'y a pas ou très peu d'enjeux, la commune peut choisir de laisser la falaise meuble reculer librement tout en sécurisant le pied et/ou le sommet de falaise par la pose de ganivelles ou de panneaux avertissant le public du risque d'instabilité de falaise (Fig. 43).

Fig. 38 : Diversité des enjeux menacés par l'érosion des falaises meubles en Bretagne.

A : villas à Perros-Guirec ; B : habitations à Plozévet ; C : hôtel à Saint-Quay-Portrieux, D : mobil-home menacé de chute à Plougasnou ; E : terrain de golf à Pléneuf-Val-André ; F : terrain agricole à Hillion ; G : route départementale à Fréhel ; H : sentier côtier effondré à Telgruc-sur-Mer.

Fig. 39 : Techniques de durcification du front de falaise utilisées en Bretagne.

Travaux de confortement de falaise

Ancrage de la paroi par des pieux à Saint-Quay-Portrieux (22)

Travaux de béton projeté à Perros-Guirec (22)

Travaux d'enrochement à Plogoff (29)

Falaises meubles confortées sur toute leur hauteur

Falaise confortée par des clous et un grillage renforcé (Saint-Quay-Portrieux)

Falaise confortée par du béton projeté, un gradin, un mur et un enrochement en pied (Perros-Guirec)

Enrochement de l'ensemble de la falaise (Locquirec, 29)

Enrochement de l'ensemble de la falaise (Pouldreuzic, 29)

Fig. 40 : Techniques de durcification de la base des falaises meubles.

Enrochements installés initialement en pied de falaise qui n'ont pas empêché son recul (Trébeurden, 22)

Enrochements dispersés sur la grève, inefficaces face au recul de la falaise (Louannec, 22)

Mur en parpaings accélérant l'érosion à son extrémité (Locquirec)

Murs maçonnés (Locquirec)

Noter que le choix a été fait ici par les gestionnaires, de considérer les processus marins comme seuls responsables du recul de la falaise.

Fig. 41 : Système d'évacuation des eaux continentales.

Drainage des eaux continentales par une rigole (Trédrez-Locquémeau)

Évacuation d'eaux pluviales et d'assainissement en sommet de falaise participant au recul (Trédrez-Locquémeau)

Fig. 42 : Gestion du versant entier combinant le traitement de l'érosion marine et subaérienne.

Enrochement en pied et drainage du versant (Planguenoual, 22)

Digue-promenade et drainage du versant (Plérin, 22)

Fig. 43 : Sécurisation du sommet et du pied de falaise sans implantation d'ouvrages.

Ganivelles installées en pied et au sommet de falaise pour prévenir des dangers d'éboulement (Fouesnant, 29)

Filet installé en pied de falaise devant un glissement récent et panneau d'avertissement (Plérin, 22)

Rares sont les sites où le choix s'est porté sur des techniques dites « souples » (ex : rechargement en sable, drainage du vent) qui offrent des possibilités de protection plus respectueuses de l'environnement et qui intègrent la mobilité du trait de côte. Le choix des stratégies de gestion est rendu encore plus complexe puisqu'il est très souvent influencé par la pression exercée par les riverains, le budget disponible et la sensibilité des gestionnaires qui font surtout confiance à des solutions « en dur » (Mineo-Kleiner, 2013). Ainsi, le rechargement de plage, qui est une solution permettant de dissiper une partie de l'énergie des vagues et de réduire la durée d'exposition des falaises aux agents marins (ANCORIM, 2012), n'est pas utilisée pour ralentir l'érosion du pied de falaise.

De plus, là où l'origine subaérienne et/ou marine des processus d'érosion impliqués sur un secteur de falaise meuble n'a pas été suffisamment bien étudiée, la mise en place de certains ouvrages peut s'avérer inefficace contre le recul, voire l'accélérer en créant des turbulences par la présence des blocs (Fig. 40). Des ouvrages privés sont aussi mis en place sans aucune concertation ni réflexion globale sur le site. Ces ouvrages qui ont la particularité de fixer une partie ou la totalité du front de falaise entravent le transit naturel des sédiments et empêchent que les sédiments issus de l'érosion des côtes à falaise viennent nourrir les plages (Bernatchez, Fraser et Lefaivre, 2008). D'une manière générale, les stratégies adoptées choisissent plutôt de s'opposer au recul des falaises meubles que de s'y adapter, par exemple en mettant en place un zonage ou en déplaçant les enjeux menacés.

3.3- Discussion

Diversité géomorphologique des falaises meubles

La diversité des formes d'érosion observées lors de la phase de reconnaissance de terrain montre bien que le recul des falaises meubles peut être le résultat d'une érosion lente, progressive mais régulière sur le long terme, impliquant de faibles volumes (par éboulisation ou affouillement) mais aussi d'une érosion brutale impliquant un grand volume de matériaux (par des phénomènes de glissement, d'effondrement ou d'éboulement). La diversité des formes d'érosion pour ce qui est des volumes et des cinématiques reflète la complexité des processus impliqués en interaction avec des formations de nature très variées. Ces manifestations sont conditionnées par la nature et la cohésion des matériaux mais aussi par les conditions météorologiques et océaniques ainsi que les interventions anthropiques (Carter et Guy Jr, 1988 ; Bray et Hooke, 1997 ; Pierre et Lahousse, 2006 ; Bernatchez, Fraser et Lefaivre, 2008 ; Collins et Sitar, 2008 ; Young, Guza, et al., 2009). Le recensement des phénomènes d'érosion sur chaque site et de leurs caractéristiques, comme la nature des mouvements de terrain et leur volume, est essentiel pour une meilleure compréhension des dynamiques de recul ainsi que pour le choix des techniques d'aménagement et de gestion. Le travail de recensement réalisé ici montre que l'étude du risque d'érosion des falaises meubles en Bretagne souffre d'une absence de base de données, qui est pourtant primordiale pour l'analyse du risque à l'échelle régionale.

Typologie des falaises meubles

La typologie de falaises meubles définie à la suite de la campagne de terrain, ainsi que la base de données constituée, permettent d'évaluer la représentativité géomorphologique et géographique des sites sélectionnés. Ici, quatre des six sites retenus se localisent dans le nord du Massif armoricain ce qui reflète effectivement la répartition régionale des falaises meubles. La typologie employée se fonde avant tout sur la structure et la nature des formations constituant les falaises et diffère de celles proposées dans de précédentes études menées sur des littoraux à falaises meubles. Ainsi, Jones et Lee (1994) définissent une typologie basée sur la lithologie alors que Biville (2004) propose de différencier les falaises meubles par la présence ou non d'une base rocheuse affleurant en pied. Ainsi, dans ces typologies, il a été choisi de ne pas faire la distinction entre les falaises V1 et V2 se différenciant notamment par leur granulométrie. De même, la classification de Pian (2010) répartit les falaises meubles en quatre catégories en se basant sur l'altitude des falaises et l'épaisseur de l'horizon d'altération. Cette typologie ne prend pas en compte les matériaux d'origine quaternaire car elle a été définie pour les littoraux sud bretons où la proportion de formations superficielles est relativement réduite voire nulle. La variation d'épaisseur des formations quaternaires entre le nord et le sud du Massif armoricain s'explique en fait par la nature et les modalités de dépôts des formations pléistocènes (Hallégouët et Van Vliet-Lanoë, 1986). Dans la littérature anglo-saxonne, l'analyse des différents types de falaise reprend souvent le concept de « CBU » pour *Cliff Behaviour Unit* définit par Lee et Clark (2002). Cette typologie est basée, comme son nom l'indique, sur les comportements de falaise, c'est-à-dire sur la nature des mouvements de terrain à l'origine du recul des falaises. La classification CBU est notamment utilisée au Royaume-Uni dans les études de gestion et de suivi des falaises meubles (DEFRA, 2002 ; Stuiver, 2013). Bien que les morphologies des falaises semblent traduire différentes modalités de recul, la majeure partie des analyses menées sur la vulnérabilité des falaises meubles en Bretagne (ex : Bonnot-Courtois et al., 2008 ; Schroëtter et Blaise, 2015) ne prennent pas en compte ces caractéristiques de l'évolution géomorphologique des falaises.

Apport de la méthodologie de sélection à l'expertise en matière de risques côtiers

La méthodologie de sélection des sites peut être employée dans le cadre de la réalisation d'un état des lieux à une échelle régionale mais aussi à une échelle plus réduite, départementale voire communale. Cet outil peut être utilisé pour la sélection de sites sur une aire géographique donnée mais peut aussi servir d'outil d'analyse globale d'un territoire permettant d'en relever les grandes caractéristiques ainsi que les problèmes d'érosion rencontrés. Ce travail vise ainsi à renforcer l'expertise régionale en matière de compréhension et de gestion des risques côtiers. Il peut être utilisé aussi bien par les gestionnaires des services déconcentrés de l'État et des collectivités locales et territoriales que par les équipes de recherche souhaitant, par exemple, sélectionner des sites dans le cadre de la mise en place d'un observatoire. Cependant, il convient de noter que le nombre limité de sites pouvant être retenus peut venir complexifier le travail de sélection dont l'objectif est d'obtenir la meilleure représentativité possible des situations rencontrées. Ici, malgré l'existence de nombreux sites considérés comme intéressants pour l'étude, il a été choisi de limiter le nombre à six sites afin de ne pas compromettre la régularité des suivis.

Conclusion intermédiaire

La méthodologie de sélection a permis d'aboutir à un échantillonnage de six sites de falaises meubles que l'on considère comme représentatifs de l'ensemble des situations rencontrées à l'échelle régionale sur le plan géomorphologique et par rapport aux enjeux exposés. Ces sites reflètent la diversité des morphologies, des enjeux et des stratégies de gestion liés aux risques d'érosion. La méthodologie proposée s'appuie sur un travail bibliographique, une reconnaissance de terrain puis l'utilisation d'un tableau de sélection reprenant les observations et les informations recensées. Dans le cadre du travail de sélection, une typologie de falaises meubles a été définie. La diversité des morphologies des falaises meubles, observée à l'échelle régionale et les différents aménagements mis en œuvre pour arrêter ou ralentir leur recul font écho à la complexité du fonctionnement de ces systèmes côtiers. Toutes les informations recueillies au cours de cette étude ont été géoréférencées dans un SIG. Cette base de données servira de support au suivi des falaises meubles à l'échelle régionale. La méthodologie de sélection présentée ici constitue un outil permettant de dresser un bilan sur les problèmes posés actuellement par le phénomène de recul des falaises meubles en Bretagne. Afin d'identifier les processus physiques impliqués dans le recul des falaises meubles, la mise en place d'un suivi topo-morphologique sur les sites d'étude apparaît essentiel. Avant d'analyser la cinématique de recul sur ces sites, il est nécessaire de préciser les caractéristiques lithologiques et les particularités météo-marines propres à chacun des secteurs d'étude.

CHAPITRE 4 : Cadre morphologique et météo-marin des sites d'étude

Les six sites à falaises meubles retenus constituent les terrains expérimentaux de cette thèse. Le caractère commun de l'ensemble de ces sites est qu'ils correspondent, tous les six, à des morphologies continentales héritées. Chacune d'entre elles est façonnée par le nettoyage progressif de la couverture de formations superficielles par les agents marins et subaériens. Ce nettoyage conduit au dégagement, à des stades plus ou moins poussés, d'une crypto-topographie sous-jacente, taillée dans les affleurements rocheux, et qui constitue elle-même un héritage de périodes géologiques antérieures. Les variations de hauteur d'un bout à l'autre d'un même secteur de falaises meubles sont, par exemple, le reflet de cette topographie continentale qui existait avant la transgression holocène. Les falaises meubles sont donc des versants continentaux recoupés actuellement par l'érosion littorale. L'abrupt de la falaise est la partie mobilisée par l'érosion mais c'est l'ensemble du versant dans lequel ces falaises sont entaillées qui doit être considéré. En effet, lorsque ce versant continental est atteint par la mer, les processus continentaux sont ravivés (du fait de la pente forte de la paroi de la falaise) et participent au recul de l'abrupt, conjointement aux processus marins.

Bien qu'étant formé chacun, par des formations géologiques héritées d'une longue histoire, les caractéristiques physiques des sites d'étude diffèrent, tant du point de vue morphologique que par leur exposition aux forçages météorologiques et hydrodynamiques. En effet, au-delà des caractéristiques environnementales générales et moyennes du littoral breton (cf. chapitre 2), se cache une morphologie des falaises et un climat littoral plus complexes, marqués par une forte variabilité spatiale de ces paramètres qu'il convient d'étudier.

Dans ce chapitre, les caractéristiques physiques et géographiques des sites d'étude seront donc présentées. Le contexte morphologique et anthropique sera abordé par le biais de cartes géomorphologiques et l'analyse de coupes géologiques permettra de connaitre les formations composant les falaises meubles. Le contexte climatique sera abordé au travers de la normale climatique (1981-2010) des stations Météo-France les plus proches des sites d'étude (Annexe 3), en insistant sur les cumuls de précipitations et le régime des vents. Concernant le contexte hydrodynamique, les paramètres de marée seront abordés par l'intermédiaire des mesures issues de la base de données du SHOM (https://data.shom.fr/donnees/). Les données de houle (directions, hauteurs significatives et périodes des vagues) seront analysées, quant à elles, par l'intermédiaire des valeurs obtenues par modélisation, à l'aide de la base de données HOMERE (WaveWatch III, version 4.11) qui couvre la période 1994-2016 (Maisondieu et al., 2017). Les coordonnées des points de sortie utilisés pour cette modélisation sont présentées en Annexe 4.

4.1- La plage des Vallées et la grève de Nantois à Pléneuf-Val-André

Ce premier secteur côtier étudié se localise sur la façade orientale de la baie de Saint-Brieuc et est ouvert sur la Manche (Fig. 44). La plage des Vallées et la grève de Nantois sont situées sur le littoral nord-est de la commune de Pléneuf-Val-André, dans les Côtes-d'Armor, en contrebas d'un plateau dont l'altitude générale est de l'ordre d'une centaine de mètres environ. Les deux plages sont contigües et séparées simplement par une avancée rocheuse correspondant à un affleurement de roche résistante dans la topographie continentale qui détermine la ligne d'interfluve entre les deux vallées (Fig. 44 et Fig. 45).

Fig. 44 : Localisation du site de Pléneuf-Val-André.

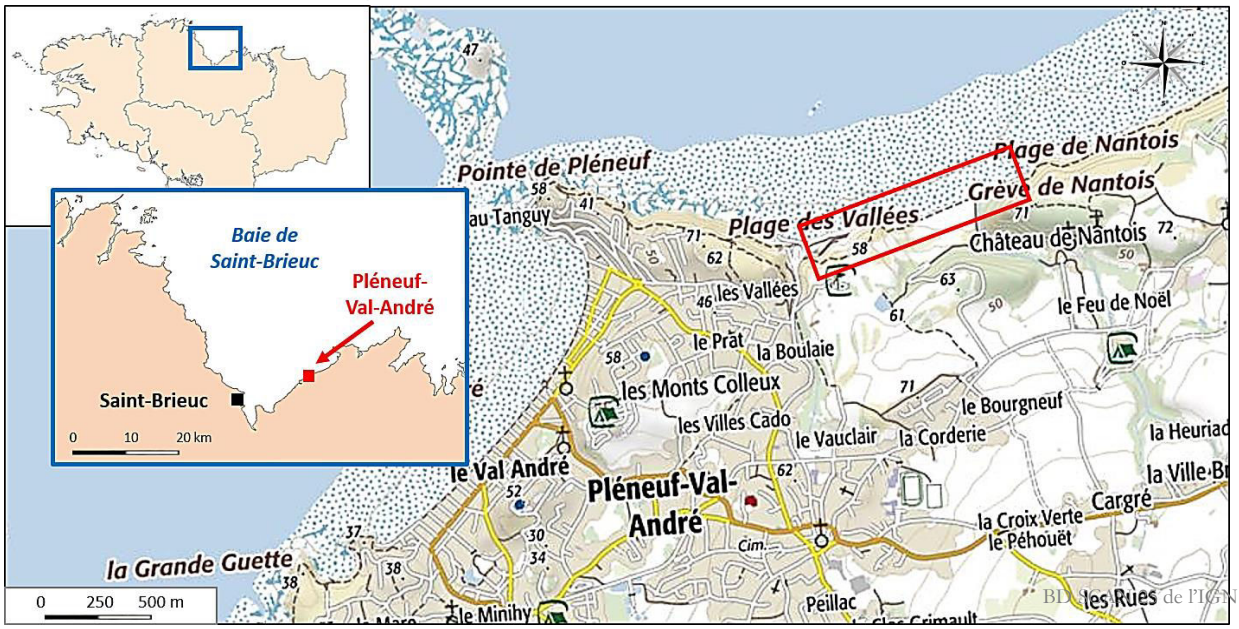
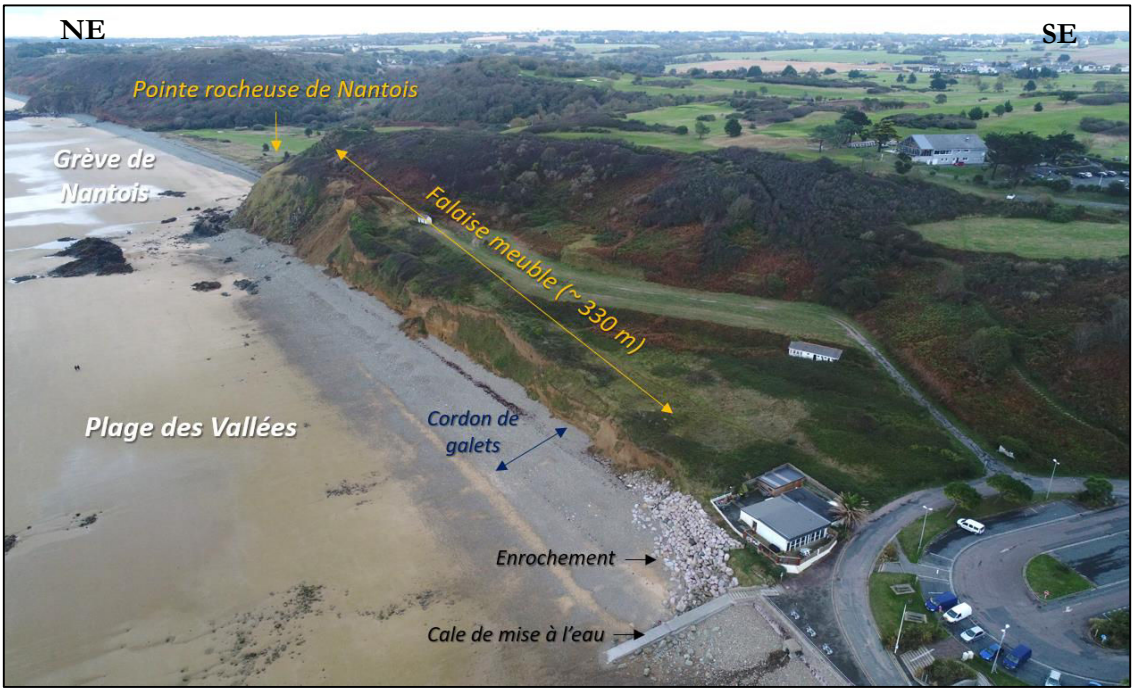


Fig. 45 : Vue aérienne de la plage des Vallées et, en arrière, de la grève de Nantois (photographie : J. Ammann, 2018).

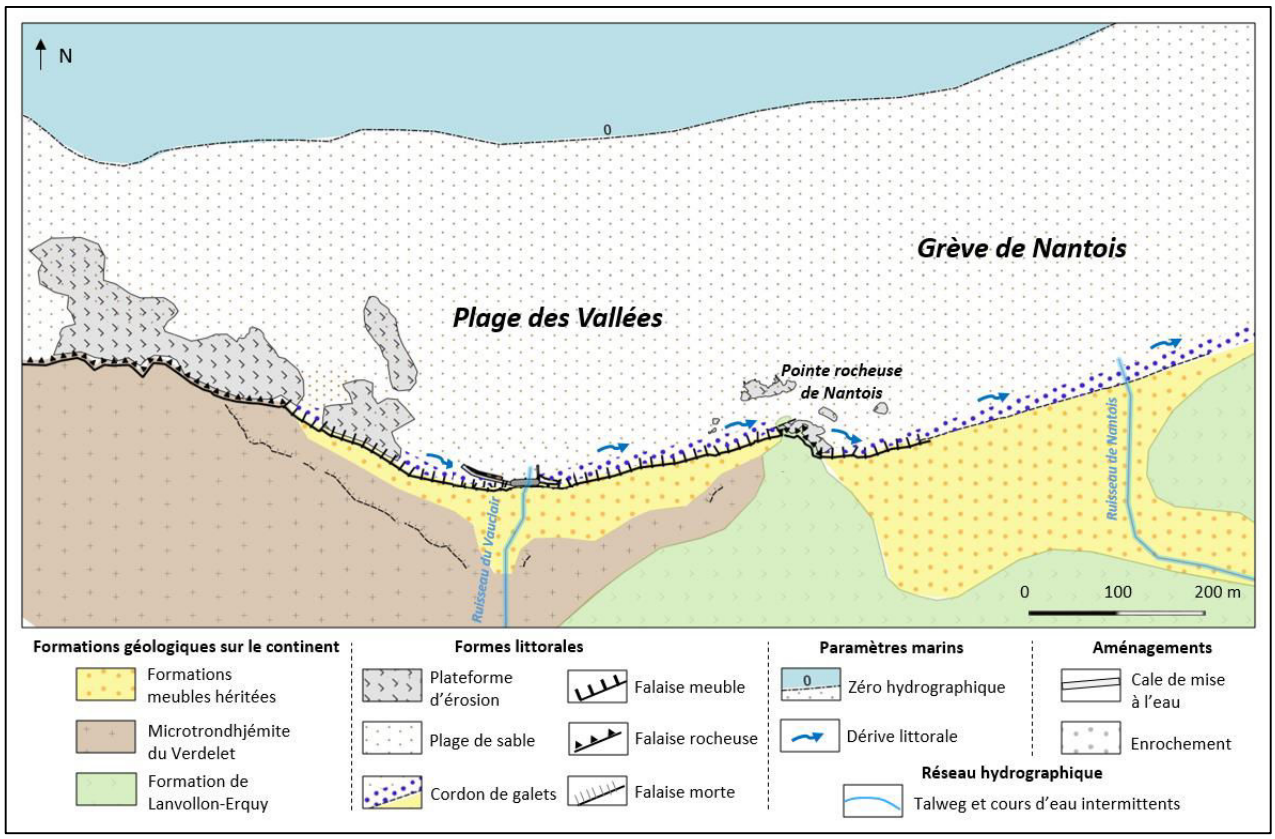


Le site de la plage des Vallées-Nantois se localise entre deux vallons où s'écoulent le ruisseau du Vauclair, à l'est, et le ruisseau de Nantois, à l'ouest (Fig. 46), de part et d'autre d'une ligne de crête rocheuse. Les falaises étudiées, orientées est-nord-est/ouest-sud-ouest, s'étendent sur 500 m. Elles sont réparties pour les deux tiers, sur la plage des Vallées, et pour le tiers restant sur la grève de Nantois (Fig. 45 et Fig. 46). La partie ouest du site se termine par un enrochement s'appuyant sur une cale de mise à l'eau tandis que la partie est du linéaire de falaises meubles se termine par une dépression topographique sablonneuse protégée de l'envahissement par la mer par un cordon de galets. Sur la plage des Vallées, la hauteur des falaises qui correspondent au versant oriental de la vallée du Vauclair augmente progressivement d'ouest en est, passant de 4 à 29 m. À l'inverse, la hauteur des falaises de la grève de Nantois diminue au fur et

à mesure qu'on se dirige vers l'est, passant de 22 m à un peu moins d'un mètre, en suivant la pente du versant occidental de la vallée de Nantois.

Le site de Pléneuf-Val-André est caractérisé par un vaste estran qui peut découvrir sur plus de 400 m de largeur. Il présente une pente faible et régulière et, en haut d'estran, se trouve un épais cordon de galets de 4 m de haut et de 10 à 21 m de large recouvrant le pied des falaises meubles (Fig. 45 et Fig. 46).

Fig. 46 : Carte géomorphologique du site de Pléneuf-Val-André.



La carte géomorphologique ci-dessus permet de présenter les différents éléments géologiques (formations sur le continent) et morphologiques du système côtier ainsi que les principales caractéristiques marines et continentales. L'ensemble des éléments décrits dans les cartes géomorphologiques est présent en Annexe 12 et sera exposé en détail dans le chapitre 8, consacré à l'identification de l'étendue des formations meubles et des zones à risque.

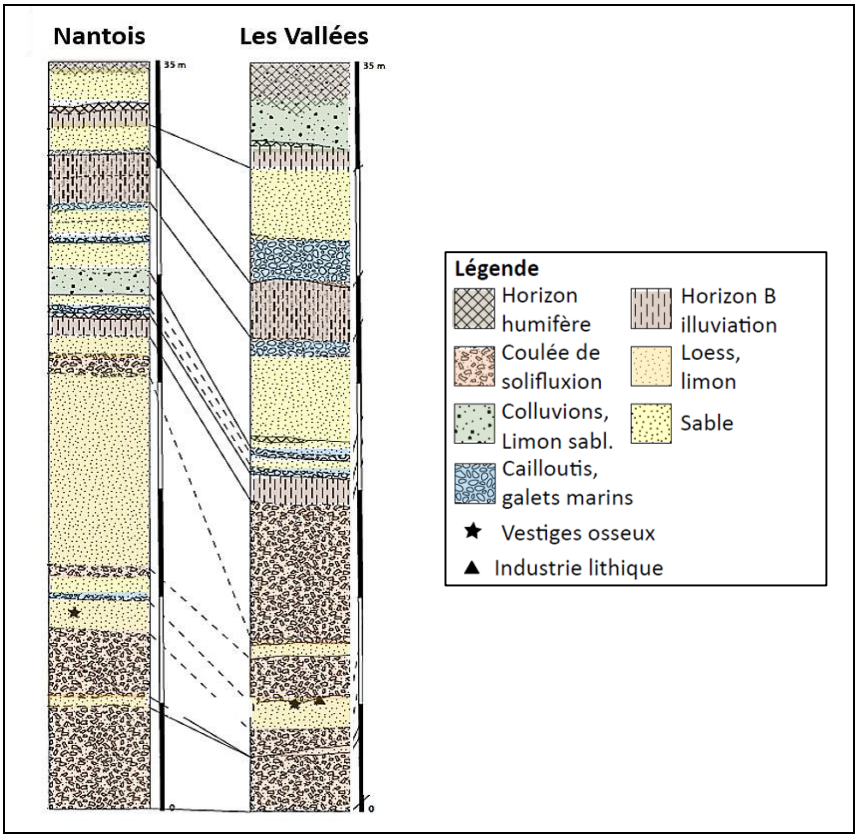
Lithologie

Du fait de leur richesse stratigraphique et paléontologique, de nombreux travaux de recherche ont été menés sur ces falaises meubles qui permettent de remonter aux deux derniers cycles glaciaires-interglaciaires (Giot et Monnier, 1972 ; Monnier, 1973 ; Loyer et al., 1995 ; Huet, 2010 ; Bahain et al., 2012). La coupe stratigraphique de la falaise de Nantois figure parmi une des plus complètes de la région, ce qui lui a valu d'être définie comme stratotype du quaternaire (Monnier et Morzadec-Kerfourn, 1982 ; Bigot et Monnier, 1987). Au niveau de la plage des Vallées, plusieurs gisements archéologiques ont été retrouvés témoignant d'une occupation antérieure au dernier interglaciaire (Barrois, 1896 ; Leclerc et Milon, 1925 ; Huet, 2010).

Les falaises meubles de la plage des Vallées et de la grève de Nantois sont formées par une succession de formations pédo-sédimentaires (Fig. 47) et notamment : des dépôts de heads grossiers visibles en bas de falaise, surmontés par des coulées de solifluxion litées à matrice lœssique, puis d'une couche de loess

carbonaté sur laquelle reposent à nouveau des heads et un paléosol. Des dépôts littoraux anciens inter-stratifiés (sables et galets marins) témoignent des dernières transgressions marines. Enfin, les coupes se terminent par des colluvions et des horizons pédologiques récents (Monnier et Morzadec-Kerfourn, 1982 ; Laforge et Huet, 2013).

Fig. 47 : Coupes stratigraphiques et corrélation entre les séquences pédo-sédimentaires des falaises meubles de la grève de Nantois et de la plage des Vallées (modifié de Laforge et Huet, 2013).



Ces formations meubles reposent sur un socle qui n'apparait pas en pied de falaise mais qui affleure au niveau de la pointe rocheuse de Nantois et au niveau de quelques saillants rocheux dispersés sur l'estran (Fig. 48). Ce socle rocheux est constitué, dans la partie ouest du site, par la microtrondhjémite du Verdelet (variété de tonalite) (Barrois, 1896). Cette roche cambrienne, massive, possède une teinte grise et une texture microgrenue. La roche est parcourue par de nombreuses veines de quartz. Cette intrusion de microtrondhjémite recoupe les formations cadomiennes de Lanvollon-Erquy qui composent le substratum de la partie est du site (Fig. 46 et Fig. 48). Ces formations correspondent à des roches métamorphiques, de nature dioritique à gabbroïque. Elles ont une teinte bleue à gris-vert sombre et, au niveau de la pointe de Nantois, elles sont déformées et plissées, indiquant le passage d'une zone de cisaillement (Fig. 48).

Fig. 48 : Substratum affleurant sur le site de Pléneuf-Val-André.

Microtrondhjémite du Verdelet

Formation de Lanvollon-Erquy déformée par une zone de cisaillement

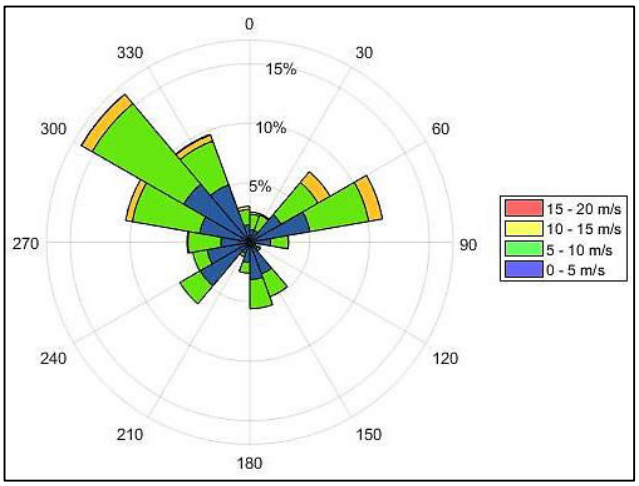
Caractéristiques météo-marines

Selon la normale climatique (1981-2010), à la station Météo-France de Saint-Cast-le-Guildo (à 25 km de la plage des Vallées), les précipitations sont de 776 mm/an se répartissant en moyenne sur 130 jours (seuls les jours pour lesquels les cumuls de précipitations sont supérieurs ou égaux à 0,2 mm sont comptabilisés). Les températures minimales et maximales moyennes varient entre 8 et 15°C et la durée d'ensoleillement est de 1 565 h/an. Le régime de vent dominant est le secteur nord-ouest avec partiellement une seconde composante de vent de secteur nord-nord-est (Fig. 49A). Les vents sont donc majoritairement d'afflux. La vitesse moyenne journalière du vent est de 5,3 m/s.

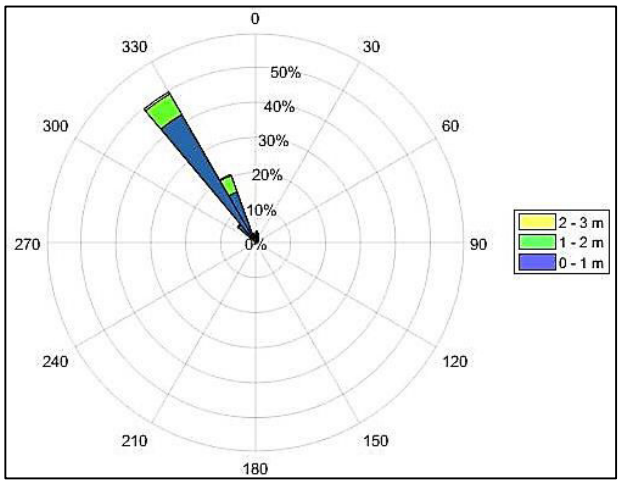
Les falaises de Pléneuf-Val-André sont exposées aux houles de la Manche parvenant dans la baie de Saint-Brieuc (Fig. 44). Néanmoins, suite à leur propagation dans la baie, ces houles sont amorties et ralenties notamment grâce à la présence de hauts-fonds, tel le Plateau des Jaunes (3,3 km au nord-ouest) ou le Plateau des Portes d'Erquy (4,7 km au nord). Les fonds, proches de la côte et recouverts essentiellement par du sable fin, attestent également d'une faible énergie marine (Augris et Hamon, 1996).

Dans la baie de Saint-Brieuc, les houles proviennent principalement d'un secteur nord-nord-ouest (entre 320 et 340°N) et leur hauteur significative, à 20 m de profondeur, est comprise entre 0,5 et 1,0 m pour 81 % du temps (Fig. 49B). La période moyenne des houles est relativement faible puisqu'elle est de 6 secondes.

Fig. 49 : Caractéristiques des vents et des houles au large de Pléneuf-Val-André.



A : Rose des vents (2003-2010) à la station Météo-France de Saint-Cast-le-Guildo



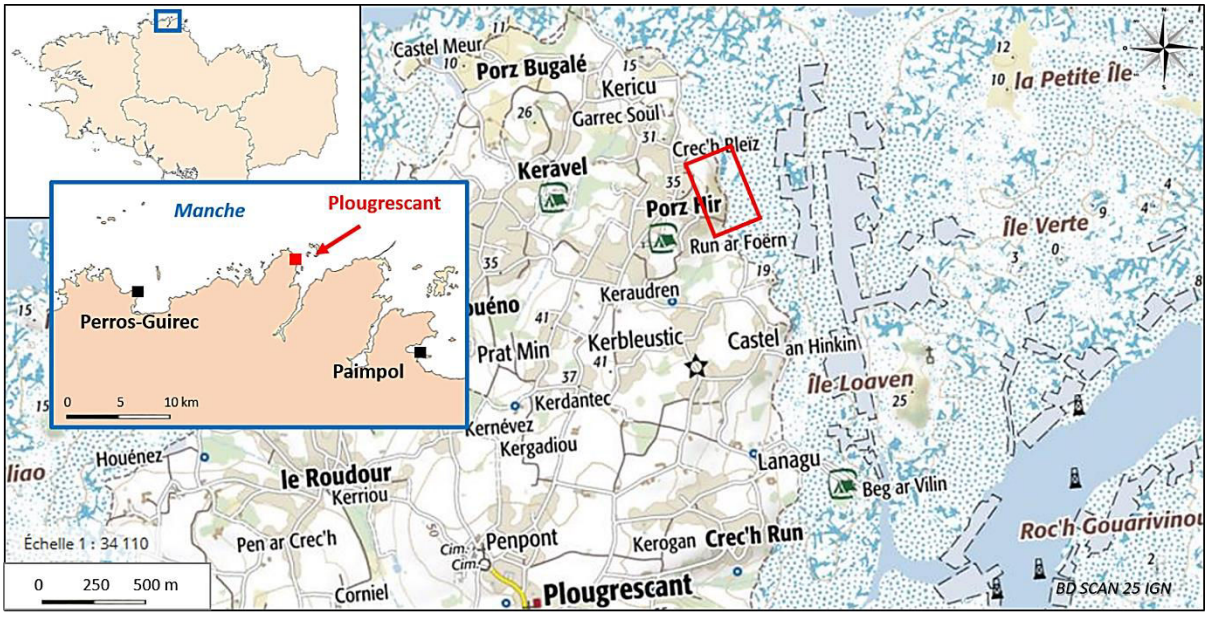
B : Direction moyenne de provenance des houles et hauteur significative à 20 m de profondeur (source : BD HOMERE)

Les marées ont une amplitude maximale de 12,5 m pour un coefficient de 120 et de 9,5 m pour un coefficient de 95. Les courants de marée en surface, décrits par le SHOM (Desmare et Nicolle, 2012), sont inférieurs à 0,5 nœud en avant du site et sont compris entre 0,5 et 1,0 nœud à 500 m au large du site. La direction principale des houles et des courants de marées associée à l'orientation ouest-sud-ouest/est-nord-est du trait de côte favorise une dérive littorale de l'ouest vers l'est (Fig. 46), au sein d'une cellule hydro-sédimentaire ouverte, allant de la Pointe de Pléneuf au Cap d'Erquy.

4.2- L'anse de Pors-Hir à Plougrescant

L'anse de Pors-Hir est située sur le littoral nord-est de la commune de Plougrescant, dans les Côtes-d'Armor, à l'entrée de l'estuaire du Jaudy (Fig. 50). Ce linéaire côtier se localise à l'extrémité est de la Côte de Granite Rose et est ouvert sur la Manche.

Fig. 50 : Localisation du site de Plougrescant.



L'anse de Pors-Hir, légèrement arquée et orientée nord-nord-ouest/sus-sud-est, possède un linéaire avoisinant les 340 m. Elle est formée, d'un point de vue morphologique, par la base d'un versant orienté

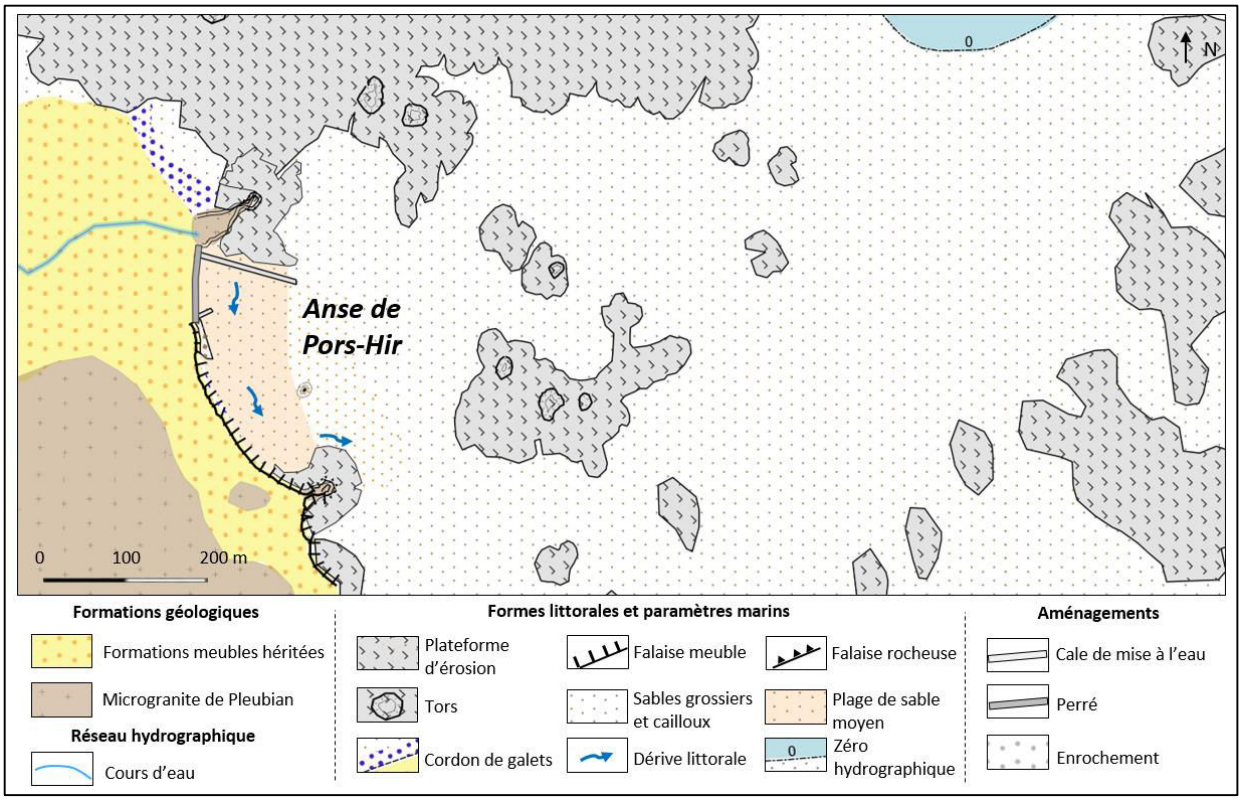
vers le nord-est dont les pentes descendent d'une altitude d'une trentaine de mètres vers la mer. Le littoral de l'anse présente deux parties distinctes (Fig. 51 et Fig. 52) :

- une partie nord, aménagée, bordée par un perré en maçonnerie. Cette portion est encadrée par deux cales de mise à l'eau (une petite et une grande cales de longueur respective de 25 m et 120 m). Cette partie aménagée représente environ le tiers nord de l'anse ;

- une partie sud, représentant les deux tiers de la plage restants, est bordée par une falaise meuble haute de 2,5 m dans sa partie nord et de 3,5 m environ dans ses parties centrale et méridionale. Son extrémité nord est prolongée par un enrochement d'une cinquantaine de mètres.

Fig. 51 : Anse de Pors-Hir vue depuis le Nord.

Fig. 52 : Carte géomorphologique du site de Plougrescant.



La plage est formée majoritairement de sable à granulométrie moyenne et, par endroits, s'observent des petits plaquages de galets peu épais, notamment en pied de falaise, d'une largeur de 1 à 2 mètres maximum. L'estran est parsemé de petits écueils rocheux, d'une dizaine de mètres de hauteur (Fig. 53). Ce « paysage à tors », comme le nomme Pinot (1998), correspond à une côte à dénudation façonnée, ici, par le dégagement par la mer des formations meubles environnantes (arènes et couverture sédimentaire). Ces écueils rocheux épars donnent une forme irrégulière au platier d'où son appellation de plateforme à écueils.

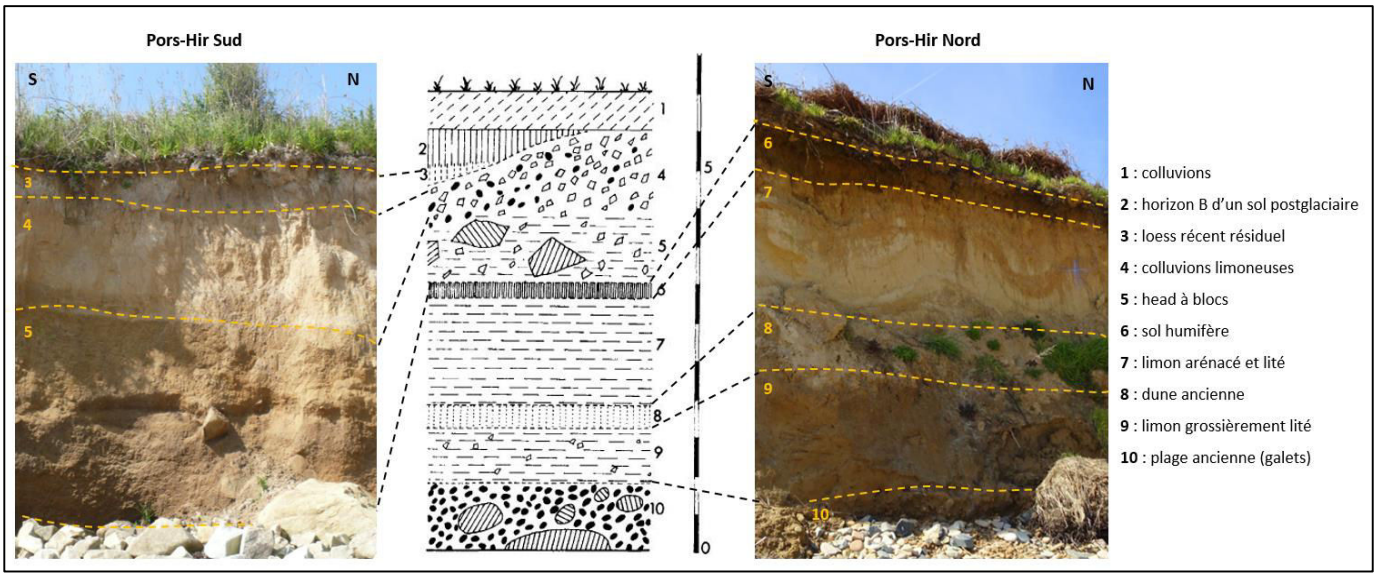
Fig. 53 : Paysage à « tors » visible depuis l'anse de Pors-Hir.

Lithologie

Du fait de la présence d'un niveau archéologique conservé dans un head ancien, présent dans la partie médiane de la falaise, la stratigraphie des dépôts a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche, notamment par J-L. Monnier (1973).

Les falaises de la plage de Pors-Hir sont formées par des dépôts quaternaires pléistocènes reposant sur un socle granitique (microgranite de Pleubian) qui affleure au niveau des pointes rocheuses encadrant l'anse et au sud du site, là où la plateforme marine affleure (Fig. 52). Les dépôts quaternaires sont constitués, dans leur partie basale, par une plage ancienne composée de galets et qui est visible dans la partie nord du linéaire de falaise meuble (Fig. 54). Ces galets anciens sont surmontés de limon grossièrement lité sur environ 2 m d'épaisseur. Localement, on y observe une intercalation de sable dunaire. Par-dessus, se trouve un limon arénacé finement lité puis un horizon fin de sol humifère. La suite de la coupe est visible notamment dans la partie sud de l'anse et est formée par un head à blocs surmonté de colluvions limoneuses, puis d'un loess altéré et d'un sol humifère postglaciaire. La coupe se termine par des colluvions récentes et le sol actuel.

Fig. 54 : Coupe géologique de la falaise de Pors-Hir (modifié de Monnier, 1976).



Caractéristiques météo-marines

Selon la normale climatique (1981-2010), à la station Météo-France de l'Île de Bréhat (à 12 km de l'anse de Pors-Hir), les précipitations sont de 759 mm/an se répartissant en moyenne sur 134 jours. Le régime de vent dominant est le secteur ouest-nord-ouest avec, partiellement, une seconde composante de vent

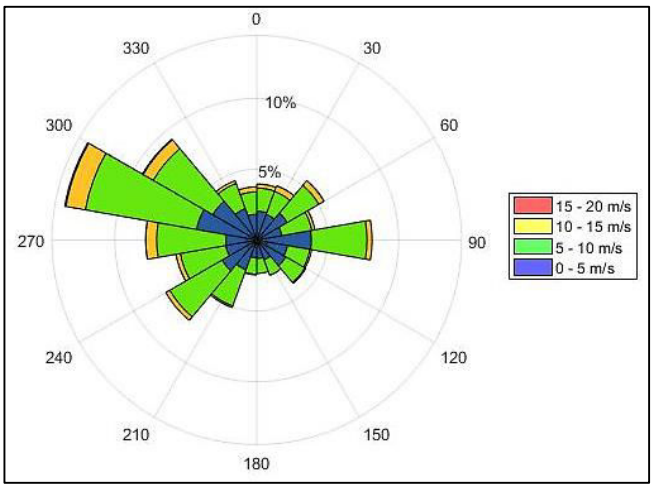
de secteur est mais qui est peu fréquente (représente moins de 20 % des vents) (Fig. 55A). La vitesse moyenne journalière du vent est de 5,7 m/s.

L'anse de Pors-Hir est exposée aux houles de la Manche (Fig. 50) mais la plate-forme à écueils cernant la plage, au nord et au sud de l'anse, offre une situation d'abri face aux houles incidentes (Fig. 52). De plus, les nombreux tors et îlots rocheux telle la Petite Ile (1,5 km à l'est) ou le Roc'h-Nor-Laier (2,4 km au nord-est) dévient la trajectoire et atténuent l'efficacité des houles parvenant dans l'anse. Entre ces hauts-fonds et la côte, les profondeurs marines sont très faibles et restent au-dessus du zéro hydrographique jusqu'à 900 m du rivage.

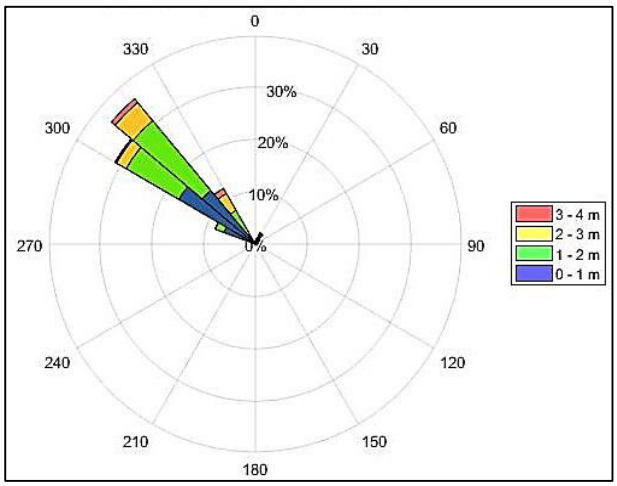
Au large du site de Pors-Hir, les houles dominantes ont une provenance nord-ouest (Fig. 55B). Du fait de son orientation, l'anse de Pors-Hir est peu exposée aux houles parvenant de ce secteur mais, sous l'effet des diffractions (au niveau des pointes rocheuses) et réfractions (lorsque la profondeur diminue), les houles arrivent à la plage avec une incidence quasiment normale.

La hauteur significative des houles, à 20 m de profondeur, est comprise entre 1,0 et 1,5 m pour 63 % d'entre elles (Fig. 55B). En période de tempêtes (vents avec une vitesse dépassant les 22 m/s, selon la définition donnée dans l'étude Vimers (Météo-France, 2013)), l'agitation est relativement importante car la hauteur significative des vagues peut dépasser 4,5 m (5,3 m enregistré lors de la tempête du 9 février 2014 et jusqu'à 6,6 m enregistré lors de la tempête Johanna du 10 mars 2008). Les houles les plus fortes sont celles de secteur nord (entre 320 et 340°N) car alors, le fetch est plus important du fait d'îlots rocheux peu nombreux dans l'aire de propagation des houles et celles-ci sont donc plus puissantes (Carnus et Gabellini, 2014). Mais, du fait de la nature rocheuse des fonds et de la forte pente de l'estran, la hauteur moyenne des houles s'atténue rapidement à l'approche de la côte car elle passe de 1,27 m à 0,77 m en moyenne, entre 20 et 10 m de profondeur, soit une diminution de 39 % (source : base de données HOMERE).

Fig. 55 : Caractéristiques des vents et des houles au large de Plougrescant.



A : Rose des vents (1981-2010) à la station Météo-France de l'Ile-de-Bréhat



B : Direction moyenne de provenance des houles et hauteur significative à 20 m de profondeur (source : BD HOMERE)

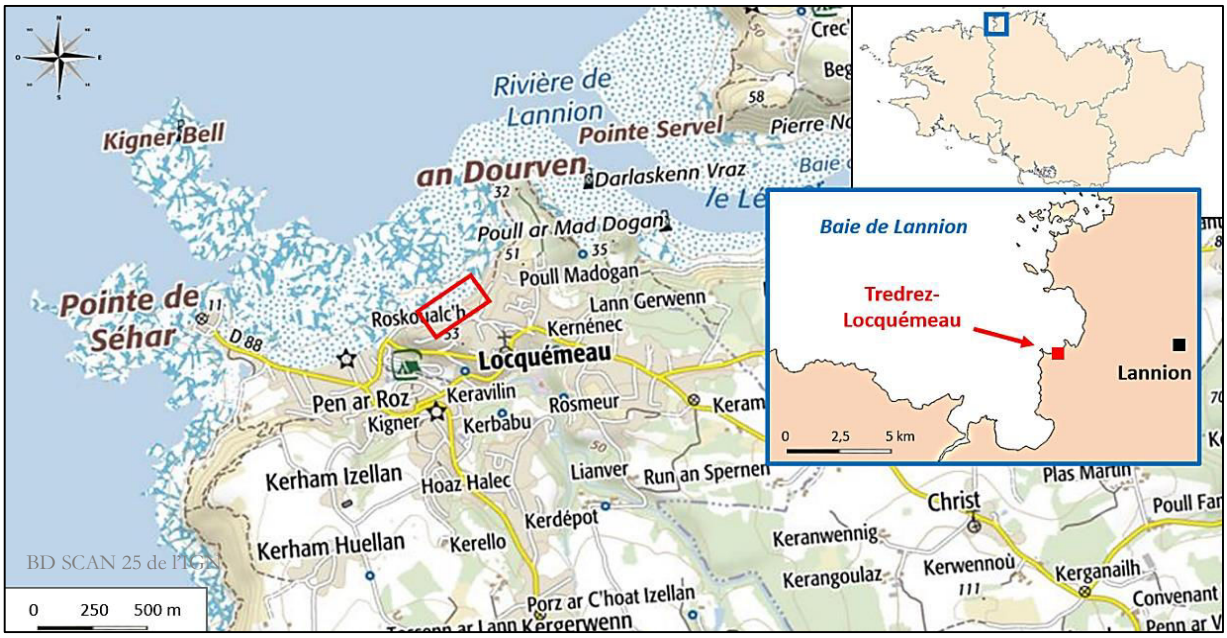
Les marées ont une amplitude maximale de 10 m pour un coefficient théorique de 120 et de 8 m pour un coefficient de 95. Les courants de marée sont marqués à proximité de la côte puisqu'ils sont compris entre 2 et 2,5 nœuds en surface. Les houles dominantes de secteur nord-ouest génèrent une dérive littorale dirigée vers le sud et les sédiments ont tendance à s'accumuler en amont-dérive d'obstacles côtiers (cales, pointes rocheuses) aux dépends des compartiments de plage situés en aval-dérive. La trajectoire de cette dérive littorale est nettement visible sur les photographies aériennes (Fig. 56).

Fig. 56 : Flux sédimentaires orientés vers le sud au large de l'anse de Pors-Hir (photographie aérienne IGN, 2003).

4.3- La plage de Notigou à Trédrez-Locquémeau

La plage de Notigou, au sud de l'estuaire du Yaudet, est située sur le littoral de la baie de Lannion, dans les Côtes-d'Armor. Cette plage se localise au nord-ouest de la commune de Trédrez-Locquémeau, dans le fond de l'anse délimitée par les pointes de Séhar et de An-Dourven (Fig. 57).

Fig. 57 : Localisation du site de Trédrez-Locquémeau.



Les falaises meubles s'étendent environ sur 300 m. Elles sont entaillées dans un versant qui culmine vers 50 m IGN et présente une pente relativement forte vers le nord-ouest marquée par la présence, en son milieu, d'un talweg peu encaissé. Ce versant est largement occupé par de nombreuses habitations (Fig. 58) qui masquent désormais les détails de la topographie. À leur extrémité est, les falaises sont protégées à leur base par un enrochement et, à leur extrémité ouest, elles sont limitées par un escalier suivi d'un mur en maçonnerie. La partie basse de l'estran présente une forte pente (3,6 %) et l'estran

sableux et rocheux peut découvrir jusqu'à 500 m de largeur. La hauteur des falaises est comprise entre 14 et 17 m, les plus faibles hauteurs étant observées dans la partie centrale et à l'extrémité est de l'anse.

Fig. 58 : Vue aérienne de la plage de Notigou (photographie : J. Ammann, 2018).

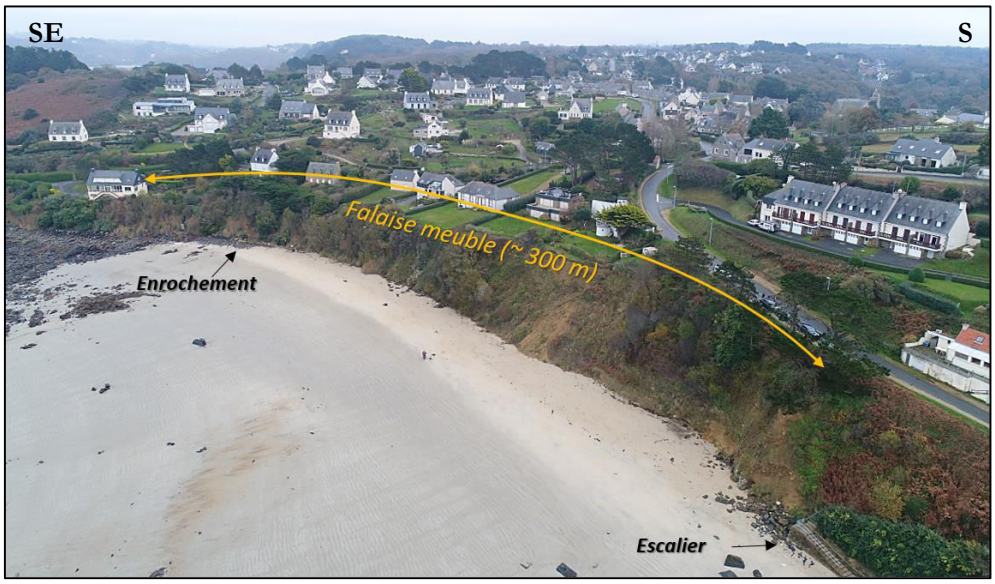
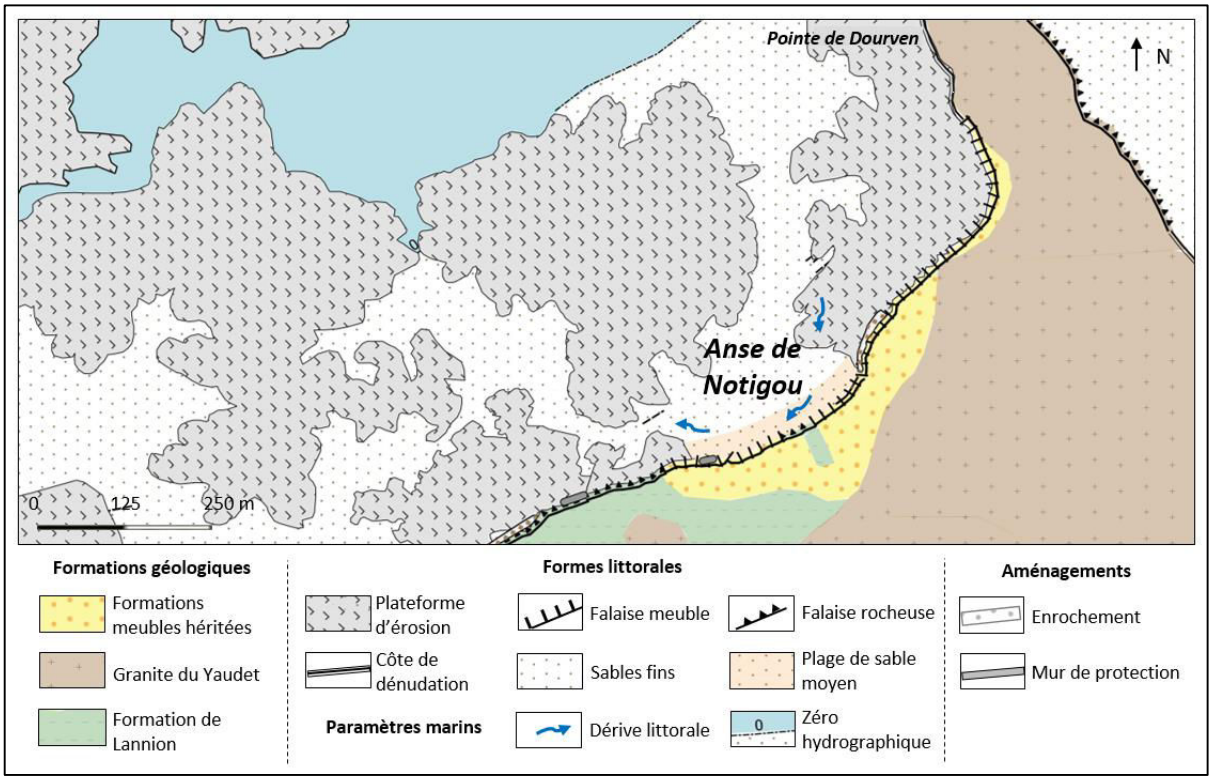


Fig. 59 : Carte géomorphologique du site de Trédrez-Locquémeau.



Lithologie

Les falaises meubles de la plage de Notigou sont formées à la base par des arènes silto-sableuses qui correspondent à des altérites évoluées du socle, poreuses et faiblement perméables. Au-dessus, reposent des coulées de head à blocs et des limons de colluvionnement (Fig. 60). Le socle sain ou peu altéré affleure notamment au niveau du platier et de pointements rocheux le long du linéaire de falaise meuble (Fig. 61). Ce socle correspond à la Formation de Lannion qui est composée d'une série volcano-sédimentaire formée par des sills acides plurimétriques intercalés dans des niveaux silto-gréseux (Chantraine et al.,

1999). Cette entité lithologique a été affectée par une déformation hétérogène et elle est orientée sur la côte autour de N70°E. Elle est recoupée au nord par le granite du Yaudet qui structure la Pointe de Dourven (Fig. 59) mais qui n'affleure pas sur le linéaire côtier étudié. Ce granite correspond à une intrusion datée à 300 Ma (Chantraine et al., 1999).

Fig. 60 : Coupe géologique de la falaise de Notigou.

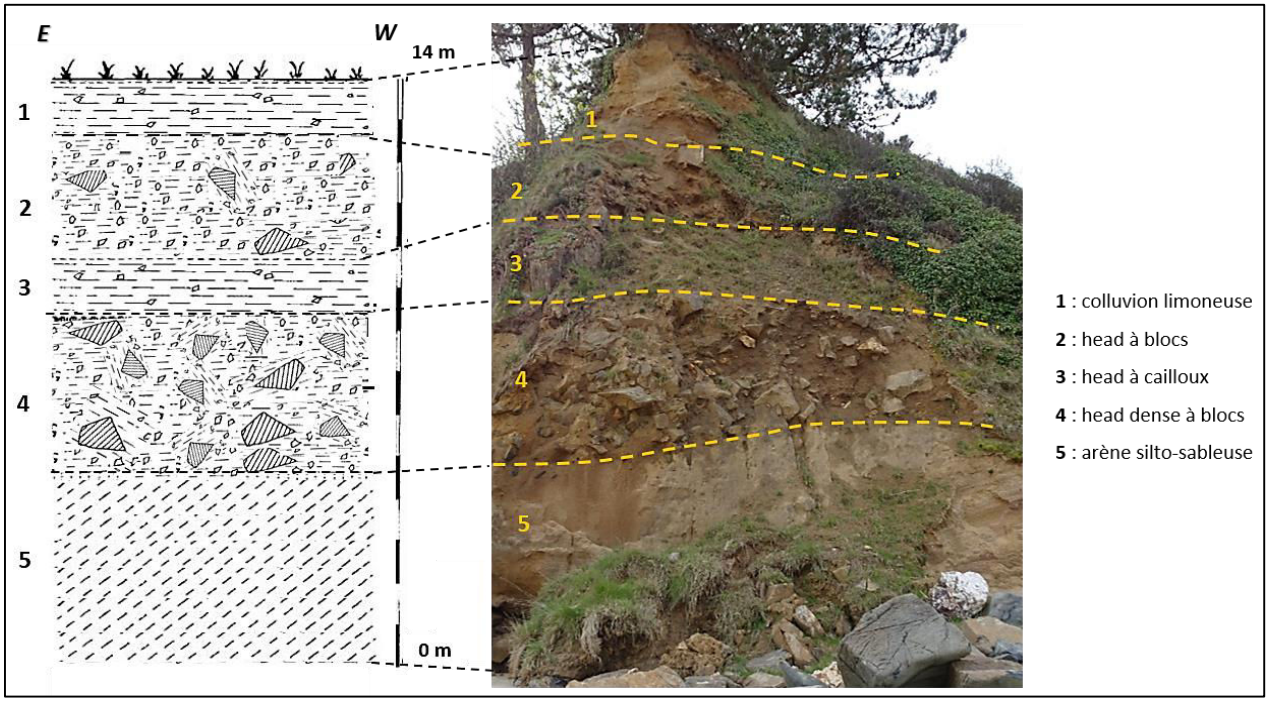
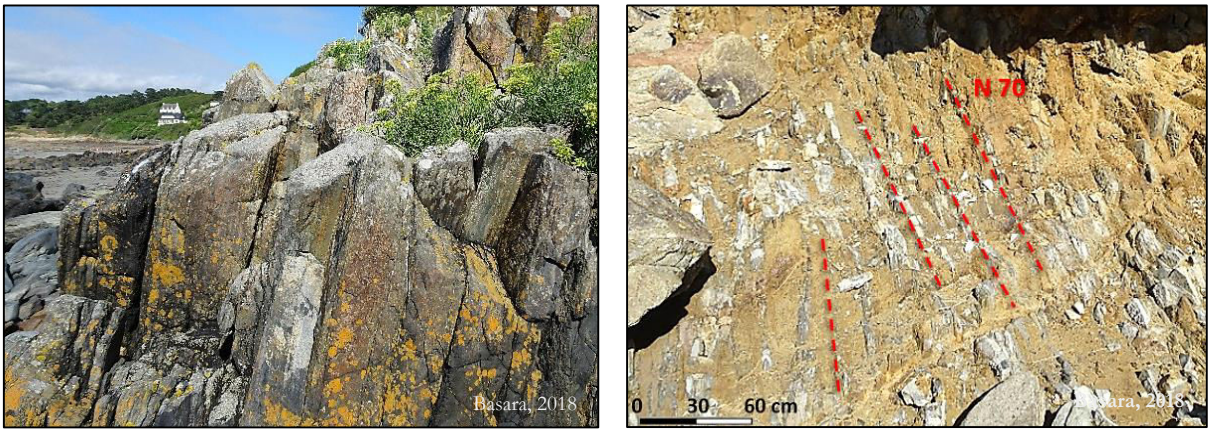


Fig. 61 : Série volcano-sédimentaire (Formation de Lannion) constituant le substratum, orientée Est-Ouest et visible sur le platier de la plage de Notigou.



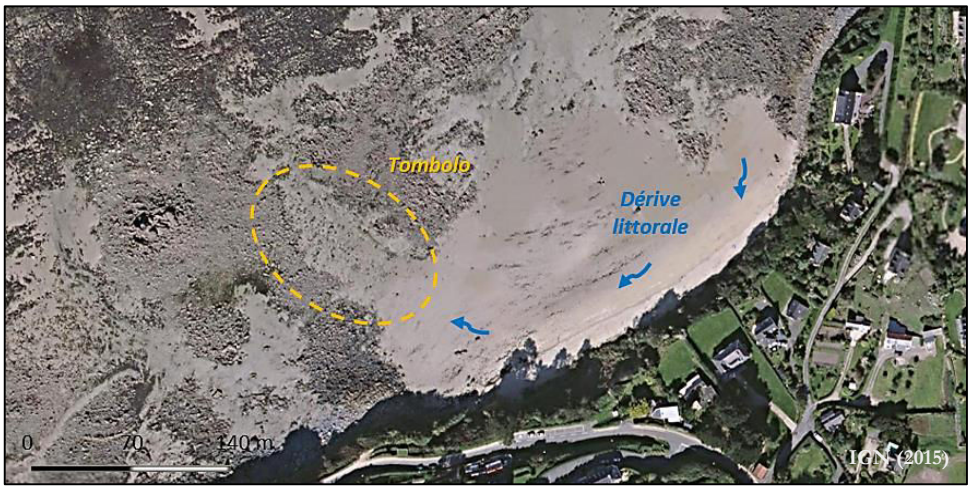
Caractéristiques météo-marines

Selon la normale climatique (1981-2010), à la station Météo-France de Ploumanac'h (à 13 km de la plage de Notigou), les précipitations sont de 856 mm/an se répartissant en moyenne sur 142 jours. Les températures minimales et maximales moyennes varient entre 9 et 15°C. Le régime de vent dominant est le secteur ouest-sud-ouest avec partiellement une seconde composante de vent de secteur est-nord-est (Fig. 63A). Sur ce site, les vents d'afflux ne sont pas majoritaires. Le vent moyen journalier est de 5,4 m/s.

Localisé dans la baie de Lannion, ce site bénéficie d'une situation relativement bien abritée, vis-à-vis des houles, par la présence d'une large plateforme rocheuse à écueils, visible à marée basse (Fig. 59). En plus

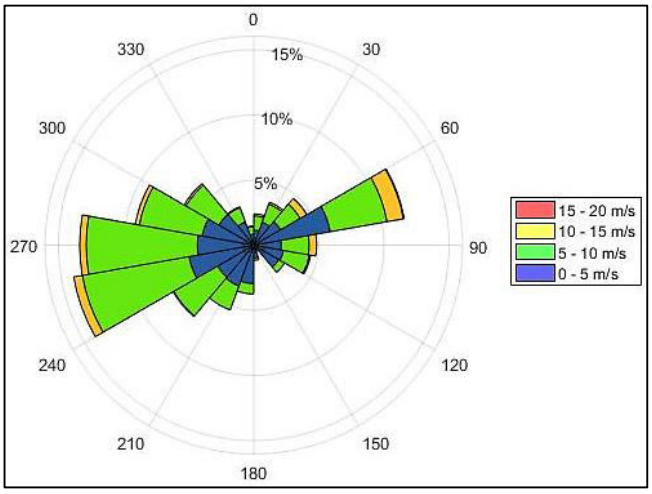
d'amortir la houle, les écueils de cette plateforme sont à l'origine de la formation d'un tombolo submersible au sud-ouest de la plage de Notigou (Fig. 62).

Fig. 62 : Formation du tombolo au sud-ouest de la plage de Notigou.

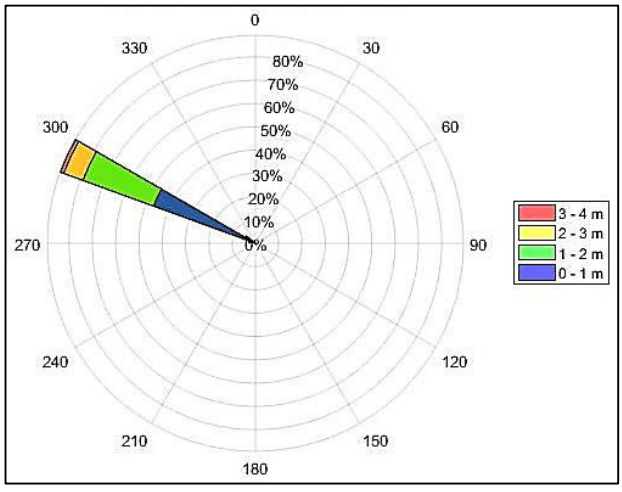


Au large du site de Trédrez-Locquémeau, les houles dominantes ont une provenance ouest-nord-ouest (295°N en moyenne) (Fig. 63B). La hauteur significative des houles reste inférieure à 1,0 m pour un peu plus de la moitié d'entre elles et est inférieure à 2,0 m pour 89 % d'entre elles (Fig. 63B). Du fait de la forte pente de l'estran, la hauteur des houles semble s'atténuer rapidement à l'approche de la côte car leur hauteur moyenne à 20 m puis à 10 m (respectivement 1,12 et 0,96 m en moyenne) diminue de 14 %. Néanmoins, en période de tempêtes, la hauteur des vagues peut dépasser les 4 m. Enfin, la période moyenne des houles est de 9 secondes (source : base de données HOMERE).

Fig. 63 : Caractéristiques des vents et des houles au large de Trédrez-Locquémeau.



A : Rose des vents (1997-2010) à la station Météo-France de Ploumanac'h



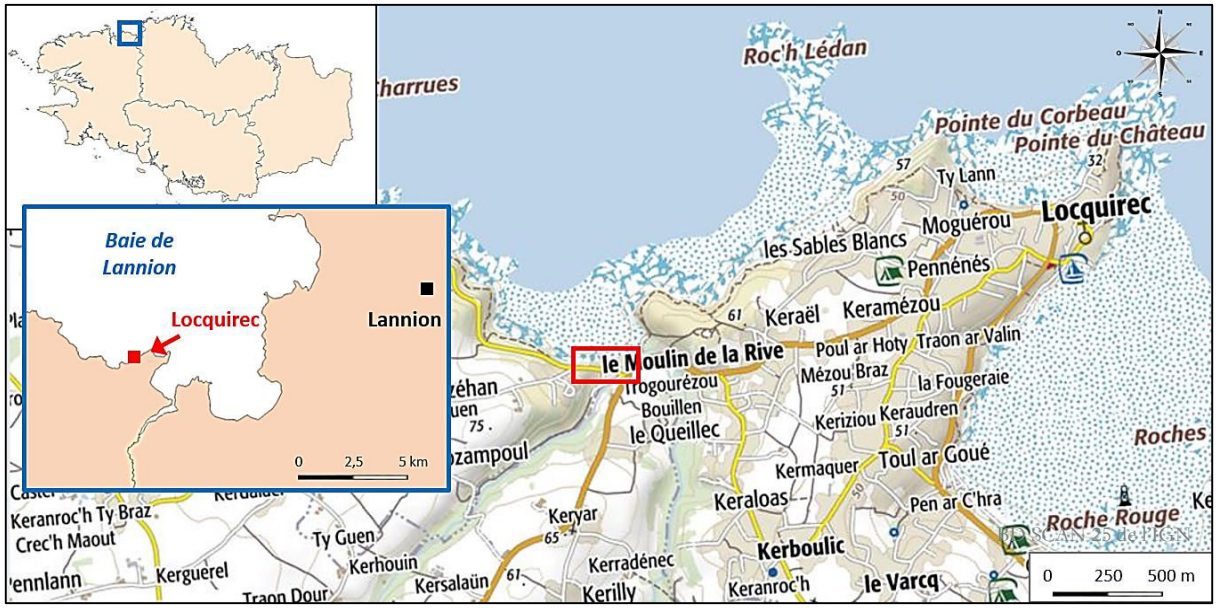
B : Direction moyenne de provenance des houles et hauteur significative à 20 m de profondeur (source : BD HOMERE)

L'amplitude maximale des marées est de 9,5 m pour un coefficient théorique de 120 et de 7,5 m pour un coefficient de 95. Les courants de marée en surface, en avant du site, sont inférieurs à 0,5 nœud. La direction principale des houles provoque une dérive littorale dirigée du nord-est vers le sud-ouest, au sein d'une cellule hydro-sédimentaire délimitée par la pointe rocheuse de Séhar, à l'ouest, et la pointe de Dourven, à l'est (Fig. 57 et Fig. 59).

4.4- L'anse du Moulin de la Rive à Locquirec

L'anse du Moulin de la Rive est localisée au sud-ouest de la baie de Lannion, sur la commune de Locquirec, dans le Finistère (Fig. 64). Ce site se situe dans une petite anse au niveau de laquelle débouchent deux cours d'eau (Fig. 66).

Fig. 64 : Localisation du site de Locquirec.



Le littoral légèrement arqué de l'anse du Moulin de la Rive a un linéaire avoisinant les 500 m (Fig. 66). Il recoupe le versant d'un talweg à l'ouest-nord-ouest et le versant occidental de la vallée d'un petit cours d'eau à l'est-sud-est. La partie centrale correspond au versant nord du plateau où s'encaissent les deux talwegs. L'altitude générale ce plateau est d'une soixantaine de mètres. Le littoral de l'anse du Moulin de la Rive est formé, d'un point de vue morphologique, par trois parties (Fig. 65 et Fig. 66) :

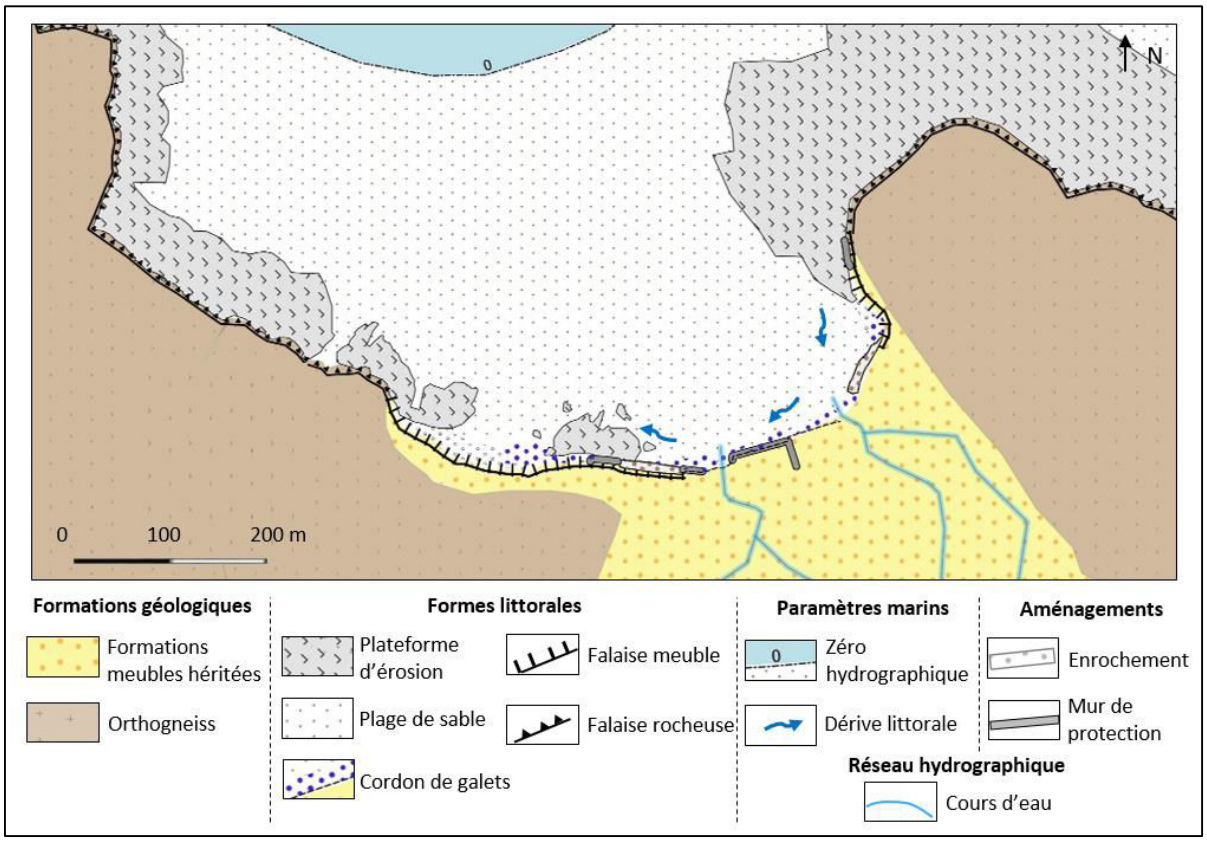
- à l'est, au droit de la dépression topographique, un secteur bas constitué par un épais cordon de galets qui se prolonge par un estran sableux, avec une pente avoisinant les 2 % ;

- au centre, une falaise meuble, haute de 7 à 10 m, urbanisée en sommet et confortée dans la partie est par un enrochement de 60 m suivi d'un mur de protection de 25 m. La partie centrale de ces falaises meubles est protégée par une plateforme rocheuse à écueils émergeant de la plage en haut d'estran ;

- à l'ouest d'un long escalier, une falaise meuble de 10 à 12 m de haut, présente les vestiges d'un remblai et est surmontée par une route départementale.

Fig. 65 : Vue aérienne de l'anse du Moulin de la Rive (photographie : J. Ammann, 2018).

Fig. 66 : Carte géomorphologique du site de Locquirec.



Lithologie

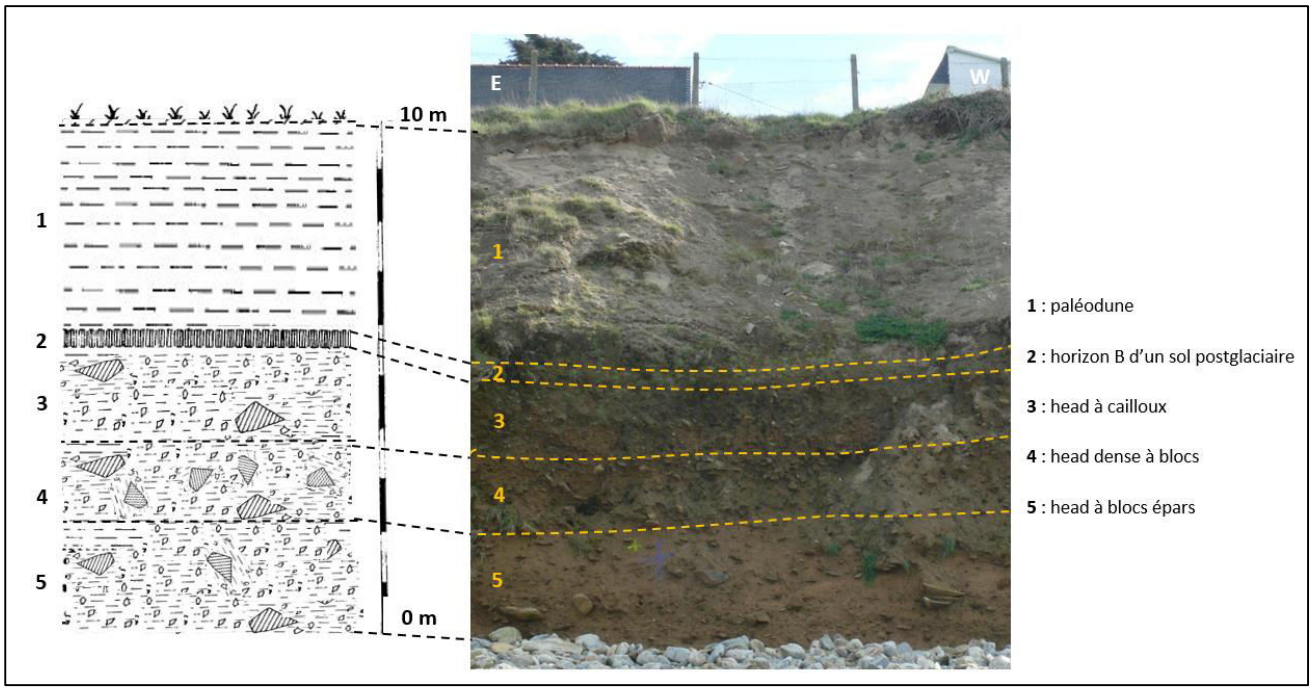
Du fait de la présence d'un niveau archéologique retrouvé dans les paléodunes constituant les falaises meubles (Giot et al., 1958), ce site a fait l'objet d'attention dans les années 1960.

Les falaises de l'anse du Moulin de la Rive sont formées, dans leur partie inférieure par plusieurs coulées grossières de head (entre 5 à 6 m d'épaisseur) qui sont surmontées par une paléodune de 5 m d'épaisseur qui diminue jusqu'à disparaitre complètement en se dirigeant vers l'ouest (Fig. 67). Entre les dépôts de

head et la paléodune, s'intercale un paléosol qui n'est visible que lorsque le versant est rafraîchi par l'érosion. Dans la partie ouest, des amas de remblai, constitués de blocs de toutes tailles, recouvrent le versant de manière diffuse.

Les formations meubles reposent sur un substratum métamorphique d'origine magmatique qui affleure au niveau des pointes rocheuses encadrant l'anse et au niveau du platier, sur l'estran. Il s'agit de l'orthogneiss du Moulin de la Rive qui a été daté à 2 000 Ma (Chantraine et al., 1999).

Fig. 67 : Coupe géologique de la falaise du Moulin de la Rive.



Caractéristiques météo-marines

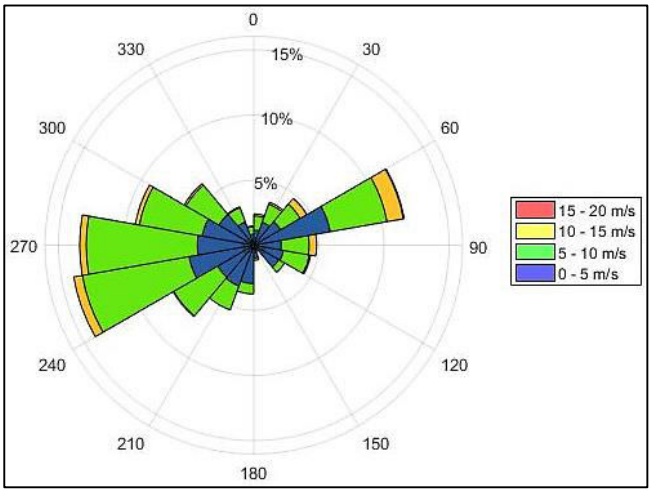
Du fait de la proximité avec le site de Trédrez-Locquémeau (9 km), la station météorologique la plus proche de l'anse du Moulin de la Rive correspond aussi à la station Météo-France de Ploumanac'h (située à 21 km de l'anse). Les normales climatiques sont donc les mêmes (précipitations de 856 mm/an, températures minimales et maximales variant entre 9 et 15°C et vent orienté principalement ouest-sud-ouest/est-nord-est avec une vitesse moyenne de 5,4 m/s) (Fig. 68A).

Les falaises de l'anse du Moulin de la Rive sont exposées aux houles de la Manche et de l'océan Atlantique parvenant dans la baie de Lannion mais, comme pour le site de Trédrez-Locquémeau, ces houles sont amorties et ralenties lors de leur propagation dans la baie, notamment grâce à la présence du Rocher des Charrues (1,6 km au nord-ouest) et du Rocher des Bœufs (3,5 km au nord-ouest). Au large du site de Locquirec, les houles les plus fréquentes sont de secteur nord-ouest et leur direction est comprise grossièrement entre 310 et 340°N (Fig. 68B). La hauteur significative des houles, à 20 m de profondeur, reste inférieure à 1,0 m pour 64 % du temps et seulement 6 % d'entre elles sont supérieures à 2,0 m (Fig. 68B). Enfin, la période moyenne des houles est de 9 secondes. Néanmoins, en période de tempêtes, la hauteur des vagues peut dépasser les 3,0 m et la période des houles, 14 secondes, comme ce fut le cas lors des tempêtes de février 2014.

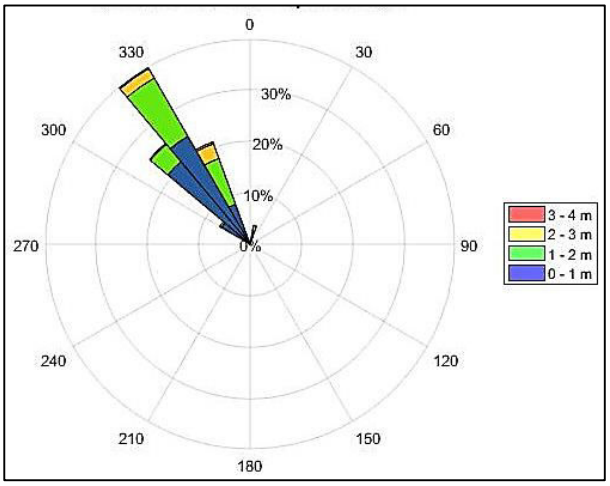
Bien que les houles soient orientées principalement nord-nord-ouest, les échancrures de l'anse génèrent des ondes de bords orientées est-ouest (Fig. 69). Ces vagues réfléchies sur les falaises rocheuses se propagent dans différentes directions provoquant l'agitation du plan d'eau et elles sont à l'origine d'une dérive littorale, au sein de l'anse, dirigée principalement de l'est vers l'ouest (Fig. 66).

L'amplitude maximale des marées est la même que pour le site de Trédrez-Locquémeau, c'est-à-dire 9,5 m pour un coefficient de 120 et de 7,5 m pour un coefficient de 95. Les courants de marée en surface, en avant du site, sont inférieurs à 0,5 nœud.

Fig. 68 : Caractéristiques des vents et des houles au large de Locquirec.

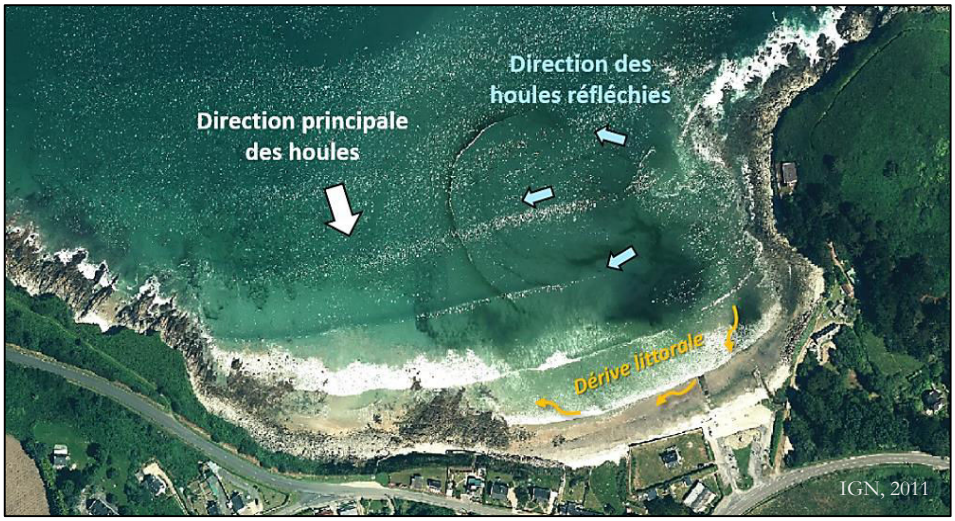


A : Rose des vents (1997-2010) à la station Météo-France de Ploumanac'h



B : Direction moyenne de provenance des houles et hauteur significative à 20 m de profondeur (source : BD HOMERE)

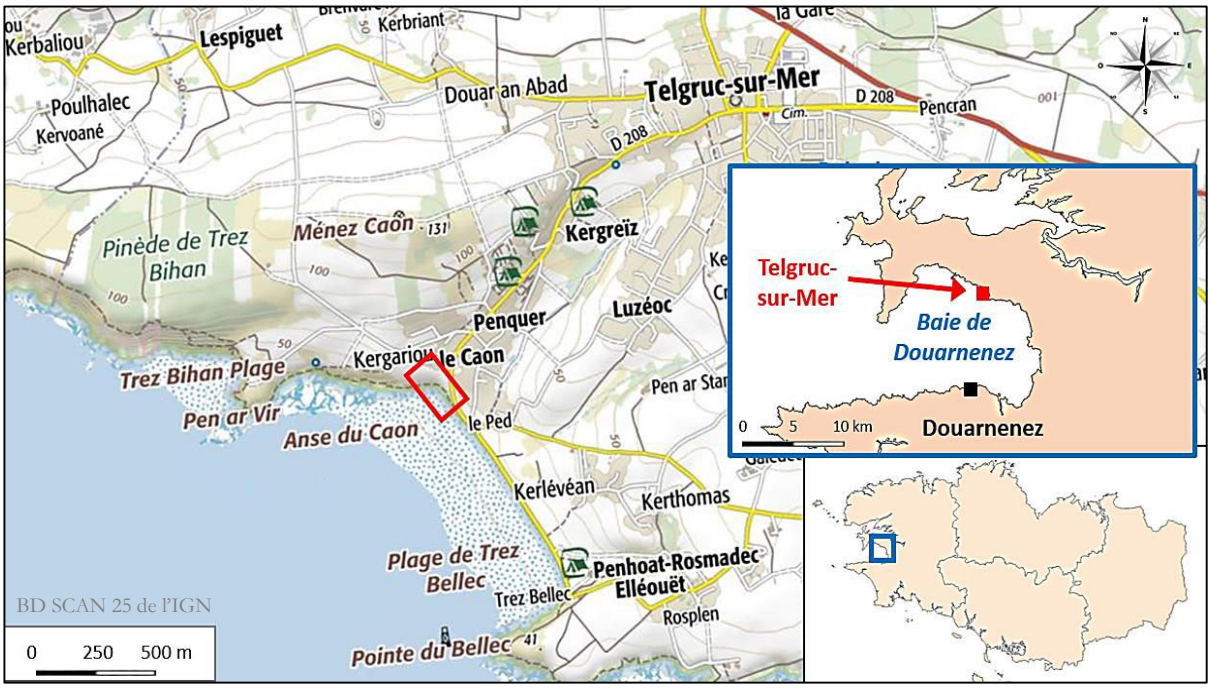
Fig. 69 : Direction principale des houles, directions des houles réfléchies et de la dérive littorale résultante.



4.5- L'anse du Caon à Telgruc-sur-Mer

L'anse du Caon est localisée dans la baie de Douarnenez, sur le littoral sud-ouest de la commune de Telgruc-sur-Mer, dans le Finistère (Fig. 70). Ces falaises sont situées à l'extrémité nord-ouest de la plage de Trez-Bellec.

Fig. 70 : Localisation du site de Telgruc-sur-Mer.



Les falaises étudiées à Telgruc-sur-Mer, en presqu'île de Crozon, recoupent le versant nord-occidental d'une vallée appalachienne ennoyée et orientée sud-ouest/nord-est entre les pointes rocheuses de Pen ar Vir, à l'ouest, et la pointe du Bellec, à l'est. Les versants de cette vallée culminent à des altitudes supérieures à 100 m (150 m à Menez-Aon, par exemple). Le secteur de falaise de l'anse du Caon, est formé, d'un point de vue morphologique, de deux parties (Fig. 72) :

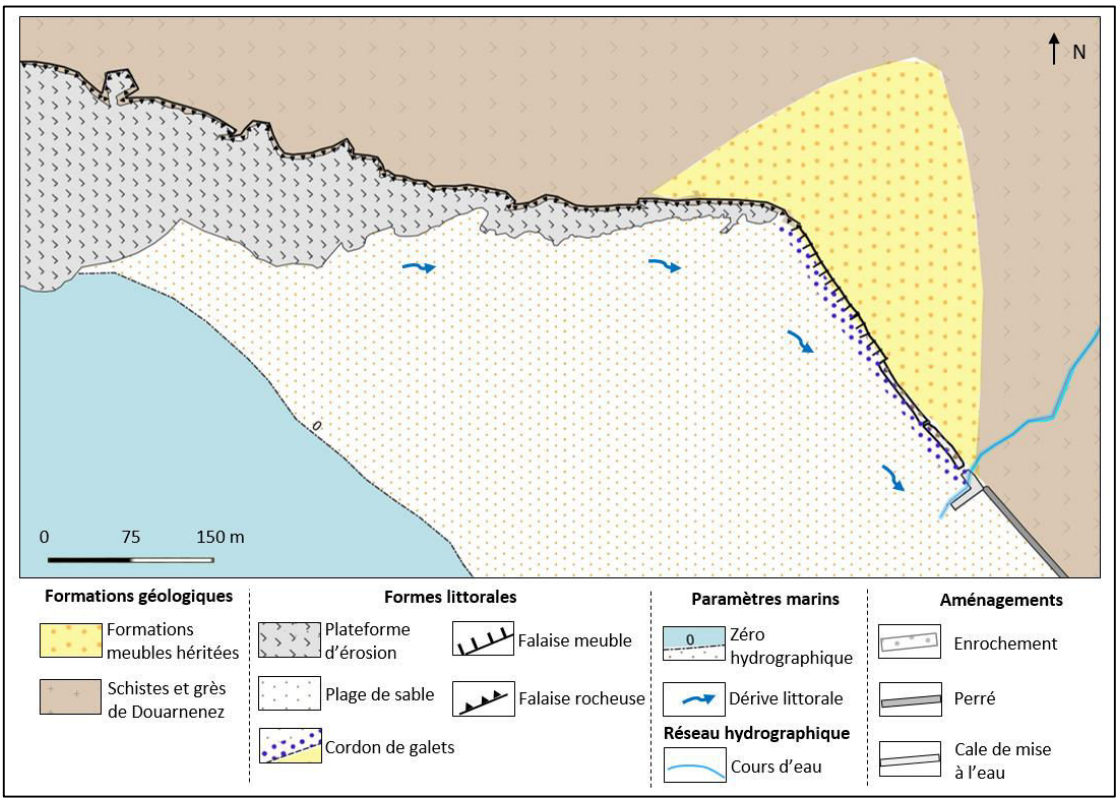
- La partie au sud de cette anse du Caon correspond à la base du versant de la vallée appalachienne. Il s'agit d'une petite falaise végétalisée et artificialisée à sa base, d'une longueur de 120 m et d'une hauteur comprise entre 3 et 6 m. Le pied de cette falaise est protégé par un enrochement qui se termine à son extrémité sud-est par une cale de mise à l'eau.

- La partie nord est formée par une falaise meuble s'étendant sur 145 m. Sa hauteur croit progressivement vers le nord en suivant la pente du versant occidental de la vallée, passant de 7,5 m dans sa partie la plus au sud, dans la continuité de la partie artificialisée, à environ 18 m de hauteur à son extrémité nord (Fig. 71).

Ce site est caractérisé par un vaste estran qui peut découvrir sur plus de 390 m de largeur. L'estran présente une pente faible et régulière (1,6 %) et en haut de plage se trouve un cordon de galets de 2 m de haut s'étalant sur 12 m de large en pied de falaise.

Fig. 71 : Anse du Caon vue depuis l'Ouest.

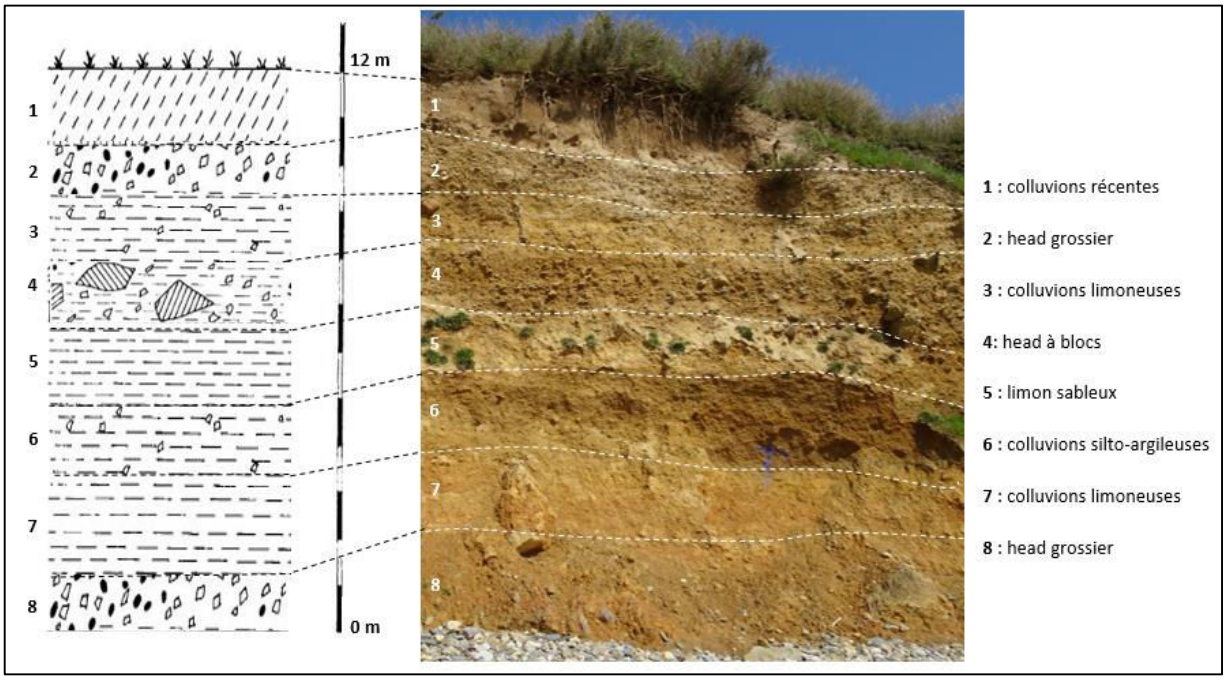
Fig. 72 : Carte géomorphologique du site de Telgruc-sur-Mer.



Lithologie

Les falaises meubles de l'anse du Caon sont formées par une succession de heads fins à moyens (graviers, sables et cailloux) et de limons de colluvionnement (Furiga, 2015) (Fig. 73). Ces formations meubles reposent sur un socle briovérien qui affleure au niveau des falaises rocheuses cernant l'anse. Il s'agit des schistes et grès de Douarnenez (Chauris et Plusquellec, 1975).

Fig. 73 : Coupe géologique de la falaise de l'anse du Caon.



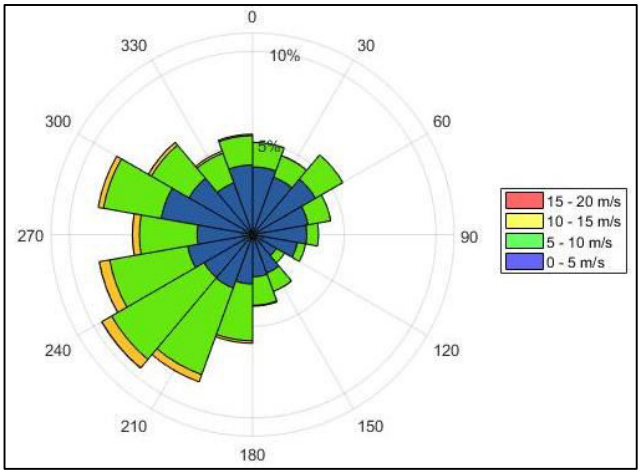
Caractéristiques météo-marines

Selon la normale climatique (1981-2010), à la station Météo-France de Lanvéoc (à 10 km de l'anse du Caon), les précipitations sont de 1 006 mm/an se répartissant en moyenne sur 159 jours. Les températures minimales et maximales moyennes varient entre 8 et 15°C et la durée d'ensoleillement est de 1 530 h/an. Le régime de vent dominant correspond à un large secteur sud-ouest (Fig. 74A). Sur ce site, les vents sont donc majoritairement d'afflux. La vitesse moyenne journalière du vent est relativement faible puisqu'elle est de 5,0 m/s.

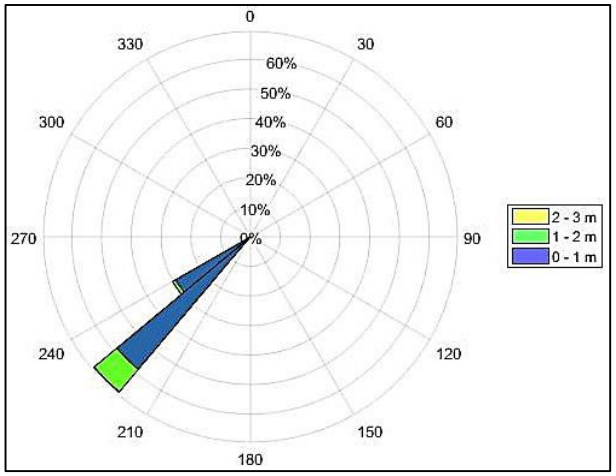
Les falaises de l'anse du Caon sont exposées aux houles de l'océan Atlantique parvenant dans la baie de Douarnenez. Néanmoins, leur propagation dans la baie amortit et ralentit les houles, notamment grâce à la présence de hauts-fonds (Guichard, 2003) telle la Pointe du Bellec (1 km au sud) ou le Rocher de Verez (4 km à l'ouest). Les fonds constituant l'anse sont recouverts essentiellement par du sable très fin qui attestent également de la faible énergie marine du milieu. Au large du site de Telgruc-sur-Mer, les houles proviennent du secteur sud-ouest et sont comprises entre 220 et 240°N (Fig. 74B). Les hauteurs significatives de houle sont relativement faibles puisqu'elles sont inférieures ou égales à 0,5 m pour un peu plus de la moitié d'entre elles et elles restent inférieures à 1,0 m pour 89 % du temps (Fig. 74B). La période moyenne des houles est de 9 secondes.

Concernant les marées, l'amplitude maximale est de 7 m pour un coefficient théorique de 120 et de 5,5 m pour un coefficient de 95. Les courants de marée en surface, sont inférieurs à 0,5 nœud. La direction principale des houles produit une dérive littorale dirigée du nord-ouest vers le sud-est (Fig. 72), au sein d'une cellule hydro-sédimentaire délimitée par la Pointe de Pen ar Vir au nord et la Pointe du Bellec au sud.

Fig. 74 : Caractéristiques des vents et des houles au large de Telgruc-sur-Mer.



A : Rose des vents (1981-2010) à la station Météo-France de Lanvéoc

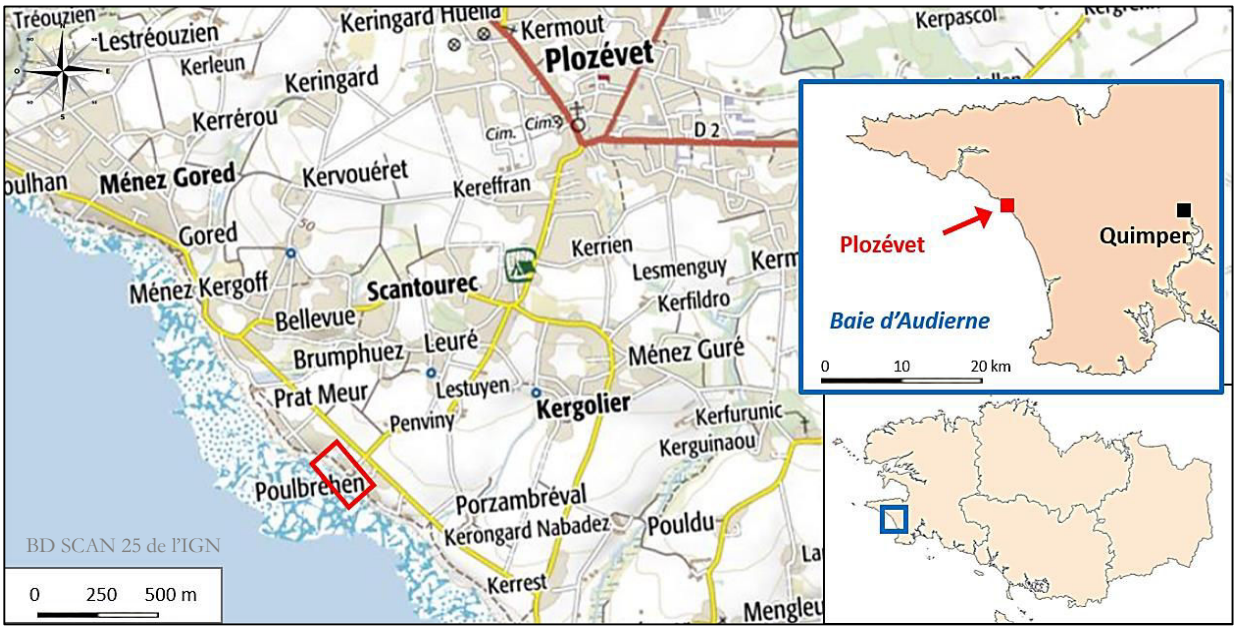


B : Direction moyenne de provenance des houles et hauteur significative à 20 m de profondeur (source : BD HOMERE)

4.6- La grève de Poulbréhen à Plozévet

La grève de Poulbréhen est située sur la façade occidentale du Finistère, dans le nord de la baie d'Audierne, sur la commune de Plozévet (Fig. 77). Elle est localisée en contrebas d'un versant qui culmine vers 30 m NGF. La pente, relativement faible, est orientée vers le sud-ouest et est entaillée, de part et d'autre de Poulbréhen, par de petits talwegs faiblement encaissés.

Fig. 75 : Localisation du site de Plozévet.



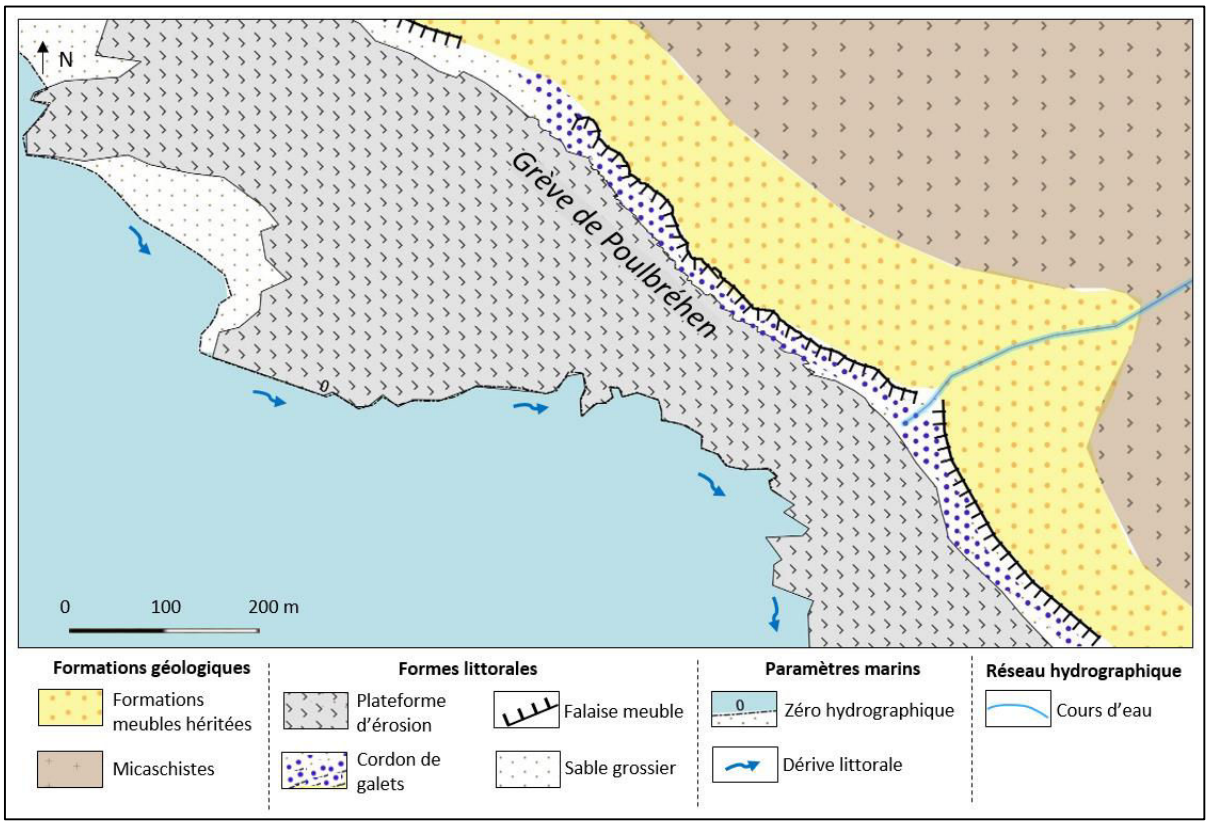
Le littoral de Plozévet est caractérisé par un estran rocheux correspondant à une plateforme d'érosion marine relativement plane (pente inférieure à 3 %). Cette plateforme est en cours d'élaboration à Poulbréhen car elle est façonnée dans les micaschistes peu résistants du centre de la baie d'Audierne. Le haut de l'estran est occupé par un cordon de galets alimenté par :

- les blocs issus du démantèlement des micaschistes et des bancs quartzeux de la plateforme ;
- les galets du cordon pléistocène du sommet de la falaise, au fur et à mesure de son recul ;
- la dérive littorale générale qui agit au sein de la vaste cellule hydro-sédimentaire de la baie d'Audierne, depuis le Cap-Sizun, au nord, en direction de la pointe de Penmarc'h, au sud (Fig. 76 et Fig. 77).

À Poulbréhen, la hauteur des falaises est modérée puisqu'elle est comprise entre 4 à 6 m. Aucun ouvrage de protection n'est présent sur ce trait de côte. En revanche, de nombreuses habitations surmontent le sommet de falaise.

Fig. 76 : Grève de Poulbréhen vue depuis l'Ouest.

Fig. 77 : Carte géomorphologique du site de Plozévet.

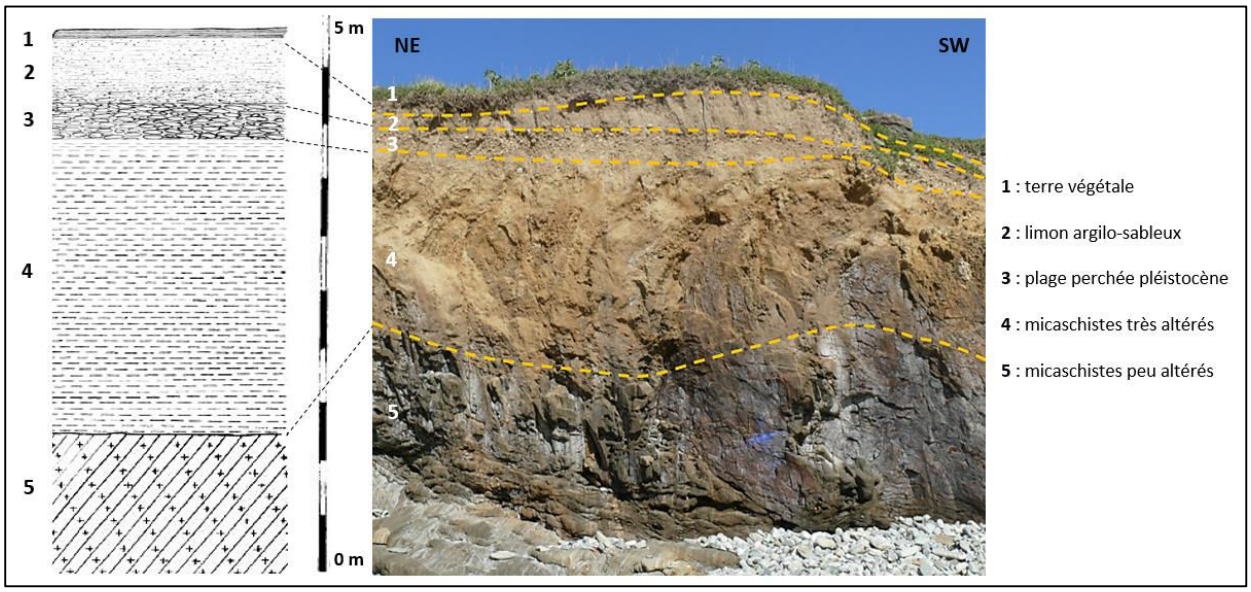


Lithologie

Les falaises de la grève de Poulbréhen sont taillées dans des roches métamorphiques altérées (micaschistes), donc meubles, dans lesquelles la mer a creusé de nombreuses grottes et couloirs. Le socle affleure sur l'estran en bandes parallèles orientées est-ouest et qui font partie du vaste anticlinal hercynien de Cornouaille de même direction est-ouest (Le Rhun et Le Rhun, 1967).

Ici, le profil classique des falaises correspond à une base formée par une roche peu altérée qui affleure plus ou moins selon les endroits. Elle est surmontée d'une épaisse couche d'altérites dont l'épaisseur est également très variable, de 1 à 3 m. Ces altérites, issues de la décomposition des micaschistes, correspondent à des argiles lourdes de couleur ocre vif. Au-dessus de cette formation repose un limon argilo-sableux pouvant contenir quelques galets pléistocènes d'un cordon ancien presque totalement démantelé (Hallégouet et Hénaff, 1993) et des éléments anguleux témoins des mouvements de solifluxion sur le versant. Le profil des falaises se termine à son sommet par une mince couche de terre végétale. Les galets observables sur le front des falaises proviennent de la transgression pendant la dernière période interglaciaire où la mer s'est avancée plus loin vers l'intérieur des terres (Le Rhun et Le Rhun, 1967).

Fig. 78 : Coupe géologique de la falaise de Poulbréhen.



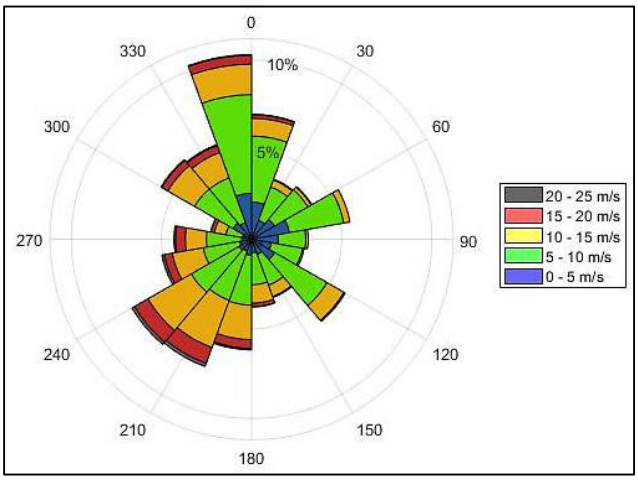
Caractéristiques météo-marines

Selon la normale climatique (1981-2010), à la station Météo-France de la Pointe du Raz (à 22 km de la grève de Poulbréhen), les précipitations sont de 740 mm/an se répartissant en moyenne sur 127 jours. Les températures minimales et maximales moyennes varient entre 8 et 15°C et la durée d'ensoleillement est de 1 684 h/an. Le régime de vent dominant est le secteur nord-nord-ouest avec une seconde composante de vent bien marqué de secteur sud-sud-ouest (Fig. 79A). Les vents sont donc en partie d'afflux. La vitesse moyenne journalière du vent est plus élevée que sur les autres sites et est de 8,2 m/s. De plus, les vents forts (vents supérieurs à 28 nœuds, de forces 7 et 8 de l'échelle de Beaufort, selon la définition donnée par Météo-France) sont relativement fréquents puisqu'ils représentent en moyenne 8 % des vents tandis que, sur les autres sites, ces vents sont inférieurs à 1 %.

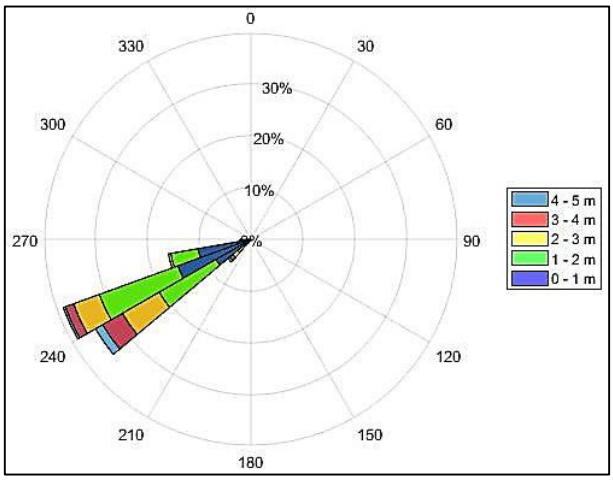
Localisées sur la façade ouest de la Bretagne, dans la baie d'Audierne, les falaises de Plozévet sont directement exposées aux houles de l'océan Atlantique (Fig. 75). Au large du site de Plozévet, les houles les plus fréquentes viennent d'un secteur ouest-sud-ouest (Fig. 79B). La hauteur significative des houles est relativement plus élevée en comparaison des autres sites. En effet, seulement 37 % d'entre elles sont inférieures à 1,0 m et les houles supérieures ou égales à 3,0 m représentent 11 % d'entre elles (Fig. 79B). Par ailleurs, les houles les plus hautes, sur la période 1994-2016, ont atteint 8,3 m le 5 février 2014. Dans ce secteur, les houles les plus fortes sont celles de secteur sud (entre 220 et 240°N).

Les marées ont une amplitude maximale de 5,5 m pour un coefficient théorique de 120 et de 4,5 m pour un coefficient de 95. Les courants de marée, en avant du site, sont inférieurs à 0,5 nœud mais ils sont compris entre 0,5 et 1,0 nœud à 1 400 m au large du site. La direction principale des houles génère une dérive littorale dirigée du nord-ouest vers le sud-est (Fig. 77), au sein d'une sous-cellule hydro-sédimentaire allant de l'embouchure du Goyen au nord à Tréguennec au sud (Hénaff et Le Berre, 2003).

Fig. 79 : Caractéristiques des vents et des houles au large de Plozévet.



A : Rose des vents (1981-2010) à la station Météo-France de la Pointe du Raz



B : Direction moyenne de provenance des houles et hauteur significative à 20 m de profondeur (source : BD HOMERE)

4.7- Synthèse et discussion

Bien que tous constitués de matériaux meubles érodés dans des paysages continentaux, les secteurs de falaises étudiés sont caractérisés par une diversité géomorphologique tant sur le plan lithologique, que du point de vue morphométrique (hauteur des abrupts, pente, caractéristiques des versants dans lesquels elles sont façonnées). De plus, sur les sites d'étude, les falaises meubles ont été artificialisées à des degrés divers.

Concernant les normales climatiques, les températures minimales et maximales contrastent très peu entre les sites avec une moyenne comprise entre 8 et 15°C (Tab. 3). Les cumuls pluviométriques sont le principal élément de différenciation climatique sur les secteurs littoraux bretons : les valeurs moyennes s'échelonnent effectivement entre 740 et 1 006 mm/an sur les sites d'étude. Les précipitations annuelles sont les plus élevées pour le site de Telgruc-sur-Mer du fait de sa proximité avec des hauts reliefs (ex : Menez-Hom culminant à 330 m et situé à 10 km de l'anse du Caon). À l'inverse, du fait de leur altitude relativement basse, les sites de Plozévet et de Plougrescant se caractérisent par de faibles cumuls pluviométriques. Enfin, la situation d'exposition du site de Plozévet, ouvert sur l'océan Atlantique, explique que les vents y soufflent plus fort que sur les autres sites.

Tab. 3 : Caractéristiques climatiques des sites d'étude.

Site d'étude	Station Météo-France la plus proche	Temp. min (°C)	Temp. max (°C)	Précipitations annuelles (mm/an)	Nombre de jours de pluie (>0,2 mm)	Direction principale des vents	Vitesse moyenne des vents (m/s)
Pléneuf-Val-André	Saint-Cast-le-Guildo (19 km)	8	15	776	130	NW	5,3
Plougrescant	Ile de Bréhat (16 km)	-	-	759	134	WNW	5,7
Trédrez-Locquémeau	Ploumanac'h (13 km)	9	15	856	142	WSW	5,4
Locquirec	Ploumanac'h (21 km)	9	15	856	142	WSW	5,4
Telgruc-sur-Mer	Lanvéoc (10 km)	8	15	1006	159	SW	5,0
Plozévet	Pointe du Raz (22 km)	8	15	740	127	NNW	8,2

- : absence de données

Les conditions d'exposition aux agents marins sont également variables d'un site à l'autre. Les houles arrivant sur les sites de Plozévet et de Telgruc-sur-Mer proviennent principalement du secteur sud-ouest tandis que, pour les autres sites, les houles proviennent d'un secteur nord-ouest avec des fetchs très différents (Tab. 4). Les sites de Plozévet et de Plougrescant sont les plus exposés aux fortes houles alors que les autres sites disposent d'une situation plus abritée, car ils sont situés en fond de baie. Toutefois, sur le site de Plougrescant, la pente élevée de la plage ainsi que la présence d'une large plateforme à écueils permettent d'atténuer l'énergie des houles arrivant à la côte. Les marnages sont très différents entre les sites d'étude et s'échelonnent entre 5,5 m (site de Plozévet) et 12,5 m (site de Pléneuf-Val-André) pour un coefficient de marée de 120.

Tab. 4 : Caractéristiques hydrodynamiques des sites d'étude.

Site d'étude	Hauteur significative des houles à 20 m	Période moyenne des houles (s)	Direction dominante	Marnage (coeff 120)	Vitesse maximale des courants de marée (nd)
Pléneuf-Val-André	0,69	6,2	284	12,5	Inf. à 0,5
Plougrescant	1,27	8,3	287	10	De 2 à 2,5
Trédrez-Locquémeau	1,12	8,9	296	9,5	Inf. à 0,5
Locquirec	0,95	8,5	308	9,5	Inf. à 0,5
Telgruc-sur-Mer	0,55	8,6	227	7	Inf. à 0,5
Plozévet	1,56	9,3	241	5,5	Inf. à 0,5

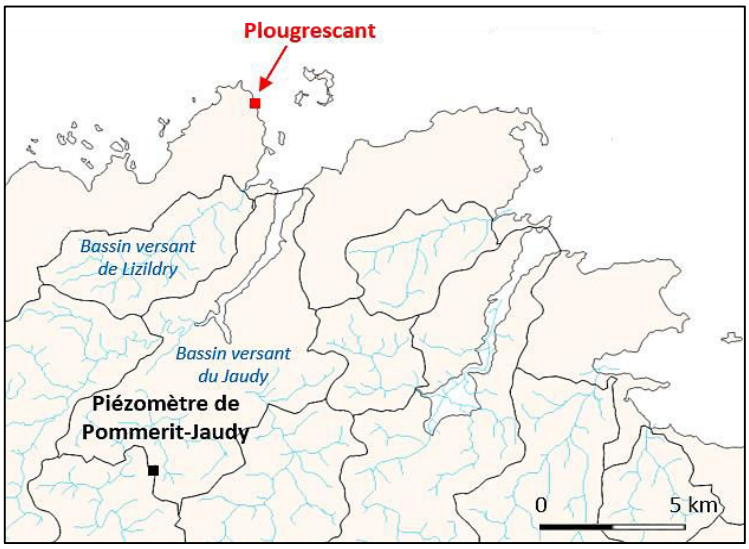
Ces données climatiques caractérisant les sites d'étude se révèlent cependant insuffisamment précises pour la compréhension des dynamiques à court terme des falaises étudiées. Par exemple, les cumuls pluviométriques, qui représentent un paramètre déterminant dans l'évolution des falaises meubles, peuvent différer fortement sur les sites au regard de mesures enregistrées parfois à plusieurs dizaines de kilomètres par les stations de Météo-France (Savelli et al., 2015).

De nombreux travaux ont démontré que le déclenchement des phénomènes d'érosion sur les falaises était directement lié aux précipitations (ex : Delmonaco et Margottini, 2004 ; Guzzetti et al., 2007 ; Panek et al., 2011) mais aussi aux fluctuations des nappes phréatiques (Cappa et al., 2004 ; Pierre et Lahousse, 2006 ; Lissak, 2012). Le portail ADES (Accès aux Données sur les Eaux Souterraines) met à disposition les données sur les niveaux de nappes profondes et les chroniques piézométriques à l'échelle nationale. Cependant, ces stations de mesure piézométriques maillent le territoire breton de façon encore plus lâche que les stations météorologiques. Ces piézomètres sont effectivement situés à des distances relativement importantes des sites d'étude (Tab. 5) et ne se trouvent pas dans les mêmes bassins versants que les sites, excepté le piézomètre de Saint-Nic à proximité du site de Telgruc-sur-Mer (Fig. 80). De plus, les stations ADES sont destinées à la mesure des variations des nappes d'eau profondes dont l'influence est plus difficile à intégrer dans la compréhension des dynamiques des formations superficielles qui se produisent au niveau des falaises meubles étudiées. Même si elles sont prises en considération, elles ne peuvent suffire à l'étude des dynamiques à court terme des sites expérimentaux.

Tab. 5 : Caractéristiques des piézomètres du réseau ADES, situés les plus proches des sites d'étude.

Site d'étude	Piézomètre ADES le plus proche	Distance site-piézomètre	Profondeur d'investigation (m)	Situé dans le même bassin versant que celui du site d'étude ?	Date de mise en service
Pléneuf-Val-André	Quintenic	12 km	31	Non	18/11/2004
Plougrescant	Pommerit-Jaudy	15 km	31	Non	04/12/2003
Trédrez-Locquémeau	Louargat	24 km	31	Non	03/12/2003
Locquirec	Plougonven	19 km	37	Non	19/02/1993
Telgruc-sur-Mer	Saint-Nic	7 km	28	Oui	21/12/2005
Plozévet	Landudec	8 km	36	Non	02/08/1993

Fig. 80 : Localisation du site de Plougrescant, du piézomètre ADES le plus proche et des limites des bassins versants.



Par conséquent, ces jeux de données climatiques, météorologiques et piézométriques d'échelle régionale sont donc complétés par des acquisitions locales de ces paramètres. Les données ont ainsi été acquises localement par l'installation de deux types de capteurs : des stations météorologiques qui ont pu être mises en place sur chaque site et un piézomètre mis en place sur le seul site du Moulin-de-la-Rive, à Locquirec. Ces données météo-marines locales sont utilisées pour analyser les modalités de recul des falaises meubles sur le temps court, à savoir la période de suivi des sites, durant les trois années de thèse. Les données Météo-France issues des stations les plus proches des sites d'étude sont employées, quant à elles, pour analyser la cinématique des falaises meubles, au-delà de la période de suivi, sur le moyen et long termes, étant donné que ces séries de mesure sont continues et permettent de remonter jusqu'aux années 1950. Les stations de mesure complémentaires, installées sur chaque site d'étude, sont présentées en détail dans le chapitre 7, consacré au suivi à court terme des sites.

Conclusion intermédiaire

Les sites d'étude se caractérisent par une diversité géomorphologique qui concerne autant le versant meuble (hauteur, lithologie, morpho-structure des falaises) que l'estran (largeur, pente et morphologie de la plage). De plus, les sites d'étude ont été artificialisés à des degrés divers. Ils ont été considérés comme suffisamment représentatifs des sites à falaises meubles du littoral régional. Du fait de leur situation géographique différente sur le linéaire côtier breton, les sites se différencient également par le contexte météo-marin local, notamment par les cumuls pluviométriques, le marnage et l'exposition aux houles arrivant de l'océan Atlantique et de la Manche. Ces différences en termes de facteurs de prédisposition et d'exposition aux agents marins et subaériens font de ces sites d'étude, des territoires propices à l'analyse de l'aléa « recul des falaises meubles ».

Conclusion de la Première Partie

Cette première partie qui avait pour objectif de présenter le contexte du risque d'érosion des falaises meubles en Bretagne a permis de souligner toute la diversité littorale de la région :

- Sur le plan **géomorphologique** : les falaises meubles bretonnes représentent 20 % du linéaire côtier de la région. Les matériaux meubles qui les composent sont issus d'une longue histoire géologique et ont été façonnés en falaise par la transgression postglaciaire et holocène. Ces matériaux se distinguent par des origines et des lithologies différentes et démontrent ainsi, la diversité géomorphologique des falaises meubles régionales. Une typologie a été définie et permet de classer ces falaises en trois types géomorphologiques : RAV, V1 et V2.

- Du point de vue du **contexte météo-marin** : la présence de l'océan et la situation de péninsule de la Bretagne lui confèrent un climat tempéré caractérisé par des températures douces, des précipitations abondantes, à l'échelle de l'année, et des vents soutenus. Le linéaire côtier breton est exposé aux houles venant de l'océan Atlantique et de la Manche et aux vents dominants d'ouest. Toutefois, l'étendue spatiale du territoire et la morphologie très découpée de la côte bretonne impliquent que les situations d'exposition de chaque falaise meuble à l'échelle locale sont très différentes.

- En termes d'**enjeux exposés** : le recul des falaises meubles en Bretagne menace une variété d'enjeux, selon l'échelle de temps considérée. Ainsi, le recul des falaises menace aussi bien des habitations, que des bâtiments, des terrains agricoles, des routes côtières ou des lieux à vocation touristique ;

- En termes de **stratégie de gestion** : une variété de techniques est employée pour tenter de ralentir ou de stopper le recul des falaises meubles. Ceci reflète la complexité de ces systèmes côtiers dont l'évolution est régie par de multiples processus marins et subaériens qui se combinent et se relaient dans le temps et l'espace.

Afin de mieux cerner les processus physiques impliqués dans le recul des falaises meubles et d'évaluer le risque et la vulnérabilité côtière, six sites d'étude ont été retenus à partir d'une méthodologie de sélection. Ces sites d'étude sont considérés comme représentatifs de la situation régionale, sur le plan géomorphologique et par rapport aux différents enjeux exposés. Ils constituent les terrains expérimentaux de la thèse sur lesquels est mis en place un suivi topo-morphologique et sur lequel est évalué le risque d'érosion. Avant toute caractérisation du risque, il est nécessaire maintenant de quantifier le recul à différentes échelles de temps afin d'identifier les tendances d'évolution et évaluer le niveau d'aléa.

PARTIE 2 – QUANTIFICATION DU RECUL DES FALAISES MEUBLES SUR DES ÉCHELLES SPATIO-TEMPORELLES IMBRIQUÉES : VERS UNE DÉTERMINATION DES FACTEURS D'ÉROSION

Alors que 20 % du linéaire côtier breton est constitué de falaises meubles (Hénaff et al., 2018), la connaissance de leur fonctionnement et de leur vitesse de retrait demeure incomplète (Fournier et Regnauld, 1991). L'évolution des falaises meubles est régie par de multiples processus marins et subaériens qui se combinent et se succèdent dans le temps et l'espace (Joyal, 2015). Les caractéristiques géomorphologiques de chaque secteur du linéaire côtier viennent complexifier l'analyse de la dynamique des falaises meubles. Ainsi, l'objectif de cette deuxième partie est d'**évaluer l'aléa « recul des falaises meubles** » en quantifiant la **répartition spatio-temporelle de l'érosion** et en identifiant les **facteurs qui en sont responsables.**

Ici, l'évaluation de l'aléa recul des falaises meubles repose sur la combinaison de trois méthodes offrant la possibilité d'observer l'évolution de ces littoraux au travers de plusieurs échelles temporelles et spatiales imbriquées :

- À **l'échelle séculaire** (long terme) et **régionale**, une réflexion sur les événements météo-marins les plus morphogènes est menée à partir d'une analyse historique de l'aléa érosion des falaises meubles sur l'ensemble du littoral breton, depuis le début du 20^{e} siècle (chapitre 5). Cette échelle long terme permet d'appréhender les facteurs de prédisposition à l'érosion (ex : géomorphologie, lithologie) des falaises meubles. Le croisement de cette chronique d'aléas érosion avec les conditions météo-marines qui prévalaient lors du déclenchement des mouvements de terrain permet d'identifier les principaux facteurs responsables du recul.

- À **l'échelle pluri-décennale** (moyen terme), le recul est mesuré sur les **sites d'étude** par la comparaison diachronique de photographies aériennes verticales (chapitre 6). Les résultats permettent d'identifier et d'expliquer les changements de tendance dans le recul des falaises meubles au cours des soixante dernières années. L'échelle du moyen terme permet effectivement d'identifier l'influence de forçages naturels évoluant sur un pas de temps de plusieurs années (ex : variations de l'intensité des précipitations, de la fréquence des tempêtes) ainsi que l'impact des aménagements qui constituent, bien souvent, des facteurs préparatoires (Hénaff et al., 2013 ; Bernatchez et al., 2014). Cette échelle du moyen terme permet donc de replacer l'évolution des falaises meubles dans le contexte d'artificialisation des littoraux.

- À **l'échelle saisonnière** (court terme) et sur les **sites d'étude**, le recul est quantifié par une technique de photogrammétrie couplée avec des levés au tachéomètre (chapitre 7). Ces mesures à très haute résolution permettent de fournir des éléments de réponse quant à la répartition spatiale et temporelle des volumes érodés et de mieux comprendre les modalités de recul des falaises meubles. L'échelle saisonnière permet d'appréhender l'impact de forçages se produisant sur le court terme (ex : tempêtes, précipitations intenses), qui peuvent être associés à des reculs importants du trait de côte et qui masquent les forçages dont les signatures s'expriment à plus grande échelle.

CHAPITRE 5 : Analyse des épisodes de recul en Bretagne aux 20ème et 21ème siècles

L'évolution des falaises meubles est caractérisée par des reculs irréguliers, se faisant souvent par « à-coup » (Pinot, 1998). Ces aléas succincts sont entrecoupés par de plus ou moins longues périodes de « stabilité », parfois décennales, et qui dépendent des caractéristiques du milieu (Sunamura, 2015). L'approfondissement de la connaissance de l'aléa érosion des falaises meubles est essentiel afin d'améliorer les stratégies de gestion et les politiques de prévention des risques côtiers. L'analyse historique permet d'améliorer cette connaissance afin d'encourager la culture du risque et la mémoire des événements passés qui restent encore insuffisantes (Slaymaker, 1999 ; Mitchell, 2000 ; Veyret et Reghezza, 2005 ; Leone, 2007 ; Garnier et al., 2010 ; Acerra et Sauzeau, 2012). De plus, dans le contexte actuel de changements environnementaux globaux et régionaux, les processus à l'origine de l'aléa érosion sont susceptibles de se renforcer (Zhang et al., 2004).

Toute la difficulté de l'étude de l'érosion des falaises réside dans l'observation des mouvements de terrain les affectant (Giuliano, 2015). L'analyse diachronique du recul des falaises à partir de photographies aériennes verticales reste l'approche la plus couramment utilisée (Moore et Griggs, 2002 ; Costa et al., 2004). Cette technique permet l'observation des tendances globales sur la période encadrée par les clichés mais l'échelle temporelle ne permet pas de connaitre le moment du départ des matériaux ni les conditions environnementales qui l'ont précédé et/ou déclenché. À l'inverse, les LIDAR (« *Light Detection and Ranging* ») et les lasers terrestres permettent des observations spatiales et temporelles fines, mais leur mise en œuvre encore trop récente ne permet pas de disposer de tendances globales de l'évolution sur le long terme.

Afin de mieux identifier les facteurs qui interviennent lors des phénomènes d'érosion des falaises meubles à l'échelle de la Bretagne, il apparait indispensable de recenser les aléas d'érosion passés et de les analyser en tenant compte des conditions environnementales au moment de leur survenue. L'analyse historique des aléas est également essentielle afin de connaitre leur fréquence de survenue qui est fonction du volume de matériaux mobilisés, et les éventuels changements de tendance au cours des dernières décennies. De plus, l'analyse de la répartition spatiale et l'identification des secteurs les plus fréquemment impactés présentent un grand intérêt en termes de gestion du risque et de priorisation des mesures de prévention. Les objectifs de cette étude sont, d'une part, de disposer d'une base de données et d'un historique d'érosion des falaises meubles en Bretagne qui est essentiel pour constituer une mémoire de l'aléa et, d'autre part, d'identifier la répartition spatio-temporelle de l'érosion et de déterminer les principaux facteurs impliqués. Ainsi, dans cette étude, les questions principales sont :

- Quelles portions de côte en Bretagne ont été principalement affectées par l'aléa (érosion de falaises meubles) depuis le début du 20e siècle ?
- Quelle est la fréquence de survenue de cet aléa ?
- Quels ont été les événements de forçage les plus morphogènes ?
- Quelles sont les conditions météorologiques et marines favorables au déclenchement des mouvements de terrain sur les falaises meubles ? Sont-ils le résultat d'un facteur unique ou d'une combinaison de facteurs ?
- La morphologie des falaises conditionne-t-elle leur sensibilité aux agents marins et subaériens ?

Pour répondre à l'ensemble de ces questions, ce chapitre s'organise en quatre parties. La première partie sera consacrée à la description de la méthode de recueil et d'analyse des aléas d'érosion de falaises meubles. La seconde partie présentera la répartition spatio-temporelle des phénomènes d'érosion

en Bretagne, depuis le début du 20e siècle. À partir d'une analyse diachronique des aléas recensés avec les conditions météo-marines, la troisième partie identifiera des seuils de déclenchement et les forçages dominants dans l'érosion des falaises meubles. Enfin, les choix méthodologiques et les limites de la technique adoptée seront discutés dans la quatrième partie.

5.1- Recensement des phénomènes d'érosion

L'objectif, ici, est de recenser à l'échelle régionale, les phénomènes d'érosion de falaises meubles afin de disposer d'une base de données à référence géographique qui servira de support à une analyse historique des aléas. Avant de présenter la méthode, il est important de préciser la distinction faite entre les notions d'aléa et d'événement, notamment utilisées dans ce chapitre. Comme indiqué dans le chapitre 1, l' « **aléa** » désigne le phénomène d'érosion des falaises meubles, qui entraine nécessairement un recul du front de falaise. L '« **événement** » correspond au phénomène d'origine marine et/ou subaérienne à l'origine de l'aléa (ex : tempête, pluies intenses). Il s'agit du processus ayant déclenché une érosion de falaise. L'événement ne représente donc pas l'aléa érosion mais la cause (considérée par conséquent comme l'élément de forçage) de cet aléa.

5.1.1- Recueil de données existantes et d'aléas passés non répertoriés

Le recensement des phénomènes d'érosion a nécessité l'utilisation d'archives historiques et récentes qui constituent une source d'informations efficace des aléas passés (Lang et al., 1998 ; Bernatchez, Fraser, Friesinger, et al., 2008 ; Ciavola et Jiménez, 2013).

Les phénomènes d'érosion de falaises meubles ont été inventoriés par le biais de bases de données existantes telles que la base de données « Mouvements de terrain » présente sur le site *InfoTerre* ou « l'Atlas des aléas littoraux des départements d'Ille-et-Vilaine, des Côtes-d'Armor et du Finistère » (Schroëtter et Blaise, 2015). Des données non-répertoriées ont également été recueillies par l'analyse de schémas de mise en valeur de la mer, d'articles scientifiques, d'articles de presse et de rapports de bureaux d'études (Annexe 5). Les missions de terrain effectuées durant la thèse ont également permis de recueillir de nombreux témoignages à partir d'entretiens oraux auprès d'élus et de propriétaires riverains. Ceux-ci complètent l'historique des aléas d'érosion passés non répertoriés.

Dans la base de données, pour chaque aléa, ont été précisées les informations concernant le lieu (département, commune, lieu-dit), la date (année et si possible le mois et le jour de survenue), le type de falaise (« simple » ou « composite »). Dans ce chapitre, c'est la typologie de M. Biville qui est reprise et non celle définie dans le chapitre 3 (types RAV, V1 et V2) car la cartographie des falaises meubles bretonnes à disposition est basée sur la première typologie. Des informations complémentaires indiquées dans les sources concernant le type de mouvement de terrain, les conditions météo-marines ou les dégâts engendrés ont également été recensées lorsque celles-ci étaient mentionnées. Cette méthode de recensement des aléas à partir de différentes sources et archives historiques a déjà largement montré son utilité (Hénaff et al., 2018) et est employée dans des études appliquées telles que les Plans de Prévention des Risques Littoraux (PPRL) (Le Cornec et al., 2008 ; Bossis, 2016 ; DHI, 2016 ; Landreau, 2018).

5.1.2- Tri et contrôle des données existantes

Les données issues des différentes sources ont été vérifiées car elles peuvent présenter des erreurs et ne pas refléter nécessairement la réalité (Tabeaud et al., 2009). En effet, les sources écrites post-tempêtes induisent souvent une déformation de la réalité par une sélection des aléas d'érosion les plus dommageables et l'excès dans l'interprétation. Le croisement des sources permet d'obtenir une série de données plus fiable et de combler les lacunes temporelles mais aussi spatiales. Par exemple, les arrêtés de

catastrophes naturelles (CatNat) de la base de données GéoRisques ont servi à préciser le mois ou la semaine de survenue de certains aléas. Cette base de donnée reste toutefois insuffisante pour fournir une plus grande précision temporelle car les arrêtés indiquent souvent la date de parution au Journal Officiel et non la date de l'aléa qui s'est produit quelques jours (parfois plusieurs semaines) plus tôt (Cariolet, 2011). Les données issues de la base GéoRisques ne reflètent pas non plus nécessairement la réalité car la demande d'obtention d'arrêté de catastrophe naturelle dépend fortement de ce que D'Ercole et Pigeon (1999) appellent les « filtres sociaux ». Par exemple, certaines communes ne demandent pas nécessairement d'arrêtés lors d'une érosion de falaise, en jugeant cela inutile soit parce qu'il n'y a pas eu de dégât matériel, soit parce qu'ils sont habitués à ces phénomènes. De plus, les aléas d'érosion engendrant des dommages sur les communes ne sont pas tous reconnus en état de catastrophe naturelle par un arrêté interministériel car ce dispositif de reconnaissance se prononce sur l'intensité anormale du phénomène et une « durée de retour » supérieure à 10 ans (article L.125-1 du code des assurances). Cette probabilité d'occurence implique donc que les sites les plus fréquemment impactés ne sont pas recensés dans cette base de données. De plus, la reconnaissance des arrêtés CatNat ne serait pas toujours objective (Douvinet et Vinet, 2012). Le classement en catastrophe naturelle est effectivement fondé sur des critères scientifiques insuffisamment rigoureux et sur une décision politique de la commission interministérielle qui recherche souvent un « compromis entre les intérêts contradictoires des assureurs, des assurés sans oublier ses propres intérêts et ceux des élus » (Cour des Comptes, 2008). Les données rassemblées dans la base GéoRisques doivent donc être utilisées avec précaution.

Les données issues de l'Atlas des aléas littoraux ainsi que de la base de données *InfoTerre* ont dû faire l'objet d'un tri car tous les aléas d'érosion recensés ne se sont pas nécessairement produits sur des secteurs de falaises meubles. La base de données *InfoTerre* recense, en effet, tous les mouvements de terrain sur une commune indépendamment de leur situation littorale ou continentale. Par ailleurs, certains aléas recensés ne sont pas datés ou alors de façon très imprécise (seule la décennie ou le siècle de la survenue de l'aléa est connu). Ces phénomènes d'érosion ont été exclus de l'analyse chronologique car cette imprécision temporelle (supérieure à l'année) ne permet pas d'identifier d'éventuels doublons.

Les phénomènes d'érosion recensés pour chaque site et pour une date donnée ont été géoréférencés au sein d'un SIG via le logiciel QGIS™. Ceci permet de disposer d'une représentation spatiale et temporelle de l'aléa sur le littoral breton. Outre la date et la localisation, la table attributaire associée à cette couche vectorielle renseigne les différentes caractéristiques de l'aléa, dans la mesure où l'information a pu être collectée : type de falaise (simple/complexe), facteurs générateurs mentionnés et source de l'information.

Ce travail de recensement est indispensable car les données existantes sur les phénomènes d'érosion des falaises meubles sont très souvent incomplètes. Le croisement des différentes sources a permis de compléter certaines informations (localisation, jour de survenue, type de mouvement de terrain, volume érodé…). Celles qui concernent le type de mouvement de terrain sont toutefois à analyser avec prudence car la terminologie de ces phénomènes n'est pas bien identifiée (ex : glissement, écroulement) et est souvent source de confusion autant par les propriétaires riverains, les élus ou les scientifiques (Gilbert, 1973). Ces termes sont souvent mal utilisés par les locuteurs pour caractériser l'aléa du fait de la diversité des formes d'érosion. Par exemple, il n'est pas rare de rencontrer différents qualificatifs d'un aléa au sein d'un même article de presse.

5.1.3- Données environnementales : les agents de forçage

L'identification des mécanismes d'érosion des falaises meubles prépondérants localement est difficile car les processus marins et subaériens interagissent indépendamment ou conjointement dans le temps (DEFRA, 2002 ; Lee, 2008 ; Sunamura, 2015). La mesure simultanée des différents agents de forçage reste un verrou méthodologique. Il n'en reste pas moins que l'identification des principaux facteurs

déclencheurs de l'aléa d'érosion est essentielle dans la compréhension de la dynamique régressive des falaises meubles. L'analyse des conditions environnementales lors de la survenue des aléas est donc réalisée afin d'identifier les forçages responsables de l'érosion des falaises meubles. Du fait des lacunes dans les dispositifs régionaux de mesure (cumul des précipitations, vitesse de vent…), la première partie du 20e siècle a été exclue d'une partie de l'analyse. Par ailleurs, sont étudiés ici, trois de ces forçages pour lesquels on dispose de données journalières sur plusieurs décennies :

- les **coefficients de marée** à partir de la base de donnée du SHOM (https://maree.shom.fr) ;

- les **hauteurs de précipitations** sont extraites de la base de données de Météo-France sur 22 stations de référence situées en Bretagne, à proximité du littoral (Annexe 6) ;

- les **vitesses de vent** sont également extraites du réseau de stations Météo-France et sont utilisées comme **indicateur des états de mer**. La base de données « Vimers » (Roche et al., 2014) recensant les événements de tempête en Bretagne depuis la fin du 19e siècle jusqu'à 2012 a également été utilisée afin de connaitre les événements tempétueux s'étant produits sur la région Bretagne. Afin de compléter cette base de donnée sur la période 2012-2018, les événements qualifiés de « tempête » sur la région Bretagne, ont été extraits du site Météo-France (http://tempetes.meteo.fr/Cartographie-des-tempetes-par-regions.html).

5.1.4- Définition des seuils déclenchants

La détermination des facteurs déclenchants est souvent difficile en raison de la combinaison fréquente de facteurs (Joyal, 2015). Un seuil est la valeur minimale d'un paramètre physique qui est nécessaire pour qu'un processus ait lieu ou qu'il y ait un changement d'état (Guzzetti et al., 2007). Aussi, le recours à des seuils de déclenchement permet d'identifier et de discriminer la part relative de chaque forçage.

Deux approches sont couramment utilisées afin de définir ces seuils (Roy, 2015) : la modélisation physique employée notamment en ingénierie géotechnique (Kanungo et Sharma, 2014) et l'approche empirique basée sur l'analyse statistique des événements ayant causé des instabilités de falaise (Caine, 1980 ; Costa, 2004 ; Guzzetti et al., 2007 ; Letortu, 2013). C'est la deuxième approche qui est utilisée dans cette étude afin d'établir les seuils de déclenchement. Les seuils sont donc définis par l'analyse de leur fréquence et « à-dire d'expert ». Cette méthode qui repose notamment sur l'observation est fréquemment utilisée dans des études environnementales pour résoudre de multiples problématiques (ex : Castella, 1998 ; Colmar et al., 2010). Il est à noter qu'en définissant, ici, les seuils à l'échelle régionale de la Bretagne, on considère que les caractéristiques environnementales sont globalement similaires sur la côte bretonne. Ces valeurs seuils ont été définies pour les aléas dont le jour ou, au moins, la semaine de survenue est connue, ce qui représente 71,9 % des aléas recensés.

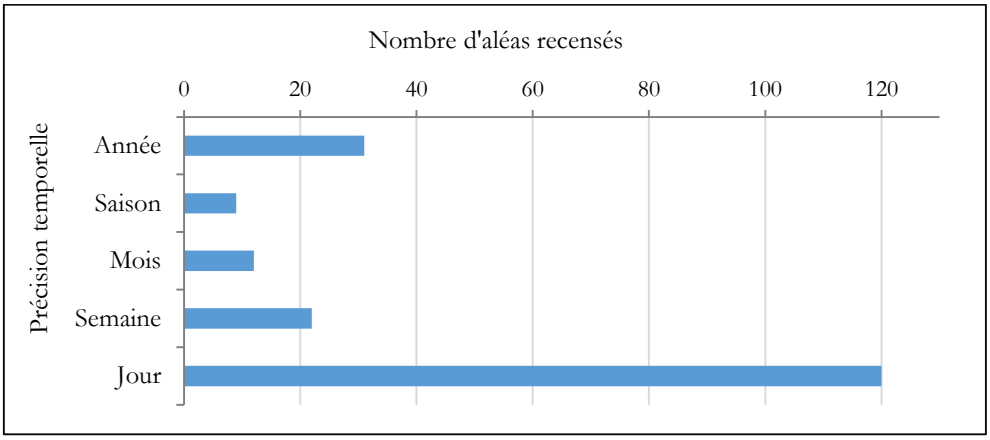
5.2- Analyse de la localisation spatiale et temporelle de l'érosion des falaises meubles depuis le début du 20e siècle

5.2.1- Précision temporelle et spatiale des données

- **Précision temporelle**

Sur 194 aléas d'érosion recensés, 62 % possèdent une précision journalière et, malgré le croisement des données entre différentes sources, 16 % des aléas ont une précision annuelle (Fig. 81).

Fig. 81 : Précision temporelle des aléas d'érosion recensés.



Le manque de précision temporelle sur les phénomènes d'érosion représente un problème relatif aux informations collectées par les différentes sources. La précision temporelle est d'autant plus faible que l'aléa est ancien. Les données issues des articles de presse donnent une précision journalière tandis que les informations issues des témoignages ou de la base de données *InfoTerre* donnent une précision mensuelle, saisonnière voire annuelle. Outre la qualité des données qui est fonction de leur ancienneté, l'imprécision temporelle vient aussi du fait que les aléas d'érosion sont rarement observés au moment de leur déclenchement. De nombreux aléas, assimilables dans ce cas à des mouvements gravitaires, se déplacent effectivement de manière progressive avec une faible vitesse de déplacement (de l'ordre de quelques millimètres par an pour certains) (Tab. 6).

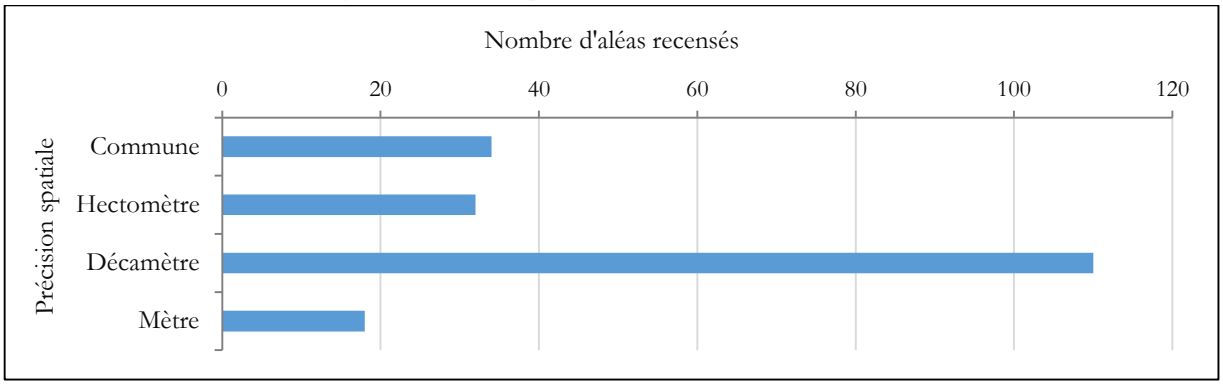
Tab. 6 : Échelle de vitesse pour les mouvements gravitaires (Varnes (1978), modifié de Pollet (2004)).

Classe de vitesse	Description	Vitesse ($m.s^{-1}$)	Vitesse typique
7	Extrêmement rapide	> 5	5 $m.s^{-1}$
6	Très rapide	> 0,05	3 $m.min^{-1}$
5	Rapide	> 5.10^{-4}	1,8 $m.h^{-1}$
4	Modéré	> 5.10^{-6}	13 $m.mois^{-1}$
3	Lent	> 5.10^{-8}	1,6 $m.an^{-1}$
2	Très lent	> 5.10^{-10}	16 $mm.an^{-1}$
1	Extrêmement lent		

- **Précision spatiale**

La majorité des aléas recensés présente une précision spatiale décamétrique (Fig. 82). Seulement 9 % d'entre eux ont une précision de l'ordre du mètre. Le manque de précision spatiale sur les phénomènes d'érosion représente un second problème dans l'analyse historique. Selon les sources de données, les aléas sont caractérisés à l'échelle de la commune (base GéoRisques), voire du lieu-dit (presse quotidienne, base de données *InfoTerre*, *Atlas des aléas littoraux*…) avec une précision hectométrique à décamétrique. Les aléas les mieux géolocalisés sont ceux où on dispose de photographies ou d'une cartographie réalisée à la suite de la survenue de l'aléa, par des chercheurs ou par des bureaux d'études.

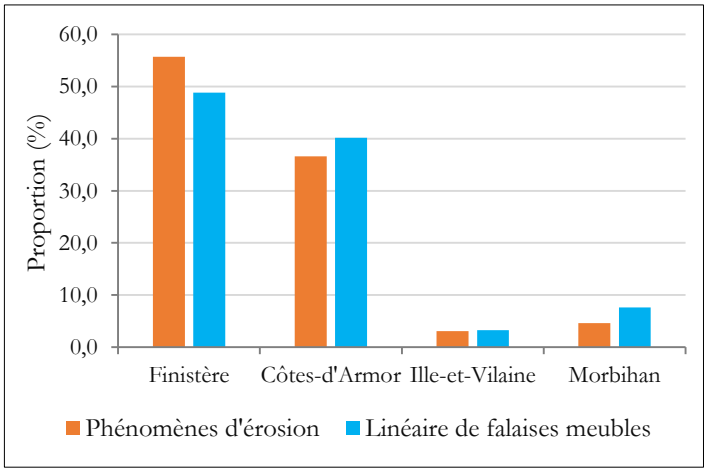
Fig. 82 : Précision spatiale des aléas d'érosion recensés.



5.2.2- Répartition spatiale des aléas

Les phénomènes d'érosion inventoriés se sont produits essentiellement dans le Finistère (55,7 %) et dans les Côtes-d'Armor (36,6 %) (Fig. 83). Cette distribution spatiale des phénomènes d'érosion est cohérente avec la localisation des falaises meubles. Les départements qui comptabilisent le plus de phénomènes d'érosion sont ceux où le linéaire de falaises meubles est le plus étendu (Fig. 83).

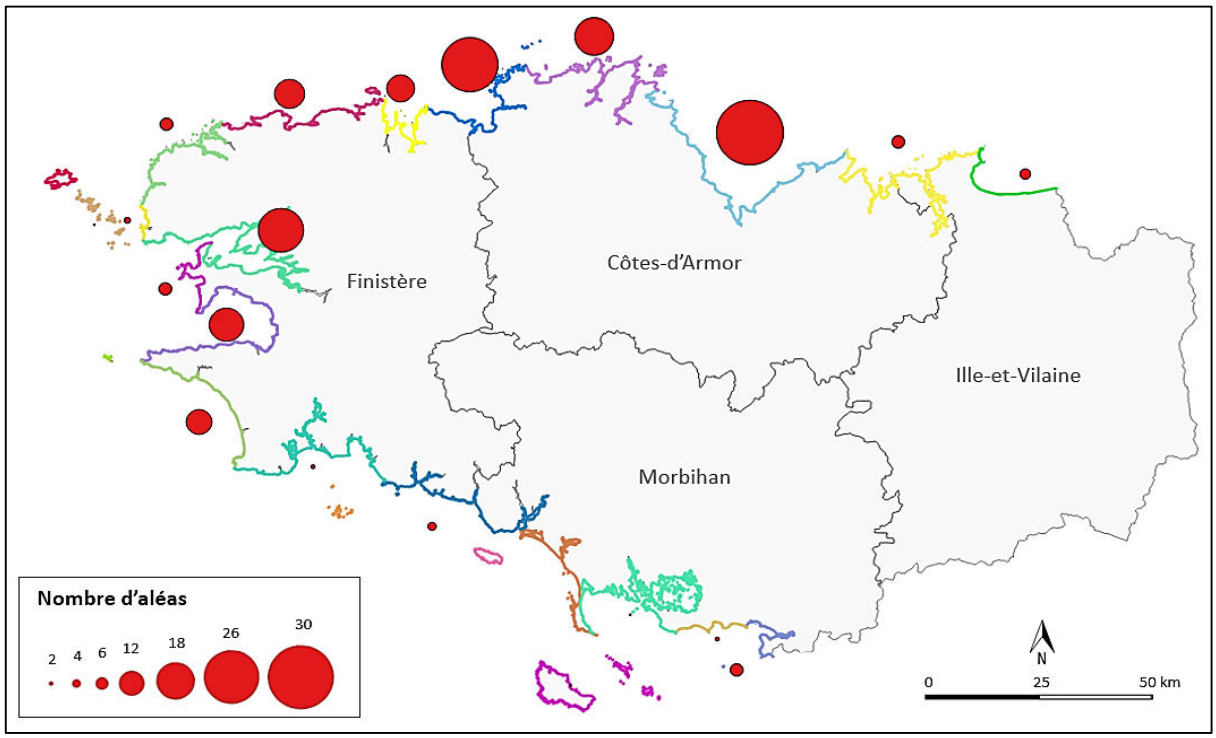
Fig. 83 : Répartition des aléas d'érosion de falaises meubles en Bretagne, par département.



	Nombre d'aléas	Pourcentage d'aléas	Pourcentage de falaises meubles
Finistère	108	55,7	48,8
Côtes-d'Armor	71	36,6	40,2
Ille-et-Vilaine	6	3,1	3,3
Morbihan	9	4,6	7,6
Total	194	100	100

La morphologie des côtes bretonnes étant très découpée, l'analyse de la répartition spatiale des aléas d'érosion de falaises meubles, à l'échelle du département, ne permet pas d'identifier les secteurs les plus impactés selon leur localisation et leur exposition. La répartition spatiale des phénomènes d'érosion a donc été analysée avec celle des grandes unités morpho-sédimentaires définies par le Cerema (Centre d'Études et d'expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement) (Fig. 84). Ces unités reposent sur un découpage du littoral en homogénéité de forme, de nature et d'exposition de la côte (MEDDE, 2016). Ces multiples unités sont donc exposées différemment selon leur localisation et leur orientation.

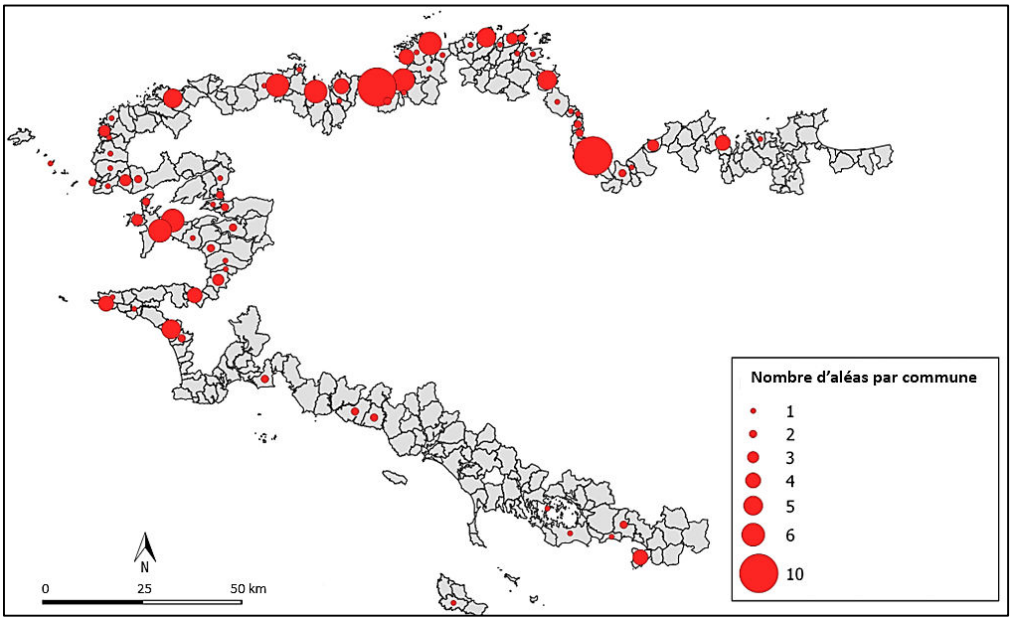
Fig. 84 : Nombre de phénomènes d'érosion de falaises meubles par unité morpho-sédimentaire depuis le début du 20e siècle. Les couleurs des portions de côte correspondent aux différentes unités morpho-sédimentaires définies par le Cerema.



À l'échelle régionale, peu d'unités morpho-sédimentaires ont été épargnées sur la période d'étude. Toutefois, la distribution géographique en termes de nombre d'aléas n'est pas homogène sur le territoire breton (Fig. 84). Un peu plus de 70 % des aléas ont eu lieu sur la côte nord-ouest de la Bretagne. De plus, trois unités morpho-sédimentaires sont principalement affectées : il s'agit, par ordre de survenue, de la baie de Saint-Brieuc, de la baie de Lannion et de la rade de Brest. Ces secteurs correspondent aux principales localisations des formations meubles quaternaires (loess, colluvions…) qui se sont accumulées dans les dépressions (Meynier, 1959 ; Monnier, 1979). Leur résistance à l'érosion plus faible en comparaison des falaises meubles formées d'altérites explique qu'elles sont davantage sujettes aux mouvements de terrain (Pinot, 1998 ; Bonnot-Courtois et Lançon, 2004). Cette distribution spatiale est donc cohérente avec le contexte géomorphologique du littoral breton.

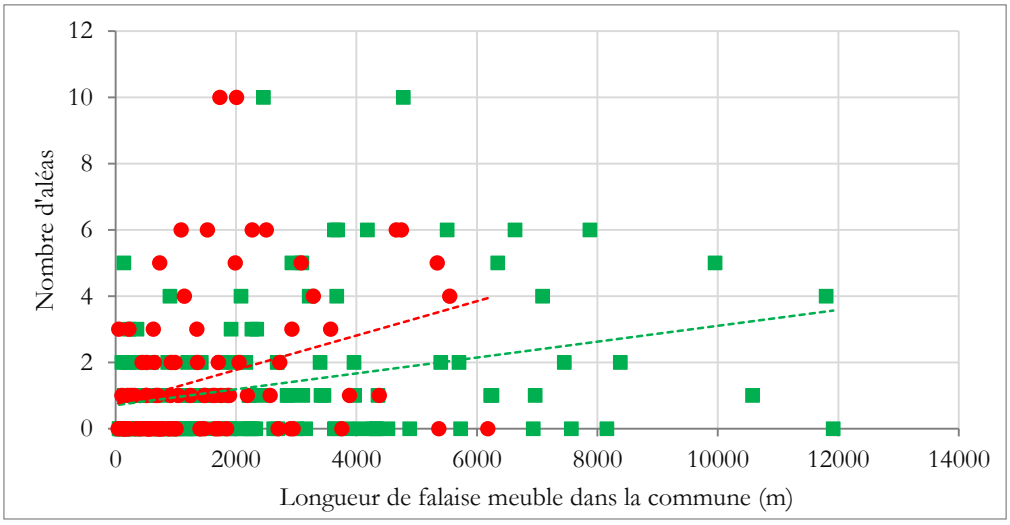
L'analyse de la répartition spatiale des aléas d'érosion par commune montre également une forte hétérogénéité sur les territoires littoraux (Fig. 85). Les communes de Plérin (22) et de Locquirec (29) sont celles qui recensent le plus d'aléas avec 10 phénomènes d'érosion de falaises meubles depuis le début du 20e siècle. Pour la commune de Plérin, ce nombre peut s'expliquer par un linéaire relativement long de falaises meubles (6 512 m) et davantage d'enjeux exposés dus à une forte densité de population (499 hab/km^2) en comparaison de la moyenne régionale (121 hab/km^2 ; source : INSEE, 2015). Pour la commune de Locquirec, le nombre élevé d'aléas recensés s'explique en partie par de nombreux témoignages recueillis dans cette commune car il s'agit d'un site d'étude qui a fait l'objet de missions de terrain régulières.

Fig. 85 : Nombre de phénomènes d'érosion de falaises meubles par commune, depuis le début du 20e siècle.



De plus, les communes littorales bretonnes présentent différents profils selon l'orientation des activités économiques qui peuvent être l'exploitation des ressources halieutiques, les activités militaires, l'exploitation agricole ou encore le tourisme balnéaire. Cette variété de profils explique ainsi les différents degrés d'importance qui sont accordés aux impacts de l'aléa érosion sur leur territoire (Hénaff et al., 2018). De plus, l'absence d'aléa recensé pour certaines communes peut aussi s'expliquer en termes de longueur de falaises meubles présentes (Fig. 86).

Fig. 86 : Nombre de phénomènes d'érosion en fonction de la longueur de falaises meubles dans la commune (en rouge : falaise de type « simple », en vert : falaise de type « composite », traits pointillés : courbes de tendance).



La probabilité qu'un phénomène d'érosion de falaises meubles survienne dans une commune est effectivement plus forte lorsque le linéaire côtier est étendu. Toutefois, comme le montre le graphique, ceci semble moins vrai lorsqu'il s'agit de falaises de type « composite » qui sont plus résistantes à l'érosion (Fig. 86). L'analyse des aléas selon la typologie des falaises montre, en effet, que les falaises meubles de type « simple » sont plus sujettes aux phénomènes d'érosion (Tab. 7). Bien que ces falaises ne représentent qu'un tiers des falaises meubles en Bretagne, elles concernent 45,5 % des phénomènes d'érosion recensés. La structure et la lithologie des falaises simples leur confèrent une moins grande résistance à l'érosion en comparaison des falaises composites formées avant tout d'altérites (Biville et Van Waerbeke, 2003).

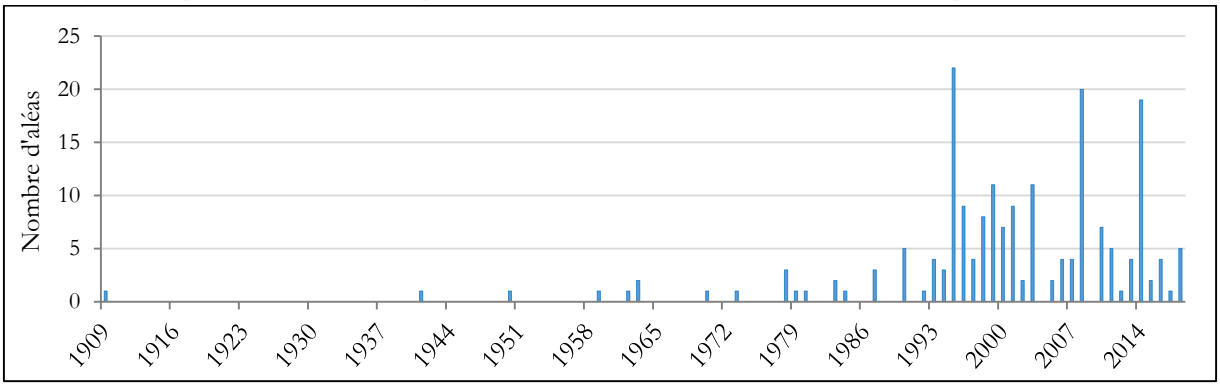
Tab. 7 : Proportion régionale des falaises simples et composites mise en relation avec les pourcentages d'aléas recensés.

	Pourcentage de falaises meubles	Pourcentage d'aléas érosion
Falaises simples	35,8	45,5
Falaises composites	64,2	54,5

5.2.3- Répartition temporelle des aléas

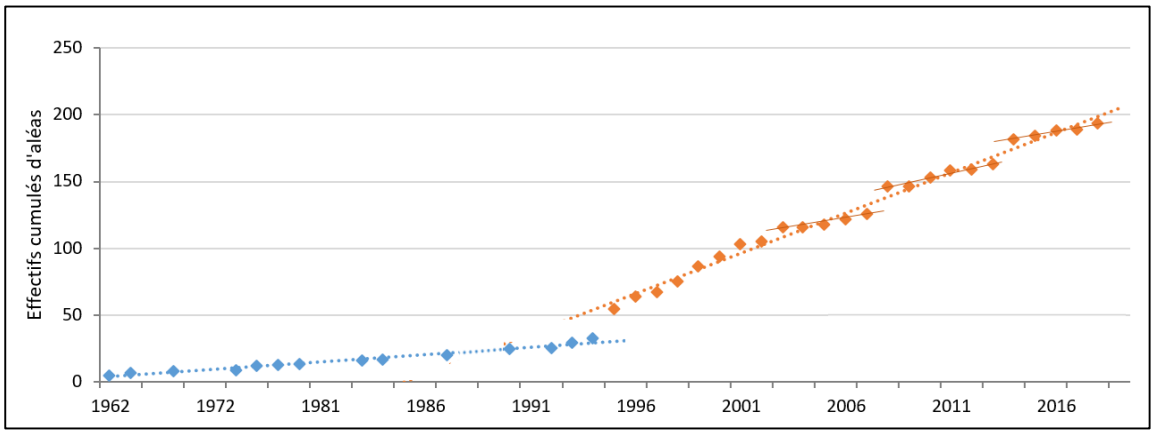
L'analyse de la distribution temporelle des aléas est essentielle afin d'identifier les tendances au cours des dernières décennies. Sur la période 1900-2018, les phénomènes d'érosion observés sont plus nombreux notamment depuis le début des années 1990 (Fig. 87). Cette augmentation s'explique principalement par le développement des médias et de l'archivage des données (Hénaff et al., 2018). En effet, c'est à partir de la seconde moitié du 20e siècle que se développent les émissions de radio, les enregistrements vidéo et les supports de stockage de l'information (disquette, CD, clé USB, DVD…) (Gallet-Blanchard, 1995 ; Bolduc, 2017). L'augmentation du nombre d'aléas observés depuis les années 1960 peut également s'expliquer par l'accroissement des personnes et des enjeux installés à proximité du littoral ainsi que par l'essor touristique (Meur-Ferec, 2006).

Fig. 87 : Répartition annuelle des phénomènes d'érosion de falaises meubles sur la période 1900-2018.



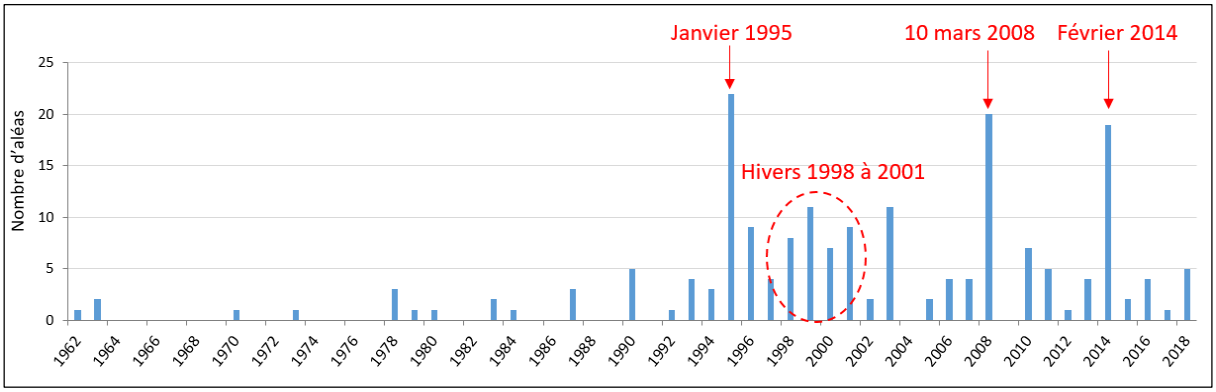
On considère donc qu'il existe une lacune importante des données avant les années 1960. L'analyse de la fréquence des aléas a donc porté sur la période 1960-2018 (Fig. 88). Les effectifs cumulés des phénomènes d'érosion montrent un changement de fréquence vers le milieu des années 1990. De 1962 à 1995, il se produit un peu moins d'un aléa par an tandis qu'entre 1995 et 2018, il se produit en moyenne sept aléas d'érosion par an. On observe donc une augmentation nette dans la fréquence des phénomènes d'érosion depuis 1995. Ce constat n'est pas en accord avec les résultats de Fichaut et Suanez (2008), Cariolet et al. (2010) et Feuillet et al. (2012) qui montrent une période plus morphogène et tempétueuse entre 1974-2002 et qui est précédée puis suivie de périodes plus « calmes ». Toutefois, ces études ont porté sur des littoraux d'accumulation en Bretagne qui sont contrôlés essentiellement par des forçages marins (ex : tempêtes, houles) tandis que l'évolution des falaises meubles est également conditionnée par des forçages subaériens tels que les précipitations (Hobbs et al., 2002 ; Collins et Sitar, 2008).

Fig. 88 : Effectifs cumulés de 1960 à 2018 du nombre d'aléas d'érosion de falaises meubles recensés en Bretagne.



Depuis les années 1990, rares sont les années épargnées par des phénomènes d'érosion de falaises meubles (Fig. 89). Sur la période 1990-2018, soit un intervalle de 28 ans, seules trois années ne comptabilisent aucune érosion de falaises meubles : années 1991, 2004 et 2009. À l'inverse, certaines années comptabilisent de nombreux aléas : il s'agit des années 1995, 2008, 2014 et de la période pluriannuelle 1998-2001. Ces années morphogènes sont liées respectivement à 4 événements météo-marins extrêmes : les fortes précipitations de janvier 1995, la tempête Johanna du 10 mars 2008, les tempêtes successives de l'hiver 2013-2014 et les hivers abondamment pluvieux de 1998 à 2001. Ces années cumulent chacune plus de 13 phénomènes d'érosion, soit 2,7 fois plus par rapport à la tendance annuelle de 1995-2018. La figure ci-dessus montre que le nombre d'aléas érosion depuis les années 2000 n'augmente pas de manière linéaire mais plutôt par « paliers » en raison de la survenue d'événements météo-marins extrêmes morphogènes et de courte durée.

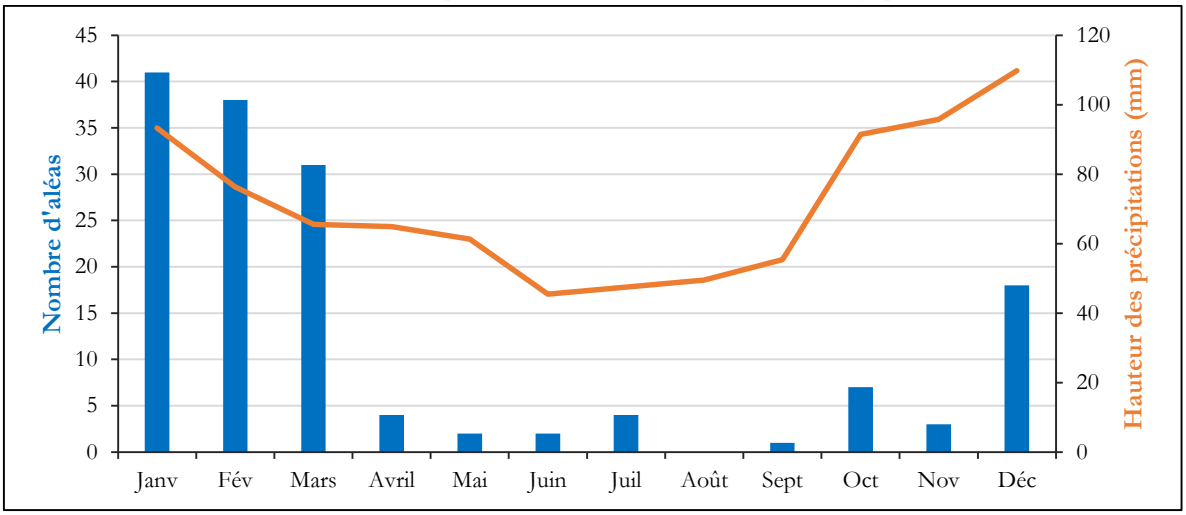
Fig. 89 : Répartition annuelle des phénomènes d'érosion sur la période 1960-2018 et identification des événements morphogènes.



La répartition mensuelle des aléas sur la période 1900-2018 a été analysée à partir des données dont la date de survenue est connue au moins au mois près. Ces données représentent 79,4 % de l'inventaire. À l'échelle de l'année, les phénomènes d'érosion se produisent essentiellement au cours de l'hiver (Fig. 90). Les mois de janvier, de février et de mars semblent être les plus favorables au déclenchement de mouvement de terrain - regroupant à eux seuls 84,8 % des aléas - suivis par le mois de décembre. Ces observations rejoignent les travaux réalisés par Greenwood et Orford (2008) qui ont montré que 86,6 % de l'érosion annuelle des falaises meubles, présentes en Irlande, avait lieu durant l'hiver. Différentes explications sont proposées dans la littérature pour expliquer cette distribution saisonnière de l'érosion. Cariolet (2011), à la suite d'une analyse historique menée sur la période 1960-2009, indique que c'est au mois de janvier et de février que se produisent la majeure partie des submersions marines. D'après l'étude Vimers (Météo-France, 2013), c'est entre novembre et février que se produisent la majorité des tempêtes car entre avril et septembre la pression ne descend que très rarement au-dessous de 990 hPa.

La saison hivernale est donc propice aux conditions d'agitation marine. De plus, l'érosion est accentuée en hiver par la diminution de la résistance des matériaux constitutifs des falaises meubles en raison de leur teneur en eau plus élevée due à des précipitations plus fréquentes (Greenwood et Orford, 2008) et à une faible évapotranspiration (Chiron, 2007). Cette augmentation de la teneur en eau représenterait un facteur préparatoire au déclenchement des mouvements de terrain. Ainsi, les falaises meubles seraient particulièrement sensibles à l'érosion marine et/ou subaérienne à la suite de longues périodes humides.

Fig. 90 : Répartition mensuelle des phénomènes d'érosion recensés depuis le début du 20e siècle et mise en relation avec le cumul mensuel des précipitations (normale climatique 1981-2010 pour la station Météo-France de Ploumanac'h, considérée ici comme représentative des conditions météorologiques sur le littoral breton).



L'évolution du nombre d'aléas d'érosion peut être rapprochée du cumul mensuel des précipitations (Fig. 90). La station de Ploumanac'h a été choisie pour comparer les précipitations avec la répartition des phénomènes d'érosion car elle est localisée sur la côte nord où se produisent principalement les phénomènes d'érosion et elle présente l'avantage d'être située sur le littoral. La comparaison montre que les mois les plus humides sont associés à un nombre élevé de phénomènes d'érosion. Toutefois, il semble exister un léger décalage entre les mois les plus humides et les mois les plus morphogènes. Ce décalage peut être attribué au temps de réponse et à la recharge des nappes. Le déclenchement des mouvements de terrain sur les falaises meubles serait donc influencé par les conditions pluviométriques, comme le suggèrent de précédents travaux (ex : Hobbs et al., 2002; Collins et Sitar, 2008; Lissak et al., 2009; Young et al., 2009 Sunamura, 2015).

Cependant, il est important de noter que des phénomènes d'érosion peuvent également survenir en période estivale (Fig. 90). Ces aléas qui ont lieu en-dehors de la période morphogénétique habituelle sont en fait déclenchés par des précipitations intenses, parfois lors d'un orage estival, comme ce fut le cas le 4 juillet 1973 à Plérin (DHI, 2016) et le 2 juin 2018 à Dinard. À l'inverse, les aléas produits en octobre sont davantage dus à la survenue d'une surcote produite par une violente tempête. C'est le cas par exemple du 20 octobre 1909 à Cancale et du 15 octobre 1987 à Locquirec où ces tempêtes ont été qualifiées « d'ouragan » dans les textes historiques du fait de leur violence (Danguy des Déserts et al., 1988 ; Lambert et Garcin, 2013).

Focus sur les trois épisodes de forçages les plus morphogènes depuis le début du 20e siècle

Sur la période 1900-2018, l'événement de forçage qui a généré le plus de phénomènes d'érosion correspond à la tempête Johanna du 10 mars 2008 qui comptabilise 18 aléas en l'espace de deux jours de durée d'action (Tab. 8, Annexe 7). L'ampleur de cette tempête a également été constatée par Hénaff (2018) qui montre qu'il s'agit du forçage d'érosion littorale le plus intense enregistré en Bretagne sur la

période 1700-2010. La sévérité de ce forçage s'explique par la conjonction de facteurs marins et subaériens : une forte tempête (vents soufflant à plus de 150 km/h à la Pointe du Raz) associée à de forts coefficients de marée (104 à 107) qui génèrent d'importantes surcotes (Cariolet, 2011). De plus, les deux directions successives des vents (sud-ouest puis nord-ouest) expliquent que cette tempête a touché toute la côte bretonne.

Pour l'événement de forçage s'étant produit en janvier 1995, une quinzaine de mouvements de terrain ont été générés en raison de cumuls pluviométriques intenses (Lang et al., 2013). En dix jours, on relève l'équivalent de quatre mois de pluviométrie moyenne. La probabilité d'occurence des pluies est comprise entre 50 et 100 ans à Brest. De plus, une surcote est enregistrée le 19 janvier 1995 par la survenue d'une tempête (92 cm mesuré à Saint-Malo (Météo-France, 2013)).

L'hiver 2013-2014 est le dernier événement fortement morphogène, enregistré depuis le début du 20e siècle. Il est caractérisé par une succession de tempêtes (Daubord, 2014 ; Blaise, 2017). Toutefois, la tempête qui s'est produite du 1er au 2 février 2014 a été la plus morphogène (avec 11 mouvements de terrain recensés). Ceci s'explique par la conjonction de forts coefficients de marées (113-114) avec une forte tempête (vents soufflant à plus de 100 km/h). De plus, les tempêtes qui l'ont précédé ont démaigri les plages et déblayé les talus d'érosion en pied de falaise contribuant ainsi à fragiliser préalablement le système côtier (Blaise, 2017).

Tab. 8 : Récapitulatif des conditions environnementales des trois événements de forçage les plus morphogènes depuis le début du 20e siècle.

Événement	Nombre d'aléas	Départements touchés	Durée	Caractéristiques	T*	GM*	S*	P*
9-10 mars 2008	18	22, 29, 56	2 jours	-Tempête (vents >150 km/h) -Grandes-marées (104 à 107) -2 directions de vents : SO et NO -Nombreuses submersions marines -Précipitations > 20 mm en 48h	++	+	++	+
17 au 28 janvier 1995	15	22, 29	10 jours	-Très fortes précipitations (jusqu'à 90 mm) -Tempête et surcote le 19 janvier	+		+	++
1-2 février 2014	11	29, 22, 56	2 jours	-Grandes marées (113 à 114) -Tempête (vents > 100 km/h) -Précédé par des tempêtes successives	+	++	+	

* Intensité des forçages pour les tempêtes (T), les grandes marées (GM), les surcotes (S) et les précipitations (P) : « + » : modéré, « ++ » : fort.

L'analyse rapide de ces trois événements morphogènes montre que les phénomènes d'érosion de falaises meubles ont été produits par des conditions environnementales différentes. Il est donc essentiel d'identifier les caractéristiques des situations météo-marines à risque et la part des différents forçages impliqués dans les phénomènes d'érosion.

5.3- Analyse diachronique des phénomènes d'érosion recensés depuis la seconde moitié du 20e siècle et des conditions environnementales

L'analyse des conditions synoptiques lors des phénomènes d'érosion permet d'identifier des seuils de déclenchement et les forçages dominants dans l'érosion des falaises meubles.

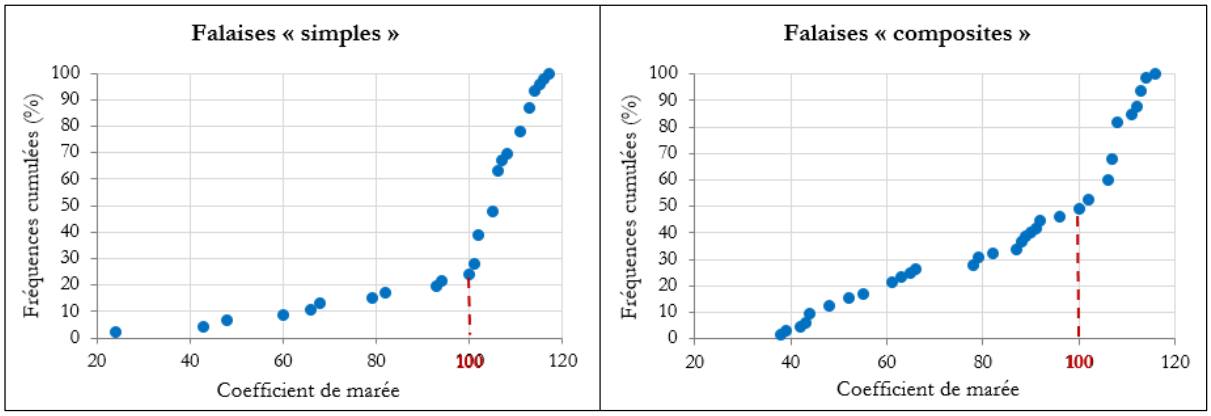
5.3.1- Détermination des seuils de déclenchement de l'aléa

Il est admis que la morpho-structure des falaises contrôle les niveaux de résistance à l'érosion marine et subaérienne (Benumof et Griggs, 1999 ; Bezerra et al., 2011 ; Sunamura, 2015). C'est pourquoi, la définition des seuils a été réalisée en tenant compte de la typologie des falaises.

5.3.1.1- Coefficient de marée

L'analyse des fréquences cumulées des aléas en fonction des coefficients de marée montre une nette augmentation de la fréquence des aléas à partir d'un coefficient de marée de 100 (Fig. 91). Cette valeur seuil est moins marquée pour les falaises composites car, du fait de leur pied rocheux, elles sont moins sensibles à l'action érosive des houles. La part des phénomènes d'érosion générés lors d'un coefficient de marée supérieur ou égal à 100 est de 51 % pour les falaises composites et de 77 % pour les falaises simples. C'est donc un coefficient de marée de 100 qui a été retenu comme seuil pour l'analyse des facteurs déclenchants.

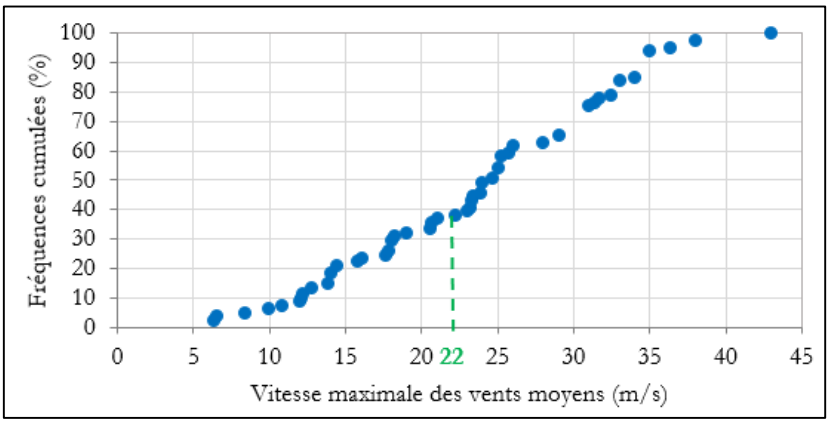
Fig. 91 : Fréquences cumulées des phénomènes d'érosion de falaises meubles en fonction des coefficients de marée et de la typologie des falaises meubles.



5.3.1.2- Vitesse de vent

Les vitesses de vent sont utilisées ici, comme un indicateur des états de mer. L'analyse des fréquences cumulées des aléas en fonction de la valeur maximale journalière des vents moyens horaires ne montre pas de seuil apparent (Fig. 92). Une vitesse de vent de 22 m/s (soit 79,2 km/h) a alors été retenue comme seuil déclenchant dans cette étude. Cette valeur correspond au seuil de tempête selon la définition donnée dans l'étude Vimers (Météo-France, 2013) et elle correspond à la force 9 de l'échelle de Beaufort.

Fig. 92 : Fréquences cumulées des phénomènes d'érosion de falaises meubles en fonction des vitesses de vent.



5.3.1.3- Précipitations

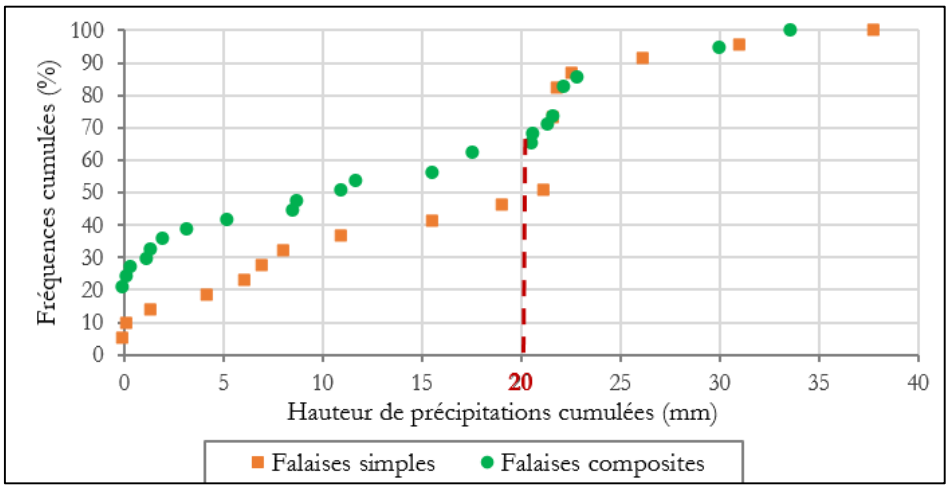
En raison de l'influence cumulative probable des précipitations, il est nécessaire d'analyser ce forçage le jour où se produit l'aléa mais aussi sur une période plus longue précédant l'aléa. Letortu (2013) suggère, en effet, pour les falaises crayeuses de Normandie, que le déclenchement des mouvements de terrain par les précipitations serait davantage lié aux conditions pluviométriques cumulées que celles du jour de l'aléa. Toutefois, il n'existe pas de consensus par rapport au nombre de jours à prendre en compte pour que le seuil représente correctement le rôle des précipitations antécédentes dans le déclenchement de l'érosion (Roy, 2015). Ainsi, dans la littérature, des corrélations ont été établies pour des périodes précédant l'aléa et allant de 2 à 120 jours. Toutefois, Guzzetti et al. (2007) montrent que les précipitations antécédentes peuvent intervenir dans le déclenchement jusqu'à une durée approximative de 200 heures, soit 8 jours. Au-delà, l'évapotranspiration conduirait à rendre l'intensité moyenne des précipitations encore plus faible. Pour Giannecchini et al. (2012), la période dans laquelle les précipitations antécédentes doivent être considérées est de 3 à 7 jours.

De plus, compte-tenu de la difficulté de discriminer les forçages d'origine marine et subaérienne dans le déclenchement de l'aléa d'érosion, il existe actuellement peu d'études qui ont établi des seuils de précipitations dans l'initiation des mouvements de terrain sur les versants littoraux. C'est pour cette raison, qu'il est fréquent de trouver dans la littérature des analogies effectuées avec des études réalisées sur des versants continentaux (Corominas et Moya, 1999 ; Guzzetti et al., 2007 ; Roy, 2015). Toutefois, Costa (2004) et Letortu (2013) évoquent un seuil de précipitations cumulées de 20 mm sur 3 à 10 jours comme une condition favorable au déclenchement des mouvements de terrain pour des falaises crayeuses. Pour des falaises meubles silto-sableuses, un seuil de précipitations cumulées de 35 mm sur 2 jours est proposé par Collins et Sitar (2008) et par Brooks et al. (2012). L'inconvénient est que ces seuils sont définis pour des régions spécifiques (falaises de Normandie, du Royaume-Uni et de Californie) et, par conséquent, sont difficilement exportables à d'autres régions (Crosta, 1989).

À partir des aléas dont le jour de survenue est connu (62 % de l'inventaire soit 120 aléas), les précipitations cumulées ont donc été calculées jusqu'à 10 jours précédant l'aléa. L'analyse des fréquences cumulées, en prenant en compte l'ensemble des phénomènes d'érosion, ne montre aucune relation entre les hauteurs de précipitation et le déclenchement des mouvements de terrain quel que soit le nombre de jours pris en compte. L'interaction des forçages marins avec les précipitations rend, en effet, difficile l'identification de seuils déclenchants. Afin d'écarter les mouvements de terrain pour lesquels les forçages marins peuvent avoir contribué au déclenchement, les aléas survenus lors d'un coefficient de marée supérieur ou égal à 100 ont été exclus de l'analyse. La nouvelle analyse basée sur 31 % des aléas recensés soit sur 61 aléas, fait alors apparaitre des seuils et des changements de fréquence en fonction des précipitations cumulées pour une période de 2 jours précédant l'aléa (Fig. 93). C'est cette durée d'analyse qui est retenue

et qui semble la plus adéquate pour identifier le rôle des précipitations sur l'érosion des falaises meubles en Bretagne. Sur cette période d'analyse de 2 jours, le seuil de précipitations cumulées favorable au déclenchement de l'érosion est estimé à 20 mm pour les falaises simples et les falaises composites (Fig. 93). La part des phénomènes d'érosion générés lors de précipitations cumulées dépassant les 20 mm sur 2 jours est de 46 %.

Fig. 93 : Fréquences cumulées des phénomènes d'érosion de falaises meubles en fonction du cumul de précipitations sur deux jours.



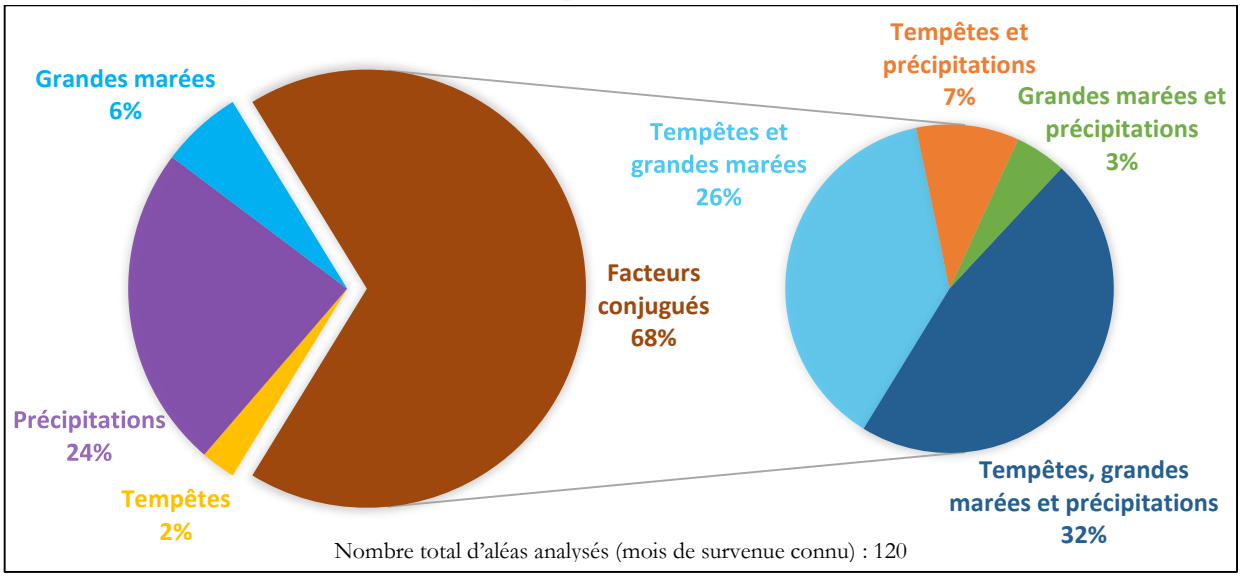
Le seuil de déclenchement similaire pour les falaises simples et les falaises composites s'explique par le fait que c'est avant tout la partie supérieure des falaises, composée majoritairement par des formations superficielles pour les deux typologies, qui conditionne les modes de saturation en eau. La période d'analyse sur 2 jours et le seuil de précipitations cumulées de 20 mm sont comparables avec ceux déterminés par les précédents travaux menés sur des falaises meubles en Californie et au Royaume-Uni (Collins et Sitar, 2008 ; Brooks et al., 2012) qui se trouvent pourtant dans des contextes climatiques différents.

5.3.2- Identification des facteurs déclenchants dans l'érosion des falaises meubles

Les premiers facteurs générateurs des aléas côtiers d'érosion et de submersion (tout type de côte confondu), mentionnés dans les archives, sont les tempêtes et les grandes marées (Hénaff et al., 2018). Toutefois, de nombreux travaux menés sur les processus d'érosion des falaises meubles montrent que les précipitations sont largement impliquées dans leur évolution (Pinot, 1998 ; Bonnot-Courtois et al., 2008 ; Greenwood et Orford, 2008). Pour autant, le développement d'ouvrages de défense contre la mer de type enrochement ou mur par exemple, montre que les processus subaériens sont rarement pris en compte dans les stratégies préventives mises en place.

À partir des seuils environnementaux précédemment définis, les forçages marins et subaériens responsables des aléas d'érosion ont été déterminés (Fig. 94). Les facteurs déclenchants ont été identifiés sur 84 % des aléas analysés soit sur 117 aléas. L'examen des forçages déclenchants montre que la majorité des instabilités de falaises meubles observées résulte de la conjonction de facteurs marins et subaériens. Au moins 68 % des aléas correspondent à la conjonction d'une période pluvieuse, d'une marée de vives-eaux et/ou d'une tempête. Toutefois, les précipitations conditionnent, à elles seules, 24 % des phénomènes d'érosion et peuvent suffire au déclenchement de mouvements de terrain sans intervention des processus marins. À l'inverse, les tempêtes et les grandes marées constituent rarement un facteur unique suffisant pour déclencher des mouvements de terrain sans intervention d'autres forçages.

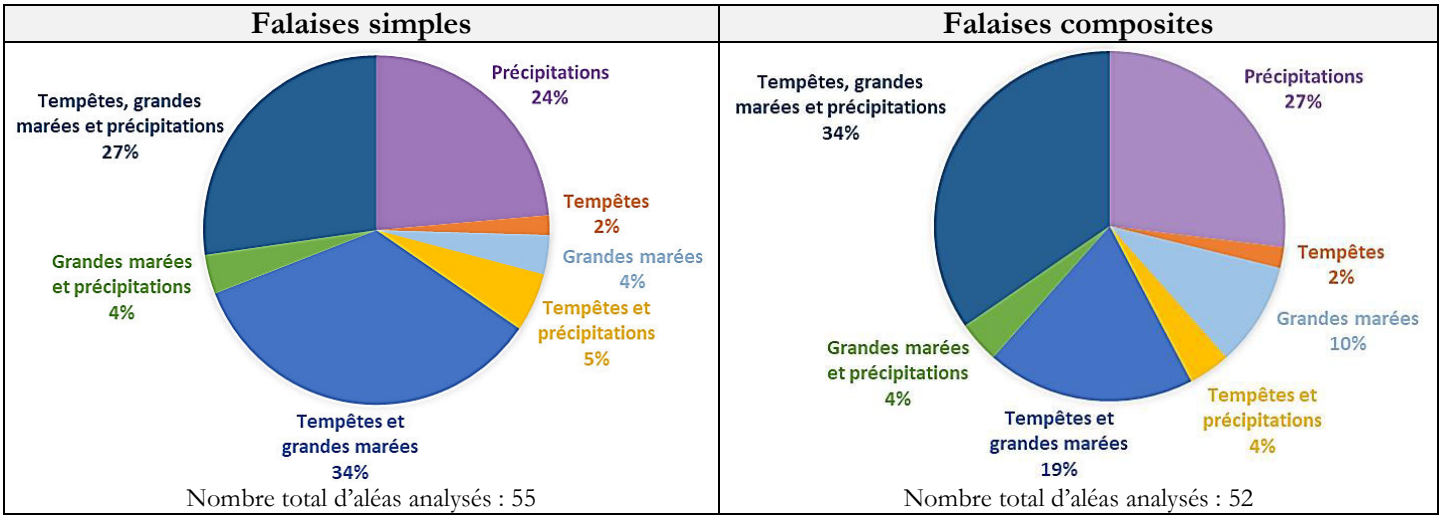
Fig. 94 : Facteurs à l'origine des phénomènes d'érosion de falaises meubles.



Parmi les facteurs conjugués, la combinaison des trois forçages « tempête, grandes marées et précipitations » est la combinaison la plus morphogène car elle associe des agents érosifs d'origine marine, continentale et aérienne. Cette configuration s'est produite notamment lors des tempêtes du 11 janvier 1978, du 19 février 1996, du 26 décembre 1999 et du 2 février 2014 (Belleguic et al., 2012 ; Blaise, 2017). Une seconde configuration à l'origine de nombreux aléas d'érosion de falaises meubles est celle qui associe une tempête avec une période de grandes marées car, dans ce cas-là comme dans le cas précédent, la surcote provoquée par la tempête est amplifiée par la marée. L'impact est notamment important si le passage de la tempête coïncide avec les heures de pleines mer (Feuillet et al., 2012). C'est ce qui s'est produit notamment le 10 mars 2008, lors de la tempête Johanna qui a été à l'origine de nombreuses submersions marines et d'une surcote importante (jusqu'à 1,41 m à Saint-Malo et 0,78 m à Concarneau) (Cariolet, 2011).

La géomorphologie des falaises conditionne leur résistance à l'érosion marine et subaérienne (Benumof et Griggs, 1999 ; Bezerra et al., 2011 ; Joyal, 2015 ; Sunamura, 2015). Les facteurs déclenchants ont ainsi été analysés selon la typologie des falaises (Fig. 95). Les falaises meubles sans soubassement rocheux apparaissent plus sensibles aux processus marins et à l'action érosive des houles. En effet, les marées de tempête (c'est-à-dire des tempêtes associées à des grandes marées) interviendraient dans un tiers des phénomènes d'érosion des falaises meubles simples. À l'inverse, les falaises composites semblent être plus sensibles aux événements impliquant de fortes précipitations. La présence d'une plateforme d'érosion marine dégagée en pied de falaise atténue l'effet des actions marines et renforce ainsi la contribution relative des précipitations.

Fig. 95 : Facteurs à l'origine des phénomènes d'érosion des falaises meubles selon leur typologie.



L'analyse des forçages impliqués dans le déclenchement de l'érosion de falaises meubles montre l'importance de la conjonction de facteurs marins et subaériens mais aussi d'événements pluvieux. L'évolution des falaises mortes, éloignées de toute action marine, prouve que les falaises meubles peuvent reculer sous la seule action des précipitations (Pinot, 1998) (Fig. 96).

Fig. 96 : Mouvements de terrain s'étant produits sur des falaises mortes à la suite de fortes précipitations.

Photo de gauche : éboulement de falaise détruisant une partie de la façade arrière du centre nautique à Douarnenez (11/02/2014);
Photo de droite : glissement de versant coupant l'accès à une route départementale à Plestin-les-Grèves (14/02/2014).

Les actions marines occupent également une part importante dans l'érosion des falaises meubles. Contrairement à ce qui est souvent évoqué dans la littérature, elles ne constituent donc pas un simple agent de transport et de déblaiement des débris. Elles apparaissent comme premier facteur explicatif de l'érosion des falaises meubles simples.

5.4- Discussion

La détermination des forçages contrôlant l'érosion des falaises meubles s'est appuyée sur une expertise quantitative. L'objectif de cette analyse était, d'une part, de recenser les phénomènes d'érosion de falaises meubles survenus depuis le début du 20^{e} siècle en Bretagne et, d'autre part, d'identifier leur répartition spatio-temporelle et les facteurs météo-marins impliqués. La composante géomorphologique a été prise en compte dans ce travail.

Choix méthodologiques sur les forçages étudiés et les seuils déclenchants retenus

Les forçages analysés dans le déclenchement des aléas d'érosion sont ceux pour lesquels on disposait de données journalières sur plusieurs décennies et qui couvraient l'ensemble du littoral breton. La hauteur des nappes phréatiques n'a pas été prise en compte en raison de la distance des stations de mesures avec les sites impactés. Les stations de la banque nationale d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines (ADES) sont effectivement souvent trop éloignées des secteurs littoraux, jusqu'à plus de 25 km pour certains sites. La hauteur significative des houles n'a pas non plus été prise en compte car ces données sont densément mesurées depuis peu et la base de données HOMERE, s'appuyant sur une modélisation numérique ne couvre que la période 1994-2016 (Maisondieu et al., 2017).

L'influence des températures n'a pas non plus été prise en considération en raison de la faible amplitude thermique quotidienne qui caractérise le climat breton et du faible nombre de jours de gel annuel, notamment sur les secteurs côtiers (Savelli, 2016). Un autre facteur susceptible de déclencher des mouvements de terrain sur les falaises est l'activité sismique. Il a, en effet, été démontré que, dans des zones tectoniques actives, les séismes sont capables de générer des mouvements de terrain (Bird, 1994 ; Griggs et al., 2005). Sur l'ensemble du territoire breton, l'activité sismique est relativement faible (Direction Régionale de l'Environnement (DIREN), 2006), c'est pourquoi ce forçage n'a pas été pris en compte dans l'analyse.

Les trois forçages retenus que sont les coefficients de marée, les vitesses de vent et les cumuls de précipitations, pour lesquels on disposait d'une série de mesures complètes sur plusieurs décennies, permettent d'avoir une représentativité suffisante des facteurs d'origine marine, continentale et subaérienne. Pour chacun de ces forçages, des seuils morphogènes ont été déterminés par une analyse statistique et à dire d'expert.

Pour les marées, c'est un coefficient de 100 qui a été retenu comme seuil déclenchant. Cette valeur est cohérente avec celle utilisée pour des travaux menés sur l'érosion littorale de la côte atlantique. Cariolet (2011) démontre que 75 % des submersions en Bretagne, entre 1960 et 2010, ont eu lieu lors d'un coefficient de marée de 95 ou plus. Letortu (2013) utilise un coefficient de marée de 85 pour discriminer l'action des houles dans l'érosion de falaises crayeuses normandes. Enfin, Caspar (2007), Feuillet et al. (2012) et Blaise (2017) utilisent un coefficient de 100 pour étudier la probabilité d'occurence et l'impact des périodes de vives-eaux sur le littoral atlantique.

Pour les seuils de précipitations, la difficulté vient de la définition de la période d'analyse précédant l'aléa (Guzzetti et al., 2007). La durée d'analyse des précipitations cumulées varie énormément selon les auteurs (entre 2 et 120 jours) en raison de l'implication de nombreux facteurs lithologiques, morphologiques et climatiques qui contrôlent le temps de réponse des nappes. Ceci explique pourquoi la quantification de la relation entre la hauteur des précipitations et le déclenchement des mouvements de terrain est aussi souvent difficile (Dornbusch et al., 2008). Dans notre étude, c'est un seuil de précipitations cumulées de 20 mm pour une période d'analyse de 2 jours précédant l'aléa qui a été retenu. Ces valeurs sont cohérentes avec celles choisies par Costa (2004) et Letortu (2013) qui utilisent un seuil de précipitations cumulées de 20 mm sur 3 à 10 jours pour étudier les mouvements de terrain sur des falaises crayeuses, et par Collins et Sitar (2008) ainsi que par Brooks et al. (2012) qui identifient un seuil de 35 mm sur 2 jours comme une condition favorable au déclenchement de mouvements de terrain pour des falaises meubles silto-sableuses.

Une question demeure : celle des seuils de vitesses de vent à partir desquels les conditions d'agitation marine sont suffisantes pour déclencher l'érosion. De nombreux travaux ont montré qu'il n'est pas facile de déterminer des seuils morphogènes à partir des vitesses de vent qui conditionnent les états de mer (Gibeaut et al., 2002 ; Rangel-Buitrago et Anfuso, 2011 ; Almeida et al., 2012 ; Gervais et al.,

2012 ; Blaise, 2017). L'identification des conditions d'agitation marine morphogènes reposant sur des critères anémométriques n'est en réalité pas aisée car le contexte marégraphique (situation de vive-eau ou de morte-eau), les caractéristiques de la houle au large et les conditions morphodynamiques dans la zone de déferlement sont autant de paramètres qui rendent l'analyse des forçages extrêmement complexe. Trzpit (1977) et Blaise (2017) évoquent une vitesse de vent comprise entre 18 et 25 m/s comme seuil suffisant pour entrainer une érosion de la côte. Dans notre étude, c'est le seuil de tempête définie dans l'étude Vimers (Météo-France, 2013) par une vitesse de vent de 22 m/s qui a été retenu.

Il est important de noter que la définition des seuils a été uniquement basée sur l'analyse des facteurs externes au versant alors que la prise en compte des facteurs internes est primordiale (ex : lithologie, perméabilité des formations) (Kim, 1991 ; Collins et Sitar, 2008). Néanmoins, l'analyse des fréquences des phénomènes d'érosion en fonction des cumuls de précipitations (Fig. 93) montre une certaine homogénéité de réponse quel que soit le type de falaise meuble (simple ou composite).

Il est donc nécessaire de garder certaines réserves quant à la fiabilité et la précision des seuils morphogènes utilisés. Leur précision est, ici, jugée suffisante pour identifier les forçages dominants par l'analyse historique régionale des phénomènes d'érosion de falaises meubles.

Les principaux forçages d'érosion des falaises meubles

Les travaux qui se sont intéressés à l'identification des forçages sur des littoraux à falaises meubles ont montré que l'érosion résulte davantage de la combinaison de facteurs marins et aériens que de l'action d'un seul forçage (Collins et Sitar, 2008 ; Young, Flick, et al., 2009 ; Brooks et al., 2012). Greenwood et Orford (2008) et Kuhn et Prüfer (2014) montrent, quant à eux, le rôle majeur des précipitations dans l'érosion de falaises meubles.

Les facteurs déclenchants identifiés dans notre étude rejoignent ces résultats. L'analyse diachronique des conditions environnementales met en évidence l'importance de la conjonction des facteurs marins et subaériens dans l'érosion de falaises meubles : au moins 68 % des aléas correspondent à la conjonction d'une période pluvieuse, d'une marée de vives-eaux et/ou d'une tempête. Toutefois, les précipitations occupent aussi une part importante dans le recul des falaises meubles : elles conditionnent, à elles seules, 24 % des phénomènes d'érosion.

L'analyse historique montre, de plus, que la part des forçages impliqués dans l'érosion des falaises meubles dépend de la géomorphologie des falaises. De mêmes constats ont été faits sur des falaises meubles au Canada (Boucher-Brossard, 2012 ; Bernatchez et al., 2014 ; Fraser et al., 2017) et en Californie (Hapke et al., 2006 ; Collins et Sitar, 2008).

Il est important de noter que la détermination des facteurs responsables du déclenchement des mouvements de terrain reste délicate en raison du nombre limité de phénomènes d'érosion recensés. L'utilisation des archives historiques peut amener à exagérer les aléas pour lesquels les données sont abondantes et à minimiser les autres. Les données recueillies à partir de ces sources sont aussi tributaires de la perception du risque à un moment donné de l'histoire (Leone, 1996 ; Clément et Jaurand, 2005). De plus, parmi les mouvements de terrain inventoriés, rares sont ceux disposant d'une information sur les volumes mobilisés. On suppose toutefois que ces aléas ont généralement été observés le plus souvent parce qu'ils étaient volumineux. En conséquence, les mouvements de terrain de petites dimensions, par exemple, ceux produits par éboulisation, sont rarement pris en considération dans ce type d'analyse. Pour autant ce phénomène représenterait une part importante des mouvements de terrain affectant les falaises rocheuses (Letortu, 2013) mais aussi les falaises meubles (Bernatchez et al., 2014).

La difficulté d'identification des facteurs déclenchants

Pour 16,9 % des aléas de l'analyse soit 22 phénomènes d'érosion, aucun facteur prépondérant n'a été identifié et plusieurs raisons peuvent expliquer ce résultat.

1) **Incertitudes sur la date de l'aléa**

Malgré un contrôle rigoureux des données, la date des aléas peut ne pas correspondre à la date de leur survenue mais à celle de leur observation qui a pu être réalisée plusieurs jours voire semaines après. Comme mentionné dans le sous chapitre 5.1.2, les aléas d'érosion sont rarement observés au moment de leur déclenchement et ils peuvent être le résultat d'un déplacement relativement lent (Tab. 6).

2) **L'intervention d'autres forçages**

L'analyse des forçages ne prend pas en compte d'autres facteurs externes comme l'**activité sismique** ou les **températures** pour des raisons qui ont été explicitées un peu plus tôt mais qui pourraient toutefois jouer un rôle dans le déclenchement des mouvements de terrain. Une **pression atmosphérique** anormalement faible peut aussi être à l'origine d'une érosion en pied de falaise et du déclenchement de mouvements de terrain en générant une surcote. En effet, une surcote peut être provoquée par de forts vents d'afflux (origine anémométrique) mais aussi par une forte baisse de la pression atmosphérique (origine barométrique) qui entraine une réduction du poids de la colonne d'air sur l'eau et ainsi une élévation générale du plan d'eau (Bouligand et Pirazzoli, 1999). La difficulté d'identifier les facteurs naturels à l'origine de l'aléa vient du fait qu'ils peuvent être combinés aussi avec des **facteurs d'origine anthropique** (Bernatchez et Fraser, 2011). Parmi eux, les déversements des eaux usées des habitations sont fréquemment évoqués dans la littérature comme facteur d'érosion dans les secteurs où les résidences ne sont pas raccordées à un réseau d'assainissement ou que le système d'assainissement est vétuste (Pinot, 1998 ; Bonnot-Courtois et al., 2008). Dans ces cas-ci, les eaux sont injectées dans le sol et une partie s'écoule vers la falaise saturant alors les formations en eau. Ainsi, le glissement qui s'est produit en mars 2016, à Saint-Quay-Portrieux, durant une période météo-marine relativement calme, aurait été provoqué par un rejet non-contrôlé d'eaux usées en raison de la vétusté des canalisations (Schroëtter, 2016 ; La Presse d'Armor, 31/07/2017). De même, les **agents biologiques** peuvent amener au déclenchement d'aléas (Bird, 1994). C'est notamment le cas lorsque des arbres se retrouvent en sommet de falaise. Même en l'absence de vent, le poids exercé par les arbres sur l'abrupt peut suffire à dépasser le seuil de stabilité de la falaise. La portion de falaise instable s'éboule, entrainant alors dans sa chute les arbres qui la surmontent.

3) **Concomittance entre les durées d'action des forçages**

Pour qu'une marée de tempête conduise à une surélévation importante du plan d'eau dont les effets se manifestent sur la falaise, il faut que l'**heure de passage coïncide avec les heures de pleine-mer**. L'impact d'une marée de vives-eaux avec une tempête se produisant le même jour dépend donc de l'écart entre l'heure de pleine mer et celle des vents maximums. Selon Feuillet et al. (2012), si cet écart est supérieur à 3 h, l'impact est très faible voire inexistant car, dans ce cas, le plan d'eau se trouve presque à mi-distance entre la haute-mer et la basse-mer. C'est le cas par exemple du 3 janvier 1999 et du 13 décembre 2000 où les coefficients de marée étaient de 100. Les pics de houle générés par le passage de ces tempêtes se sont produits au moment de la basse mer ou de la période de jusant, ce qui a limité les impacts sur le littoral (Météo-France, 2013). Toutefois, en Bretagne, du fait de l'étendue spatiale du territoire et de la propagation de l'onde de marée d'ouest en est, la probabilité que le passage d'une tempête coïncide avec les heures de pleine-mer sur au moins une des façades maritimes est relativement élevée. De plus, le régime de marée semi-diurne de la Bretagne fait que la concomitance avec une tempête peut survenir deux fois dans une même journée si les vents soufflent suffisamment longtemps. La coïncidence horaire avec les pleines mers de vives-eaux sera donc d'autant plus élevée que la durée d'action de la tempête sera longue et que sa vitesse de déplacement sera faible.

4) **La période d'analyse des forçages**

La question du **pas de temps** utilisé pour la détermination des facteurs déclenchants se pose également. Pour les coefficients de marée et les états de mer, c'est la valeur journalière qui a été choisie tandis que pour les précipitations, ce sont les cumuls antérieurs sur deux jours qui ont été utilisés. Est-ce que deux jours sont suffisants ? Faut-il augmenter la période d'analyse lorsque les conditions météo-marines sont peu dynamiques sur les deux jours précédant le mouvement de terrain ? C'est le cas par exemple de l'éboulement qui s'est produit le 10 octobre 2017 à Saint-Cast-le-Guildo où les conditions météo-marines étaient relativement calmes durant les deux jours précédant l'aléa alors que la semaine le précédant présentait un fort cumul de précipitations. Toutefois, augmenter la période d'observation des forçages rend la détermination de la part de chacun encore plus complexe, en raison de leur occurrence multiple sur ce pas de temps plus long (Letortu, 2013).

5) **Variabilité des paramètres météorologiques à l'échelle locale**

A l'échelle locale, les paramètres météorologiques peuvent fortement variés, notamment les cumuls de précipitations (cf. chapitre 4). Or, dans notre analyse, les cumuls de précipitations et les vitesses de vent sont des valeurs utilisées sur 22 stations de Météo-France réparties sur l'ensemble du territoire breton (Annexe 6). Ces **stations peuvent être éloignées** des lieux d'érosion de plus de 20 km (et à des altitudes nettement supérieures à celle du niveau de la mer). En conséquence, les valeurs météorologiques attribuées à un site peuvent ne pas refléter la réalité en raison de sa distance avec la station météorologique la plus proche et des effets locaux.

6) **Facteurs de préparation : la morphologie du système côtier**

La préparation des caractéristiques morphologiques de la plage et du versant peut être déterminante dans le déclenchement d'un mouvement de terrain lors de la survenue d'un événement météo-marin (Letortu, 2013). Le seuil de déclenchement d'un forçage donné n'est effectivement pas unique. Si le matériel a été fragilisé au préalable, tout facteur, quelle que soit son intensité, sera capable de générer un mouvement de terrain (Rosser et al., 2007). À l'inverse, si le système côtier a récemment subit une érosion intense, une marée de tempête ou de fortes précipitations peuvent se produire sans provoquer de départ de matériel en raison de **phénomènes de « purges »** antérieurs (Letortu, 2013). Ainsi, des forçages capables d'être déclenchants se produisent sans conséquence. C'est le cas par exemple de la marée de tempête du 3 mars 2014. Malgré un coefficient de marée élevé (114), cette tempête n'aurait produit aucune érosion de falaises meubles car toutes les portions de falaises instables auraient été activées un mois auparavant, lors de la marée de tempête du 2 février 2014. Les masses effondrées auraient alors servi de protection au pied des falaises, diminuant ainsi leur sensibilité aux actions marines qui suivirent. Dans ces conditions, ils participent à diminuer le degré de stabilité de la falaise et constituent des facteurs préparatoires. Le départ des matériaux dépendra donc de la taille et de la localisation des précédents. Les falaises héritent des changements environnementaux passés et leur comportement dépend de la dégradation à long terme des matériaux (Griggs et al., 1994 ; Swenson et al., 2006 ; Lim et al., 2011). Cela suggère qu'au moins un quatrième facteur détermine l'apparition et l'ampleur des phénomènes d'érosion de falaises meubles, à savoir la **morphologie du système côtier** (falaise-estran). La morphologie du littoral est dépendante du contexte météo-marin qui peut modifier considérablement la forme du profil de plage suite à des conditions d'agitation marine élevées (Morton et al., 1995 ; Forbes et al., 2004 ; Walkden et Hall, 2005 ; Houser et al., 2008 ; Senechal et al., 2015). Ainsi, un profil de plage bas atténuera moins l'énergie des vagues arrivant à la côte qui seront alors plus susceptibles d'éroder le pied de falaise. Les impacts occasionnés par les tempêtes sur les falaises meubles dépendent donc non seulement de la conjonction de facteurs météo-marins mais aussi de la morphologie pré-tempête du système côtier à l'érosion. La dichotomie entre les forçages préparatoires et déclenchants n'est pas toujours évidente. Ceci explique pourquoi il est difficile de déterminer des seuils morphogènes pourtant utiles dans l'évaluation du risque d'érosion et la protection des secteurs côtiers (Blaise, 2017).

Conclusion intermédiaire

L'analyse historique régionale (1900-2018) présentée dans ce chapitre montre l'intérêt de recenser les phénomènes d'érosion passés. L'analyse du contexte météorologique et marégraphique lors des phénomènes d'érosion permet effectivement de définir des seuils météo-marins au-delà desquels il y a un risque de déstabilisation de falaise et d'identifier les forçages météo-marins dominants. Le recensement des phénomènes d'érosion passés permet d'augmenter l'acquis d'expérience et donc aide à évaluer ce qui peut se passer dans l'avenir (Costa, 1998).

Le réel inconvénient de la réalisation d'un tel historique est qu'il est coûteux en temps. Cette méthode ne peut pas non plus offrir l'assurance de l'exhaustivité (Hénaff et al., 2018). Toutefois, la construction de cet historique, basé sur de nombreuses archives et bases de données, a permis d'identifier la répartition spatio-temporelle des phénomènes d'érosion depuis le début du 20^{e} siècle et les principaux forçages impliqués. Les côtes nord et ouest de la Bretagne sont les plus impactées et l'érosion se fait majoritairement entre les mois de janvier et mars. La conjonction des facteurs marins et subaériens détermine la majorité des phénomènes d'érosion de falaises meubles observés (68 % des aléas analysés). Cependant, les précipitations peuvent suffire au déclenchement de mouvements de terrain sans intervention d'autres forçages (24 % des aléas). Les falaises meubles sans soubassement rocheux apparaissent plus sensibles aux processus marins et notamment à l'action érosive des houles. À l'inverse, les falaises composites semblent être plus sensibles aux événements impliquant de fortes précipitations. La présence d'une plateforme d'érosion marine dégagée en pied de falaise atténue l'effet des actions marines et renforce ainsi la contribution relative des précipitations.

Il est encore présomptueux de vouloir prévoir le lieu et le moment de déclenchement des mouvements de terrain (Letortu, 2013). Toutefois, les observations réalisées dans cette étude par des approches statistiques et naturalistes constituent une source d'informations importante pour la prévention et la prévision du risque d'érosion des falaises meubles. Bien que pouvant être chronophage, cet inventaire est relativement simple à réaliser à partir d'archives et d'enquêtes de terrain. Il pourra continuer à être alimenté par les aléas d'érosion à venir.

Pour améliorer la compréhension des facteurs déclenchants et des paramètres qui contrôlent l'érosion des falaises meubles, l'analyse doit être réalisée à l'échelle locale. La quantification du recul sur les sites ateliers sélectionnés et sur différentes échelles de temps donne la possibilité de mieux identifier les forçages météo-marins et anthropiques responsables. L'analyse du recul des falaises meubles à l'échelle historique récente et la détermination des processus physiques impliqués sur les sites d'étude font l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE 6 : Quantification des taux de recul à l'échelle historique récente (1950-2015)

À l'exception de quelques travaux portant sur la dynamique de falaises meubles costarmoricaines (Pinot, 1993 ; Bonnot-Courtois et Lafond, 1995 ; Pinot, 1997 ; Biville, 2004), la cinématique des falaises meubles en Bretagne a été rarement quantifiée. L'érosion des falaises est caractérisée par des mouvements de terrain sporadiques qui se produisent et se répètent sur la période historique (qui correspond, ici, à la période contemporaine des historiens). Mais ces aléas ne sont généralement pas suffisamment fréquents pour être forcément observés annuellement en raison de leur dépendance aux conditions météo-marines. Par ailleurs, dans l'étude des risques d'érosion, toute projection des évolutions futures (souvent plusieurs décennies) des littoraux à falaise meubles nécessite de connaître *a minima* son comportement antérieur sur une période suffisamment longue pour être validée statistiquement (Carpenter et al., 2012). Pour ces raisons, le recul des falaises meubles doit être analysé à l'échelle historique, permettant d'intégrer ainsi la variabilité climatique. En effet, bien que les forçages météo-marins agissent saisonnièrement, leur intensité varie d'une année à une autre ou sur des périodes temporelles plus longues, décennales ou séculaires, par exemple (Hénaff et al., 2013 ; Brooks et Spencer, 2014 ; Joyal et al., 2016 ; Stéphan et al., 2018). De plus, certaines années sont plus riches en événements tempétueux et en marées à fort coefficient, et elles sont susceptibles alors d'entrainer une érosion de la côte (cf. chapitre 5). Giuliano (2015) propose d'attribuer à l'accumulation de ces épisodes pluvieux et tempétueux, les tendances évolutives de la côte aux échelles décennale à séculaire.

L'objectif de ce chapitre est de reconstituer les vitesses d'évolution des falaises meubles sur les sites d'étude, sur les soixante dernières années et d'identifier les forçages météo-marins et anthropiques responsables. La diversité géomorphologique des sites d'étude offre également la possibilité de comparer les taux moyens et d'identifier des facteurs de prédisposition. Enfin, cette analyse doit permettre de déterminer la contribution des forçages régionaux sur l'érosion des falaises meubles en comparaison de celles prévalant dans d'autres contextes connus dans la littérature comme les falaises du nord du Québec ou celles du sud de l'Angleterre où ces forçages ont été analysés en détail.

Afin de quantifier le recul des falaises meubles à l'échelle historique, diverses techniques basées sur la localisation du trait de côte au cours du temps (pied ou sommet de falaise utilisé comme marqueur) sont utilisées. Ainsi, on peut citer les cartes anciennes (Hapke et al., 2006 ; Dornbusch et al., 2008 ; Brooks et al., 2012), les plans cadastraux (Albinet, 2001 ; Biville, 2004), les photographies aériennes verticales (Harper, 1978 ; Bernatchez et al., 2012 ; Fraser et al., 2017), les levés LIDAR (Hobbs et al., 2010 ; Obu et al., 2017), les imageries satellitaires (Boggett et al., 2000 ; Maiti et Bhattacharya, 2009) ou encore la technique SfM (pour « Structure from Motion ») qui permet de représenter les surfaces 2D en 3D en utilisant les principes de photogrammétrie à partir de photographies aériennes obliques couplées à des mesures topographiques (Westoby et al., 2012 ; Long et al., 2016 ; Warrick et al., 2016).

Bien que les cartes anciennes et les plans cadastraux permettent de connaitre la cinématique des falaises sur les deux derniers siècles et les tendances générales à long terme, leurs précisions et leurs résolutions sont généralement faibles et ne donnent pas souvent la possibilité de connaitre les situations intermédiaires (évolutions pluri-décennales, à moyen terme) qui sont pourtant nécessaires pour comprendre l'évolution des falaises meubles. Le recul des falaises est effectivement caractérisé par des phases d'accélération et de ralentissement liées à l'évolution de forçages naturels (ex : variations de la fréquence des tempêtes, des précipitations) et de forçages anthropiques (Hénaff et al., 2013). À l'inverse, les techniques de levés topographiques à haute résolution (photogrammétrie, LIDAR, technique SfM) et l'imagerie satellitaire permettent d'avoir une bonne précision mais leur mise en œuvre encore trop

récente, ne permet pas d'analyser les tendances de l'évolution sur le moyen terme (Jego, 2003 ; Westoby et al., 2018).

Ainsi, la comparaison de photographies aériennes verticales semble être l'approche la plus appropriée pour analyser la cinématique des falaises meubles à l'échelle pluri-décennale, et est donc utilisée pour quantifier l'érosion sur les sites d'étude. Bien que cette technique puisse poser certains problèmes (ex : distorsions topographiques, erreur de photo-interprétation), elle permet de cerner les évolutions des agents naturels et anthropiques (Hénaff et al., 2013). Ainsi, par l'intermédiaire de cette méthode, ce chapitre a pour objectif de répondre aux questions suivantes :

1) Quel est le taux de recul à moyen terme des falaises meubles sur les sites d'étude ?

2) Y-a-t-il eu des évolutions de la cinématique des falaises meubles sur l'échelle historique récente (1950-2015) ? Et, dans l'affirmative, quelles sont alors les raisons de ces évolutions ?

3) Les taux de recul obtenus sur les sites d'étude bretons sont-ils comparables à ceux de côtes à falaises meubles situées dans des contextes environnementaux différents ?

La première partie de ce chapitre précisera la méthodologie de quantification du recul des falaises meubles à partir de la comparaison de photographies aériennes ainsi que les marges d'erreur associées. La deuxième partie présentera l'analyse de l'érosion sur les sites d'étude en interprétant les changements de tendance par le biais du contexte environnemental. Enfin, la dernière partie établira une synthèse de l'érosion pluri-décennale sur les sites, une comparaison avec les reculs mesurés sur d'autres linéaires de falaises meubles dans le monde et présentera une discussion concernant les limites méthodologiques de l'approche.

6.1- Méthodologie

6.1.1- Méthode de quantification du recul pluri-décennal

La méthode de comparaison des traits de côte à partir des photographies aériennes verticales (ou méthode dite de photo-interprétation) est une approche employée et maîtrisée depuis plusieurs dizaines d'années (Carter, 1988 ; Giuliano, 2015). Elle permet de réaliser une première quantification de la cinématique de recul des falaises. Même avec l'apparition des nouvelles technologies de télédétection, tels les LIDAR ou les images satellitales, les orthophotographies sont toujours adaptées puisque leur comparaison diachronique permet d'apprécier l'évolution du littoral sur les temps historiques récents, c'est-à-dire depuis le début du 20^{e} siècle (Dolan et al., 1980 ; Moore et Griggs, 2002 ; Costa et al., 2004 ; Dornbusch et al., 2008 ; Letortu, 2013).

Les photographies aériennes verticales utilisées dans le cadre de ce travail viennent de la base de données de l'IGN. Le choix des photographies a été guidé par leur résolution. Bien que les premières photographies disponibles remontent au début du 20^{e} siècle, les premières images réellement exploitables pour des analyses géomorphologiques datent des années 1950, suite à l'amélioration des techniques de photographie aérienne durant la seconde Guerre mondiale (Lemagny et al., 1986). Les photographies qui possèdent une trop petite échelle spatiale (inférieure à 1/26 000) n'ont pas été retenues car étant difficilement exploitables pour la photo-interprétation et la détection du trait de côte. Ainsi, les séries de photographies utilisées datent de 1948 à 2015 et présentent des échelles variant entre 1/5 000 et 1/26 000 (Tab. 9 présenté à la page 115). La méthodologie se décompose principalement en trois étapes : le processus de géoréférencement des photographies, la numérisation du trait de côte et le calcul des taux de recul basé sur la surface entre deux traits de côte successifs.

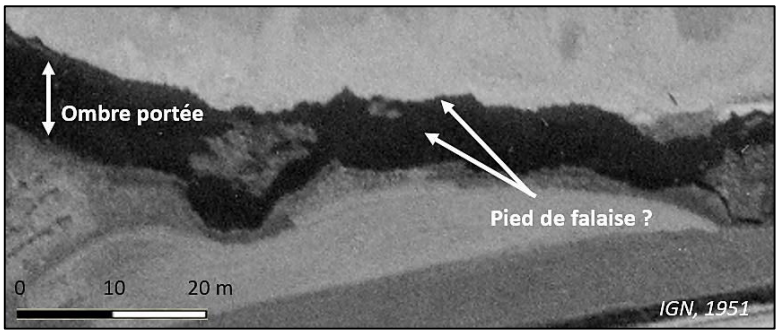
6.1.1.1- Le processus de géoréférencement

Les différentes photographies aériennes verticales issues de la base de données de l'IGN sont projetées en Lambert 93 et sont géoréférencées à partir de l'orthophotographie de 2011. Plus de 35 points de calage répartis uniformément sur chaque image ont été utilisés. Ils correspondent à des points d'amer considérés comme fixes dans le temps (ex : angles de mur ou d'ouvrages). En raison des fortes distorsions optiques que présentent les photographies aériennes, il a été choisi d'utiliser, comme outil de correction, l'algorithme *Thin Plate Spline* (TPS) qui est une méthode capable d'introduire des déformations sur des secteurs précis de l'image. Toutefois un ré-échantillonnage de type « plus proche voisin » est employé afin de ne pas changer les statistiques de l'image. Cet outil attribue à chaque pixel manquant une valeur qui est celle du pixel le plus proche et ne modifie donc pas les valeurs des pixels. Les points d'appui permettent d'obtenir, par moindres carrés, un « *Root Mean Square* » (RMS) qui correspond à l'erreur quadratique moyenne, c'est-à-dire l'erreur qu'il y a entre les données réelles et le modèle. En fonction des différents documents recalés, le RMS oscille entre 0,01 et 0,14 m.

6.1.1.2- La numérisation du trait de côte

Pour chacune des photographies géoréférencées, la ligne de côte est vectorisée manuellement via le logiciel QGIS™ au 1/150. Ici, il a été choisi de définir le trait de côte par le « sommet de falaise » car la limite du pied de falaise est plus incertaine en raison des variations des accumulations sédimentaires et des phénomènes d'ombrage, notamment dans les anses (Bray et Hooke, 1997 ; Stéphan, 2008). L'exposition des falaises au nord d'un site et leur ombre portée sur l'estran rend effectivement difficile la distinction entre le sommet, la base et le haut de plage, quelle que soit l'heure des prises du vue aériennes (Fig. 97). Ceci est notamment le cas pour trois des six sites d'étude (Pléneuf-Val-André, Trédrez-Locquémeau et Locquirec).

Fig. 97 : Photographie aérienne de 1951 de l'anse du Moulin de la Rive, à Locquirec, illustrant la difficulté d'identifier le pied de falaise en raison du masquage par son ombre portée.



6.1.1.3- Calcul des surfaces perdues et des taux de recul

Le calcul des taux de recul est basé sur la méthode surfacique qui utilise l'aire comprise entre deux traits de côte. Cette méthode fréquemment utilisée pour étudier la cinématique des littoraux (ex : (Albinet, 2001 ; Chaaban et al., 2012 ; Letortu et al., 2014) serait plus fiable que l'approche par la ligne de base qui utilise des transects perpendiculaires au trait de côte sur des points aléatoires (et pas nécessairement représentatifs) (Letortu, 2011). La méthode basée sur les aires apparait plus pertinente pour étudier la cinématique des falaises meubles dont l'évolution se fait souvent par des mouvements de masse très locaux. C'est d'ailleurs la méthode préconisée dans le guide méthodologique d'élaboration des plans de prévention des risques (MEDDE, 2014) pour analyser l'évolution des côtes à falaise.

La valeur des surfaces entre deux traits de côte est connue par le tracé des polygones entre les portions de côte exploitables, où la précision de la position du sommet de falaise est suffisante (Fig. 98). Les sections où le tracé du rivage le plus récent a progressé par rapport à une position plus ancienne ont été

exclues des mesures. En effet, la comparaison de photographies aériennes verticales peut montrer des incohérences locales où la falaise semble « avancer » car le processus de géoréférencement ne permet pas toujours de corriger complètement les distorsions radiales et tangentielles de la lentille puisqu'il ne prend pas en compte le relief (Muraz et al., 1999). Le tracé des polygones permet d'obtenir les surfaces perdues en haut de falaise entre les traits de côte. Ces surfaces perdues sont pondérées par le linéaire côtier et par l'intervalle de temps entre les deux dates. Ainsi, le taux moyen annuel de recul peut être obtenu par la formule suivante :

$$\mathbf{Tx} = \frac{\mathbf{S}}{\mathbf{L \times A}}$$

Avec *Tx, le taux de recul moyen annuel (m/an) ;*
S, la surface érodée entre deux sommets de falaise (m^2) ;
L, le linéaire de falaise sur lequel la surface est mesurée (m) ;
A, le nombre d'années séparant les deux levés.

Fig. 98 : Principe de calcul des taux de recul basé sur la surface perdue.

Dans cet exemple, l'aire perdue entre 1952 et 2011 (en jaune) est de 3982 m² en 59 ans sur un linéaire de falaise meuble de 183 m soit une vitesse moyenne de 0,37 m/an.

6.1.1.4- Quantification de la marge d'erreur

Avant d'analyser les distances et les taux de recul obtenus sur plusieurs périodes de temps, il est important d'estimer la marge d'erreur associée aux valeurs calculées. Ces méthodes de quantification du recul possèdent, en effet, une part d'incertitude provenant de trois sources d'erreur (Letortu, 2013) :

- la **qualité** (résolution) des photographies aériennes (les photographies à disposition présentent souvent une résolution de l'ordre de 0,45 m) (Tab. 9) ;
- le **processus de géoréférencement** (le calage de l'image peut varier significativement notamment en fonction du relief et de l'angle de prise de vue) (Fig. 99) ;
- la **digitalisation des données** (interprétation du haut de falaise lors de la vectorisation) qui est parfois difficile notamment dans les zones où la végétation est abondante.

L'addition de ces trois sources d'erreur donne alors la **marge d'erreur totale sur la position du trait de côte**. Celle-ci varie en fonction de la qualité des documents et de leur traitement.

La **marge d'erreur maximale sur le taux de recul** correspond alors à l'addition de la marge d'erreur totale des deux traits de côte rapportée à l'intervalle de temps les séparant (Bray et Hooke, 1997). Elle peut être obtenue avec la formule suivante :

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{eT1 + eT2}}{\mathbf{A}}$$

Avec E, la marge d'erreur maximale sur le taux de recul (m/an) ;
eT1, la marge d'erreur totale sur la position du trait de côte le plus ancien (m) ;
eT2, la marge d'erreur totale sur la position du trait de côte le plus récent (m) ;
A, le nombre d'années séparant les deux levés.

Fig. 99 : Exemple de problème de distorsion créé par l'angle de prise de vue des photographies (bourg de Pléneuf-Val-André entre 1975 et 2011).

La combinaison de toutes ces sources d'incertitudes peut amener à une marge d'erreur globale élevée, ce qui peut rendre délicat l'appréciation des taux de recul qui sont parfois dans la marge d'incertitude (Letortu, 2013 ; Basara, 2015 ; Giuliano, 2015). La marge d'erreur E indique effectivement le taux de recul minimum perceptible (Bray et Hooke, 1997). Quand l'erreur E est égale ou plus grande que le taux de recul déterminé entre deux dates, le retrait calculé n'est pas significatif. Une plus faible marge d'erreur peut être possible pour une plus grande période de comparaison parce que les erreurs liées à la numérisation deviennent proportionnellement moins élevées lorsque les distances de retrait augmentent. La difficulté, ici, est donc d'avoir des données précises notamment sur des périodes de temps court et quand le recul est lent.

Dans le cas des sites d'étude, l'erreur liée à la résolution du document est estimée comme équivalente à la taille de numérisation du pixel soit ± 0,11 à 0,94 m pour les documents utilisés ayant la moins bonne résolution (Tab. 9). Le processus de rectification est également à l'origine d'une erreur maximale d'1 pixel, soit ± 0,11 à 0,94 m. Enfin l'erreur de numérisation du trait de côte est estimée à 3 pixels de largeur au sein desquels se trouve le sommet de falaise, soit ± 0,33 à 2,82 m. Cette dernière source d'erreur peut être élevée et varie spatialement sur l'image notamment en raison de l'abondance de la végétation qui peut cacher le sommet de falaise, des ombrages et des reflets qui rendent plus difficile l'interprétation. Ainsi, la marge d'erreur totale sur la position du trait de côte peut atteindre jusqu'à ± 4,71 m pour les photographies de mauvaise qualité et peut descendre à 0,53 m pour celles de meilleure qualité.

La marge d'erreur relative sur le recul est estimée entre ± 1,07 à 6,86 m selon les périodes d'observation qui, rapportée à l'intervalle de temps correspond à une marge d'erreur maximale sur les taux de recul comprise entre 0,07 et 1,23 m/an (Tab. 9).

Ces marges d'erreurs plurimétriques semblent cohérentes avec celles obtenues par de précédentes études menées sur des littoraux à faible évolution (Gaillot et Chaverot, 2001 ; Hénaff et al., 2002 ; Pierre et Lahousse, 2003). La résolution insuffisante des photographies aériennes pour la numérisation du trait

de côte, la morphologie des sites ainsi que l'abondance de végétation sont responsables de cette marge d'erreur élevée.

Tab. 9 : Qualité des photographies aériennes utilisées pour chacun des sites d'étude et marges d'erreur sur les sommets de falaise numérisés.

				Marge d'erreur absolue (m)					Marge d'erreur relative	
Site d'étude	**Année**	**Échelle**	**Format***	**Erreur résolution**	**Erreur ortho-rectification**	**Erreur numérisation**	**Erreur totale**	**Période**	**Distance (m)**	**Taux (m/an)**
Pléneuf-Val-André	1948	1/25 403	NetB	0,55	0,55	1,65	2,75	1948-1975	3,60	0,13
	1975	1/7 808	NetB	0,17	0,17	0,51	0,85	1975-1992	3,09	0,18
	1992	1/20 352	NetB	0,45	0,45	1,34	2,24	1992-2003	5,81	0,53
	2003	1/25 930	C	0,71	0,71	2,14	3,57	2003-2011	5,97	0,75
	2011	1/25 000	C	0,48	0,48	1,44	2,40	2011-2015	4,90	1,23
	2015	1/25 000	C	0,50	0,50	1,50	2,50	**Moyenne 1975-2015**	5,25	**0,08**
Plougrescant	1952	1/25 730	NetB	0,94	0,94	2,82	4,71	1952-1962	6,86	0,69
	1962	1/20 260	NetB	0,43	0,43	1,29	2,15	1962-1977	4,40	0,29
	1977	1/20 628	NetB	0,45	0,45	1,35	2,25	1977-2003	5,88	0,23
	2003	1/25 927	C	0,73	0,73	2,18	3,64	2003-2011	6,04	0,75
	2011	1/25 000	C	0,48	0,48	1,44	2,40	2011-2015	4,90	1,23
	2015	1/25 000	C	0,50	0,50	1,50	2,50	**Moyenne 1952-2015**	7,21	**0,11**
Trédrez-Locquémeau	1951	1/4 940	NetB	0,11	0,11	0,32	0,54	1951-1972	2,79	0,13
	1972	1/8 202	NetB	0,45	0,45	1,35	2,25	1972-1997	5,15	0,21
	1997	1/20 088	C	0,58	0,58	1,74	2,90	1997-2015	5,40	0,30
	2015	1/25 000	C	0,50	0,50	1,50	2,50	**Moyenne 1951-2015**	3,04	0,07
Locquirec	1951	1/4 937	NetB	0,11	0,11	0,32	0,54	1951-1958	1,07	0,15
	1958	1/5 025	NetB	0,11	0,11	0,32	0,53	1958-1980	1,57	0,07
	1980	1/9 839	NetB	0,21	0,21	0,62	1,04	1980-2015	3,54	0,10
	2015	1/25 000	C	0,50	0,50	1,50	2,50	**Moyenne 1951-2015**	3,04	**0,05**
Telgruc-sur-Mer	1951	1/5 154	NetB	0,11	0,11	0,33	0,56	1951-1976	2,71	0,11
	1976	1/19 770	NetB	0,43	0,43	1,29	2,15	1976-1993	5,11	0,30
	1993	1/20 528	C	0,59	0,59	1,77	2,96	1993-2012	3,96	0,21
	2012	1/10 000	C	0,20	0,20	0,60	1,00	2012-2015	3,50	0,88
	2015	1/25 000	C	0,50	0,50	1,50	2,50	**Moyenne 1951-2015**	3,06	**0,05**
Plozévet	1977	1/20 449	NetB	0,44	0,44	1,32	2,20	1977-1993	3,20	0,2
	1993	1/20 618	C	0,20	0,20	0,60	1,00	1993-2012	2,00	0,11
	2012	1/10 000	C	0,20	0,20	0,60	1,00	2012-2015	3,50	1,17
	2015	1/25 000	C	0,50	0,50	1,50	2,50	**Moyenne 1977-2015**	4,70	**0,12**

***NetB** : Noir et blanc ; **C** : Couleur

6.1.2- Méthode d'identification des forçages naturels et anthropiques

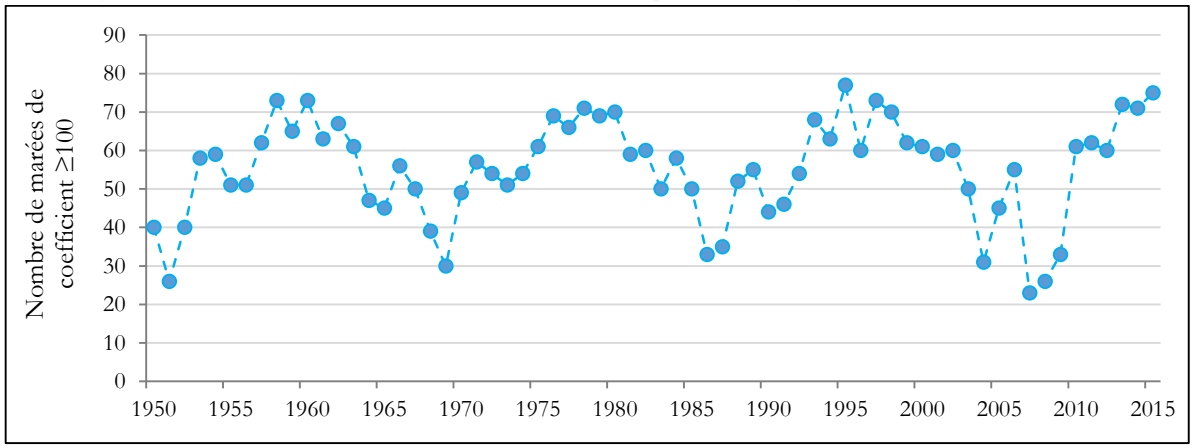
La dynamique à long terme du trait de côte est commandée par des forçages naturels agissant à différentes échelles spatio-temporelles (Thom et Hall, 1991 ; de Vriend et al., 1993 ; Fenster et al., 1993 ; Hénaff et al., 2013 ; Castelle et al., 2017). Les forçages marins et subaériens sont modulés par des épisodes ponctuels (ex : pluie intense lors d'un orage) mais présentent aussi des variations sur des pas de temps pluriannuels à pluri-décennaux dont l'effet sur le littoral se fait sentir à l'échelle historique récente (Thom et Hall, 1991). De même, les aménagements des zones côtières peuvent avoir un impact sur le littoral à l'échelle de plusieurs années (Paskoff, 1985 ; Pinot, 1998 ; Hapke et al., 2013).

Afin d'étudier l'influence des forçages naturels et anthropiques sur l'échelle décennale, l'analyse des taux de recul est donc, ici, couplée avec l'analyse du contexte environnemental. Parmi les forçages météo-marins agissant sur l'érosion des falaises, trois forçages pour lesquels on dispose de données annuelles sur plusieurs décennies sont étudiées : le nombre de jours de marées à fort coefficient, l'écart pluviométrique à la moyenne 1950-2015 et le nombre annuel de tempêtes (le seuil de vitesse de vent de 22 m/s, défini par Météo-France (2013) pour qualifier un événement de « tempête » et utilisé dans l'analyse historique (chapitre 5) est réutilisé ici).

- **Variations des amplitudes de marée**

Les amplitudes de marée sont influencées par le cycle de périodicité des éclipses, connu sous de nom de Saros (ou cycle chaldéen). Ces cycles se produisent sur environ 18,6 ans et interviennent dans la distribution des variations des amplitudes de la marée au cours des cycles réguliers des vives-eaux et des mortes-eaux sur un mois lunaire. Leur impact n'est pas négligeable sur les littoraux (Gratiot et al., 2008 ; Hénaff, 2012 ; Weill et al., 2012 ; Hénaff et al., 2015). L'influence de ce cycle est visible notamment à l'échelle décennale où des phases successives de plusieurs années comportant un grand nombre de forts coefficients de marée sont suivies de plusieurs années qui en comptent un nombre plus faible (Fig. 100).

Fig. 100 : Nombre annuel de coefficients de marée supérieurs ou égaux à 100 entre 1950 et 2015.



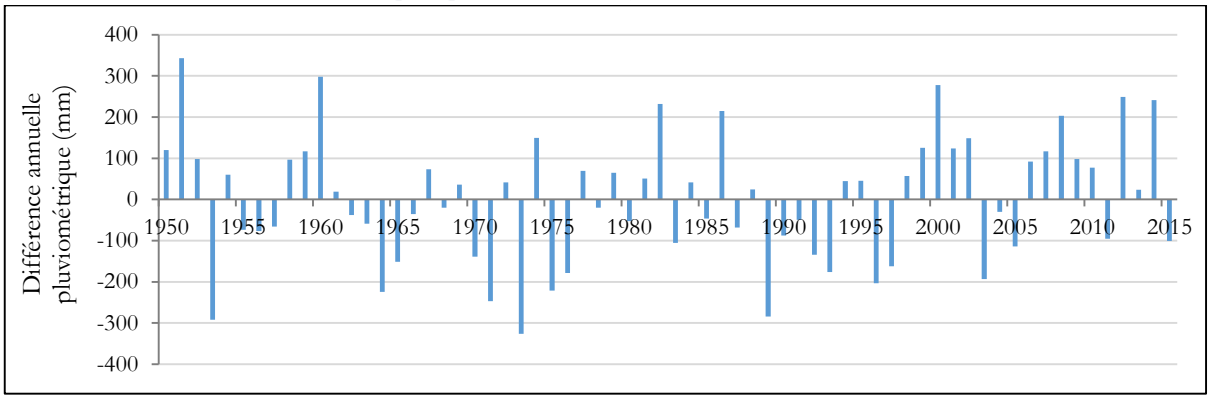
Le coefficient de marée de 100 a été retenu comme référence car l'analyse historique régionale (cf. chapitre 5) a montré que c'est notamment à partir de cette valeur que les niveaux d'eau semblent avoir un impact sur l'érosion des falaises meubles. Le nombre annuel de marées de coefficient supérieur ou égal à 100 a été obtenu à partir des valeurs indiquées sur la base de données du SHOM (https://maree.shom.fr) qui correspondent aux valeurs calculées pour le port de Brest.

Depuis 1950, quatre périodes remarquables comportent plus de 60 marées de coefficients égaux et supérieurs à 100 dans l'année : les années 1955 à 1967 ; 1975 à 1982 ; 1995 à 2000 et 2010 à 2015 (Fig. 100).

- **Variations des cumuls pluviométriques**

À l'échelle décennale, les écarts des précipitations annuelles à la moyenne 1950-2015 montre que plusieurs années déficitaires succèdent à plusieurs années excédentaires (Belleguic et al., 2012). Ces « séquences » pluvieuses et sèches pluriannuelles sont effectivement observées sur l'ensemble des stations Météo-France situées à proximité des sites d'étude (Fig. 101). Or, les années de pluviométrie excédentaire sembleraient avoir un impact dans le déclenchement des mouvements de terrain (Guidicini et Iwasa, 1977 ; Wilson, 1997).

Fig. 101 : Écarts du cumul annuel des précipitations à la moyenne 1950-2015 à la station Météo-France de Lanvéoc.



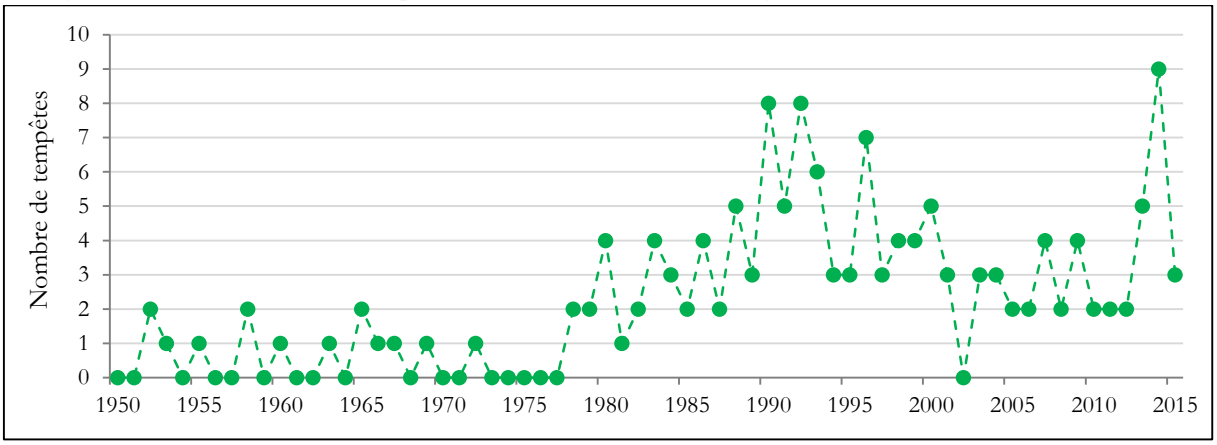
Afin d'évaluer l'influence des séquences pluvieuses dans l'évolution historique des falaises meubles, les différences pluviométriques annuelles sont calculées, pour chacun des sites, à partir des moyennes 1950-2015 des stations Météo-France les plus proches des sites d'étude (Annexe 3).

- **Variations de la fréquence des tempêtes**

À l'échelle décennale, on observe également en Bretagne, et plus largement dans le nord de l'Europe, des phases d'agitation météo-marine alternant avec des phases de « calme » météo-marin (Chaverot et al., 2008 ; O'Connor et al., 2011 ; Blaise, 2017). Ces changements de conditions anémométriques et marines en Bretagne et l'apparition d'événements tempétueux en Atlantique nord seraient liés à l'Oscillation Nord Atlantique (ONA ou NAO pour North Atlantic Oscillation) (Pirazzoli et al., 2004 ; Dodet et al., 2010 ; Masselink et al., 2014). Les successions de tempêtes ont un fort impact sur l'évolution des littoraux car elles empêchent les plages de se régénérer (Lee et al., 1998 ; Birkemeier, 1999 ; Morton, 2002 ; Ferreira, 2005 ; Anthony, 2013 ; Sunamura, 2015 ; Blaise, 2017). L'augmentation de la fréquence des tempêtes favorise aussi le cas de concomitance avec des périodes de marées à fort coefficient et ainsi l'apparition de surcotes pouvant entrainer l'érosion de la base des falaises. C'est pourquoi, dans cette étude, le nombre annuel de tempêtes est utilisé comme indicateur des états de mer. La base de données utilisée dans l'analyse historique régionale (chapitre 5) et créée à partir de l'étude « Vimers » (Roche et al., 2014) a été réexploitée pour connaitre les conditions marines sur les sites d'étude. Néanmoins, la surface de la région touchée par les tempêtes est rarement précisée et ne permet pas de savoir si son impact s'est limité à une seule façade littorale régionale, selon la force et l'orientation des vents.

Malgré la lacune des données de tempêtes avant les années 1980, liée notamment au manque d'observation et d'archivage des données (cf. chapitre 5), les chroniques des épisodes tempétueux montrent, depuis 1950, la présence de cinq périodes remarquables comportant plus de 3 tempêtes dans l'année : les années 1983-1988, 1990-1993, 1996-2000, 2007-2010 et 2013-2014 (Fig. 102).

Fig. 102 : Nombre annuel de tempêtes entre 1950 et 2015 en Bretagne (sources : données Météo-France).



- **Évolution de l'aménagement**

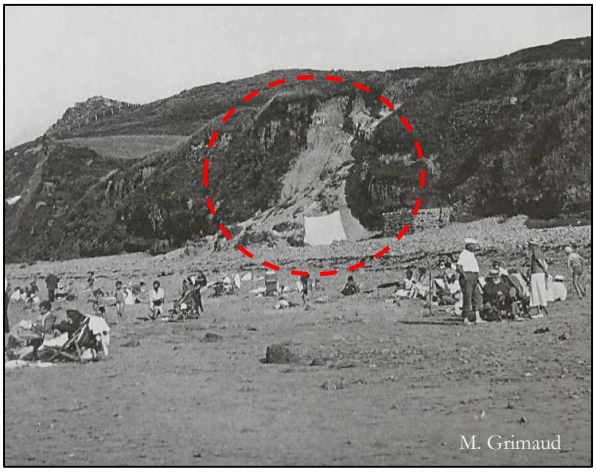
L'évolution du trait de côte est également analysée au regard de l'anthropisation du territoire afin d'identifier les éventuels impacts des aménagements sur l'érosion du littoral (Paskoff, 1985 ; Ruz, 1987 ; Del Río et al., 2013). Dans ce sens, une analyse historique de l'anthropisation des sites a été réalisée notamment à partir des photographies aériennes disponibles sur le site de l'IGN qui permettent de suivre l'évolution des territoires au cours du temps. La comparaison diachronique des paysages rend ainsi compte de la mutation des secteurs littoraux bretons qui sont passés, généralement, d'une exploitation agricole des sols à une utilisation résidentielle et de loisirs depuis la seconde moitié du 20^{e} siècle (Pinot, 1998). Cette analyse historique de l'aménagement des sites a été complétée par des recherches bibliographiques et des entretiens oraux auprès d'élus et de propriétaires riverains pour préciser la date de mise en place d'ouvrages ou de construction de maisons.

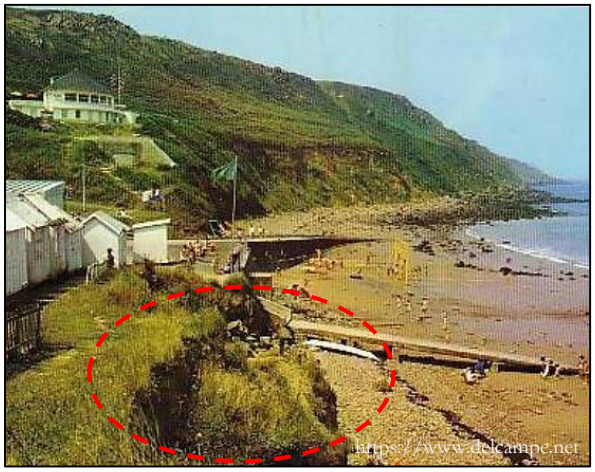
6.2- Analyse des taux de recul pluri-décennaux sur les sites d'étude

6.2.1- Pléneuf-Val-André

L'érosion affectant le site de la plage des Vallées n'est pas un phénomène récent comme en attestent d'anciennes photographies prises dans les années 1930 et le milieu du 20e siècle (Fig. 103).

Fig. 103 : Photographies de la falaise de la plage des Vallées prises dans les années 1930 (photo de gauche, vue en direction de l'est) et les années 1960 (photo de droite, vue vers l'ouest) montrant la présence de masses glissées et de zones de glissement devant le camping.





Ce phénomène d'érosion est également observé et décrit dans les documents du début du 20e siècle. L'article écrit par Y. Leclerc et Y. Milon, en 1925, à la suite de la découverte d'un gisement fossilifère indique ainsi que : « *L'attaque de la falaise par la mer détache fréquemment de larges pans de sable limoneux, s'écroulant en gradins au pied de l'escarpement* » ; « *La marée de février (1926) a enlevé une partie de nos déblais et a fait glisser une partie de la falaise* ».

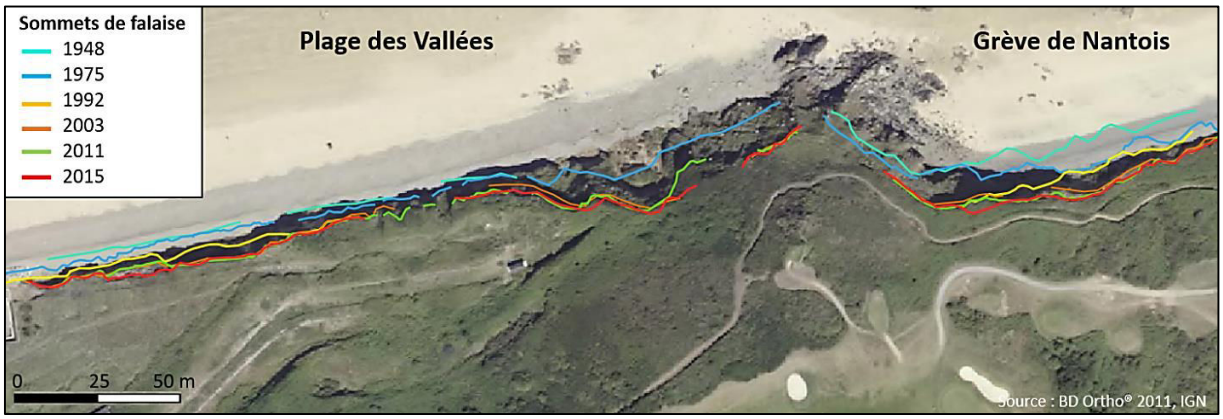
La comparaison diachronique des photographies aériennes sur le site de Pléneuf-Val-André permet de quantifier la cinématique de recul des falaises meubles entre 1948 et 2015 avec des intervalles d'observation de 4 à 27 ans (Tab. 10).

Sur les 67 ans d'analyse, entre 1948 et 2015, le taux de recul moyen des falaises du site de Pléneuf-Val-André est de 0,20 m/an. Ce taux de recul moyen pour ce site cache une certaine variabilité temporelle mais aussi spatiale sur la période de temps analysée (Tab. 10, Fig. 104). En effet, entre 1948 et 2015, le taux de recul moyen est de 0,16 m/an pour les falaises de la plage des Vallées tandis qu'il est de 0,27 m/an pour les falaises de la grève de Nantois. Sur ces soixante-sept dernières années, le secteur de Nantois semble donc avoir évolué plus rapidement que le secteur des Vallées.

Tab. 10 : Taux de recul entre 1975 et 2015 des falaises du site de Pléneuf-Val-André.

		Taux de recul (m/an)		
Période étudiée	**Durée de la période (années)**	**Plage des Vallées**	**Grève de Nantois**	**Moyenne du site**
1948-1975	27	0,10	0,25	0,16
1975-1992	17	0,26	0,28	0,27
1992-2003	11	0,25	0,35	0,29
2003-2011	8	0,04	0,25	0,12
2011-2015	4	0,15	0,19	0,17
Moyenne 1948-2015	40	**0,16**	**0,27**	**0,20**

Fig. 104 : Évolution du sommet de falaise de la plage des Vallées et de la grève de Nantois entre 1948 et 2015.



L'analyse diachronique du recul des falaises sur ces deux secteurs montre, entre la période 1948-1975 et la période 1975-1992, une augmentation généralisée du recul des falaises. Celui-ci est cependant plus marquée dans le secteur des Vallées (0,10 à 0,26 m/an) que dans le secteur de Nantois (0,25 à 0,28 m/an). En revanche, entre 1992 et 2003, on observe une augmentation de l'érosion pour les falaises de Nantois (0,35 m/an) tandis que le taux de recul des falaises des Vallées reste sensiblement le même. À l'inverse, entre 2003 et 2011, on observe une diminution du recul pour les deux secteurs. Cette diminution est à nouveau beaucoup plus marquée pour les falaises de la plage des Vallées (0,04 m/an). Entre 2011 et 2015, le taux de recul des falaises de la plage des Vallées augmente à nouveau, tandis que celui des falaises de Nantois diminue légèrement (Tab. 10).

L'étude diachronique du recul des falaises en relation avec le contexte météo-marin et le contexte anthropique permet de mieux comprendre ces évolutions (Fig. 105 et Fig. 106).

L'augmentation du recul moyen des falaises sur la période 1975-1992 semble être liée à des tempêtes plus fréquentes et des années très pluvieuses (Fig. 105). À titre d'exemple, l'année 1986 enregistre un cumul pluviométrique excédentaire de 268 mm par rapport à la moyenne 1950-2015 (651 mm) soit un surplus de 41 %. Néanmoins, l'accélération du recul pour le secteur des Vallées est à relier à l'historique des aménagements du site (Fig. 106). En effet, dans les années 1960, un camping s'installe juste en arrière des falaises des Vallées. La surface végétalisée en sommet de falaise est alors fréquemment dégradée par la circulation de voitures, par le tassement du sol sous le poids des cabines de plage ou encore par le piétinement des vacanciers, et ne se régénère pas durant les saisons hivernales. Les photos prises dans les années 1960 attestent des phénomènes d'érosion impactant les aménagements du camping situés en bord de falaise (Fig. 103). La dégradation et la réduction de la surface de végétation des sommets de falaises par les changements d'usage des sols, modifient la circulation de l'eau au sein du versant et contribuent à accroître l'infiltration des eaux de pluie et de ruissellement. Ceci représente un des facteurs auxquels le rapport EUROSION (2004) attribue la diminution de la stabilité des falaises.

Fig. 105 : Taux de recul moyen des falaises de Pléneuf-Val-André et chroniques des conditions météo-marines entre 1950 et 2015 (sources : SHOM (marées) et Météo-France (tempêtes et précipitations à la station de Saint-Cast-le-Guildo).

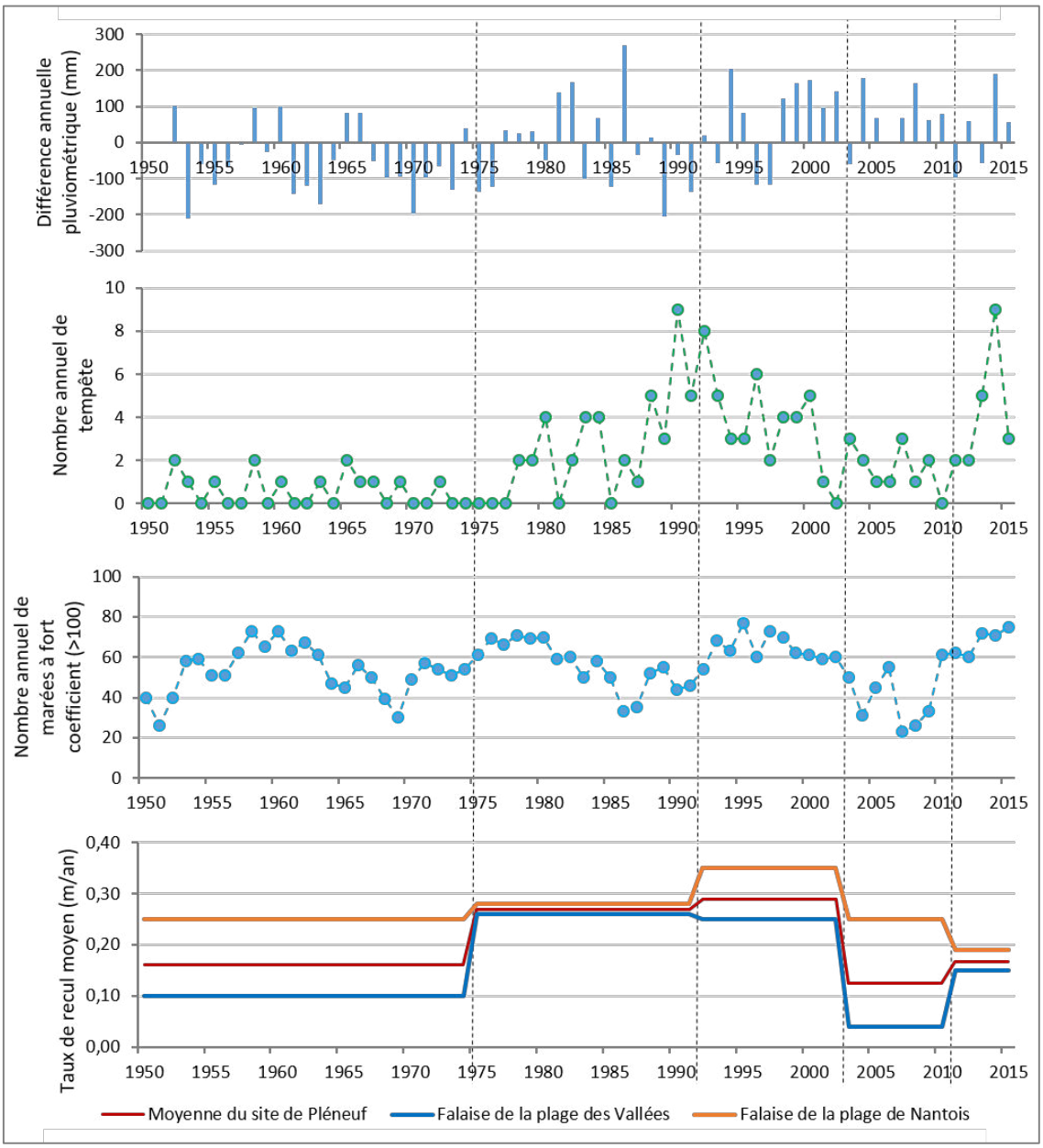
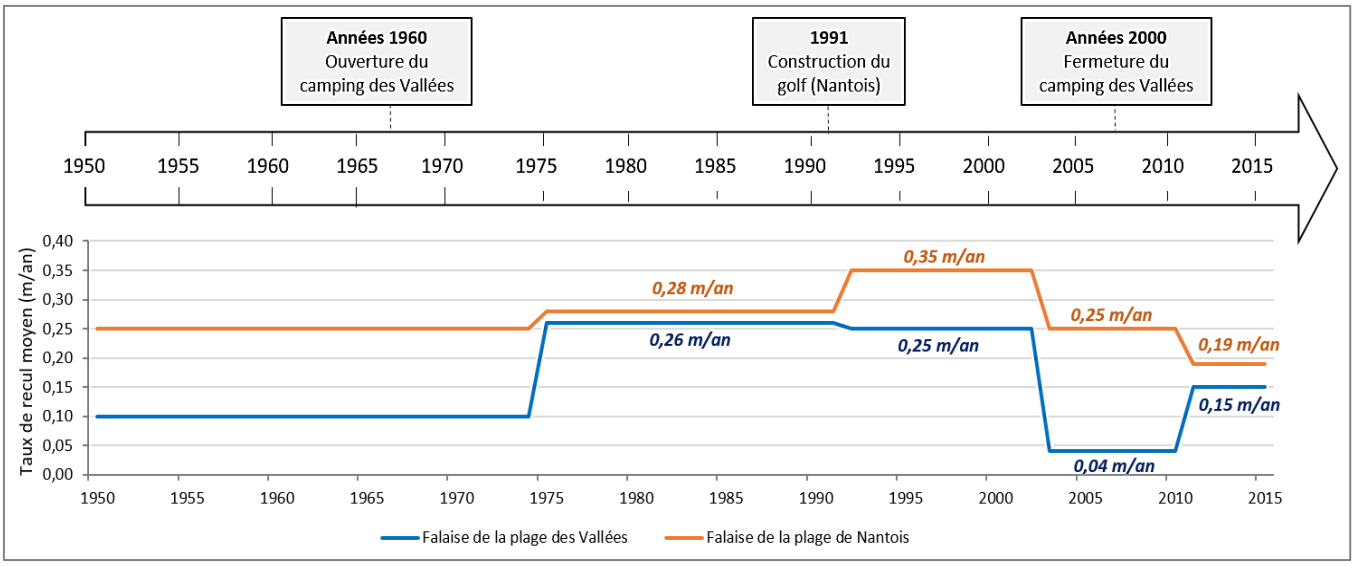
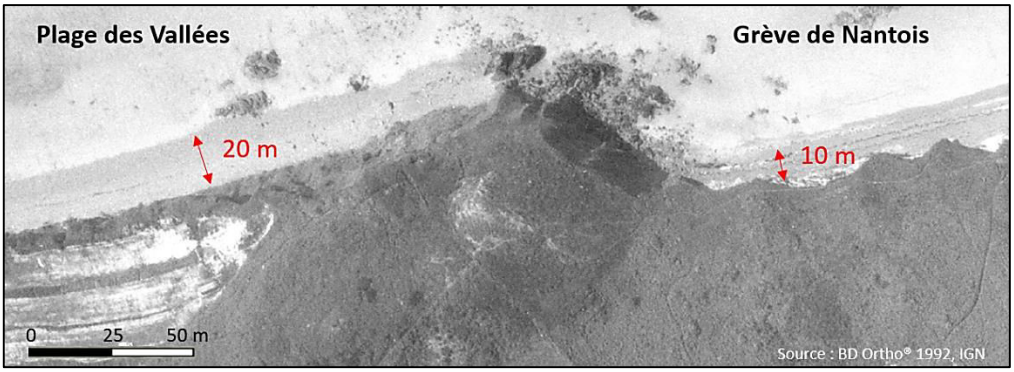


Fig. 106 : Évolution des taux de recul des falaises de la plage des Vallées et de la grève de Nantois mise en relation avec la chronique des aménagements entre 1950 et 2015.



Entre 1992 et 2003, une succession d'années pluvieuses (1998 à 2002) et tempétueuses (1992 à 2000) couplées avec des marées à fort coefficient (jusqu'à 77 jours de fortes marées en 1995) (Fig. 105) coïncide avec l'augmentation du recul des falaises de Nantois. Ceci suggère une plus grande sensibilité des falaises de Nantois aux forçages marins. Les observations de terrain montrent effectivement un cordon de galets bien moins large et moins haut au pied des falaises de Nantois qu'au pied des falaises des Vallées, assurant alors une moins bonne protection contre les actions marines (Lee, 2008) (Fig. 107). Ceci pourrait également expliquer que le taux de recul moyen des falaises de Nantois depuis 1950 a toujours été supérieur à celui des falaises des Vallées.

Fig. 107 : Différence de largeur du cordon de galets entre la plage des Vallées et la grève de Nantois.



Néanmoins, ce seul paramètre ne permet pas d'expliquer l'accélération de la vitesse de recul des falaises de Nantois entre 1992 et 2003 alors que durant cette même période, la vitesse d'évolution des falaises des Vallées est restée la même voire a légèrement diminué (Tab. 10). En considérant que ces deux secteurs sont exposés aux mêmes agents érosifs d'origine subaérienne et marine du fait de leur proximité et de leur orientation similaire, on peut s'interroger sur l'intervention de facteurs d'origine anthropique expliquant ces évolutions différentes (Fig. 106).

L'historique des aménagements sur le site de Pléneuf-Val-André montre, en effet, l'installation d'un golf en 1991, juste en arrière de la falaise de Nantois. Ce golf est venu remplacer des champs agricoles et des terres en friches. L'augmentation des taux de recul depuis cette date, pourrait ainsi être expliquée par l'apport supplémentaire d'eau liée à l'irrigation journalière des greens du golf. De plus, les greens sont des pelouses rases qui absorbent moins bien l'eau de pluie en comparaison des champs agricoles. Ainsi,

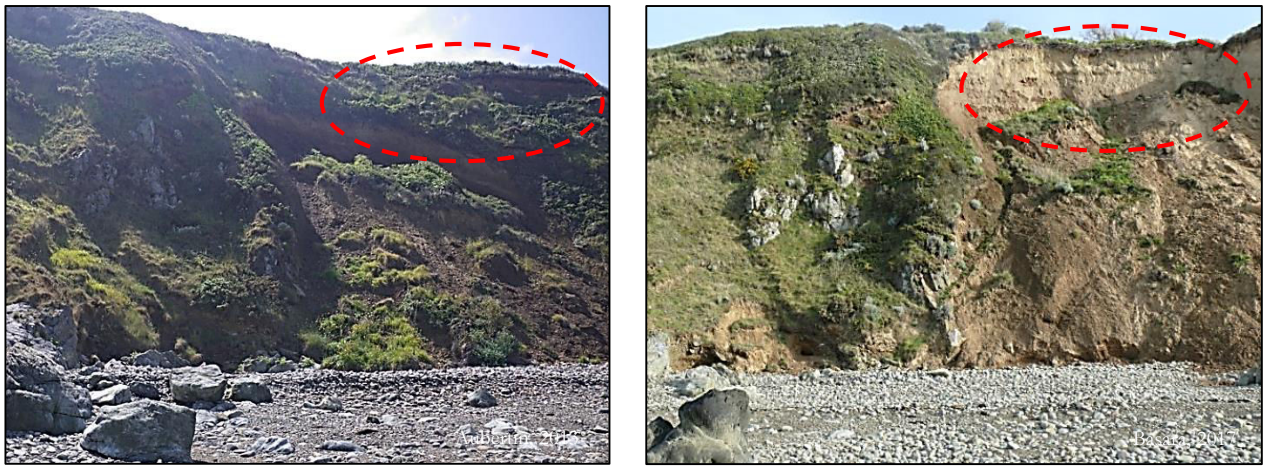
plusieurs auteurs ont déjà montré leur impact sur le recul des falaises (Meur-Ferec et al., 1991 ; Conseil de l'Europe, 1999 ; Gomes et Pinto, 2004 ; Johnstone et al., 2016).

Entre 2003 et 2011, la diminution des taux de recul observée pour les deux secteurs serait liée à des conditions marines moins favorables à l'érosion (Fig. 105). En effet, cette période est marquée par des années comportant peu de marées à fort coefficient et des tempêtes moins nombreuses. De plus, la diminution du recul beaucoup plus marquée pour le secteur des Vallées peut être reliée à la fermeture du camping au début des années 2000 (Fig. 106).La surface en sommet de falaise qui était, jusqu'alors, fréquemment dégradée (piétinement, circulation de voitures…) a pu revenir à un état « naturel » où la végétation s'est rétablie (Fig. 108). Ainsi, la végétation qui a un rôle protecteur contre l'érosion continentale en absorbant une partie de l'eau précipitée et en retenant les sols par ses racines, a pu contribuer à diminuer la sensibilité de ce secteur à l'érosion, ce qui pourrait expliquer la forte diminution des taux de recul depuis le début des années 2000 (Fig. 106).

Fig. 108 : Évolution de l'aménagement en sommet de falaise de la plage des Vallées (à droite, photographie prise dans les années 1970, à gauche, cliché pris le 03/08/2017).

Entre 2011 et 2015, il n'y a pas eu de changements dans l'aménagement du site et l'augmentation de l'érosion des falaises de la plage des Vallées pourrait être liée notamment à la succession des tempêtes de l'hiver 2013-2014 (Fig. 105). L'analyse de photographies anciennes montre effectivement des mouvements de terrain et une nette évolution de la zone de glissement située à l'est de la plage des Vallées (Fig. 109). Cette augmentation de l'érosion dans ce secteur a pu bénéficier à la grève de Nantois car, la dérive littorale étant dirigée vers l'est, la grève de Nantois est davantage alimentée par les débris issus de l'érosion en amont. L'apport sédimentaire venant de l'érosion des falaises des Vallées entre 2011 et 2015 aurait ainsi contribué à une moins grande sensibilité à l'érosion des falaises meubles de Nantois et aurait permis une diminution des taux de recul dans ce secteur.

Fig. 109 : Photographies prises le 28/12/2013 (à gauche) et le 11/04/2017 (à droite) montrant une progression vers l'arrière de la niche d'arrachement de la zone de glissement initiée à l'ouest de la pointe rocheuse de Nantois.

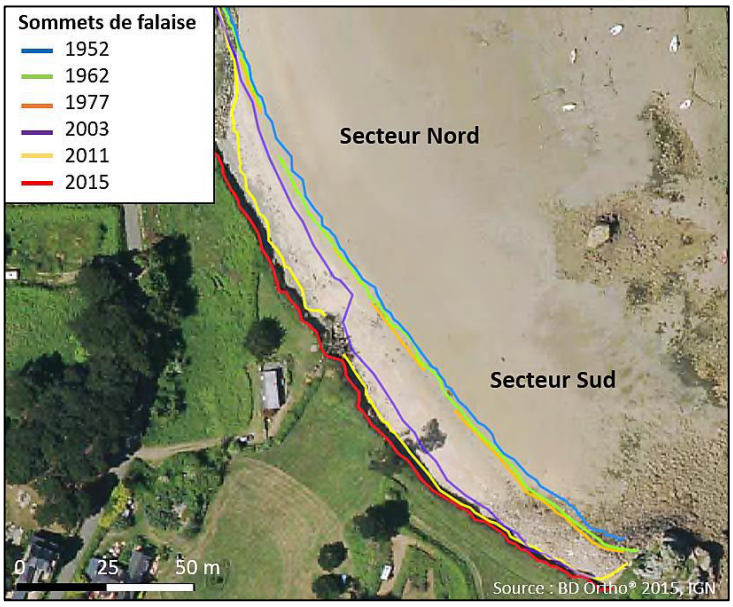


6.2.2- Plougrescant

Sur le site de Pors-Hir, à Plougrescant, l'érosion rapide des falaises meubles avait été remarquée dès la fin du 20e siècle par Pinot (1993) et Bonnot-Courtois et Lançon (2004).

Sur les 63 ans d'analyse, entre 1952 et 2015, les falaises de l'anse de Pors-Hir ont reculé en moyenne de 26 m soit un taux de recul moyen de 0,41 m/an (Fig. 110). Toutefois, la comparaison diachronique des photographies aériennes montre un recul des falaises très discontinu dans le temps et l'espace, notamment depuis la fin des années 1970.

Fig. 110 : Évolution du sommet de falaise de l'anse de Pors-Hir et taux de recul entre 1952 et 2015.

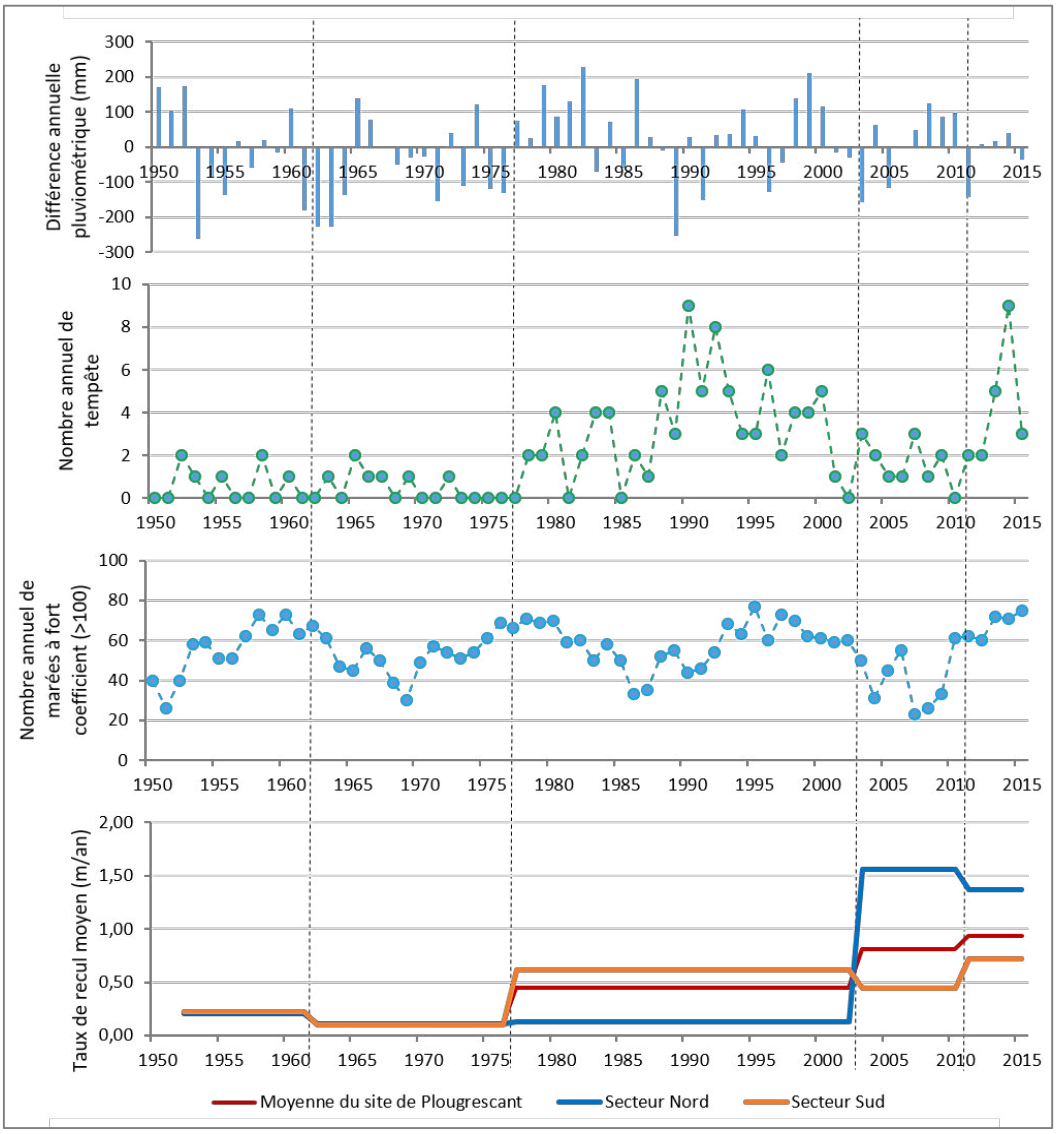


Période étudiée	Durée (années)	Secteur Nord	Secteur Sud	Moyenne du site
1952-1962	10	0,20	0,22	0,21
1962-1977	15	0,11	0,10	0,10
1977-2003	26	0,13	0,61	0,45
2003-2011	8	1,56	0,44	0,81
2011-2015	4	1,37	0,72	0,94
Moyenne 1952-2015	63	**0,40**	**0,41**	**0,41**

Avant les années 1980, le recul des falaises meubles est modéré et homogène sur l'ensemble du site (Fig. 110). Le taux de recul moyen sur la période 1952-1962 est de 0,21 m/an tandis qu'il est de 0,10 m/an sur la période 1962-1977. Ces vitesses rejoignent les valeurs des taux de recul à long terme de 0,13 m/an, obtenus par Pinot (1997) et Biville (2004), à partir de la comparaison de cadastres. L'érosion moins forte observée entre 1962 et 1977 peut être liée notamment à la succession d'années pluviométriques déficitaires ainsi qu'à des marées à fort coefficient moins nombreuses et donc à des conditions météo-marines moins favorables à l'érosion (Fig. 111).

Toutefois, vers la fin des années 1970, on observe une accélération du recul dans le secteur sud de l'anse avec un taux de retrait moyen de 0,61 m/an (Fig. 110). Cette forte dynamique régressive se déplace ensuite progressivement vers le nord et s'amplifie, notamment depuis le début des années 2000. Ainsi, entre 2003 et 2011, le recul mesuré est de 1,56 m/an pour le secteur nord contre 0,44 m/an pour le secteur sud. Alors que la période 1977-2003 est marquée par l'augmentation en fréquence des tempêtes, du nombre de grandes marées et des années pluviométriques excédentaires, les conditions météo-marines du début des années 2000 apparaissent plus calmes (Fig. 111). Les chroniques des conditions météo-marines ne suffisent donc pas à expliquer l'accélération du recul des falaises depuis la fin du 20e siècle car, même lors des périodes météo-marines peu agitées (2003 à 2012), on n'observe aucun ralentissement du recul. Entre 2011 et 2015, le recul dans la partie nord reste élevé avec un taux moyen de 1,37 m/an contre 0,72 m/an dans la partie sud (Fig. 110).

Fig. 111 : Taux de recul moyen des falaises de Pors-Hir et chroniques des conditions météo-marines entre 1950 et 2015 (sources : SHOM (marées) et Météo-France (tempêtes et précipitations à la station de l'Ile-de-Bréhat).



L'anse de Pors-Hir étant globalement homogène du point de vue lithologique mais aussi morphologique, l'explication de cette dynamique régressive discontinue dans le temps et l'espace est à mettre en relation avec l'historique de l'aménagement du site.

L'érosion et les aménagements entre les années 1970 et le début des années 2000

Avant les années 1970, le littoral de Pors-Hir était très peu aménagé et n'avait pas subi d'importante modification. L'anse présentait une forme arquée et le recul était modéré et globalement homogène sur l'ensemble du site (Fig. 110). Un large cordon de galets venait protéger la base des falaises (Fig. 112). Depuis le début des années 1970, plusieurs ouvrages bétonnés ont été installés sur l'anse de Pors-Hir et sont venus perturber l'érosion naturelle des falaises et le transit sédimentaire. En effet, en 1968, un des propriétaires riverains décide de construire un mur de 90 mètres de long en haut d'estran pour protéger sa propriété de l'érosion (Fig. 114). Quelques années plus tard, en 1979, une longue cale de 120 mètres de long et un perré sont construits au nord de l'anse. Les galets de la plage sont alors utilisés pour la construction de la grande cale et pour d'autres chantiers de proximité. De plus, en 1978, à la suite de la marée noire de l'Amoco Cadiz, les galets de la plage sont enlevés massivement au bulldozer afin d'accélérer le nettoyage des plages de galets, juste avant les vacances estivales. Ceci entraine la disparition presque totale des galets de l'anse dans les années 1980 (Fig. 113). C'est à cette période que s'accélère le recul des falaises meubles de Pors-Hir, notamment dans le secteur sud de l'anse - le secteur nord étant protégé par un mur en béton (Fig. 114).

Fig. 112 : Photographie ancienne datant d'avant la construction de la grande cale et témoignant de la présence d'un épais cordon de galets sur l'ensemble du linéaire de la plage de Pors-Hir.

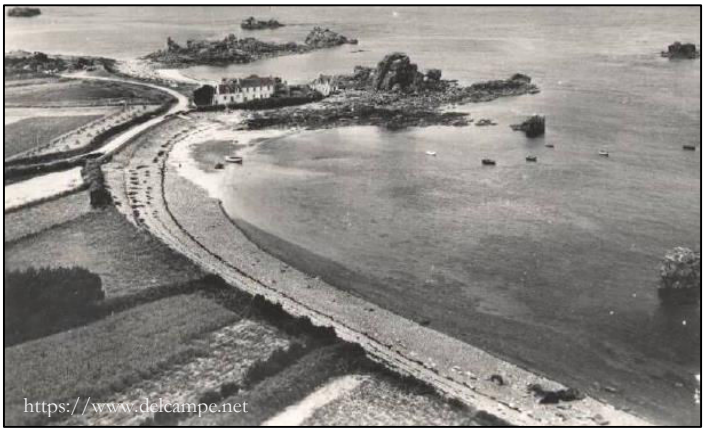
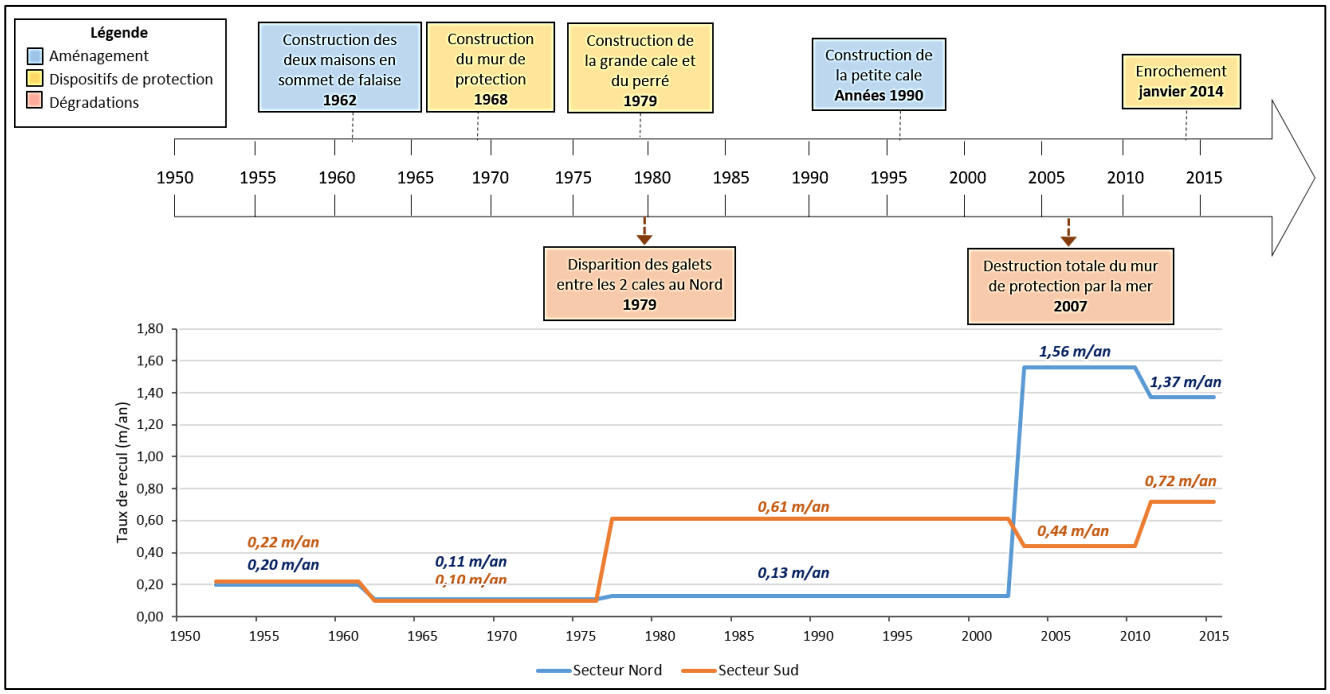


Fig. 113 : Disparition des galets de l'anse de Pors-Hir. À droite, photographie datant d'avant la construction de la grande cale et à gauche, photographie prise en 2017.

Fig. 114 : Évolution des taux de recul des falaises de l'anse de Pors-Hir mise en relation avec la chronique des aménagements.



Les galets ayant avant tout un rôle protecteur en atténuant l'énergie des vagues déferlant en pied de falaise, leur disparition sur la plage de Pors-Hir, depuis les années 1980, aurait donc favorisé l'action érosive marine et l'accélération du recul des falaises. De plus, la grande cale construite en 1979 a également pu empêcher une partie du transit des galets et de sable allant du nord vers le sud de la plage. Cette hypothèse semble être confirmée sur le terrain par une différence marquée d'altitude de la plage entre le flanc nord et le flanc sud de la grande cale (Fig. 115A). La cale a ainsi un rôle d'épi en retenant les sédiments au nord et en privant la plage de Pors-Hir, située en amont-dérive, de nouveaux apports. À la fin des années 1990, une seconde cale a été construite au milieu de l'anse (Fig. 114). La présence des deux cales a ainsi pu favoriser l'érosion par la réflexion des vagues contre les ouvrages. La présence du perré entre les deux cales (Fig. 115B), construit en 1979 et restauré en 2007, a pu également jouer un rôle combiné à celui des cales en favorisant la réflexion des vagues. Ce perré empêche également tout échange sédimentaire avec l'arrière-plage. Enfin, le mur de protection construit dans la partie nord de l'anse, a permis d'atténuer, durant la fin du 20^{e} siècle, le recul dans ce secteur mais a renforcé l'érosion à son extrémité sud par un « effet de bout ».

Fig. 115 : Ouvrages bétonnés présents dans l'anse de Pors-Hir.

A : Grande cale de mise à l'eau (la flèche montre la différence d'altitude de la plage entre le flanc sud et le flanc nord de la cale) ; B : Perré surmonté d'un parapet.

L'accélération du recul depuis les années 1970 coïncide donc avec l'installation des ouvrages bétonnés (cales, perré et mur de protection) et la disparition du cordon de galets (Fig. 114).

L'érosion depuis le début des années 2000

L'érosion accrue, depuis les années 1970, dans le secteur sud de l'anse, et l'amplification de l'agitation marine créée à l'extrémité du mur de protection amène, en 2003, à la destruction progressive de l'ouvrage depuis son extrémité sud vers le nord. Le recul de la falaise suit alors la même évolution (Fig. 116).

Fig. 116 : Destruction du mur de soutènement à Pors-Hir (29/07/2003).

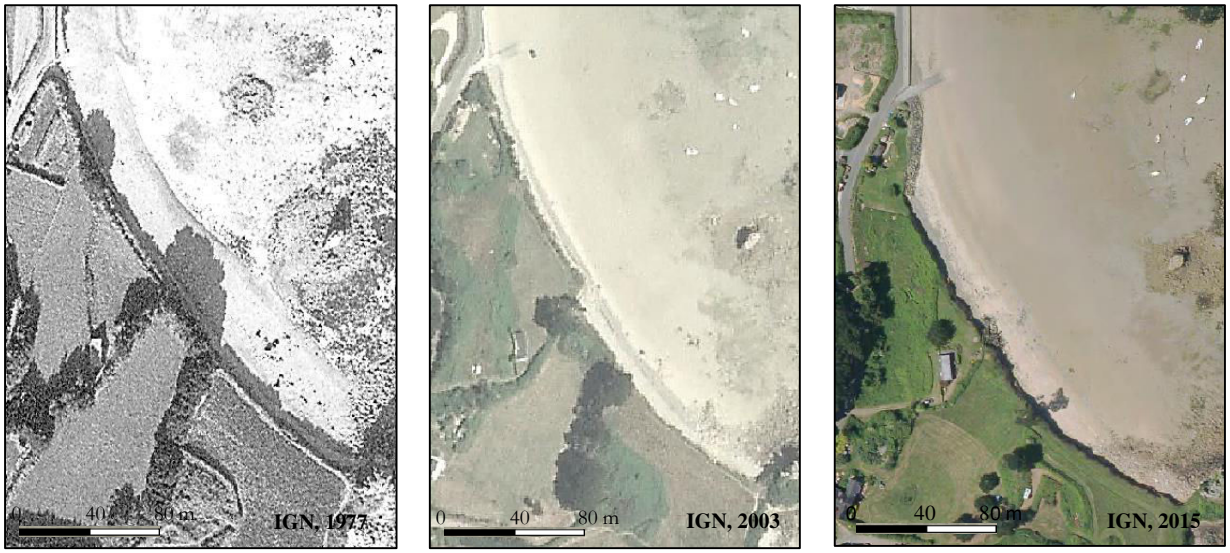
D'après Pinot (1997), ce secteur est particulièrement vulnérable du fait de l'obliquité du mur par rapport à la houle favorisant, au sud, l'accès des vagues par l'arrière, accélérant ainsi l'érosion de la falaise. Selon Bonnot-Courtois (2009), la construction de ce mur au pied de la falaise n'a pas suffi à arrêter la poursuite de l'érosion car l'eau venant des terres n'était pas drainée ou évacuée ailleurs. Ainsi, sous la pression des falaises meubles gorgées d'eau sur la façade interne du mur, des portions de l'ouvrage cèdent à tour de rôle et basculent sur le haut d'estran. En 2007, la totalité du mur de soutènement est détruit et se retrouve effondrée sur la plage de Pors-Hir (Fig. 117). Le secteur nord de l'anse, jusqu'alors peu soumis à l'érosion, voit ses falaises rattraper leur retard sur le retrait de la partie sud. On assiste alors à des retraits d'ordre métrique, notamment en période hivernale où les agents météo-marins défavorables sont réunis (Fig. 111). C'est le cas des tempêtes de mars 2008 et de l'hiver 2013 où un peu plus de 4 mètres de falaises sont érodées dans la partie nord entre novembre 2013 et février 2014 (Le Quellec, 2015). L'accélération du recul dans la partie nord du site a conduit le deuxième propriétaire à défendre son terrain par un

enrochement à l'extrémité nord de l'anse avec pour effet une turbulence accrue et un recul encore plus marqué.

Fig. 117 : Démantèlement du mur de soutènement à Pors-Hir en 2007.

L'analyse du recul des falaises meubles de l'anse de Pors-Hir, entre 1952 et 2015 montre donc l'influence des aménagements sur la cinématique de recul. Jusque dans les années 1970, la falaise de Pors-Hir avait un plan régulièrement arqué (Fig. 118), malgré un recul sensible d'une quinzaine de centimètres par an depuis un peu plus d'un siècle (Pinot, 1993). Ce tracé était en accord avec celui des laisses de pleine mer et il n'y avait pas d'amplification locale de l'énergie de la mer. Or, depuis la mise en place des ouvrages de protection, la morphologie de l'anse a été modifiée et le recul de la falaise s'est accéléré.

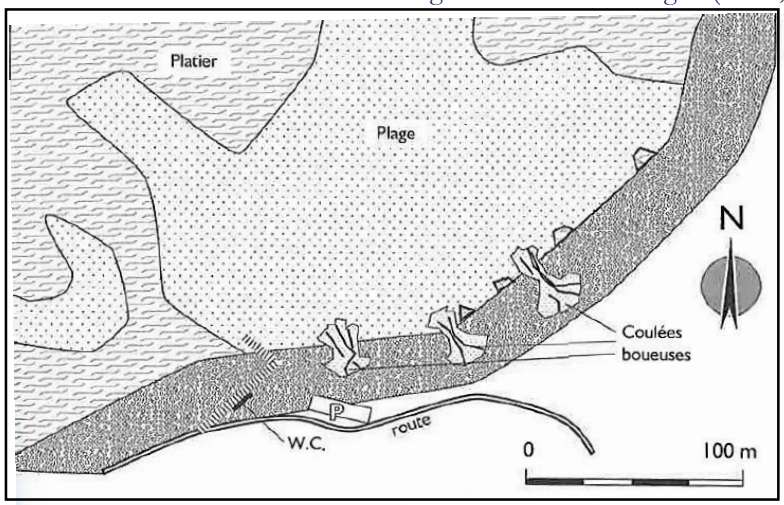
Fig. 118 : Évolution morphologique de l'anse de Pors-Hir (de gauche à droite : en 1977, 2003 et 2015).



6.2.3- Trédrez-Locquémeau

Le recul des falaises de Notigou avait également été repéré à la fin du 20e siècle par J.-P. Pinot (1993) (Fig. 119).

Fig. 119 : Coulées boueuses observées le long de la falaise de Notigou (Pinot, 1993).



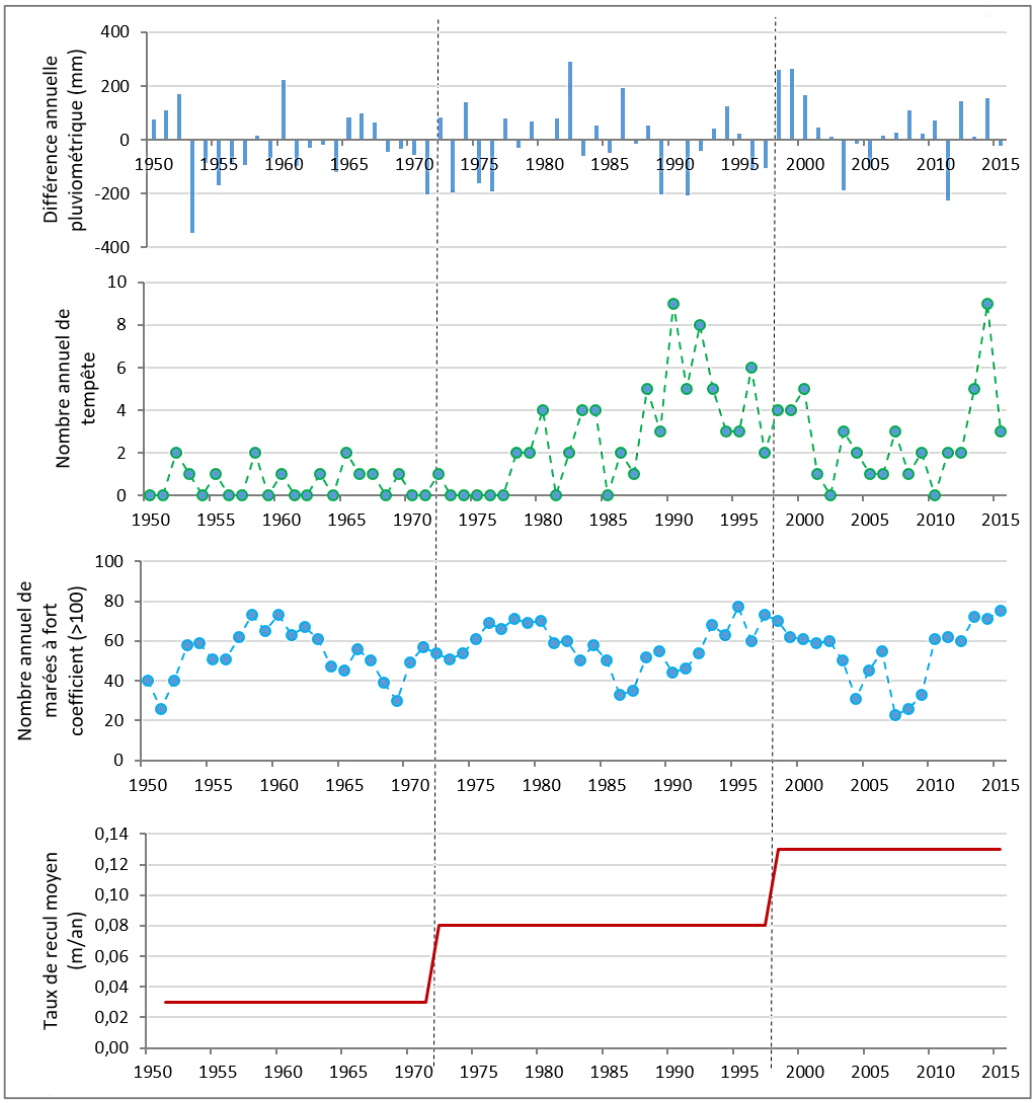
D'après les photographies aériennes, entre 1961 et 2015, le taux de recul moyen des falaises de Notigou est de 0,08 m/an (Fig. 120). L'analyse du recul sur des intervalles de temps plus courts montre que, durant cette période de temps, le taux de recul moyen a augmenté progressivement passant de 0,03 m/an (période 1951-1972) à 0,08 m/an (période 1972-1997) puis à 0,13 m/an (période 1997-2015).

Fig. 120 : Évolution du sommet de falaise de la plage de Notigou et taux de recul entre 1951 et 2015.

Période étudiée	Durée de la période (années)	Taux de recul (m/an)
1951-1972	21	0,03
1972-1997	25	0,08
1997-2015	18	0,13
Moyenne 1951-2015	64	**0,08**

L'apparente augmentation du nombre de tempêtes entre 1978 et 2002 et plusieurs années pluviométriques excédentaires pourraient expliquer l'augmentation des taux de recul durant la fin du 20e siècle (Fig. 121). Les années 1982, 1998 et 1999 enregistrent effectivement un surplus de précipitations de 32 à 35 % par rapport à la moyenne 1950-2015. Toutefois, les conditions météo-marines relativement plus « calmes » depuis 2002 ne permettent pas d'expliquer la poursuite du fort recul du début du 21e siècle.

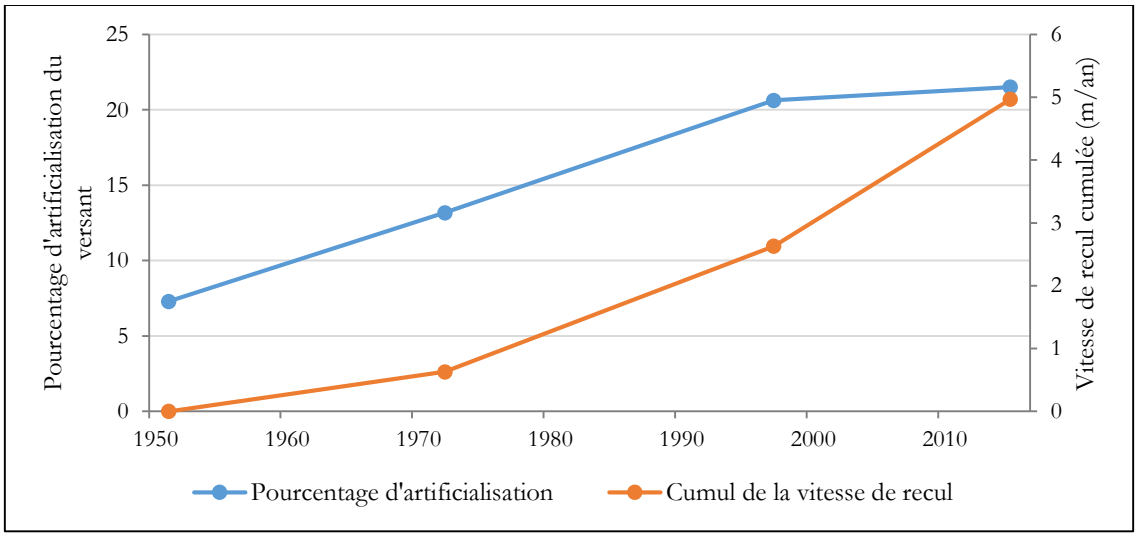
Fig. 121 : Taux de recul moyen des falaises de Notigou et chroniques des conditions météo-marines entre 1950 et 2015 (sources : SHOM (marées) et Météo-France (tempêtes et précipitations à la station de Ploumanac'h).



Hormis un enrochement installé à l'extrémité est du site, dans les années 1980, le trait de côte a été faiblement aménagé. Toutefois, la forte artificialisation du territoire drainant le versant en arrière des falaises de Notigou, depuis les années 1960, a certainement eu une influence sur la cinématique de recul des falaises (Fig. 122). En 1993, J.-P. Pinot constate justement plusieurs coulées boueuses le long de ces falaises (Fig. 119). Les phénomènes d'érosion plus fréquents depuis la fin du 20^{e} siècle seraient dus notamment au développement du bâti littoral, à l'augmentation des surfaces artificialisées qui favorisent le ruissellement (Fig. 123) et à l'apport supplémentaire d'eau venant des canalisations non raccordées. Bien que la croissance de l'artificialisation du sommet de falaise ait ralenti depuis les années 2000 (due à la saturation foncière), la poursuite de l'accroissement du recul peut être liée à l'arrivée en retraite des riverains (Kych, 1986 ; Guichard-Claudic, 2001). Pinot (1993) fait effectivement remarquer que l'accélération du recul des falaises meubles coïncide souvent avec l'arrivée des retraités car, alors, les maisons occupées auparavant, seulement durant l'été, le sont alors toute l'année. Les eaux usées rejetées en épandage ne sont plus rejetées seulement durant l'été mais aussi durant l'hiver, période où les falaises meubles sont les plus sensibles à l'érosion car déjà saturées en eau par les précipitations hivernales.

Fig. 122 : Urbanisation du sommet de falaise à Notigou entre 1951 et 2011.

Fig. 123 : Évolution de la vitesse de recul des falaises et de l'artificialisation (surfaces cumulées des bâtiments construits et des voies imperméabilisées) du versant drainant la falaise de Notigou entre 1951 et 2015.



6.2.4- Locquirec

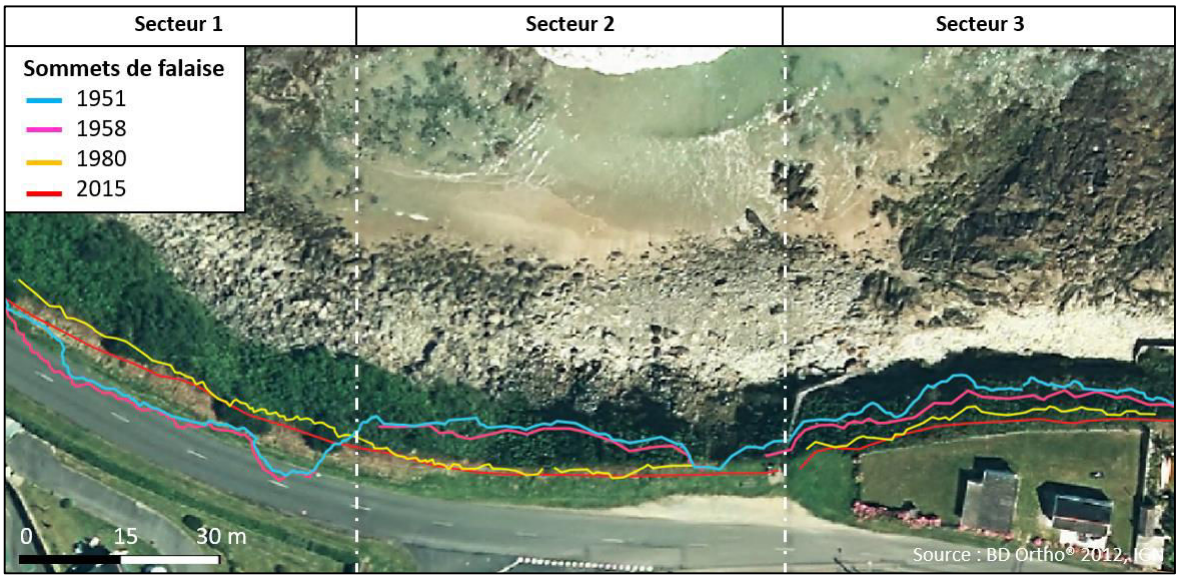
La comparaison diachronique des photographies aériennes, sur le site de Locquirec, permet de quantifier la cinématique de recul des falaises meubles entre 1951 et 2015 avec des intervalles d'observation de 7 à 35 ans (Tab. 11). D'après les photographies aériennes, sur les 64 ans d'analyse, le taux de recul moyen des falaises du site de Locquirec est de 0,07 m/an. Toutefois, à l'exemple des falaises de Pors-Hir, la comparaison diachronique des photographies montre un recul de la falaise discontinu dans le temps et l'espace, notamment depuis la fin des années 1950 (Fig. 124, Tab. 11). Afin d'étudier ces différences d'évolution dans l'espace, le linéaire de falaise a été divisé en trois secteurs (Fig. 124).

Entre 1951 et 1958, le recul des falaises est globalement homogène sur l'ensemble du site et il est de 0,15 m/an. Toutefois, entre 1958 et 1980, alors qu'il y a une avancée du trait de côte dans le secteur 1 liée à un apport de remblai, on observe une accélération du recul dans le secteur 2 de l'anse (0,21 m/an) et une légère diminution dans le secteur 3 (0,12 m/an) (Fig. 124). Enfin, à partir de 1980, le recul des falaises diminue sur l'ensemble de l'anse puisqu'il n'est plus que de 0,02 à 0,05 m/an (Tab. 11).

Tab. 11 : Taux de recul des falaises de l'anse du Moulin de la Rive entre 1951 et 2015.

		Taux de recul (m/an)			
Période étudiée	**Durée de la période (années)**	**Secteur 1**	**Secteur 2**	**Secteur 3**	**Moyenne du site**
1951-1958	7	0,16	0,15	0,15	0,15
1958-1980	22	-	0,21	0,12	0,17
1980-2015	35	0,04	0,02	0,05	0,04
Moyenne 1951-2015	64	0,04	0,10	0,08	**0,07**

Fig. 124 : Évolution du sommet de falaise de l'anse du Moulin de la Rive de 1951 à 2015.



L'augmentation du recul des falaises entre 1958 et 1980 peut être liée aux marées à forts coefficients plus fréquentes au début des années 1960 et à la fin des années 1970 (Fig. 125). Toutefois, l'augmentation plus marquée de l'érosion pour le secteur 2 est à relier à l'aménagement du site (Fig. 126). Avant les années 1960, l'anse du Moulin de la Rive était peu aménagée. Seule une habitation surplombait directement le sommet de falaise et une voie de circulation non goudronnée permettait aux habitants d'accéder à l'anse (Fig. 127). Au début des années 1960, un volume massif de remblai a été apporté au niveau du secteur 1 de l'anse pour protéger cette portion de côte de l'érosion et construire une route départementale longeant la côte (Fig. 126 et Fig. 128). D'après la hauteur de falaise et la surface remblayée en sommet, le volume de remblai est estimé à environ 4800 m^3. Cet apport de remblai a permis une avancée vers la mer d'un peu plus de 6 mètres du sommet de falaise dans le secteur 1 mais il a provoqué une accélération du recul de la portion de côte adjacente (secteur 2) qui n'a pas été remblayée (Fig. 126, Tab. 11). Le remblai, constitué d'amas de blocs de toutes tailles, a effectivement joué un rôle similaire à un enrochement en réfléchissant l'énergie des vagues et en accélérant l'érosion dans les secteurs voisins.

Fig. 125 : Taux de recul moyen des falaises du Moulin de la Rive et chroniques des conditions météo-marines entre 1950 et 2015 (sources : SHOM (marées) et Météo-France (tempêtes et précipitations à la station de Ploumanac'h).

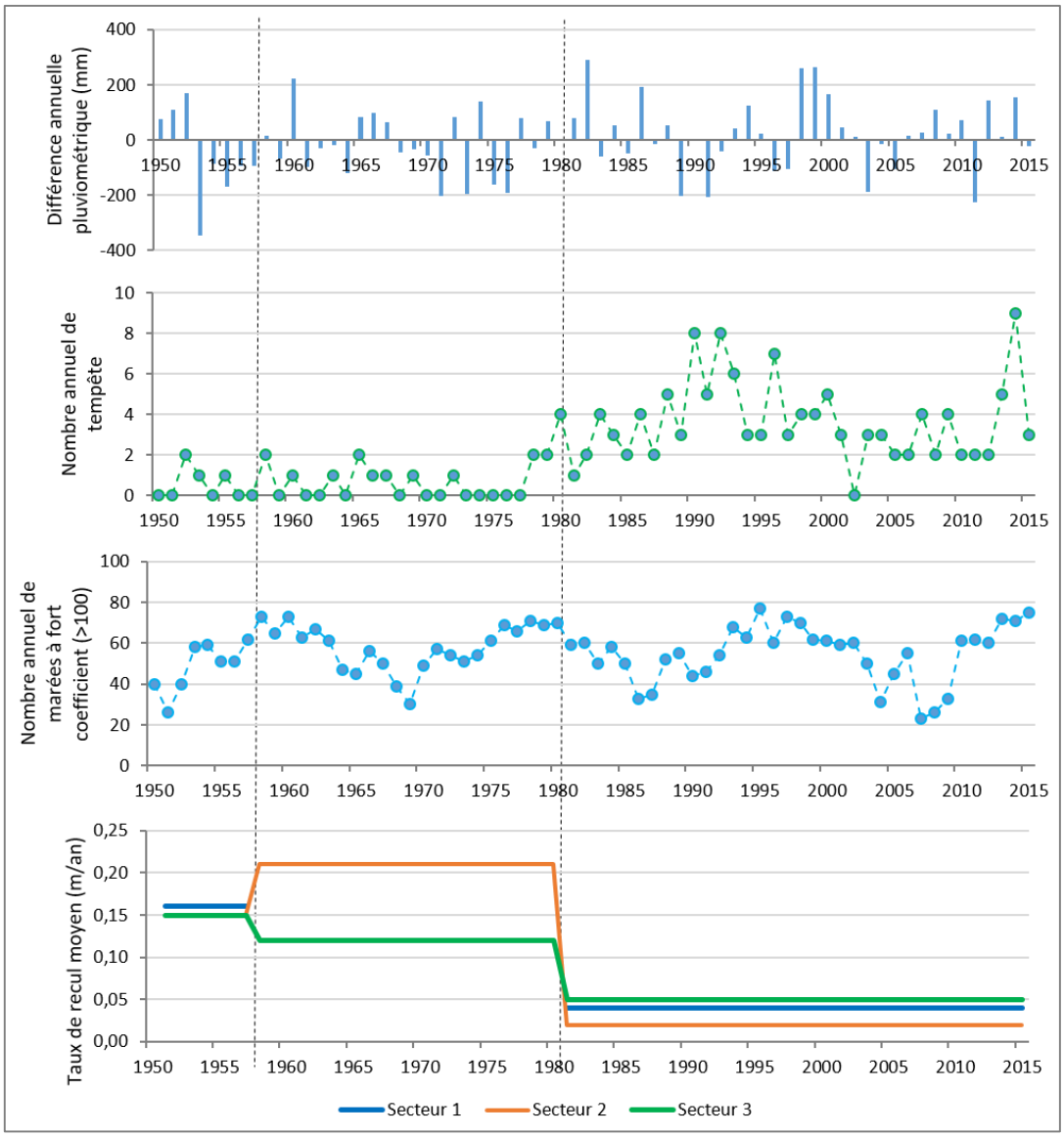


Fig. 126 : Évolution des taux de recul des secteurs de falaise du Moulin de la Rive mise en relation avec la chronique des aménagements.

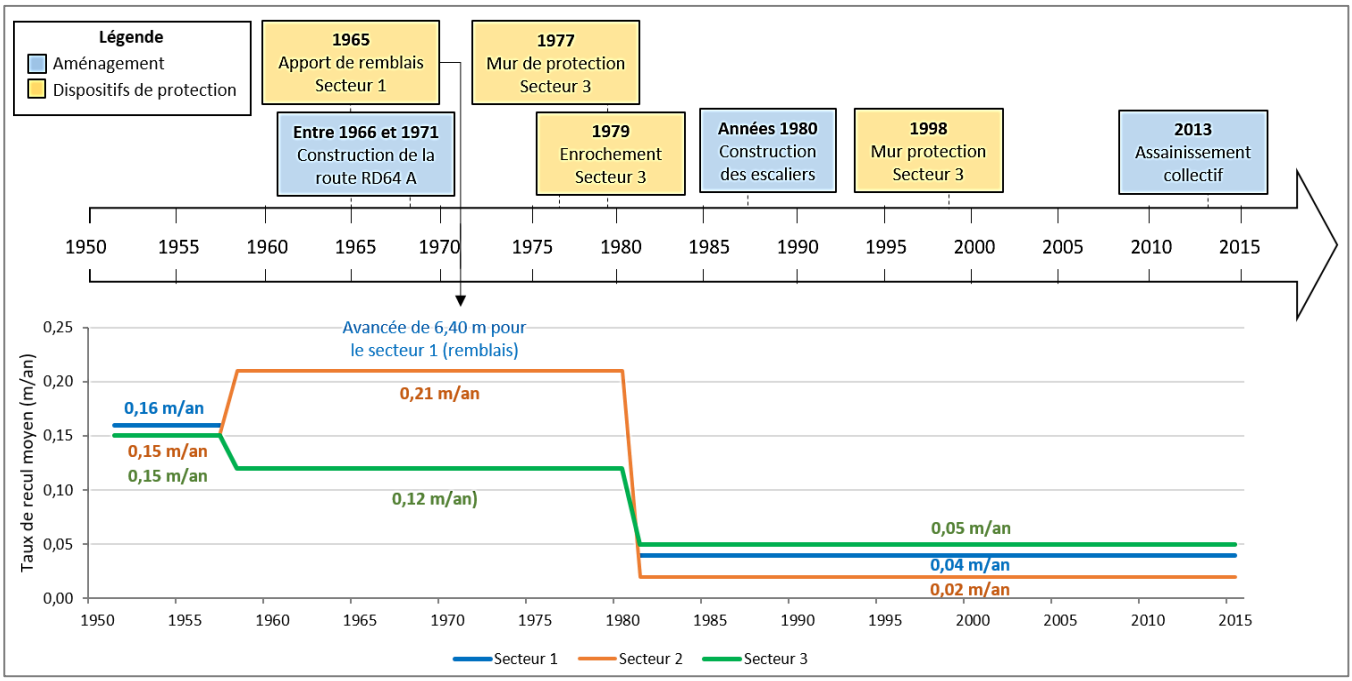


Fig. 127 : Urbanisation du sommet de falaise du Moulin de la Rive entre 1951 et 2012.

La diminution des taux de recul des falaises observée sur l'ensemble de l'anse, depuis les années 1980, est liée à la mise en place de nombreux ouvrages de protection comme des murs de protection ou des enrochements (Fig. 126 et Fig. 128). Ces ouvrages ont certes permis, ici, de ralentir le recul des falaises meubles mais au prix de l'artificialisation, de la perte du caractère esthétique du paysage et d'un coût élevé de mise en place et d'entretien. L'installation d'un système d'assainissement collectif par la commune en 2013 a également permis de diminuer la quantité d'eau contenue dans les formations meubles et donc d'atténuer leur sensibilité à l'érosion.

Fig. 128 : Succession d'ouvrages de protection mis en place pour stopper le recul des falaises du Moulin de la Rive.

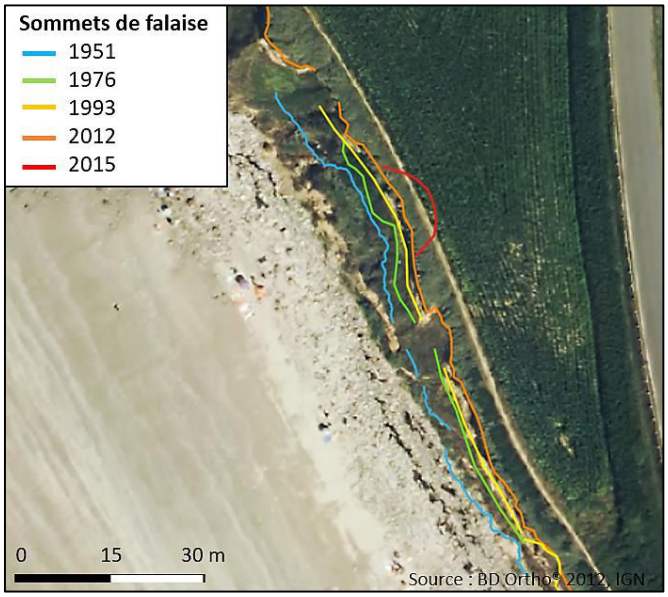
Enrochement et mur de protection dans le secteur 3 (vue prise depuis le NW)

Remblais dans le secteur 2 (affecté par des mouvements de terrain sous l'effet d'agents d'origine marine et subaérienne)

6.2.5- Telgruc-sur-Mer

La comparaison diachronique des photographies aériennes sur le site de Telgruc-sur-Mer montre un taux de recul moyen de 0,09 m/an entre 1951 et 2015 (Fig. 129). Toutefois, sur cette période d'analyse de 64 ans, le taux de recul est plus élevé entre 1951 et 1976, atteignant 0,10 m/an, puis entre 2012 et 2015, où la vitesse de retrait atteint 0,19 m/an.

Fig. 129 : Évolution du sommet de falaise de l'anse du Caon et taux de recul entre 1951 et 2015.



Période étudiée	Durée de la période (années)	Taux de recul (m/an)
1951-1976	25	0,10
1976-1993	17	0,07
1993-2012	19	0,07
2012-2015	3	0,19
Moyenne 1951-2015	64	**0,09**

Le taux de recul des falaises, plus élevé sur la période 1951-1976, serait lié à la succession d'années pluvieuses (1950 à 1952 et 1958 à 1960) et des années riches en fort coefficient de marée (1957 à 1963) (Fig. 130). En revanche, le recul entre 2012 et 2015 est lié aux successions de tempêtes durant cet intervalle de 3 ans et notamment à la tempête du 2 février 2014 qui s'est produite lors d'une marée de coefficient 113 et après des précipitations durables de l'hiver 2013-2014, et qui a généré un important glissement de terrain. Ce glissement a entrainé un recul ponctuel de 4 mètres du sommet de falaise coupant ainsi le sentier côtier à cet endroit (Fig. 131). Le taux de retrait calculé sur ce court intervalle de temps ne doit donc pas être interprété comme une accélération récente du recul.

Fig. 130 : Taux de recul moyen des falaises de l'anse du Caon et chroniques des conditions météo-marines entre 1950 et 2015 (sources : SHOM (marées) et Météo-France (tempêtes et précipitations à la station de Lanvéoc).

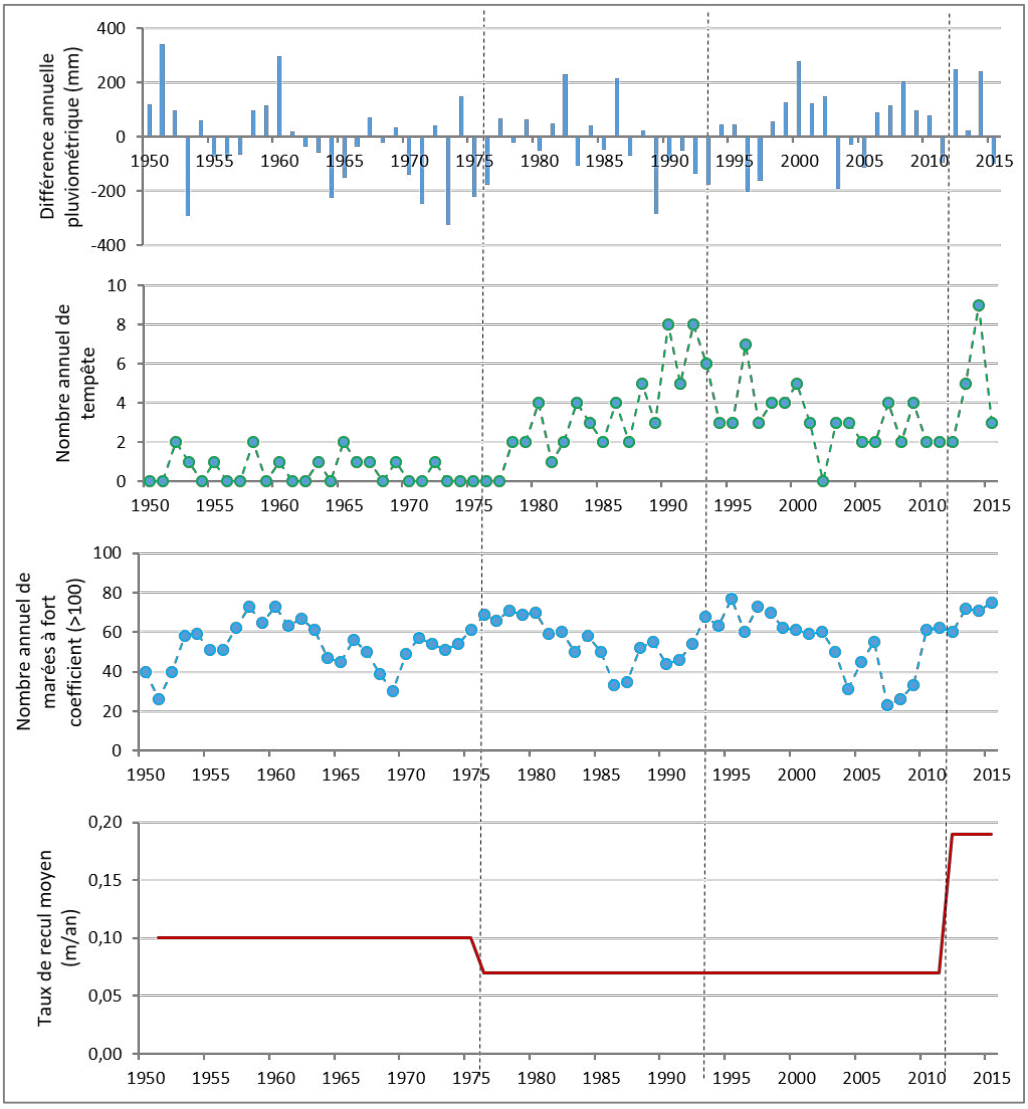


Fig. 131 : Glissement le 2 février 2014 entrainant un recul de 4 m du sommet de falaise et affectant le sentier côtier.

Sur ce site, les aménagements mis en place en sommet de falaises, durant les soixante dernières années, se résument à la route départementale constuite au début des années 1970 et des résidences construites en amont du versant, notamment dans les années 1990 (Fig. 132). L'absence d'accélération du recul des falaises durant ces périodes semble indiquer, ici, que les aménagements n'ont eu que peu voire pas d'influence sur l'érosion du trait de côte.

Fig. 132 : Aménagement du versant sur le site de Telgruc-sur-Mer entre 1951 et 2012.

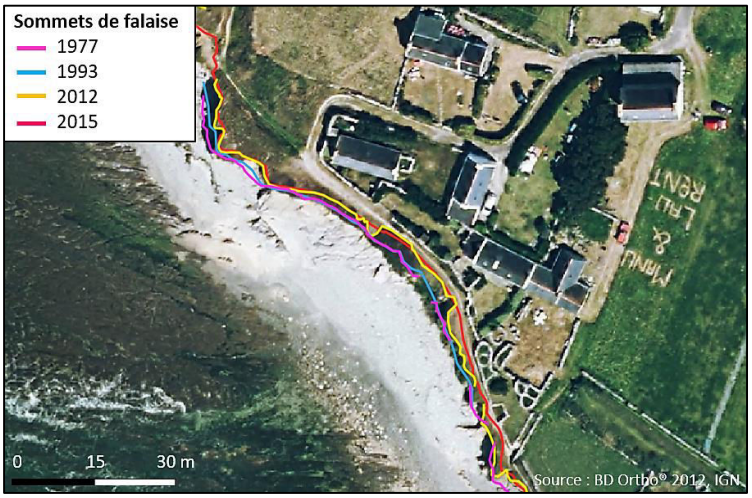
6.2.6- Plozévet

L'érosion des falaises meubles sur le site de Plozévet n'est pas un phénomène récent comme en attestent les études entreprises au milieu du 20e siècle par Guilcher (1954) ou Le Rhun (1967) : « *dans la partie méridionale de la commune se pose le problème du recul de la côte* ».

Sur le site de Plozévet, l'analyse de l'évolution des taux de recul des falaises n'a pu être réalisée qu'entre 1977 et 2015, soit un intervalle de 38 ans, en raison de l'absence de photographie aérienne exploitable dans ce secteur avant les années 1970 (Tab. 9).

Le taux de recul à moyen terme obtenu sur le site de Plozévet, entre 1977 et 2015, est de 0,06 m/an (Fig. 133). Toutefois, comme observé pour le site de Trédrez-Locquémeau, le taux de recul moyen a augmenté progressivement durant cet intervalle de 38 ans, passant de 0,03 m/an (période 1951-1972) à 0,08 m/an (période 1972-1997) puis à 0,14 m/an (période 1997-2015).

Fig. 133 : Évolution du sommet de falaise de la grève de Poulbréhen et taux de recul entre 1977 et 2015.

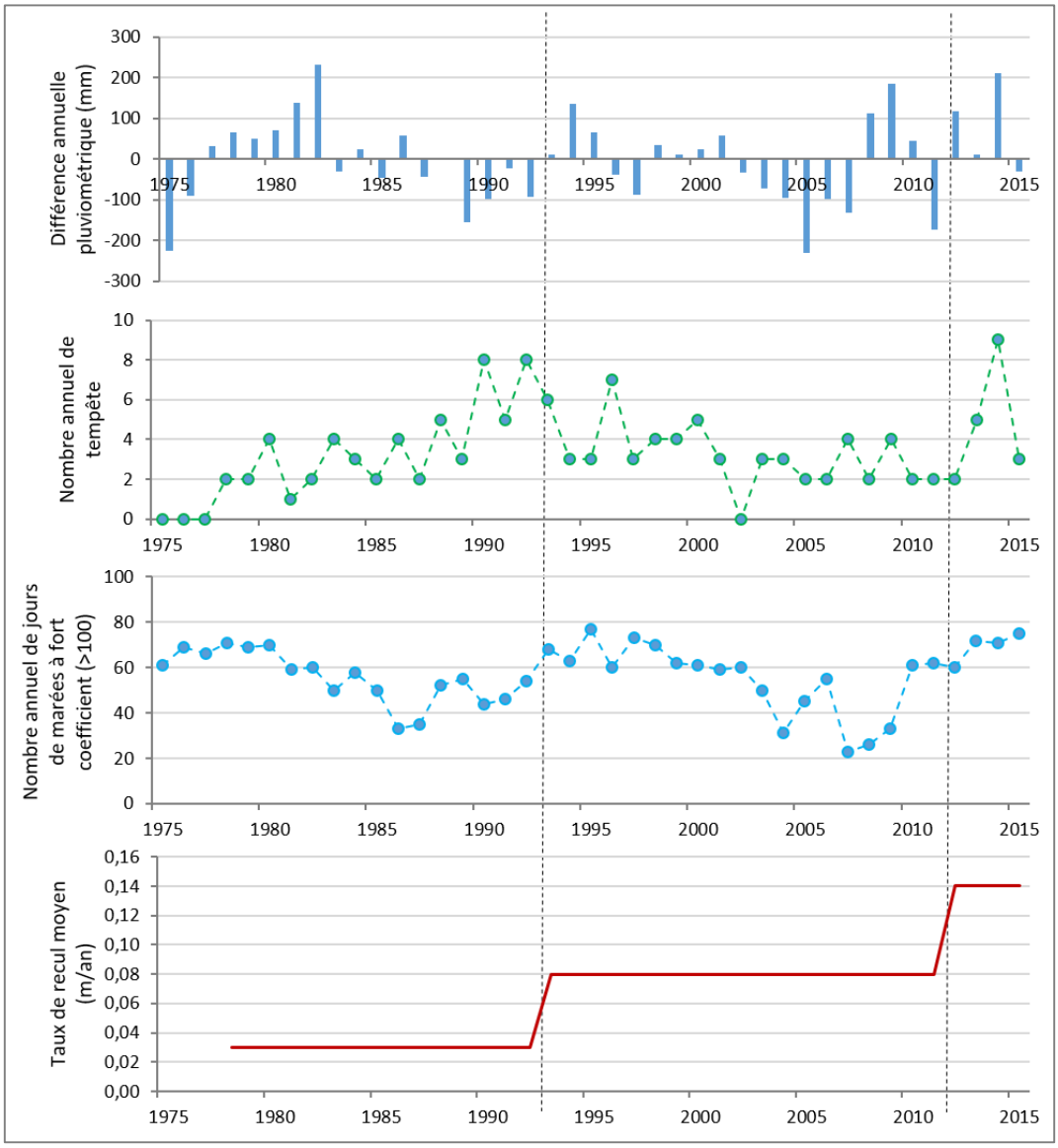


Période étudiée	Durée de la période (années)	Taux de recul (m/an)
1977-1993	16	0,03
1993-2012	19	0,08
2012-2015	3	0,14
Moyenne 1977-2015	38	0,06

Hormis les années 1990 riches en marées à fort coefficient et les fortes précipitations de l'année 2009, il ne semble pas y avoir eu de conditions météo-marines remarquables expliquant la hausse du recul entre la fin du 20e siècle et le début du 21e siècle (Fig. 134). Sur cette période, il n'y a pas eu non plus d'aménagement permettant d'expliquer cette évolution, les résidences présentes en sommet de falaise ayant été construites avant les années 1970. Toutefois, comme supposé sur le site de Trédrez-

Locquémeau, l'augmentation de l'érosion peut être liée à l'arrivée en retraite, dans les années 1990, des propriétaires riverains. Durant cette période, on observe effectivement une conversion de résidences secondaires en résidences principales (Zaninetti, 2006 ; Le Strat et Auzet, 2015). Les habitations étant dépourvues de réseaux d'assainissement collectif dans ces secteurs ruraux, cela implique des apports supplémentaires d'eau dans le sol venant saturer les formations meubles des falaises et ainsi favoriser l'érosion.

Fig. 134 : Taux de recul moyen des falaises de Poulbréhen et chroniques des conditions météo-marines entre 1975 et 2015 (sources : SHOM (marées) et Météo-France (tempêtes et précipitations à la station de Penmarc'h).



De même que pour le site de Telgruc-sur-Mer, l'augmentation du recul entre 2012 et 2015 est liée notamment aux événements tempétueux de l'hiver 2013-2014 où des pans de falaise se sont effondrés (Fig. 135). Le taux de recul calculé sur cet intervalle de 3 ans ne doit pas cependant être considéré comme représentatif de l'évolution pluri-décennale.

Fig. 135 : Effondrement de falaise recoupant le sentier côtier à Poulbréhen suite aux tempêtes de février 2014. Vue depuis le nord-ouest.

6.3- Discussion

Limites de la méthode utilisée

Le principal avantage de cette approche par photo-interprétation des clichés aériens de l'IGN est la couverture d'un intervalle de temps relativement long (entre 38 et 67 ans selon les sites) avec toutefois un inconvénient concernant des incertitudes plurimétriques sur la localisation du haut de falaise. L'évolution relativement lente des falaises rend souvent difficile la quantification du recul par le biais des photographies aériennes. Cette faible évolution induit effectivement des marges d'erreur élevées qui dépassent souvent le recul mesuré et rend alors l'interprétation délicate (Moore et al., 1999 ; Costa et al., 2004 ; Marques, 2006 ; Dornbusch et al., 2008 ; Letortu, 2013). Afin d'obtenir une plus grande précision, il est nécessaire de comparer les sommets de falaise sur des périodes de temps suffisamment longues car les erreurs liées à la numérisation deviennent alors proportionnellement moins élevées au fur et à mesure que les distances de retrait augmentent.

En plus d'une faible résolution des photographies, la détection du sommet de falaise peut être rendue difficile en raison de la morphologie du site (Stuiver, 2013). Il est effectivement fréquent que le couvert végétal masque une partie ou l'ensemble du versant littoral sur les clichés aériens (Fig. 136). Dans ce cas, il est alors impossible de déterminer la position du sommet de falaise.

Fig. 136 : Photographie aérienne de 2015 de la plage de Notigou, à Trédrez-Locquémeau, illustrant la difficulté d'identifier le sommet de falaise en raison du masquage par la végétation.

Il est important de noter que les taux de recul à moyen terme dépendent de l'intervalle de temps d'observation. Un intervalle de temps court (inférieur à 5 ans) n'est pas nécessairement représentatif, car alors les évolutions mesurées sont davantage influencées par les forçages agissant sur des échelles

temporelles très courtes (ex : tempêtes, précipitations intenses de quelques heures) et qui peuvent générer un recul important des falaises (Montreuil et Bullard, 2012 ; Dewez et al., 2013 ; Sunamura, 2015 ; Masselink et al., 2016). Ceci a été constaté sur les sites d'étude, notamment sur la période d'observation 2011-2015 où la forte érosion produite durant les tempêtes de février 2014 a induit une forte augmentation du recul moyen. Ces événements paroxysmaux posent donc la question de leur représentativité au sein des tendances pluri-décennales (Fenster et al., 1993 ; Martínez et al., 2011 ; Stéphan et al., 2018).

Une autre limite de la méthode concerne l'analyse des forçages naturels avec les taux d'évolution. Les contraintes liées à l'utilisation de données environnementales sont les mêmes que celles employées pour l'analyse historique régionale (chapitre 5), à savoir une incertitude sur la représentativité des conditions météo-marines (tempêtes, marées à fort coefficient et cumul pluviométrique) du fait de la distance des stations de mesure avec les sites d'étude. Toutefois, l'assez bonne corrélation entre les périodes d'accélération de la vitesse de recul et l'augmentation de la fréquence des forçages naturels conforte l'idée que les données sont suffisamment représentatives.

Une seconde limite dans l'identification des forçages concerne la difficulté de dissocier les facteurs naturels des facteurs anthropiques lorsque les deux interviennent lors d'une période d'accélération du recul (Daeden, 2015). Il est effectivement difficile de connaitre la part respective attribuée à chaque forçage. Par exemple, l'augmentation du recul des falaises de la grève de Nantois, à Pléneuf-Val-André, sur la période 1992-2003, est-elle davantage due à l'accroissement de la fréquence des tempêtes et des événements pluvieux sur cette période ou à l'aménagement du golf en sommet et à l'irrigation des greens ? L'échelle d'observation pluri-décennale fait qu'il est parfois difficile de trancher sur la prépondérance des forçages. Leur cumul néanmoins contribue à cette accélération.

Enfin, il est également important de noter que d'autres agents de forçage, non pris en compte dans cette étude, peuvent venir influencer le recul des falaises meubles à l'échelle historique récente. En effet, les échanges sédimentaires entre l'infra et le supralittoral qui s'opèrent à des échelles pluri-décennales (Pye et Blott, 2008 ; Ruz et al., 2017) peuvent agir sur le bilan sédimentaire de la plage et sur la protection du pied de falaise contre l'érosion marine. La direction des houles dominantes par rapport à l'orientation de la côte influencerait également la capacité des vagues à éroder la falaise (Bray et Hooke, 1997 ; Hénaff, 2008 ; Bezerra et al., 2011 ; Barkwith et al., 2014). Des vagues arrivant avec un angle différent de 90° impliqueraient un déplacement longitudinal des sédiments, de plus fortes variations des profils de plage et donc une plus grande sensibilité du système côtier à l'érosion (Lemasson et Regnaud, 1997). De même, ces changements d'orientation déterminent des périodes de moindre ou de plus forte exposition des falaises aux agents marins. Or, sur les dernières décennies, des changements de modification du régime des vents et, par conséquent, de la direction des houles ont été mis en évidence en Bretagne (Lemasson et Regnaud, 1997 ; Hénaff, 2004 ; Cariolet, 2011). Enfin, un autre facteur, peu documenté, et pouvant influencer le recul des falaises meubles, à l'échelle historique récente, est l'accumulation d'algues sur l'estran (ex : laminaires, sargasse). Celle-ci va agir comme une protection naturelle du haut d'estran contre l'action des vagues (Figlus et al., 2015). Les accumulations peuvent être influencées par les phénomènes d'eutrophisation (en ce qui concerne les algues vertes notamment) et évoluent souvent à l'échelle de plusieurs années (Piriou, 1985 ; Arzel, 1998)

Comparaison des taux de recul et des forçages impliqués sur les sites d'étude

La comparaison diachronique des photographies aériennes a permis de montrer que ce sont les falaises du site de Plougrescant qui ont évolué le plus rapidement sur les soixante dernières années avec un taux de recul moyen de 0,41 m/an (Tab. 12). Les falaises des Vallées et de Nantois ont reculé aussi rapidement sur la période d'analyse (respectivement 0,16 et 0,27 m/an). Ces plus fortes vitesses de recul peuvent être

expliquées par la lithologie des falaises. En effet, sur les sites de Plougrescant et de Pléneuf-Val-André, les falaises sont formées par des formations quaternaires fines, faiblement résistantes à l'érosion marine et subaérienne (cf. chapitre 4). Bien qu'appartenant au type V1, les falaises de Telgruc-sur-Mer reculent moins rapidement en comparaison des falaises de Plougrescant et de Pléneuf-Val-André (0,09 m/an). Ceci pourrait s'expliquer, dans un premier temps, par une granulométrie plus grossière des formations constituant la falaise (plus forte proportion de head et absence de loess et de niveau sableux) et, dans un second temps, par une plus faible exposition aux agents marins (cf. chapitre 4). Ceci permettrait aux éboulis de perdurer plus longtemps en pied et de favoriser la stabilité de la falaise. De par son rythme de recul et sa lithologie, le site de Telgruc-sur-Mer se rapprocherait donc davantage des falaises de type V2 (Locquirec et Trédrez-Locquémeau) que des falaises de type V1.

Enfin, sur le site de Plozévet, bien que les falaises soient formées par des formations rocheuses (micaschistes), le taux de recul est relativement élevé (0,08 m/an) en comparaison des falaises granitiques qui sont répandues dans la région (taux inférieur à 0,04 m/an d'après les travaux de Prémaillon et al. (2017)). Le taux de recul sur ce site s'explique notamment par la schistosité et le degré d'altération des roches qui confèrent aux falaises une faible résistance à l'érosion. Les taux d'érosion des falaises meubles composites ne dépendent donc pas seulement de la lithologie mais aussi du degré d'altération, de fracturation et de schistosité de la base rocheuse (Benumof et al., 2000 ; Cruslock et al., 2010 ; Sunamura, 2015).

Tab. 12 : Récapitulatif des taux de recul à moyen terme obtenus sur chaque site d'étude.

Site d'étude	Taux de recul (m/an)	Période d'observation
Les Vallées (Pléneuf-Val-André)	0,16	1948-2015
Nantois (Pléneuf-Val-André)	0,27	1948-2015
Plougrescant	0,41	1952-2015
Trédrez-Locquémeau	0,07	1951-2015
Locquirec	0,07	1951-2015
Telgruc-sur-Mer	0,09	1951-2015
Plozévet	0,08	1977-2015

Bien que notre analyse indique des taux de recul pluri-décennaux compris entre 0,07 et 0,41 m/an sur les sites d'étude (Tab. 12), l'Indicateur National de l'Érosion côtière (INE), produit par le Cerema, dans le cadre de la Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte, indique un recul « imperceptible » pour les falaises des sites de Plougrescant, de Trédrez-Locquémeau, de Telgruc-sur-Mer et de Plozévet. Cet indicateur, réalisé à l'échelle nationale, et mis à disposition sur le site Géolittoral, est basé sur la comparaison d'orthophotographies remontant aux années 1920-1950 sur lesquelles ont été digitalisés les traits de côte au 1/2 500 (Hédou et al., 2015 ; Landreau, 2018). Le biais de cet indicateur est lié au seuil de détection du recul sur les photographies historiques, qui est de l'ordre de 0,10 m/an (Hédou et al., 2015), ce qui apparait relativement élevé en comparaison des vitesses moyennes de recul des falaises. Mais la vocation de l'indicateur est de donner une information homogène, à une échelle nationale, sur l'évolution du trait de côte et ne pas se substituer aux études locales. Ainsi les portions de côte classées comme « recul imperceptible » par l'INE peuvent correspondre à des côtes dont le recul est compris entre 0 et 0,10 m/an. Ceci apparait cohérent avec les vitesses d'évolution obtenues pour ces sites, excepté pour les falaises de Plougrescant dont le taux de recul moyen a été estimé à 0,41 m/an sur la période 1952-2015. Une erreur dans la digitalisation du sommet de falaise sur ce site pourrait venir expliquer l'absence de recul indiquée par l'indicateur INE.

En ce qui concerne les forçages impliqués dans le recul des falaises meubles, l'analyse des taux de recul sur les sites d'étude avec les conditions environnementales montre que les périodes d'accélération du recul moyen coïncident souvent avec l'accroissement de la fréquence des marées à fort coefficient, des

tempêtes et des cumuls pluviométriques excédentaires. Ceci rejoint donc les observations réalisées sur les conditions météo-marines favorables à l'érosion des falaises meubles à partir de l'analyse historique régionale (cf. chapitre 5).

Toutefois, ces forçages naturels ne permettent pas d'expliquer à eux seuls l'évolution des vitesses de recul, depuis 1950, sur les sites d'étude. L'analyse des taux de recul pluri-décennaux montre effectivement la forte influence des aménagements sur les vitesses d'évolution. On observe très souvent une accélération du recul moyen dans les années qui suivent la mise en place d'ouvrages côtiers ou qui sont marquées par l'artificialisation des sommets de falaise. L'urbanisation mais aussi l'installation d'ouvrages de protection du trait de côte entrainent une augmentation de la sensibilité des falaises à l'érosion en perturbant le fonctionnement hydro-sédimentaire de l'accumulation littorale à leur pied, en augmentant la teneur en eau des formations meubles et en diminuant la capacité d'absorption des sols (Bonnot-Courtois et Lafond, 1995 ; Pinot, 1998). Ainsi, les nombreux ouvrages bétonnés à Plougrescant et l'artificialisation des sommets de falaise à Trédrez-Locquémeau et à Plozévet auraient accéléré le recul naturel des falaises.

Il faut noter toutefois que l'accélération du recul des falaises meubles n'est pas observée sur tous les sites d'étude. En effet, sur le site de Locquirec la tendance est à l'amoindrissement des vitesses depuis une trentaine d'années en raison d'une forte protection du trait de côte par les ouvrages et de la mise en place d'un système d'assainissement collectif. La diminution de la quantité d'eau rejetée dans les sols serait, en réalité, suffisante pour ralentir le recul des falaises meubles (Pinot, 1998). Sur le site de Pléneuf-Val-André, on observe aussi une diminution de l'érosion grâce au retour du couvert végétal en sommet de falaise. Ces observations montrent que des mesures de mitigation (ex : drainage du versant, restauration du couvert végétal) permettent de freiner efficacement le recul des falaises meubles.

Comparaison du recul des falaises meubles en Bretagne avec d'autres côtes à falaises meubles

Les vitesses de recul des falaises sur les sites d'étude varient entre 0,07 et 0,41 m/an (Tab. 12). Ceci rejoint la valeur moyenne des taux de recul de falaises meubles, obtenue par Prémaillon et al. (2017), à partir d'une synthèse bibliographique sur des falaises dans le monde, essentiellement en Europe, en Amérique du Nord et en Océanie, donc situées plutôt en climat tempéré à froid. Selon ces travaux, les falaises meubles, composées de sédiments peu consolidés, tertiaires à quaternaires, reculent à une vitesse moyenne de 0,23 m/an avec des valeurs comprises entre 0,02 et 0,80 m/an.

Toutefois, des études menées sur la cinématique de falaises meubles au sud et à l'est du Royaume-Uni, au Québec ainsi qu'en Alaska montrent que le recul à moyen terme peut atteindre des valeurs bien plus élevées (Tab. 13). D'après Quinn et al. (2009), les falaises de la côte Holderness figurent parmi les côtes reculant le plus rapidement en Europe. Ainsi, des taux de recul de 0,85 et 1,15 m/an ont été mesurés respectivement dans les comté d'Hampshire et de Norfolk (Barton, 1973 ; Brooks et al., 2016).

Ces plus fortes vitesses de recul observées sur les côtes du Royaume-Uni pourraient s'expliquer par la lithologie des falaises meubles, composées essentiellement d'argile (till glaciaire). Plusieurs auteurs ont effectivement montré que les falaises constituées d'argile s'érodaient plus rapidement que celles constituées de matériaux peu cohésifs car elles sont davantage sujettes aux phénomènes de cryoclastie, de dessiccation et de ravinement (Wilcock et al., 1998 ; Boucher-Brossard, 2012).

Dans les régions froides, de forts taux de recul de falaises meubles ont également été observées (Tab. 13). Ainsi, au nord du Québec et en Alaska, des taux de recul de 1,30, de 1,50 et de 1,97 m/an ont été obtenus pour des falaises meubles silto-sableuses et silto-argileuses (Harper, 1978; Bernatchez et Dubois, 2008). Dans ces régions, le recul moyen des falaises meubles apparait donc globalement supérieur à celui des falaises meubles bretonnes. Outre des lithologies sensiblement différentes, ces vitesses de recul s'expliquent notamment par l'influence du climat. En effet, la grande différence, sur le plan climatique,

entre la Bretagne et l'Alaska ou le Québec est qu'ils présentent des températures hivernales négatives (moyennes comprises entre -4 et -12°C (normales 1971-2000 à Québec)) durant plus de 4 mois, de décembre à la mi-avril (Marie et al., 2014). La persistance des températures négatives induit des processus cryoclastiques (gélifraction, coulées boueuses…) qui viennent s'ajouter et participent à l'érosion des falaises (Bernatchez et al., 2014). Plusieurs études ont d'ailleurs mis en évidence de forts taux de recul (pouvant dépasser les 6 mètres) liés à la saison froide dans les falaises de dépôts meubles (Dionne et Brodeur, 1988 ; Bernatchez et Dubois, 2008). Les travaux de Prémaillon et al. (2017) montrent d'ailleurs que le nombre annuel de jours de gel aurait une forte influence sur les taux de recul des falaises meubles.

Tab. 13 : Exemples de taux de recul historiques de falaises meubles situées dans des zones froides à tempérées.

Localisation	Latitude	Lithologie	Hauteur moyenne (m)	Période d'observation	Taux de recul moyen (m/an)	Référence	Climat
Santa Monica (Californie)	34°01'	Silt et argile	50	1933-1998	0,3	Hapke et al. (2006)	Méditerranéen
Santa Cruz (Californie)	36°57'	Silt et argile	30 à 36	1931-1982	0,2	Griggs et Fulton-Bennett (1987)	Méditerranéen
Pacifica (Californie)	37°37'	Alluvions et sable	45	1958-1998	0,25	Snell et al. (2000)	Méditerranéen
Porquerolles (France)	42°59'	Sable et graviers fluviatiles hérités	4	1991-2006	0,39	Lopez-Saez et al. (2018)	Méditerranéen
Carry-le-Rouet (France)	43°19'	Sable et graviers	5	1924-2011	0,04	Giuliano (2015)	Méditerranéen
Bournemouth (Royaume-Uni)	50°42'	Sable tertiaire	9	1870-1964	0,2	Bray (1993)	Tempéré océanique
Bournemouth (Royaume-Uni)	50°42'	Sable et argile tertiaires	30	1987-1994	0,8	Bray (1993)	Tempéré océanique
Hampshire (Royaume-Uni)	50°44'	Sable et argile tertiaires	25	1869-1958	0,85	Barton (1973)	Tempéré océanique
Walton-on-the-Naze, Essex (Royaume-Uni)	51°49'	Dépôts glaciaires pléistocènes	2 à 22	1874-1973	0,55 à 0,68	Gray (1988)	Tempéré océanique
Norfolk (Royaume-Uni)	52°35'	Boue et sable	Non précisée	1891-2013	1,15	Brooks et al. (2016)	Tempéré océanique
Weybourne à Sheringham, North Norfolk (RU)	52°57'	Base de craie et couverture de till glaciaire héritée	25	1880-1967	0,9	Cambers (1976) in Brooks et Spencer (2014)	Tempéré océanique
Aanse du Caro, rade de Brest (France)	48°19'	Héritages périglaciaires	10	1952-2000	0,12	Stéphan (2008)	Tempéré océanique
Cromenac'h, anse de Betahon (France)	47°31'	Héritages périglaciaires	5 à 12	1952-2000	0,79	Stéphan (2008)	Tempéré océanique
Dibenn (France)	47°30'	Héritages périglaciaires	5	1948-2004	0,1	Stéphan (2008)	Tempéré océanique
Kercambre, St-Gildas-de-Rhuys (France)	47°29'	Héritages périglaciaires	3	1953-2018	0,09	Basara et al. (en cours de rédaction)	Tempéré océanique
Penhors, Pouldreuzic (France)	47°56'	Altérites micaschisteuses et cordon de galets pléistocène	5 à 10	1828-1983	0,21 (moy.) de 0,37 à 0,1	Hallégouët et Hénaff (1993)	Tempéré océanique
L'Hôtellerie, Hillion (France)	48°30'	Héritages périglaciaires	5 à 10	1956-2015	0,08	DHI (2015)	Tempéré océanique
Rosslare, Wexford (Irlande)	52°15'	Dépôts glaciaires et fluvio-glaciaires	10 à 40	1903-1978	1,6	Forde (1978), in Ruz (1989)	Tempéré océanique
Boston Harbor Islands (Massachsetts, USA)	42°18'	Graviers, sable, silt et argiles (dépôt sous-glaciaire)	2 à 23	1938-2001	0,03-0,53	Himmelstoss et al. (2006)	Tempéré froid de façade orientale
Ragueneau (Québec)	49°03'	Sable et silt	3 à 5	1931-1996	1,3	Bernatchez et Dubois (2008)	Tempéré froid de façade orientale
Val-Marguerite (Québec)	50°08'	Sable	3	1996-2006	0,6	Bernatchez et Dubois (2008)	Tempéré froid de façade orientale
Rivière-Saint-Jean (Québec)	50°18'	Silt et argile	4 à 15	1948-2005	1,97	Boucher-Brossard (2012)	Tempéré froid de façade orientale
Kharasavey, Yamal Peninsula (Russie)	71°10'	Sable et argile	7 à 12	1964-2016	0,4	Belova et al. (2017)	Froid circumpolaire
Kharasavey, Yamal Peninsula (Russie)	71°10'	Argile	7 à 12	1964-2016	0,4 à 0,8	Belova et al. (2017)	Froid circumpolaire
Chukchi Sea Coast, SW de Barrow (Alaska)	71°17'	Argile, silt et sable sur base d'argiles du Crétacé	10 (moyen) 18 (max)	1948/49-1976	0,31 ; (0,06-1,50)	Harper (1978)	Froid circumpolaire

Puisque le climat semble jouer un rôle sur la cinématique à moyen terme des falaises meubles, il serait intéressant d'analyser les vitesses de recul des falaises meubles situées à des latitudes tropicales (bordant la côte de pays africains par exemple). Malheureusement, à ce jour, très peu de travaux ont été menés dans ces régions (Prémaillon et al., 2017).

Il est important de noter que la comparaison des taux de recul moyen de falaises meubles venant des différentes études locales reste, néanmoins, délicate en raison de la diversité des contextes géomorphologiques (ex : hauteurs des falaises, nature des constituants, impacts anthropiques éventuels…) et des contextes hydro-climatiques différents. La variété des méthodes de quantification (comparaison de photographies aériennes, de cadastres, cartes anciennes…), leur précision et leur étendue spatiale et temporelle peuvent également induire un biais. On retiendra cependant la très large gamme de vitesses de retrait pluri-décennales de ces falaises, notamment pour les climats des latitudes moyennes à climat tempéré océanique (Tab. 13).

Conclusion intermédiaire

L'analyse des photographies aériennes verticales a permis de reconstituer les vitesses d'évolution des falaises meubles sur les sites d'étude depuis les années 1950. L'étude couplée de ces vitesses de recul avec le contexte météo-marin et anthropique a permis d'identifier les principaux forçages et d'expliquer les changements de tendance dans le recul des falaises meubles.

Ainsi, sur les sites d'étude, le taux de recul moyen des falaises, sur les soixante dernières années, est compris entre 0,07 et 0,41 m/an. Durant cette période, les phases d'accélération du recul des falaises sont liées aux conditions météo-marines (succession de tempêtes, d'années pluvieuses…) mais aussi à la mise en place d'aménagements sur le littoral. L'urbanisation et la construction d'ouvrages bétonnés créent effectivement un déséquilibre dans le système côtier et renforcent l'action érosive des forçages naturels. L'impact de ces aménagements se fait alors sentir à l'échelle de plusieurs années (Ruz, 1987 ; Brown, 2008).

L'analyse couplée des vitesses d'évolution et du contexte environnemental permet d'améliorer la compréhension des processus intervenant dans l'évolution des falaises meubles à moyen terme. Toutefois, du fait que les mouvements de terrain affectant les falaises soient épisodiques et non linéaires, les taux d'évolution à moyen et long termes doivent être interprétés prudemment (Young et Ashford, 2006) car ceux-ci ont tendance à « lisser » ces discontinuités temporelles. Cet aspect de l'évolution justifie le recours aux suivis à haute résolution temporelle et spatiale (Joyal, 2015). Il est effectivement important d'avoir un intervalle d'acquisition de données inférieur au rythme de recul des falaises pour bien repérer les processus d'érosion lorsqu'ils se produisent et pour observer tous les stades d'évolution des différentes portions de falaise.

Ainsi l'augmentation de la résolution temporelle des mesures permettra de mieux cerner l'impact morphogène des forçages naturels (ex : tempêtes hivernales, précipitations intenses) et d'analyser plus finement la répartition spatiale du recul. Cette quantification du recul des falaises, sur une plus courte échelle temporelle, fera l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE 7 : Analyse du recul à court terme par suivi photogrammétrique

La quantification du recul sur de courtes périodes est primordiale pour la compréhension de la dynamique régressive des falaises meubles et de leurs modalités de recul. Le départ des matériaux constituant les falaises est effectivement très hétérogène dans le temps et dans l'espace (Hénaff et al., 2002). Aussi, l'étude de la cinématique à court terme permet d'examiner ces modalités spatio-temporelles et les forçages marins et subaériens impliqués. Pour y parvenir, des suivis de terrain à haute résolution spatiale et temporelle ont été mis en place sur les sites d'étude. Les suivis se basent sur des levés photogrammétriques couplés à des mesures par tachéomètre et qui sont réalisés à la fréquence de deux fois par an, spécifiquement au printemps et à l'automne.

Les objectifs de ces suivis sont d'augmenter la précision temporelle et spatiale des aléas observés ; de mesurer les volumes érodés et de les relier aux conditions météo-marines. La photogrammétrie semble être adaptée à ces objectifs car, contrairement à la comparaison diachronique de photographies aériennes verticales, elle permet de réaliser une quantification annuelle voire saisonnière de l'érosion côtière et de connaitre la répartition spatiale de l'ablation le long de l'abrupt (pied, milieu et sommet de falaise) ainsi que les volumes produits. Ainsi, cette approche permettra de répondre aux questions suivantes :

- Quels sont les taux d'ablation du front de falaise sur les sites d'étude ? et sont-ils comparables aux vitesses de recul pluriannuel du haut de falaise obtenues à partir des photographies aériennes de l'IGN (cf. chapitre 6) ?
- Quelle est la répartition temporelle, à court terme, du recul des falaises (saisonnalité) ? Existe-t-il une relation avec l'évolution des profils de plage ?
- Quelles sont les modalités d'évolution des falaises meubles sur les sites d'étude et les forçages météorologiques, marins et continentaux impliqués ?

Pour répondre à ces questions, ce chapitre s'organise en quatre parties. La première sera consacrée à la description de la méthodologie adoptée et la seconde, à l'analyse de la répartition temporelle de l'érosion. La troisième partie cherchera à interpréter ces résultats au regard de la répartition spatiale des matériaux érodés à l'échelle des sites, l'objectif étant d'identifier les agents et processus responsables de l'érosion observée. Enfin, la quatrième partie comparera les taux d'ablation mesurés par photogrammétrie avec les taux de recul obtenus sur les moyen et long termes afin d'apprécier la représentativité temporelle de la période de suivi.

7.1- Méthodologie

Les techniques de télédétection sont de plus en plus employées pour acquérir des informations géographiques sur le système côtier (Dekker et al., 2001). Souvent privilégiées, les images satellitaires présentent une résolution spatiale restreinte et des contraintes liées à la couverture nuageuse ou à l'heure locale d'acquisition (Jaud, 2011). L'utilisation des plateformes aéroportées permet d'obtenir une meilleure résolution spatiale, le plus souvent, inférieure à 20 cm (Casson et al., 2005), mais cette technique représente un coût d'acquisition important. Le suivi saisonnier de l'érosion des falaises meubles requiert une très haute résolution (de quelques centimètres) qui ne peut être atteinte, à l'heure actuelle, par le biais des outils satellitaires ou aéroportés.

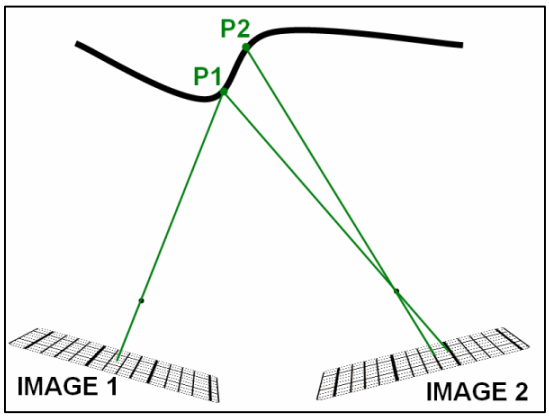
La photogrammétrie par levé terrestre, qui se développe depuis plusieurs années pour quantifier le recul des falaises (Adams et Chandler, 2002 ; Costa et al., 2004 ; Lim et al., 2005 ; Letortu et al., 2018 ; Jaud et

al., 2019), permet d'apporter une meilleure précision que celle obtenue par les techniques traditionnelles et présente l'avantage de pouvoir être réalisée à moindre coût (Pierre et Lahousse, 2003).

7.1.1- Principe de la photogrammétrie

La photogrammétrie est une technique qui consiste à retrouver la position, dans l'espace, de chaque point de la surface visible des formes photographiées à partir de l'analyse de plusieurs photographies prises sous des angles de vue différents (Delevoie et al., 2012). Deux acquisitions décalées d'un certain angle sont nécessaires pour obtenir une vue stéréoscopique (Sabater, 2009) (Fig. 137). Une photographie est une projection plane de l'image d'un objet tridimensionnel. Le processus de photogrammétrie effectue en quelque sorte l'opération inverse en retrouvant la position des points dans l'espace à partir de l'analyse des images. Ceci s'effectue par l'identification de points d'appui GCP (*Ground Control Point*) dont les coordonnées sont connues avec précision et par la création d'un nuage de points géoréférencé. Sur les sites d'étude, les points d'appui sont matérialisés sur la paroi de falaise par le dessin de plusieurs points de repère.

Fig. 137 : Schéma de principe de la photogrammétrie (Beugnot, 2012).



N.B : Le trait plein représente le linéaire de falaise photographié sous différentes prises de vue.

Un des avantages de la photogrammétrie est qu'il s'agit d'un procédé à coût relativement faible pour l'étape d'acquisition, puisqu'il suffit de disposer d'un appareil photo numérique de bonne qualité (résolution minimale de 12 Mégapixels) (Drones Imaging, 2013), d'un GPS (*Global Positioning System*) et de temps pour la prise des photographies. Cette technique d'acquisition est relativement rapide car elle peut être effectuée en moins de 4 h pour des linéaires de falaise de 200 à 300 m.

Le calcul photogrammétrique utilise les informations contenues dans la carte de pixels constituant la photographie numérique. Celle-ci doit donc être la moins dénaturée possible et, pour un résultat optimal, il est nécessaire que les prises de vue remplissent tous les critères de qualité pour le calcul (Delevoie et al., 2012). Les paramètres tels que l'éclairage, la stabilité ou la qualité de l'optique doivent être maîtrisés. Ainsi des objets surexposés ou sous-exposés avec des ombres nettes et un fort contraste peuvent gêner l'exploitation des images à l'aide des algorithmes. De même, les zones avec une végétation abondante sont contraignantes car elles sont très sujettes au mouvement entre les instants d'acquisition de deux photographies (déplacement des branches ou des feuilles) et empêchent une bonne corrélation des images. Toutefois, les résultats obtenus par cette méthode peuvent être d'excellente qualité et parfaitement comparables à ceux obtenus avec les scanners laser 3D (Delevoie et al., 2012). L'avantage de cette méthode par rapport aux scanners laser est qu'elle peut être mise en œuvre à l'aide d'un matériel peu encombrant et qu'elle ne nécessite pas plusieurs mises en station pour couvrir toute la zone analysée sur chaque site d'étude. En effet, la portée théorique des scanners laser est de 400 m pour une surface réfléchissante à 80 % et de 140 m pour une surface réfléchissante à 10 % (Jaud, 2011 ; Leclerc, 2016)

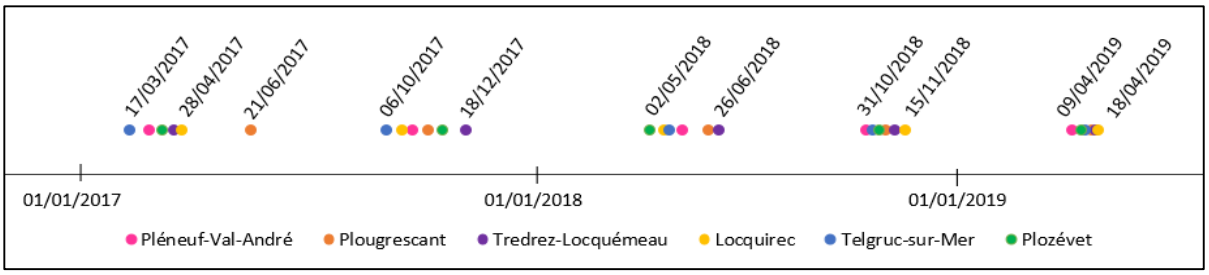
alors que la portée théorique du tachéomètre est de 1000 m. Mais, comme toutes les méthodes de mesure optique, il faut que les points à mesurer restent visibles par le système et, au-delà de 200 à 300 m, il est généralement difficile d'effectuer une visée précise pour la mesure topographique.

La précision des levés photogrammétriques dépend également de la distance entre l'objet et le capteur de l'appareil photo mais aussi de la qualité des images et de la dimension des pixels (Pesci et al., 2004). Pour une prise de vue optimale, l'opérateur doit être situé à une distance lui permettant de photographier toute la hauteur de l'abrupt en restreignant la prise d'autres éléments tel le ciel ou la plage.

7.1.2- Levé photogrammétrique

Les six sites d'étude ont fait l'objet de levés photogrammétriques deux fois par an, au printemps et à l'automne, entre le 17 mars 2017 et le 18 avril 2019 (Fig. 138). Pour chacun des sites, 5 levés ont pu être réalisés soit un total de 30 acquisitions sur 25 mois.

Fig. 138 : Chronologie des levés réalisés sur les sites d'étude entre mars 2017 et avril 2019.



7.1.2.1- Instrumentation des sites

Chacun des sites d'étude a été équipé de plusieurs points de calage (entre 4 à 7 points selon les sites), matérialisés par un clou topographique en laiton scellé sur des surfaces planes, dans la mesure du possible (Tab. 14). Ainsi, ces clous ont été plantés au niveau de substrats rocheux ou d'ouvrages bétonnés qui ne risquaient pas d'être mobilisés à l'échelle de plusieurs années. De plus, ils ont été disposés de façon la plus hétérogène possible sur les sites d'étude afin d'obtenir de meilleurs résultats lors de l'étape de géoréférencement. Sur chaque site, un des clous topographiques est utilisé comme point de mise en station de la base DGPS (*Differential Global Positioning System*). L'ensemble des points de calage présents sur les sites est mesuré lors de chaque mission afin de replacer les mesures relatives dans un référentiel absolu (Lambert 93) ainsi que de quantifier les marges d'erreur inhérentes à la mesure d'un levé à l'autre.

Tab. 14 : Nombre de points de calage installés sur chaque site.

Site d'étude	Nombre de points de calage
Pléneuf-Val-André	7
Plougrescant	5
Tredrez-Locquémeau	5
Locquirec	6
Telgruc-sur-Mer	4
Plozévet	7

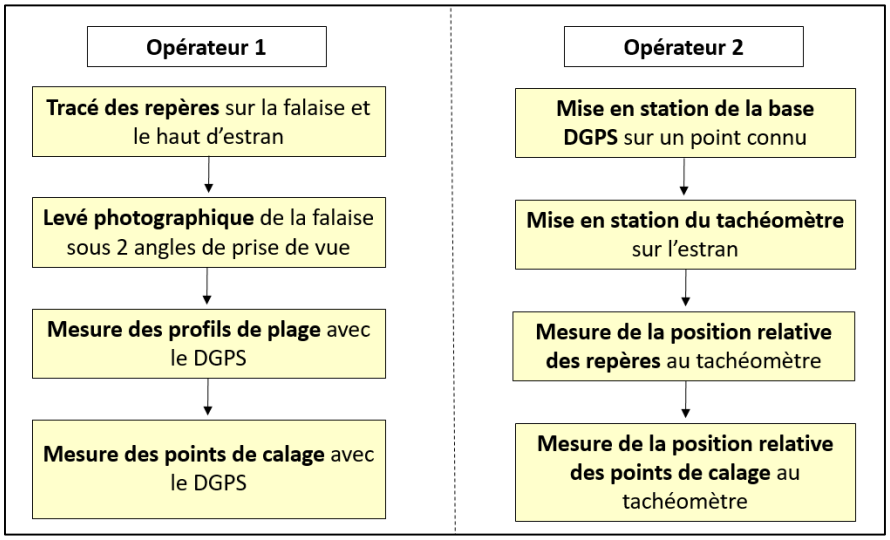
Clou topographique fixé sur le platier à Pléneuf-Val-André.

Les coordonnées absolues du point de mise en station de la base DGPS sont connues grâce à une acquisition réalisée pendant plusieurs heures. Le géoréférencement des autres points de calage installés sur chacun des sites a été réalisé en mesurant les coordonnées de ces points en mode RTK (*Real Time Kinematic*) afin d'obtenir une plus grande fiabilité.

7.1.2.2- Protocole d'acquisition

Le protocole d'acquisition repose sur la prise de photographies du front de falaise et sur le géoréférencement des repères visibles sur les photographies. Ce géoréférencement s'effectue en relevant la position des repères à l'aide d'un tachéomètre dont les mesures sont replacées dans un référentiel absolu grâce aux points de calage qui sont également relevés au tachéomètre (et dont les coordonnées absolues sont connues). Le protocole d'acquisition se déroule en plusieurs étapes résumées dans l'organigramme ci-dessous :

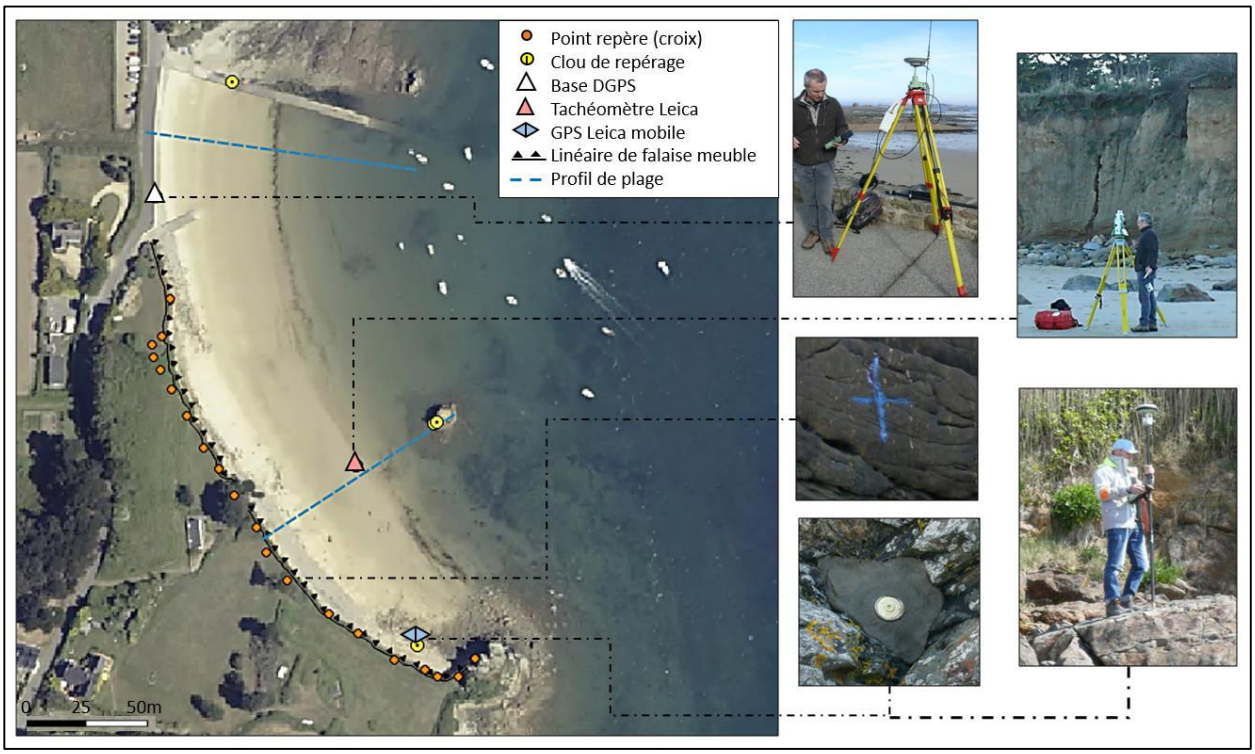
Fig. 139 : Organigramme du protocole d'acquisition.



Une équipe de deux personnes, au minimum, est nécessaire pour réaliser le levé : une personne chargée du tachéomètre et une personne chargée du tracé des repères et de la prise des photographies (Fig. 139). Il est important de géolocaliser le plus précisément possible les repères sur la falaise car l'imprécision de leur mesure se reporte automatiquement sur le nuage de points lors de son géoréférencement dans le système de coordonnées cartographiques de référence (Letortu, 2013). Afin de réduire les erreurs de positionnement des repères, nous avons opté pour des croix tracées sur la falaise avec de la poudre bleue (craie pour l'arpentage), au lieu de cibles cylindriques car elles induisent une différence de position entre la mesure topographique et la surface visible sur les photographies (Fig. 140). De plus, la couleur bleue des croix permet un repérage et un pointage relativement facile sur les photographies. Ces repères tracés à partir de la craie d'arpentage sont espacés d'environ 10 à 30 m et répartis à différentes hauteurs en partie basse de la falaise et sur le haut de plage. Entre 10 à 21 repères sont tracés sur chaque site. La position relative des points repères et des points de calage est mesurée par le tachéomètre installé sur l'estran (Fig. 140).

Deux séries de photographies de la falaise sont réalisées avec un angle maximal de 20° par rapport à la perpendiculaire au trait de côte et avec un taux de recouvrement supérieur à 60 % entre deux photographies successives. Le recouvrement entre deux clichés doit effectivement être au minimum de 50 % pour permettre l'assemblage des photographies et les calculs de stéréophotogrammétrie (Jaud, 2011). Enfin, un à deux profils transversaux au rivage (cross-shore), depuis le pied de falaise jusqu'au bas d'estran, sont réalisés à partir du DGPS pour suivre l'évolution morphologique des plages (Fig. 140).

Fig. 140 : Configuration des levés topographiques au tachéomètre sur le site de Plougrescant.



Sur chacun des sites, l'étendue du linéaire côtier étant limité à 300 mètres, une seule mise en station est nécessaire, excepté, pour le site de Pléneuf-Val-André où deux mises en station sont effectuées, à chaque levé, pour couvrir l'ensemble de la zone d'étude : une station sur la plage des Vallées et une seconde station sur la grève de Nantois.

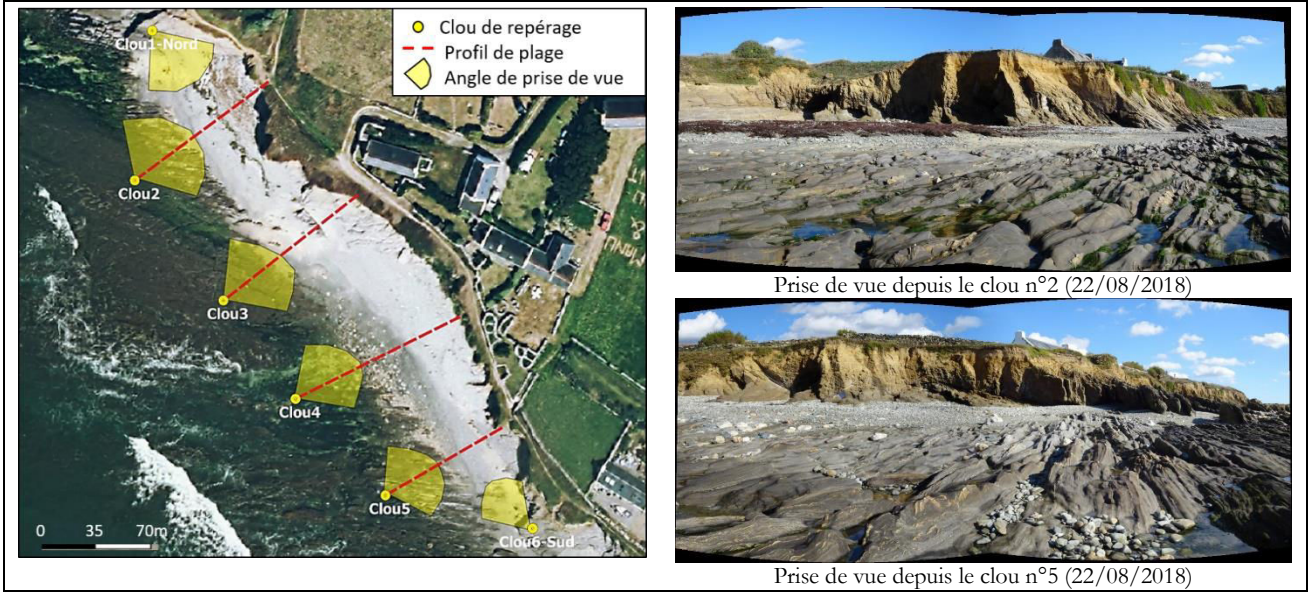
7.1.2.3- Optimisation du protocole d'acquisition

L'optimisation des acquisitions sur l'ensemble des sites passe par la prise en compte des facteurs pouvant nuire au bon traitement des images. La qualité des levés photogrammétriques est effectivement conditionnée par les paramètres météorologiques. En cas de pluie, les photographies du front de falaise deviennent inexploitables, d'une part, parce que les gouttes d'eau représentent des zones masquant le front de falaise sur les images et, d'autre part, les gouttes d'eau représentent des « objets » en mouvement qui rendent difficile l'assemblage des images par les logiciels de traitement. De même, un fort vent peut être problématique car il agite la végétation présente sur le front de falaise, qui devient alors un objet en mouvement et représente ainsi une contrainte pour l'exploitation des photographies.

L'optimisation des levés passe donc par la prise en compte de l'ensemble de ces paramètres environnementaux. Un levé optimal doit être réalisé lors d'une journée sans pluie, avec peu de vent, pendant une plage horaire correspondant à la basse mer pour une marée de vives-eaux mais aussi permettant le levé photogrammétrique sans contre-jour (dépendant de l'orientation de la falaise). Dans la pratique, il est parfois difficile de combiner tous ces critères.

Par ailleurs, selon les sites d'étude, la méthode d'acquisition présentée précédemment peut faire l'objet d'adaptations ou d'améliorations. Ainsi, sur le site de Plozévet, en raison de la morphologie très découpée de la côte et d'un haut de plage mobile, le protocole d'acquisition a été complété par un levé photographique du front de falaise et du haut d'estran, réalisé avec la même prise de vue (angle, distance et hauteur) depuis les six clous de repérage implantés sur le site (Fig. 141). De plus, la morphodynamique du haut d'estran est suivie par le levé de quatre profils de plage.

Fig. 141 : Configuration des levés photographiques et topographiques supplémentaires sur le site de Plozévet.



Prise de vue depuis le clou n°2 (22/08/2018)

Prise de vue depuis le clou n°5 (22/08/2018)

7.1.2.4- Matériel utilisé

Les levés photogrammétriques sont basés sur l'utilisation d'un appareil photo numérique et d'un tachéomètre. Le choix de l'appareil photo s'est porté sur l'utilisation d'un compact expert (Sony Cyber-shot RX100, capteur 17 mégapixels), équipé d'un objectif grand angle qui permet une prise de vue assez large et de conserver une géométrie homogène pour les images enregistrées durant le levé photogrammétrique (Fig. 142).

Fig. 142 : Outils utilisés pour les levés photogrammétriques.

Tachéomètre Leica TS15	**GPS Trimble GeoXH 6000**	**Appareil photo Sony Cyber-shot RX100**

Les levés topographiques ont été réalisés avec un **tachéomètre Leica TS15** (Fig. 142). Le tachéomètre permet de mesurer des angles et des distances grâce à un laser réfléchi sur une cible, ici la paroi de la falaise, et ainsi de mesurer la position relative des points de repère sur le terrain. La précision horizontale et verticale donnée par le tachéomètre est de l'ordre de 2 mm (Leica Geosystems, 2015). L'inconvénient principal du tachéomètre est qu'il nécessite un temps de mise en station : transport du matériel sur l'estran (jusqu'à 500 m de la zone de stationnement, selon les sites), calage et mise à niveau de l'instrument. Par conséquent, les levés requièrent la présence d'au moins deux personnes en raison de la durée d'acquisition limitée due aux contraintes horaires induites par la marée semi-diurne.

Afin de réduire le temps de mise en station et de rendre le levé réalisable par un seul opérateur, le **GPS portable Trimble GeoXH 6000** a été testé pour effectuer les levés topographiques et évaluer la

possibilité de remplacer, à terme, le tachéomètre (Fig. 142). La précision donnée par cet appareil, après post-traitement, est *a priori* de 1 cm, ce qui est acceptable dans le cadre du suivi de l'évolution du littoral. Ce type d'instrument est, par ailleurs, largement utilisé pour le suivi morphodynamique des plages (Morton et al., 1993 ; Baptista et al., 2008 ; Krueger et al., 2009 ; Dornbusch, 2010). Toutefois, l'utilisation de cet appareil a été abandonnée, à la suite du deuxième levé photogrammétrique, du fait de la marge d'erreur des mesures, notamment sur la composante verticale, et donc de l'erreur induite sur les volumes quantifiés. La comparaison de mesures prises sur des mêmes points avec le tachéomètre et le GPS portable montre effectivement une marge d'erreur moyenne de 5 cm pour les composantes X et Y et de 12 cm pour la composante Z (le calcul de ces erreurs sera détaillé au sous-chapitre 7.2.1). Les erreurs de positionnement du GPS portable peuvent être liées à la distance élevée entre l'antenne mobile et la station de base utilisée pour post-traiter les données (Leclerc, 2016). Les stations de base les plus proches sont effectivement situées entre 10 et 42 km des sites d'étude (Tab. 15). L'imprécision des mesures est également liée à la faible réception des signaux satellites au moment de l'acquisition, notamment dans les zones d'ombre ou de réflexion des signaux des satellites au pied de hautes falaises (cas de Pléneuf-Val-André) ou de falaises très végétalisées, recouvertes par des arbres (cas de Trédrez-Locquémeau). De plus, à ces erreurs, peut s'ajouter un décalage entre l'antenne et la position des points relevés, lié à l'utilisation même du GPS portable (différence de l'antenne au point à mesurer, verticalité de l'antenne…).

Tab. 15 : Stations de base les plus proches des sites d'étude utilisées pour le post-traitement des données acquises au GPS portable.

Site d'étude	Station de base utilisée	Distance de la station de base au site d'étude
Pléneuf-Val-André	RGP Saint-Brieuc*	19 km
Plougrescant	RGP Lannion*	21 km
Trédrez-Locquémeau	RGP Lannion*	10 km
Locquirec	RGP Lannion*	19 km
Telgruc-sur-Mer	RGP Brest*	20 km
Plozévet	RGP Concarneau*	42 km

* RGP : Réseau GPS Permanent

Face à l'imprécision des données acquises par le GPS portable, les levés topographiques suivants ont donc seulement été réalisés avec le tachéomètre Leica.

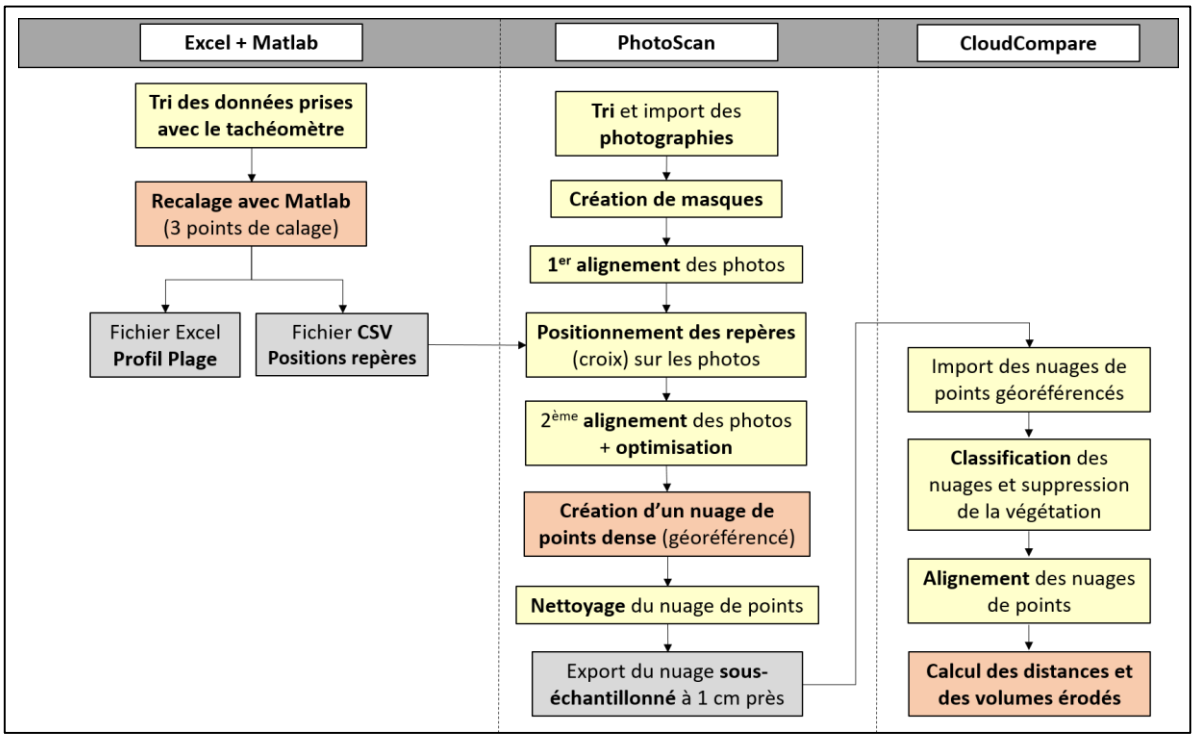
7.1.3- Traitement des données

Le traitement des données nécessite le recours à quatre logiciels et se décompose en quatre étapes principales (Fig. 143) :

1) la correction des données acquises sur le terrain ;
2) la création d'un nuage de points et son géoréférencement ;
3) le nettoyage et la classification des nuages ;
4) l'alignement des nuages et le calcul des volumes érodés.

Cette méthode de traitement des données reprend une partie des travaux de M. Jaud (2011) et de P. Letortu (2013) qui ont exploité des Modèles Numériques de Terrain (MNT) générés à partir de données topographiques acquises au scanner laser terrestre (TLS, pour « *Terrestrial Laser Scanning* ») pour étudier la dynamique littorale de côtes sableuses et à falaise. La méthode a été adaptée au suivi photogrammétrique des falaises meubles à partir d'un tachéomètre et des logiciels de traitement photogrammétrique à disposition, en l'occurrence Agisoft PhotoScan™ (version 1.4.0) et CloudCompare™ (version 2.6.3).

Fig. 143 : Organigramme de la chaine de traitement des données.



7.1.3.1- Correction des données topographiques

Les positions relatives acquises à partir du tachéomètre sont recalées en appliquant une rotation, via le logiciel Matlab™, afin de connaitre leur position absolue dans le système de coordonnées Lambert 93. Cette étape s'effectue à partir de trois points de calage dont la position est connue et qui sont relevés chaque fois au tachéomètre et au DGPS Leica.

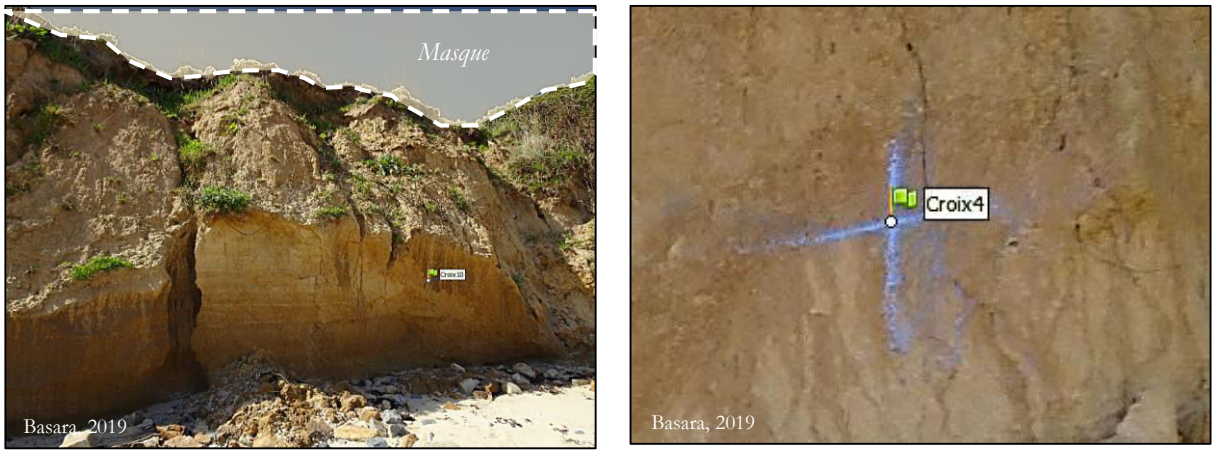
Les données acquises à partir du GPS portable sont corrigées en post-traitement via le logiciel Pathfinder™. Cette correction s'effectue via les stations de base du réseau GPS permanent qui fournissent les données acquises en continu (Tab. 15). Ceci permet de réduire les erreurs GPS liées, par exemple, à une faible réception des signaux satellites au moment de l'acquisition.

7.1.3.2- La création du nuage de points et son géoréférencement

Cette étape se réalise avec le logiciel PhotoScan™ dans lequel ont été importées les photos acquises sur le terrain. Le logiciel permet un assemblage des photographies successives possédant un taux de recouvrement suffisant, puis la création d'un nuage de points dense.

Lors de l'étape d'assemblage des photographies, des masques sont utilisés dans PhotoScan™ afin de délimiter des secteurs qui peuvent être problématiques pour la corrélation (ex : ciel, éléments en mouvement comme la végétation) (Fig. 144). Les zones masquées ne sont alors pas prises en compte pour le traitement des données et permettent d'améliorer l'alignement des photographies.

Fig. 144 : Exploitation des photographies sous le logiciel PhotoScan : création de masque et pointage d'un repère sur la falaise de Pors-Hir à Plougrescant.



Le géoréférencement du nuage de points dans le système de coordonnées cartographiques Lambert 93 s'effectue à partir des coordonnées absolues calculées pour les repères (croix) tracés sur la falaise et qui constituent des points d'appui. Lors de l'étape du géoréférencement, les repères sur la falaise ayant une marge d'erreur supérieure à 10 cm ne sont pas utilisés. Cette méthode aboutit à un géoréférencement de haute précision avec une erreur quadratique moyenne qui se situe entre 0,006 et 0,035 m pour les levés réalisés au tachéomètre et entre 0,027 et 0,055 m pour les levés réalisés avec le GPS portable (Annexe 8).

7.1.3.3- Le nettoyage et la classification du nuage de points

Le nuage de points géoréférencé constitue un modèle numérique de surface où de nombreux points ne représentent pas la topographie *stricto sensu* (Jaud, 2011) comme des objets ou des personnes situées sur la trajectoire des prises de vue photographiques. Cette étape de nettoyage s'effectue manuellement sur le logiciel PhotoScan™. Lorsque cela est possible, la végétation dense sur le front de falaise est également enlevée.

En raison de la très haute résolution de la mesure, les fichiers de nuage de points deviennent rapidement volumineux (supérieurs à 4 GB) et la plupart des logiciels ne peuvent supporter leur affichage 3D à l'écran. La densité des nuages de points est donc réduite afin de permettre un traitement moins lourd des données. Ce sous-échantillonnage est choisi de façon à ce que la densité du nuage résultant ait un espace inter-points maximal de 0,01 m. Les nuages de points réduits sont ensuite importés dans le logiciel CloudCompare™ afin de pouvoir les comparer et quantifier les volumes de matériaux perdus (Fig. 143).

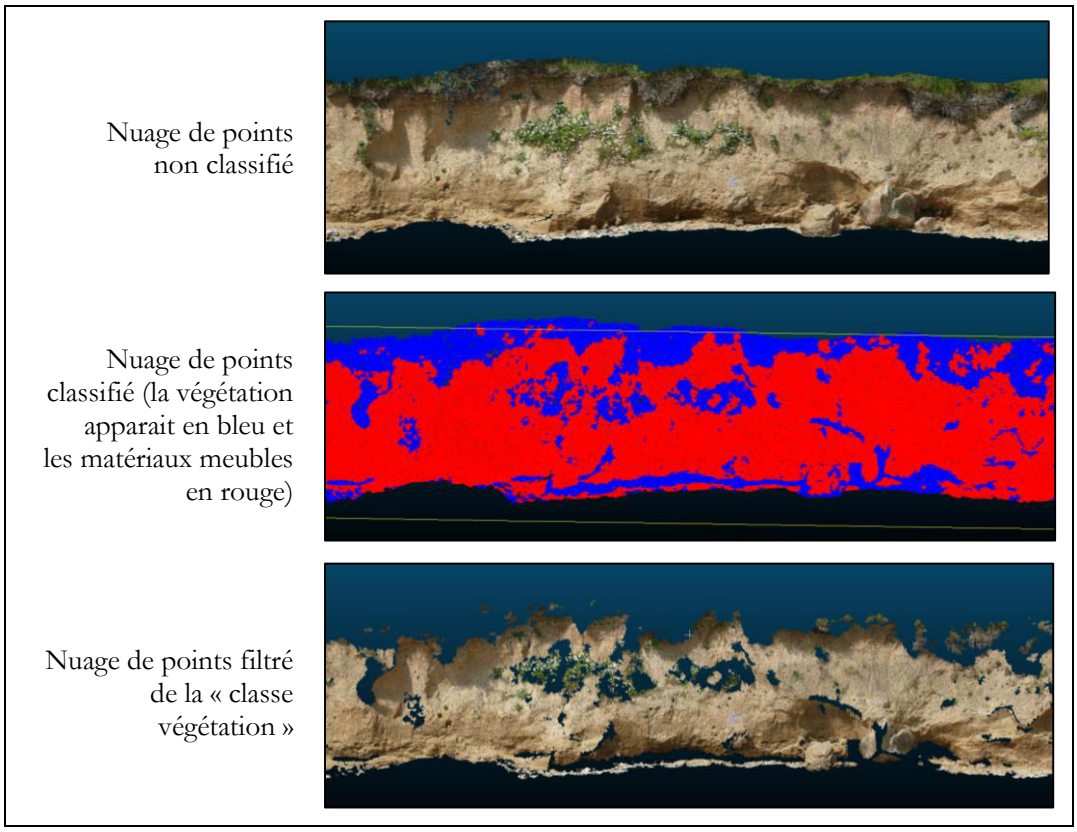
Malgré le nettoyage manuel des portions de falaise végétalisées, de nombreux points du nuage géoréférencé correspondent à de la végétation et induisent, par conséquent, une erreur sur le calcul des volumes. Les fronts de falaise sont effectivement végétalisés entre 11 % (site de Telgruc-sur-Mer) et 72 % (site de Trédrez-Locquémeau) (Tab. 16). Différentes méthodes ont été testées pour filtrer la végétation (Prokop et Panholzer, 2009 ; Brodu et Lague, 2012 ; Letortu, 2013). Ici, la méthode développée par Brodu et Lague (2012) est appliquée. Elle consiste en une classification multi-échelles des nuages de points via le plugin *Canupo* du logiciel CloudCompare™. Cet outil permet de créer une classification de plusieurs sous-ensembles – ici, la végétation et les formations meubles – et de les appliquer aux nuages de points afin de différencier les éléments (Fig. 145). Un fichier de classification est créé pour chaque site d'étude car la lithologie des falaises et leur couverture végétale diffèrent et, par conséquent, les pixels et les classes sont différents. Afin de ne garder que les points représentant les matériaux meubles, les nuages classifiés sont ensuite filtrés par les valeurs de la classe correspondante (Fig. 145). Toutefois, malgré la rigueur employée pour créer les fichiers de classification, le nuage de points filtré peut encore contenir des points représentant la végétation. Le filtrage reste, en effet, complexe du fait de la gamme de pixels

associée à chaque classe et du fait que la végétation sur les falaises meubles est très souvent rase (Bioret, 1989). A l'inverse, les zones d'ombre peuvent être identifiées comme de la végétation et elles sont alors retirées lors du filtrage du nuage de points (Fig. 145).

Tab. 16 : Pourcentage de végétation recouvrant les fronts de falaise sur les sites d'étude.

Site d'étude	Pourcentage de végétation
Les Vallées (Pléneuf-Val-André)	39
Nantois (Pléneuf-Val-André)	32
Plougrescant	24
Trédrez-Locquémeau	72
Locquirec	27
Telgruc-sur-Mer	11
Plozévet	12

Fig. 145 : Classification et filtrage des nuages de points sous CloudCompare (exemple des falaises de Plougrescant).



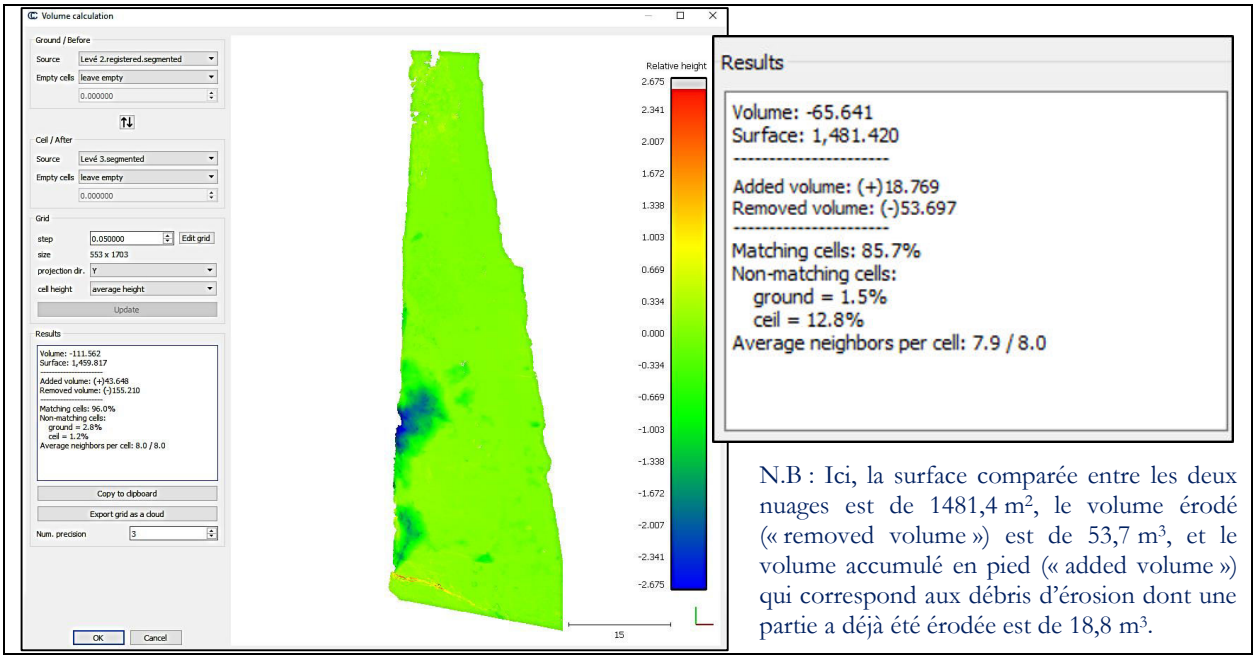
N.B : dans cet exemple, le nuage de points filtré contient encore des points représentant la végétation.

7.1.3.4- Alignement des nuages et calcul des volumes érodés

Lors de l'affichage simultané de deux nuages, il est possible d'observer les nuages de points directement utilisables et ceux dont la superposition ne s'avère pas toujours parfaite, notamment les nuages réalisés à partir des levés au GPS portable qui possèdent un décalage dans la composante verticale. Dans ce cas, grâce aux surfaces fixes sur les nuages de points (par exemple l'escalier bétonné sur le site de Locquirec), le recalage des nuages est possible à partir du choix d'un levé de référence (le plus fiable). Grâce à ces zones fixes, les nuages problématiques, réalisés à partir des levés au GPS portable, sont recalés avec la fonction *Align* du logiciel CloudCompare™. Cette fonction utilise l'algorithme « *4 points Congrunt Sets For Robust Registration* » de Aiger et al. (2008) qui nécessite au minimum quatre points d'appui pour un recalage rigide du nuage par une translation ou une rotation.

Le calcul des volumes s'effectue ensuite entre deux nuages de points nettoyés de la végétation (et éventuellement recalés) (Fig. 143). La génération d'un maillage est nécessaire pour quantifier l'ablation du front de falaise entre deux nuages de points acquis à différentes dates. En raison de la densité très forte des points constituant les nuages et de la taille des surfaces étudiées, le logiciel PhotoScan™ n'est pas capable de gérer le passage en maille 3D en utilisant l'ensemble des points des nuages. En effet, même après le sous-échantillonnage des nuages de points à 1 cm, la densité de points reste élevée. Par exemple, elle est d'environ 25 000 points par m^2 pour la falaise de Nantois, à Pléneuf-Val-André, ou de 44 000 points par m^2 pour la falaise de l'anse du Caon à Telgruc-sur-Mer. Afin de quantifier l'ablation des falaises à partir des nuages de points à disposition, l'outil *Volume* du logiciel CloudCompare™ a alors été utilisé. Cet outil permet de connaitre le volume de matériaux manquant en utilisant un processus de maillage des nuages. L'outil calcule les différences topographiques en estimant la normale à la surface des nuages et en calculant la distance entre les deux surfaces le long de cette normale. Il est ainsi possible de connaitre les volumes sédimentaires « perdus » ainsi que les volumes sédimentaires des zones d'accumulation, pour les débris d'érosion en pied de falaise par exemple (Bitelli et al., 2004 ; Pesci et al., 2004 ; Prokop et Panholzer, 2009 ; Letortu, 2013) (Fig. 146). Toutefois, cet outil permet de représenter la distance relative entre deux nuages selon un seul axe principal (X ou Y). Or, les fronts de falaise étudiés sont rarement linéaires. La quantification des volumes a donc nécessité un découpage des fronts de falaise par section présentant une orientation homogène et un calcul des volumes selon la direction propre à chaque section.

Fig. 146 : Fenêtre de l'outil Volume du logiciel CloudCompare, généré pour la comparaison des falaises meubles de Nantois, selon la direction Y, pour les levés acquis le 20/10/2017 et le 28/05/2018.

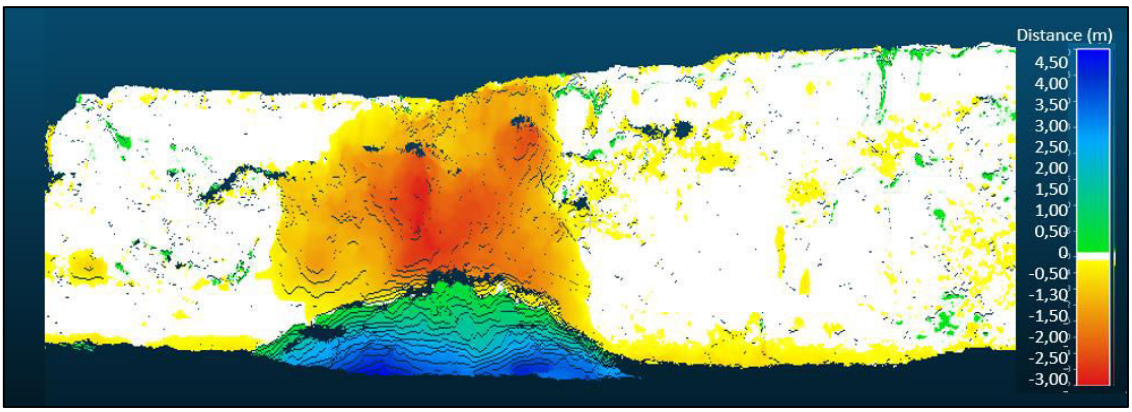


N.B : Ici, la surface comparée entre les deux nuages est de 1481,4 m^2, le volume érodé (« removed volume ») est de 53,7 m^3, et le volume accumulé en pied (« added volume ») qui correspond aux débris d'érosion dont une partie a déjà été érodée est de 18,8 m^3.

Afin d'identifier les secteurs d'ablation et d'analyser la répartition spatiale de l'érosion le long du linéaire de falaise, la distance entre deux nuages de points levés à des temps différents est ensuite calculée grâce à l'outil *Compute cloud/cloud distance* du logiciel CloudCompare™. Les distances sont obtenues par soustraction du nuage de points le plus ancien au nuage de points le plus récent (Fig. 147). La distance calculée obtenue à partir d'un algorithme de type Distance de Hausdorff (Oniga et Chirilă, 2013) correspond alors à la distance voisine la plus proche entre les points des deux nuages. La densité de points élevée des nuages à disposition nous permet d'utiliser cette méthode car, dans ce cas, le voisin le plus proche est considéré comme le point réel le plus proche sur la surface représentée par le nuage. De plus, le calcul de distance « nuage à nuage » est amélioré en utilisant la modélisation *Least Square Plane* qui donne une meilleure précision par ajustement aux moindres carrés. Un champ scalaire « Distance » est ajouté au

nuage de référence et permet de déterminer les zones d'ablation du front de falaise (valeurs négatives) et les zones d'accumulation (valeurs positives) (Fig. 147).

Fig. 147 : Zones d'accumulation et d'ablation d'une portion de falaise de la plage des Vallées apparaissant entre les levés du 20/10/2017 et 28/05/2018.



7.1.4- Identification des facteurs impliqués dans l'érosion

L'efficacité des forçages marins et subaériens dans l'érosion des falaises peut varier sur de très petites distances et dépend des caractéristiques internes du milieu (Joyal, 2015). En conséquence, l'analyse spatiale de l'érosion est effectuée au regard de la lithologie et de la géomorphologie des falaises. Afin d'identifier les facteurs préparatoires et/ou déclenchants des mouvements de terrain repérés sur les sites d'étude pendant la période de suivi, et dont au moins le mois de survenue est connu, trois forçages météo-marins pour lesquels on dispose de données journalières sont analysés. Il s'agit des coefficients de marée, des hauteurs de précipitations et de la vitesse du vent qui renseigne sur l'état de mer.

- **Les actions marines**

L'analyse historique régionale (chapitre 5) et la quantification des taux de recul à moyen terme (chapitre 6) ont montré l'influence des marées dans l'érosion des falaises meubles, notamment à partir d'un coefficient de 100. En plus d'élever l'altitude du plan d'eau (Lee, 2008 ; Cariolet, 2011), le coefficient de marée influencerait le niveau de la nappe facilitant ainsi le déclenchement de mouvements gravitaires ou la réactivation de glissements (Grainger et Kalaugher, 1987). Le coefficient de marée journalier, sur la période de suivi, est connu à partir de la base de données du SHOM (https://maree.shom.fr) ainsi que les hauteurs d'eau et le marnage dans les ports secondaires ou de référence les plus proches des sites d'étude (Tab. 17).

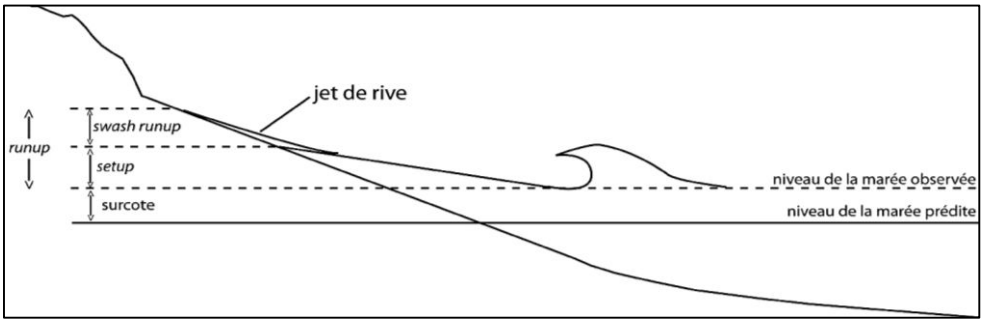
Par ailleurs, dans le but d'identifier les modalités de recul des falaises meubles et le degré d'implication des actions marines, l'altitude du pied de falaise par rapport aux niveaux d'eau moyens est analysée. Ainsi, cinq niveaux caractéristiques de la marée ont été calculés sur chaque site d'étude (Tab. 17) : les niveaux marins extrêmes de pleine mer pour des probabilités d'occurence de 10, 50 et 100 ans ainsi que les Pleines Mers moyennes de Vives-Eaux (PMVE) et les Plus Hautes Mers Astronomiques (PHMA) qui correspondent aux niveaux d'eau atteints pour un coefficient de marée respectif de 95 et de 120. Les niveaux d'eau sont calculés à partir des références altimétriques maritimes données par le SHOM (Pineau-Guillou, 2012) sur les ports secondaires les plus proches des sites d'étude (Tab. 17).

Tab. 17 : Niveaux d'eau associés à chaque site d'étude (source : SHOM).

Site d'études	Port secondaire le plus proche	PMVE	PHMA	Probabilité d'occurence des niveaux d'eau extrême		
				10 ans	50 ans	100 ans
Pléneuf-Val-André	Dahouët (3,2 km)	5,53	6,81	6,80	7,00	7,10
Plougrescant	Port-Béni (3,7 km)	4,58	5,70	5,50	5,60	5,60
Trédrez-Locquémeau	Locquémeau (0,8 km)	4,23	5,14	5,20	5,40	5,50
Locquirec	Locquirec (2,4 km)	4,27	5,15	4,90	4,90	5,00
Telgruc-sur-Mer	Morgat (8,8 km)	3,28	4,12	4,20	4,40	4,40
Plozévet	Audierne (8,8 km)	2,76	3,34	3,50	3,60	3,70

Les valeurs des niveaux d'eau sont toutefois à utiliser avec précaution du fait des incertitudes associées aux méthodes d'interpolation graphique. De plus, il est important de rappeler que ces niveaux d'eau ne tiennent pas compte du *runup* qui est la somme de deux phénomènes distincts (Komar, 1998 ; Lee, 2008 ; Cariolet, 2011) : le *wave setup* qui est l'élévation liée à une accumulation d'eau entre la zone de déferlement et la plage et le *swash runup* qui correspond à l'élévation maximale atteinte par le jet de rive (Fig. 148). En conséquence, les niveaux d'eau réels atteints sur les sites peuvent être supérieurs aux niveaux d'eau calculés à partir des marégraphes.

Fig. 148 : Représentation schématique du setup et du runup (Cariolet, 2011).



- **Les actions subaériennes**

L'analyse historique régionale et la quantification des taux de recul à moyen terme (cf. chapitres 5 et 6) ont également montré le rôle des précipitations dans l'érosion des falaises meubles.

Les stations Météo-France les plus proches des sites d'étude (Annexe 3) permettent d'analyser l'influence des précipitations sur la cinématique des falaises meubles à moyen et long termes, étant donné que ces séries de mesure sont continues et permettent de remonter jusqu'aux années 1950. Cependant, ces données météorologiques se révèlent insuffisamment précises pour la compréhension des dynamiques à court terme des falaises étudiées. Ces stations de mesures, éloignées de plusieurs dizaines de kilomètres des sites d'étude ne peuvent prendre en compte les effets locaux de relief et de côte (Savelli et al., 2015). C'est pourquoi, des stations météorologiques multi-paramètres *La Crosse Technology WM9280* ont été installées sur chacun des sites d'étude (Tab. 18). Elles ont été positionnées, chacune, en sommet ou en arrière des falaises, sur des terrains privés, avec l'accord des propriétaires. Ces stations ont permis d'enregistrer les données quotidiennes et horaires relatives aux hauteurs de précipitation, aux températures, à la vitesse et à la direction de vent et à la pression atmosphérique. Les stations météorologiques possèdent une capacité de stockage permettant d'enregistrer les mesures horaires sur 4 mois, demandant ainsi d'être relevées au moins trois fois par an. Toutefois, sur la période d'enregistrement, il existe des lacunes dans les séries de mesure qui sont dues à des dysfonctionnements des capteurs ou liées à des facteurs environnementaux externes (ex : orage du 9 juin 2018 effaçant toutes les données enregistrées dans la console de la station météorologique de Pléneuf-Val-André).

Tab. 18 : Caractéristiques des stations météorologiques installées sur les sites d'étude.

Site d'étude	Distance au sommet (m)	Altitude (m)	Date début mesures	Remarques
Pléneuf-Val-André	750	63	10/01/18	3 mois de données effacées par l'orage du 09/06/18
Plougrescant	10	9	25/06/18	Dysfonctionnement du capteur pluviométrique par intermittence
Trédrez-Locquémeau	26	24	23/01/18	
Locquirec	3	16	23/01/18	Panne de batterie : 10 jours de données manquantes
Telgruc-sur-Mer	1 600	86	10/12/2018	
Plozévet	5	11	04/02/18	Dysfonctionnement du capteur pluviométrique durant 3 mois

Station météorologique installée sur le site de Trédrez-Locquémeau

Par ailleurs, de nombreux auteurs ont démontré que le déclenchement des phénomènes d'érosion sur les falaises était lié non seulement aux précipitations mais aussi aux fluctuations des nappes phréatiques (Cappa et al., 2004 ; Pierre et Lahousse, 2006 ; Lissak, 2012). Afin d'étudier le rôle des nappes phréatiques dans l'érosion des falaises meubles et de connaitre les relations entre la pluviométrie et les variations des nappes, une sonde piézométrique a été installée sur le site de Locquirec (Fig. 149). Un forage de 12 mètres de profondeur, réalisé par la société Ginger-CEBTP, en sommet de la falaise meuble, dans le cadre d'un diagnostic pour conforter la falaise (Fradet, 2015), a été réutilisé à cet effet. Toutefois, il n'a pas été possible d'installer de sonde piézométrique sur les autres sites d'étude en raison de la difficulté d'obtenir une autorisation des propriétaires pour réaliser un forage et installer un piézomètre.

Fig. 149 : Sonde piézométrique installée en sommet de falaise sur le site de Locquirec (vue depuis l'ouest).

7.2- Résultats

Les levés photogrammétriques fournissent une spatialisation fine des phénomènes d'ablation sur les sites d'étude. Ces levés permettent ainsi de connaitre la répartition spatiale de l'érosion, les volumes érodés, les périodes de départ des matériaux et, par conséquent, d'apporter des éléments de réponse quant aux processus responsables.

7.2.1- Estimation de la marge d'erreur

L'estimation de la marge d'erreur sur les nuages de points créés est importante car elle détermine le changement minimal qui peut être détecté (Oppikofer et al., 2009). On distingue trois types d'erreur :

- l'**erreur de positionnement** qui correspond à l'erreur de la position des clous de repérage. Cette erreur est liée à la précision des instruments (tachéomètre et GPS portable) et à la qualité des levés dépendant eux-mêmes des paramètres environnementaux (ex : pluie, vent…) ;

- l'**erreur de recalage** qui correspond à l'erreur lors de la génération du nuage de points. Elle est liée au traitement photogrammétrique en lui-même (recalage des photographies par l'identification de pixels communs dans les zones de recouvrement des images, choix des repères utilisés sur la falaise pour le géoréférencement du nuage de points) ;

- l'**erreur sur les différentiels** qui correspond à l'erreur entre deux nuages de points d'un même site, acquis à des dates différentes. Cette erreur provient de la comparaison des deux nuages à l'aide du logiciel CloudCompare™. Elle correspond à l'erreur totale puisqu'elle inclue les erreurs de positionnement et de recalage.

7.2.1.1- L'erreur de positionnement

L'erreur de positionnement est évaluée à partir de la mesure des positions des clous de repérage effectuée lors de chaque levé. Ainsi, la réitération des mesures sur un même point permet de connaitre les erreurs lors des levés mesurant la position des repères et qui sont utilisés pour le géoréférencement (Malet et al., 2002 ; Jaud, 2011). Cette erreur est évaluée en calculant l'erreur quadratique moyenne des coordonnées des clous de repérage mesurées au tachéomètre par rapport à leur position relevée au DGPS (et de même pour le GPS portable), sur chaque site (Tab. 19).

Tab. 19 : Erreur moyenne de positionnement liée à la mesure au tachéomètre et au GPS portable.

	Tachéomètre			GPS portable		
Site d'étude	**X**	**Y**	**Z**	**X**	**Y**	**Z**
Pléneuf-Val-André	0,005	0,008	0,008	0,027	0,050	0,076
Plougrescant	0,011	0,006	0,014	0,049	0,036	0,227
Trédrez-Locquémeau	0,006	0,009	0,002	0,059	0,071	0,214
Locquirec	0,009	0,012	0,006	0,034	0,031	0,052
Telgruc-sur-Mer	0,012	0,006	0,005	0,041	0,034	0,080
Plozévet	0,004	0,008	0,003	0,041	0,053	0,087
Moyenne	**0,008**	**0,008**	**0,006**	**0,042**	**0,046**	**0,122**

L'erreur moyenne sur les positions des clous de repérage levées au tachéomètre Leica est de **0,008 m en x, 0,008 m en y et 0,006 m en z**. La position des clous de repérage levée au GPS portable présente une erreur quadratique moyenne de **0,042 m en x, 0,046 m en y et 0,122 m en z**. Les erreurs de positionnement sont donc beaucoup plus importantes avec le GPS portable pour les raisons évoquées un peu plus tôt, notamment la distance élevée entre l'antenne mobile et la station de base pour post-traiter les données (Tab. 15). La marge d'erreur des mesures réalisées au GPS portable est la plus grande

sur le site de Trédrez-Locquémeau (0,059 m en x, 0,071 m en y et 0,214 en z), en raison de la forte couverture végétale et arborée du front de falaise (Tab. 16) ainsi que de la hauteur de l'abrupt (15 m en moyenne).

7.2.1.2- L'erreur de recalage

La deuxième erreur liée au traitement photogrammétrique est générée lors de l'étape de géoréférencement du nuage de points. Afin de minimiser cette erreur, seules les coordonnées des repères les plus fiables sont intégrées lors du géoréférencement des nuages. En effet, certains repères présentent une moins bonne précision en raison de leur distance au tachéomètre ou des conditions météorologiques lors du levé, par exemple.

L'erreur quadratique moyenne (RMS) du géoréférencement se situe entre 0,006 et 0,035 m pour les levés réalisés au tachéomètre et entre 0,027 et 0,055 m pour les levés réalisés avec le GPS portable (Annexe 8). La marge d'erreur du géoréférencement plus élevée sur certains nuages de points est due à des conditions de levé non optimales. En effet, pour plusieurs acquisitions, des phénomènes de contre-jour sont venus perturber les levés photogrammétriques (Annexe 8). Pour le levé réalisé le 26/10/2018 sur la grève de Nantois, l'erreur plus élevée du géoréférencement (0,027) est due à la pluie durant l'acquisition.

La somme de cette erreur de recalage avec l'erreur de positionnement correspond à l'erreur absolue, c'est-à-dire l'erreur entre le nuage brut géoréférencé et la mesure *in situ* (Letortu, 2013). En additionnant ces deux sources d'erreur, la marge d'erreur absolue des nuages est estimée à **± 0,03 m** pour ceux positionnés à partir des levés au tachéomètre et **± 0,17 m** pour ceux positionnés à partir des levés au GPS portable.

7.2.1.3- L'erreur sur les différentiels

L'erreur sur les différentiels correspond à l'erreur entre deux nuages de points d'un même site, acquis à des dates différentes et est généré lors de la comparaison des deux nuages. Ces erreurs peuvent venir d'un décalage entre les nuages de points ou de la présence de végétation par exemple. Afin de quantifier l'erreur sur les différentiels, des zones supposées fixes ont été utilisées sur chaque site d'étude (Tab. 20). La difficulté d'évaluer cette erreur sur les sites à falaises meubles vient du fait que les zones pouvant être considérées « stables », aux courtes échelles de temps, sont peu présentes. Ces zones correspondent à des pointements rocheux ou à des ouvrages bétonnés (ex : escaliers).

Tab. 20 : Zones « fixes » utilisées sur chaque site d'étude pour calculer la marge d'erreur relative.

Site d'étude	Zone « fixe » utilisée
Pléneuf-Val-André	Pointe rocheuse de Nantois
Plougrescant	Pointe rocheuse située au sud du site
Trédrez-Locquémeau	Escalier situé à l'ouest du site
Locquirec	Escalier dans la partie centrale
Telgruc-sur-Mer	Pointe rocheuse située au nord du site
Plozévet	Pointe rocheuse située au sud du site

Les différences de volumes mesurées sur ces zones « stables », à partir de l'outil *Volume* du logiciel CloudCompare™, sont rapportées à la superficie comparée des différentiels afin d'avoir une estimation de la **marge d'erreur sur les volumes** de matériaux soustraits (Annexe 9). Ainsi, plus la superficie des nuages utilisés pour quantifier les volumes est grande, plus l'erreur associée est élevée.

Cette erreur sur les volumes est divisée par la surface afin de connaitre l'**erreur sur l'épaisseur** (ablation exprimée en mètre) des matériaux perdus et qui est alors indépendante de la taille de la surface considérée. Enfin, dans le but de connaitre l'**erreur sur les taux d'ablation**, l'erreur sur l'épaisseur (qui correspond à l'intervalle entre deux acquisitions, c'est-à-dire entre 5 à 7 mois) est rapportée à une année.

L'erreur sur l'épaisseur des matériaux perdus est comprise entre 0,01 et 0,02 m et l'erreur sur les taux d'ablation est comprise entre 0,02 et 0,04 m/an (Annexe 9). Les erreurs les plus élevés correspondent aux différentiels dont au moins un des nuages de points a été positionné avec le GPS portable. Les marges d'erreur plus grandes sur le site de Trédrez-Locquémeau sont liées notamment à la présence de végétation sur le front de falaise car ce site est végétalisé à 72 % (Tab. 16). Malgré le filtrage des nuages, certains points correspondent effectivement à de la végétation et induisent donc une erreur sur les volumes calculés.

Comme nous allons le voir dans la partie suivante, les taux d'ablation sont parfois dans la marge d'incertitude mais ceci est davantage lié à la courte période de comparaison entre deux levés successifs (entre 5 à 7 mois) qu'à la précision des levés et des traitements photogrammétriques.

7.2.2- Volumes produits et répartition temporelle de l'érosion

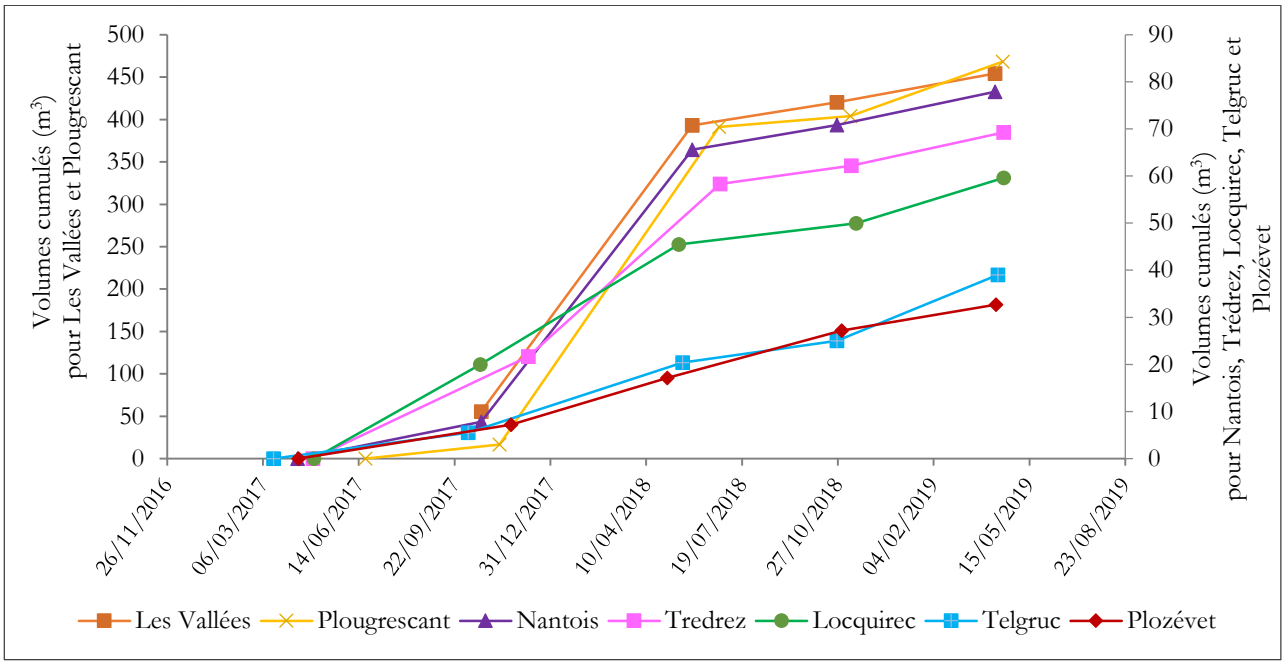
Les cinq levés réalisés sur chaque site d'étude, entre mars 2017 et avril 2019 (Fig. 138), ont permis de quantifier les volumes d'ablation durant deux périodes estivales (mai à octobre) et durant deux périodes hivernales (novembre à avril). Les volumes totaux produits entre 2017 et 2019 sur les six sites sont très variables : de 33 à 468 m^3 (Tab. 21). L'ensemble des différentiels obtenus pour chaque site est présent en Annexe 10. Les volumes d'ablation ont été rapportés à la superficie de chaque site afin d'avoir une appréciation de la cinématique du recul moyen à l'échelle du site.

Tab. 21 : Noms des différentiels, volumes de débris et taux d'ablation sur les sites d'étude entre 2017 et 2019.

Site d'étude	Date du nuage de points ancien	Date du nuage de points récent	Nom du diff-érentiel	Période saisonnière	Nombre de jours entre les levés	Surface étudiée (m^2)	Volume perdu (m^3)	Ablation (m)	Taux d'ablation (m/an)
Les Vallées (Pléneuf)	11/04/2017	20/10/2017	A	été-automne 2017	192	1551	55 (± 21)	0,04	0,07
	20/10/2017	28/05/2018	B	hiver-printemps 2018	220	1334	337 (± 18)	0,25	**0,42**
	28/05/2018	26/10/2018	C	été-automne 2018	151	1391	27 (± 10)	0,02	0,05
	26/10/2018	09/04/2019	D	hiver-printemps 2019	165	1555	34 (± 11)	0,02	0,05
				Total	**728**	**1458**	**454 (± 60)**	**0,31**	**0,16**
Nantois (Pléneuf)	11/04/2017	20/10/2017	A	été-automne 2017	192	1517	8 (± 7)	0,01	0,01
	20/10/2017	28/05/2018	B	hiver-printemps 2018	220	1443	58 (± 19)	0,04	**0,07**
	28/05/2018	26/10/2018	C	été-automne 2018	151	1508	5 (± 4)	0,00	0,01
	26/10/2018	09/04/2019	D	hiver-printemps 2019	165	1590	7 (± 6)	0,00	0,01
				Total	**728**	**1515**	**78 (± 36)**	**0,05**	**0,03**
Plougres-cant	21/06/2017	08/11/2017	A	été-automne 2017	140	703	17 (± 9)	0,02	0,06
	08/11/2017	25/06/2018	B	hiver-printemps 2018	229	766	374 (± 10)	0,49	**0,78**
	25/06/2018	09/11/2018	C	été-automne 2018	137	698	13 (± 5)	0,02	0,05
	09/11/2018	17/04/2019	D	hiver-printemps 2019	159	755	64 (± 5)	0,08	**0,19**
				Total	**665**	**731**	**468 (± 29)**	**0,64**	**0,35**
Trédrez-Locqué-meau	27/04/2017	08/12/2017	A	été-automne 2017	225	868	22 (± 12)	0,02	0,04
	08/12/2017	26/06/2018	B	hiver-printemps 2018	200	937	37 (± 13)	0,04	**0,07**
	26/06/2018	10/11/2018	C	été-automne 2018	137	958	4 (± 10)	0,00	0,01
	10/11/2018	18/04/2019	D	hiver-printemps 2019	159	866	7 (± 9)	0,01	0,02
				Total	**721**	**907**	**69 (± 38)**	**0,08**	**0,04**
Locquirec	28/04/2017	19/10/2017	A	été-automne 2017	174	723	20 (± 10)	0,03	0,06
	19/10/2017	14/05/2018	B	hiver-printemps 2018	207	684	25 (± 9)	0,04	**0,07**
	14/05/2018	15/11/2018	C	été-automne 2018	185	792	5 (± 4)	0,01	0,01
	15/11/2018	18/04/2019	D	hiver-printemps 2019	154	723	10 (± 5)	0,01	0,03
				Total	**720**	**731**	**60 (± 28)**	**0,08**	**0,04**
Telgruc-sur-Mer	17/03/2017	06/10/2017	A	été-automne 2017	203	921	6 (± 5)	0,01	0,01
	06/10/2017	18/05/2018	B	hiver-printemps 2018	224	953	15 (± 7)	0,02	**0,03**
	18/05/2018	26/10/2018	C	été-automne 2018	161	978	5 (± 4)	0,00	0,01
	26/10/2018	12/04/2019	D	hiver-printemps 2019	168	922	14 (± 6)	0,02	**0,03**
				Total	**756**	**944**	**39 (± 22)**	**0,04**	**0,02**
Plozévet	12/04/2017	20/11/2017	A	été-automne 2017	222	827	7 (± 6)	0,01	0,01
	20/11/2017	02/05/2018	B	hiver-printemps 2018	163	853	10 (± 7)	0,01	0,03
	02/05/2018	31/10/2018	C	été-automne 2018	182	819	10 (± 6)	0,01	0,02
	31/10/2018	10/04/2019	D	hiver-printemps 2019	161	823	6 (± 5)	0,01	0,02
				Total	**728**	**831**	**33 (± 24)**	**0,04**	**0,02**

Les plus forts volumes de débris ont été produits durant la première période hivernale (novembre 2017 à mai 2018) (Tab. 21). Sur les deux années de mesure, cette période est à l'origine respectivement de 80 et de 74 % de l'érosion totale sur les sites de Plougrescant et de Pléneuf-Val-André (falaises de la plage des Vallées et de la grève de Nantois) (Fig. 150). Sur les sites de Locquirec et de Trédrez-Locquémeau, c'est sur l'ensemble de la première année de suivi (été 2017 et hiver 2017-2018) que l'érosion est plus intense.

Fig. 150 : Volumes cumulés de matériaux érodés sur les sites d'étude entre mars 2017 et avril 2019.

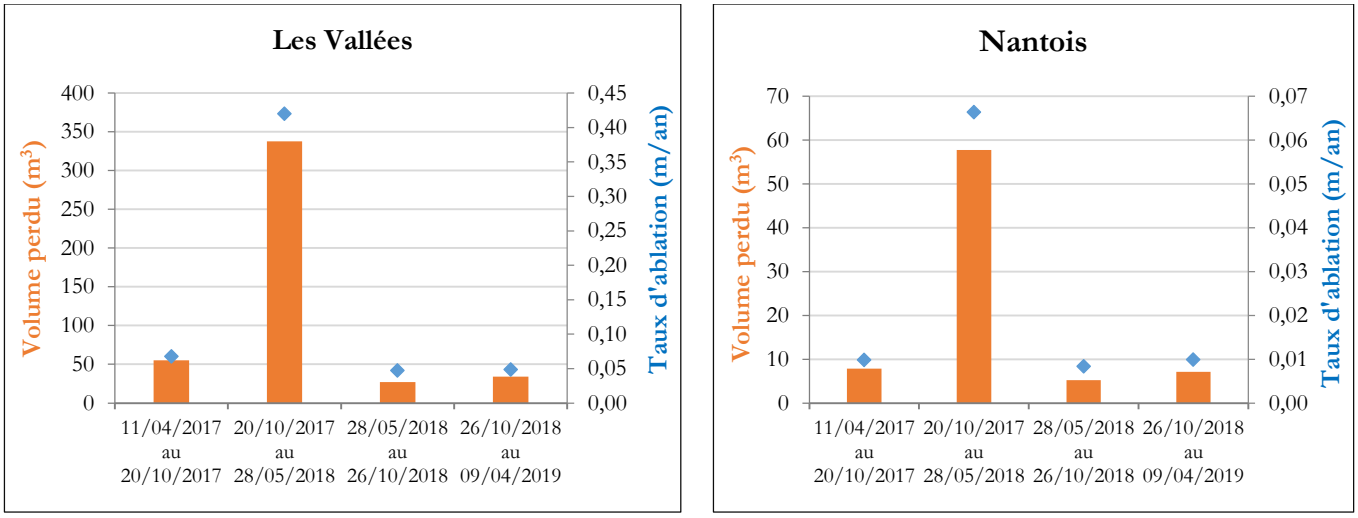


Néanmoins, la figure ci-dessus montre que tous les sites ne présentent pas la même répartition temporelle de l'érosion sur la période de suivi. En effet, la première période hivernale ne se distingue pas du reste de la période étudiée sur les sites de Telgruc-sur-Mer et de Plozévet. Les volumes produits pour chaque site et leur répartition temporelle sont donc analysés et mis en parallèle avec les évolutions des profils de plage afin de se rendre compte d'éventuels effets concordants avec la cinématique du front de falaise. Sur certains sites, quatre profils de plage au lieu de cinq sont présentés en raison de contraintes sur le terrain, notamment les horaires de marée, qui n'ont pas permis de réaliser l'acquisition ou en raison d'une trop grande marge d'erreur associée à la composante verticale du profil (Annexe 11). Pour chaque acquisition, les valeurs de pente moyenne de la berme (lorsque celle-ci est présente) et de l'estran sont calculées à partir des profils de plage et sont discutées conjointement à l'analyse des volumes de matériaux produits par l'érosion des falaises.

7.2.2.1- Pléneuf-Val-André

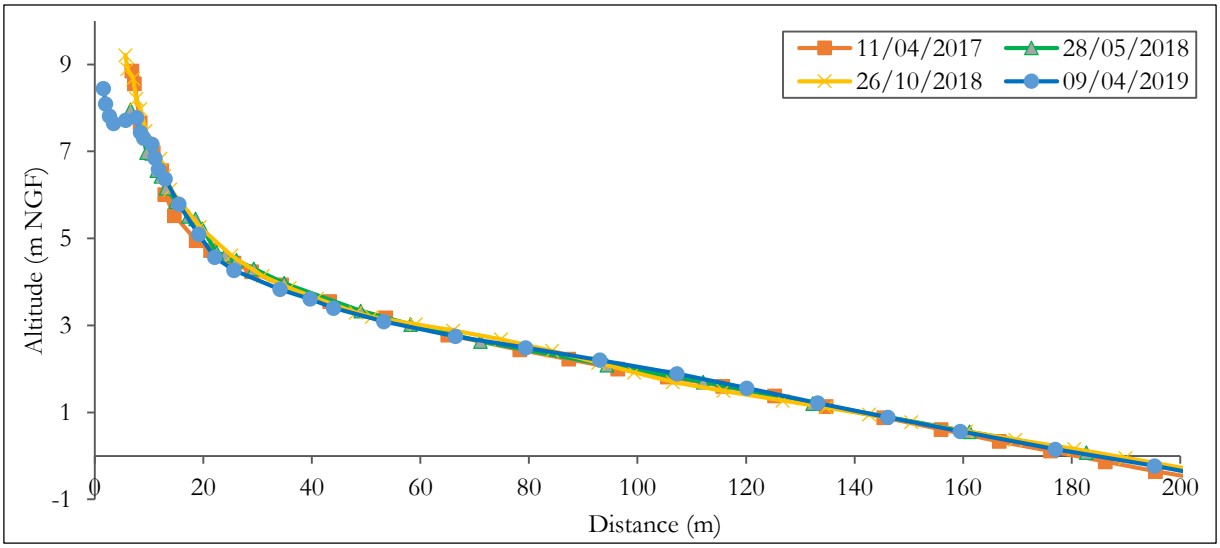
Sur le site de Pléneuf-Val-André, entre avril 2017 et avril 2019, l'ablation totale des falaises de la plage des Vallées est de 0,31 m (± 0,02 m) correspondant à un taux annuel de 0,16 m/an tandis que pour les falaises de la grève de Nantois, le taux d'ablation est de 0,03 m/an (Tab. 21). Sur la période suivie, l'ablation des falaises est donc bien moindre sur le secteur de Nantois. Les levés photogrammétriques montrent que l'hiver 2017-2018 est marqué par une production de débris importante pour le secteur des Vallées (337 m^3 (± 18 m^3)) mais aussi pour le secteur de Nantois (58 m^3 (± 19 m^3)) correspondant à un taux d'ablation respectif de 0,42 m/an et 0,07 m/an. Lors de cette période, les taux d'ablation sont multipliés par 2,5 par rapport au taux annuel des deux secteurs sur les 24 mois de suivi (Fig. 151).

Fig. 151 : Volume de matériaux libérés par l'érosion et taux d'ablation des falaises de la plage des Vallées et de la grève de Nantois entre 2017 et 2019.



Les profils de plage de Pléneuf-Val-André entre avril 2017 et avril 2019 montrent une faible variabilité morphologique (Fig. 152). Les valeurs de pente moyenne oscillent entre 2,2 et 2,6 %. La valeur de pente plus faible, atteinte au printemps 2019, est caractéristique du « profil d'hiver » : le haut de plage est démaigri au profit du bas de plage, le sable n'ayant pas encore migré vers le haut d'estran. De même, le profil du cordon de galets situé en haut de plage est aplani aux printemps 2018 et 2019 (pente moyenne de 15 % contre 20 % pour les périodes estivales) sous l'effet des houles de tempête qui tendent à transporter les sédiments vers le bas d'estran et à aplanir la berme (Gervais et al., 2012). Inversement, en octobre 2018, le haut de plage est rehaussé avec la présence d'une barre sableuse. Les sédiments du bas de plage ont été transférés vers le haut de plage sous l'action des houles de beau temps.

Fig. 152 : Évolution du profil de la plage des Vallées entre 2017 et 2019.

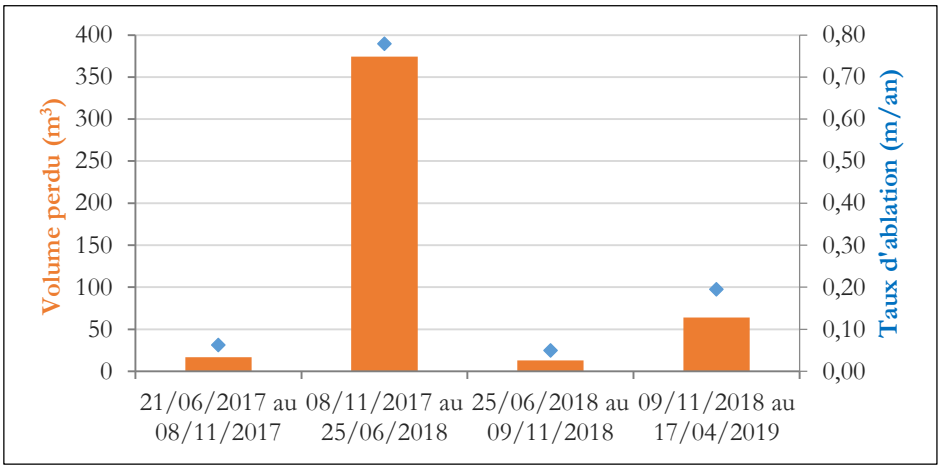


Sur le site de Pléneuf-Val-André, on ne remarque pas d'effet concordant entre l'évolution du profil de plage et les volumes de matériaux produits. Toutefois, l'abaissement hivernal du profil de plage a pu favoriser l'érosion observée durant l'hiver 2017/2018. L'abaissement du profil de plage induit effectivement un déplacement vers la côte du point de déferlement des houles qui ne s'effectue plus en bas de plage mais à proximité du pied de falaise (Letortu, 2013).

7.2.2.2- Plougrescant

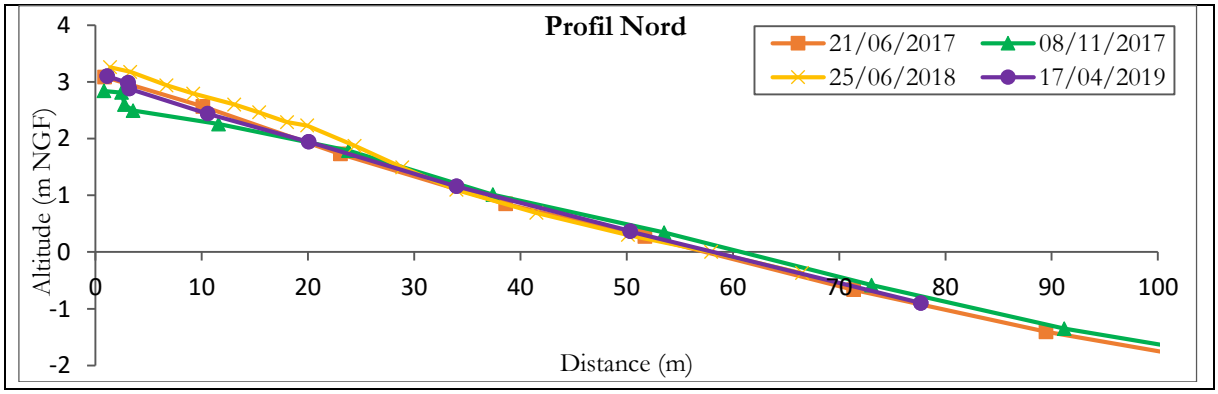
Sur les 22 mois de suivi, entre juin 2017 et avril 2019, l'ablation totale du front de falaise à Pors-Hir est de 0,64 m (± 0,02 m) correspondant à un taux annuel de 0,35 m/an (Tab. 21). Toutefois, les levés incluant la période hivernale sont marqués par les taux d'ablation les plus forts (0,19 à 0,78 m/an) (Fig. 153). À l'inverse, durant l'été et le début de l'automne, les évolutions semblent beaucoup plus faibles (0,05 à 0,06 m/an).

Fig. 153 : Volume de matériaux libérés par l'érosion et taux d'ablation des falaises de la plage de Pors-Hir entre 2017 et 2019.



Les profils de plage à Pors-Hir sont marqués par une variabilité saisonnière (Fig. 154). Entre 2017 et 2019, les valeurs de pente oscillent entre 5,2 et 6,0 %. La valeur de pente la plus faible est atteinte à l'automne 2017 et est associée à un fort démaigrissement du haut de plage (- 0,48 m) (Fig. 155). Cet abaissement du profil de plage, à la fin de l'année 2017, aurait induit un rapprochement vers la côte du point de déferlement et aurait ainsi favorisé l'érosion marine particulièrement forte de l'hiver 2017-2018. À l'été 2018, suite à la production élevée de débris en début d'année, le haut de plage est fortement engraissé (+ 0,63 m).

Fig. 154 : Évolution des profils de plage situés au nord et au sud de la plage de Pors-Hir entre 2017 et 2019.



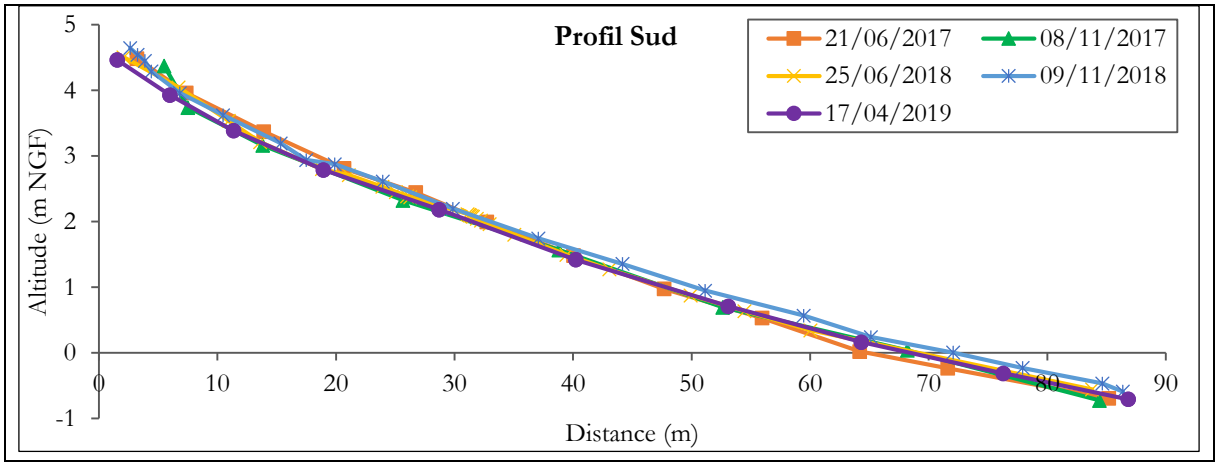
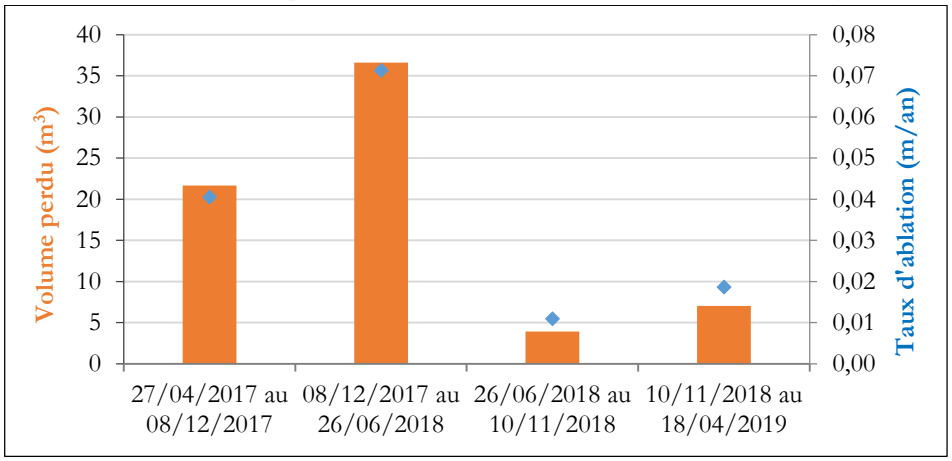


Fig. 155 : Démaigrissement du haut de plage à Pors-Hir, à l'automne 2017, visible par le déchaussement des ouvrages.

7.2.2.3- Trédrez-Locquémeau

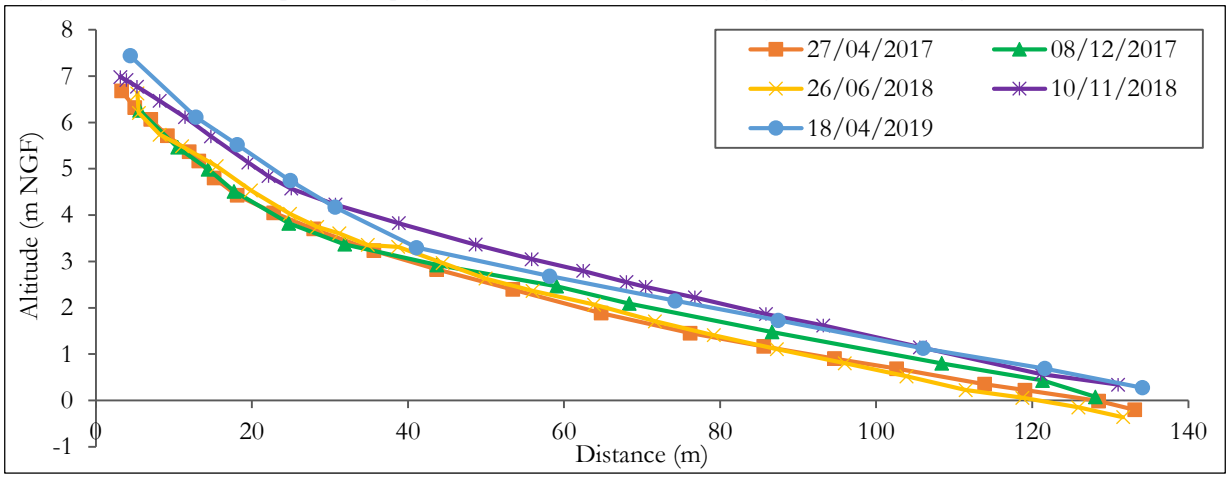
L'ablation du front de falaise de Notigou, à Trédrez-Locquémeau, entre avril 2017 et avril 2019 est de 0,08 m (± 0,02 m) correspondant à un taux annuel de 0,04 m/an (Tab. 21). L'hiver 2017-2018 est marqué par une production plus importante de débris par rapport à la moyenne sur ce site mais avec une augmentation relative moindre par rapport aux sites de Pléneuf-Val-André et de Plougrescant (production multipliée par 1,75 au lieu de 2,5) (Fig. 156). Par ailleurs, la période comprise entre le 27/04/2018 et le 08/12/2017 a également été propice à l'érosion avec un taux d'ablation de 0,06 m/an.

Fig. 156 : Volume de matériaux libérés par l'érosion et taux d'ablation des falaises de Notigou entre 2017 et 2019.



La plage de Trédrez-Locquémeau comporte une berme sableuse avec une pente moyenne de 11 % (se trouvant entre 3,3 et 7,4 m d'altitude) suivie d'une rupture de pente délimitant un estran moins réflectif ayant une pente moyenne de 4 %. Sur la période de suivi, les profils de plage de Trédrez-Locquémeau montrent une forte variation morphologique, notamment au cours de l'année 2018 (Fig. 157). Tandis qu'en 2017 et au printemps 2018, les profils de plage sont relativement bas, à l'automne 2018 et au printemps 2019 la plage montre un réhaussement de 0,7 à 1,1 mètre. Les volumes de matériaux libérés par la falaise en 2017 et au début de 2018 ne sont pas suffisants pour expliquer ce rehaussement du profil de plage. La remontée de matériel sableux du bas d'estran, issu des dernières grosses tempêtes de 2014, pourrait venir expliquer l'engraissement du haut de plage. En effet, il a été montré qu'une grande partie des littoraux d'accumulation qui ont été fortement érodés connaissent une longue phase de régénération, notamment lors de la succession d'hivers peu morphogènes (Anthony, 2013 ; Blaise, 2017). Or, depuis 2014, les conditions météo-marines hivernales ont été relativement clémentes et de nature à permettre la régénération des cordons littoraux. Ce réengraissement du haut de plage redonne au site une protection naturelle du pied de falaise contre l'érosion marine.

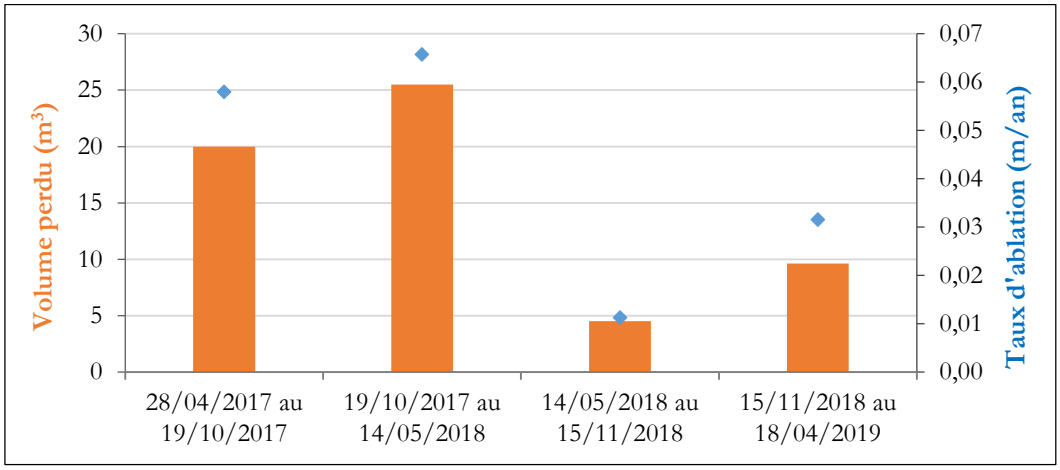
Fig. 157 : Évolution des profils de plage situés au droit de la zone de glissement, à Notigou, entre 2017 et 2019.



7.2.2.4- Locquirec

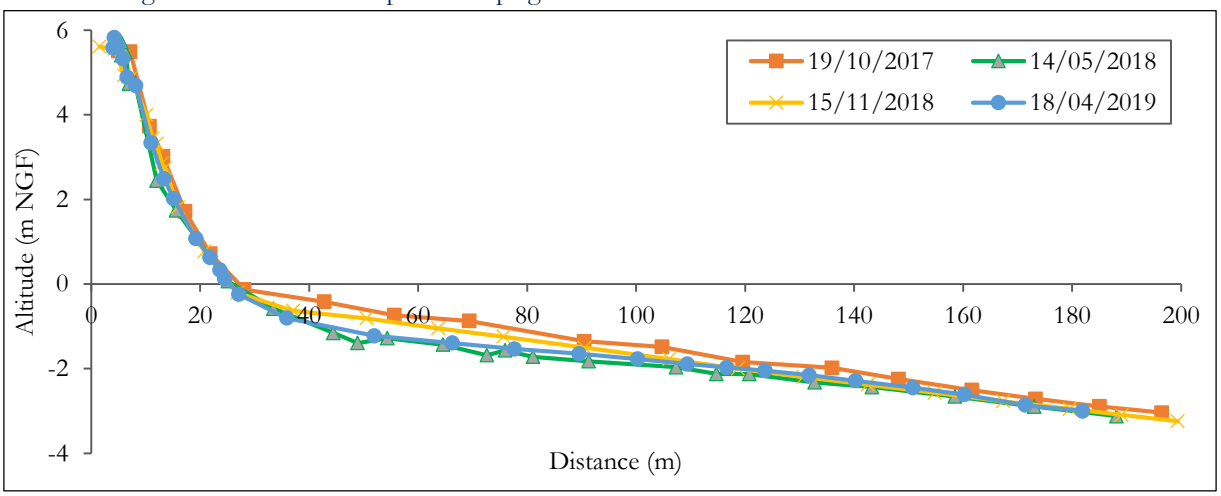
L'ablation des falaises de l'anse du Moulin de la rive, à Locquirec, sur la période de suivi, est de 0,08 m (± 0,02 m) correspondant à un taux annuel de 0,04 m/an (Tab. 21). Comme pour le site de Trédrez-Locquémeau, la période du 28/04/2017 au 14/05/2018 est marquée par une production plus importante de débris (Fig. 158).

Fig. 158 : Volume de matériaux libérés par l'érosion et taux d'ablation des falaises du Moulin de la Rive entre 2017 et 2019.



Les profils de plage du site de Locquirec montrent une variabilité morphologique saisonnière avec une plage rehaussée à l'automne 2017 et 2018 (+ 0,18 à + 0,41 m) par rapport aux profils de printemps (Fig. 159). Les valeurs de pente de la plage oscillent entre 1,9 et 2,3 %, la pente la plus faible étant atteinte à l'automne 2017. Sur le site de Locquirec, on ne constate pas de lien direct entre le profil de plage et les volumes de matériaux produits. Toutefois, l'abaissement hivernal du profil de plage entre octobre 2017 et mai 2018 a pu favoriser l'érosion observée durant cet hiver.

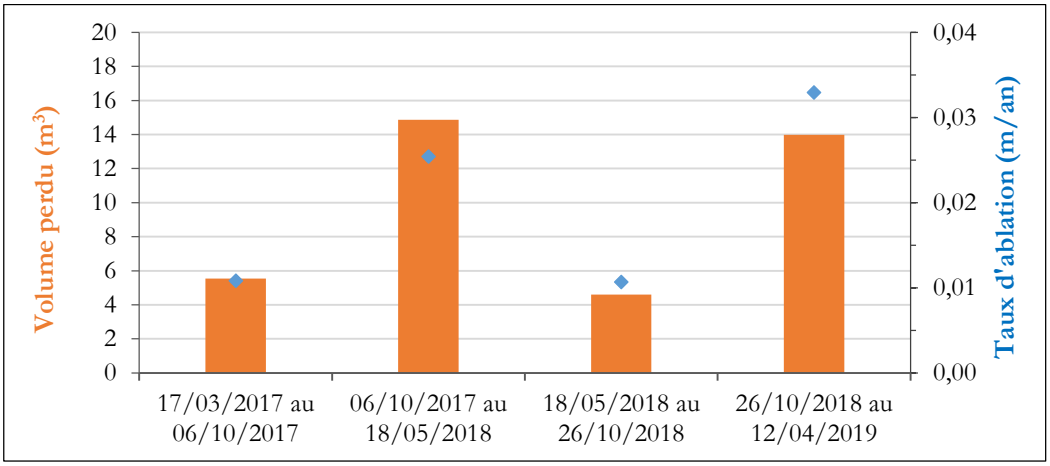
Fig. 159 : Évolution des profils de plage de l'anse du Moulin de la Rive entre 2017 et 2019.



7.2.2.5- Telgruc-sur-Mer

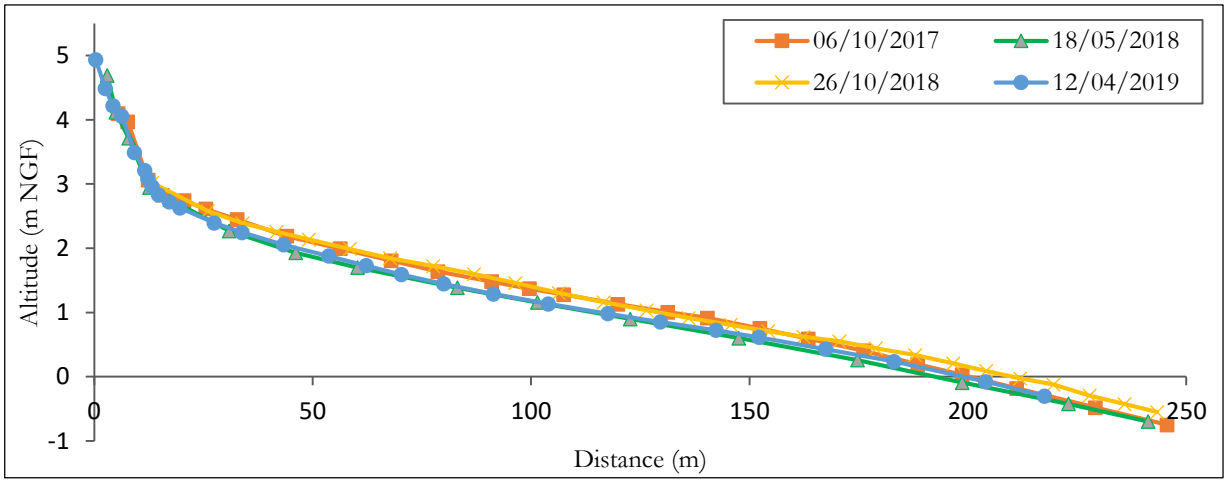
Sur le site de Telgruc-sur-Mer, l'ablation du front de falaise, sur les 25 mois de suivi, entre mars 2017 et avril 2019, est relativement faible puisqu'elle est de 0,04 m (± 0,02 m) correspondant à un taux annuel de 0,02 m/an (Tab. 21). Toutefois, les levés incluant la période hivernale sont marqués par des taux d'ablation plus forts (0,03 m/an contre 0,01 m/an pour la période estivale) (Fig. 160).

Fig. 160 : Volume de matériaux libérés par l'érosion et taux d'ablation des falaises de l'anse du Caon entre 2017 et 2019.



Les profils de plage de Telgruc-sur-Mer montrent une variabilité morphologique saisonnière avec un niveau de plage rehaussé de 0,25 m en moyenne à l'automne 2017 et 2018 par rapport aux profils de printemps (Fig. 161). La pente de la plage varie peu et est comprise entre 1,5 et 1,6 %. Toutefois, le profil du cordon de galets est légèrement plus aplani au début de l'année 2018 et 2019. Ici, l'effet semble concordant entre l'altitude des profils de plage et les volumes de matériaux produits. En effet, aux profils de plage « d'hiver » (haut de plage démaigri et cordon de galets étalé) sont associés des taux d'ablation de falaise plus élevés. Conjointement au renforcement des conditions d'agitation marines en hiver, l'aplanissement du cordon de galets et le démaigrissement du haut de plage durant la période hivernale, auraient permis aux vagues d'atteindre le pied de falaise, de déblayer les éboulis, voire d'éroder la base de l'abrupt.

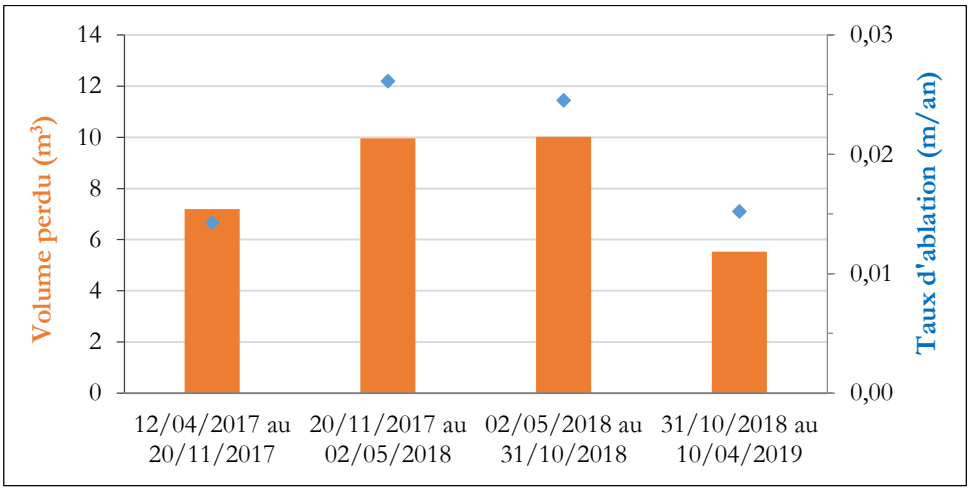
Fig. 161 : Évolution du profil de plage de l'anse du Caon entre 2017 et 2019.



7.2.2.6- Plozévet

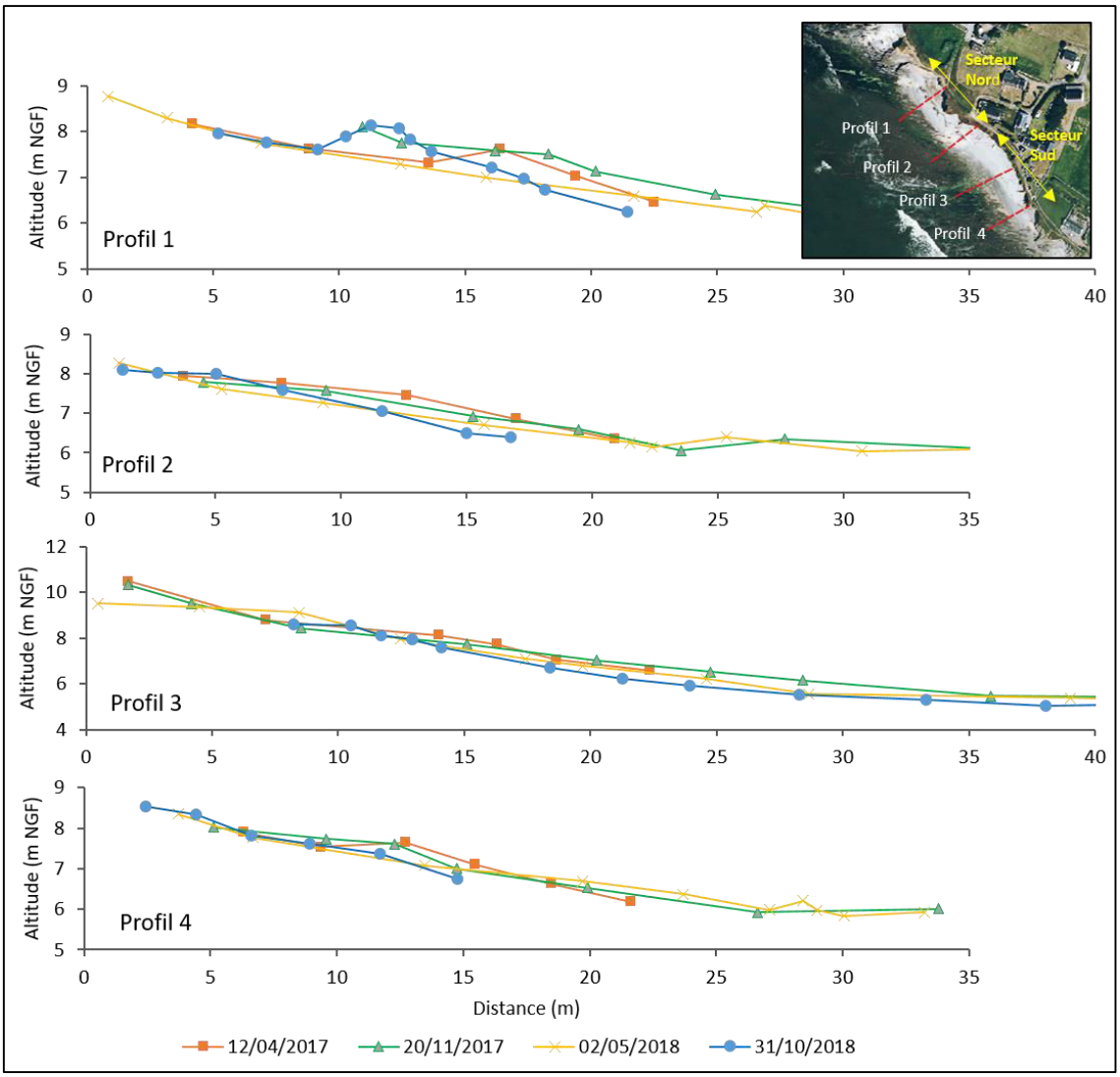
Sur le site de Plozévet, l'ablation du front de falaise est relativement faible avec un taux annuel de 0,02 m/an (Tab. 21). À l'inverse des autres sites, il ne semble pas y avoir de saison plus propice à l'érosion sur les 24 mois de suivi (Fig. 162).

Fig. 162 : Volume de matériaux libérés par l'érosion et taux d'ablation des falaises de la grève de Poulbréhen entre 2017 et 2019.



Les profils de plage du site de Plozévet montrent une forte variation morphologique, avec des signatures différentes entre les secteurs nord et sud du site (Fig. 163). Le protocole de suivi complémentaire adopté pour ce site permet d'appréhender ces évolutions de la plage. Sur le secteur nord du site, les profils n°1 et n°2 montrent un abaissement du profil de plage et un net étalement de la berme durant l'hiver 2017-2018, les galets ayant migré en bas de plage (pente de 7 % au printemps 2018 contre 20 % en 2017). À l'automne 2018, la plage et la berme présentent une pente plus élevée et le cordon de galets se trouve à une position plus haute que l'année précédente. Pour le secteur sud du site, les profils n°3 et 4 ne montrent pas d'abaissement du profil de plage durant l'hiver 2017-2018 mais un léger étalement de la crête du cordon de galets. Celui-ci est également rehaussé à l'automne suivant. Grâce à la survenue de plusieurs grandes marées durant l'été 2018, les galets sont remontés vers le sommet du cordon. Sur le site de Plozévet, les profils de plage n°1 et 2 semblent donc être plus mobiles que les profils de plage n°3 et 4, suggérant une plus forte action marine dans le secteur nord du site. Toutefois, la répartition temporelle des volumes produits sur le site (Fig. 162) ne semble pas être reliée directement à l'évolution pourtant marquée des profils de plage.

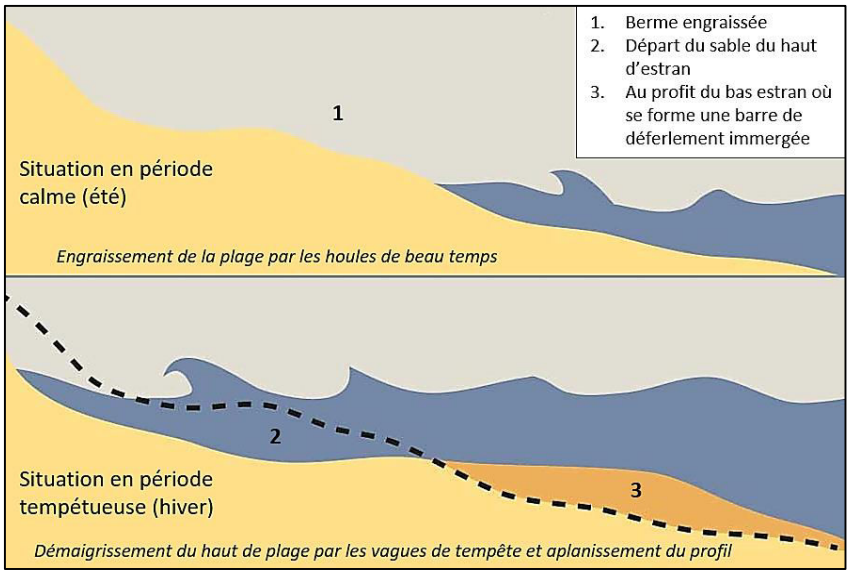
Fig. 163 : Évolution des profils de plage et de la berme à Poulbréhen entre 2017 et 2018.



7.2.2.7- Bilan de la répartition temporelle de l'érosion

L'analyse de l'évolution des profils de plage sur les sites d'étude, entre 2017 et 2019, montre qu'ils suivent globalement le schéma classique des évolutions, à l'échelle annuelle, entre un « profil d'hiver », aplani et démaigri en haut de plage et un « profil d'été » où le haut de plage et la berme sont engraissés (Fig. 164). Les tempêtes hivernales contribuent à l'érosion des profils de plage tandis que les houles longues non couplées à une agitation supplémentaire due au vent local (houles dites de « beau temps ») permettent sa reconstruction et l'accumulation de sédiments en haut de plage (Dehouck, 2006 ; Jaud, 2011). Toutefois, l'hiver 2017-2018 est marqué par une plus forte érosion du haut de plage liée notamment aux tempêtes successives du début de l'année 2018 (tempêtes « Carmen », « Éléanor » et « Fiona » du 1er, 3 et 17 janvier 2018). Ce démaigrissement du haut de plage sur l'ensemble des sites aurait favorisé l'érosion marine en pied de falaise et aurait ainsi contribué à une plus forte production de débris. Comme démontré par plusieurs auteurs (Philpott, 1984 ; Kamphuis, 1987 ; Lee, 2008), l'abaissement des profils de plages impliquerait donc de plus forts taux de recul des falaises meubles.

Fig. 164 : Schéma conceptuel du comportement d'une plage en période estivale et en période hivernale (modifié de Paskoff, 1985 et Turbout, 2013).



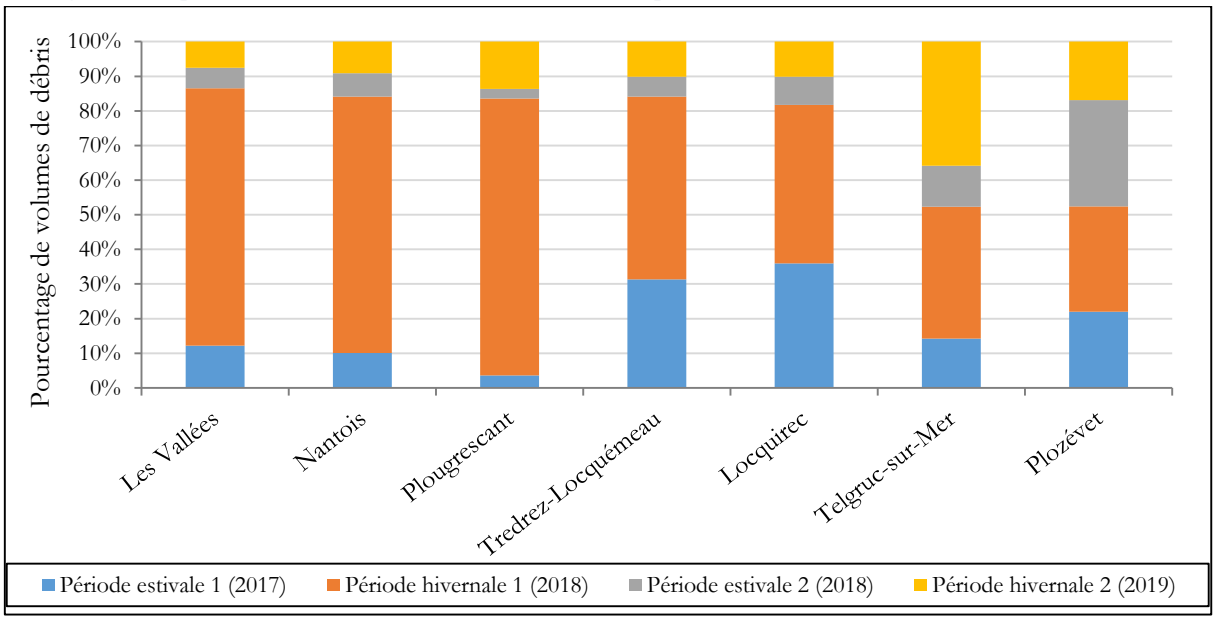
Les volumes de matériaux arrachés du front de falaise, entre 2017 et 2019, diffèrent toutefois selon les sites. Les plus forts volumes sont mesurés sur le site des Vallées, à Pléneuf-Val-André et sur le site de Pors-Hir, à Plougrescant. Sur les deux années de suivi, ces deux sites présentent des taux d'ablation plus importants que sur les autres sites (respectivement 0,16 et 0,35 m/an contre une moyenne de 0,02 à 0,04 m/an pour les quatre autres sites).

L'analyse des volumes de matériaux libérés montre également des différences dans la répartition saisonnière de l'érosion selon les sites (Tab. 22 et Fig. 165). Tandis que les sites de Pléneuf-Val-André (Les Vallées et Nantois), de Plougrescant et de Telgruc-sur-Mer se sont érodés principalement durant les semestres hivernaux (74 à 94 % de l'érosion totale), les autres sites se sont érodés de manière plus homogène sur l'année, avec toutefois une contribution légèrement plus marquée de l'érosion durant l'hiver pour les sites de Locquirec et de Trédrez-Locquémeau (56 à 63 % de l'érosion totale) (Tab. 22). Les falaises de type V1 apparaissent donc plus sensibles aux conditions météo-marines hivernales que les falaises de type V2 et surtout celles de type RAV. Cette répartition saisonnière de l'érosion selon les types de falaises s'explique principalement par leur lithologie et leur géomorphologie : les falaises RAV possèdent une plateforme marine dégagée à leur pied permettant d'atténuer, par sa rugosité, l'effet des actions marines particulièrement virulentes durant l'hiver (ex : agitation marine, surcotes). De même, les falaises V2, formées principalement par des heads, sont plus résistantes à l'érosion marine et subaérienne que les falaises V1 du fait de la plus forte granulométrie et de la plus forte cohésion des matériaux. Les falaises composées de sédiments fins et faiblement cohésifs seraient effectivement plus sensibles aux actions marines (Collins et Sitar, 2008 ; Sunamura, 2015). Nos observations à l'échelle court terme confirment ainsi que la lithologie et la structure des falaises conditionnent leur érosion et les volumes de matériaux libérés (Robinson, 1977 ; Benumof et Griggs, 1999 ; Bezerra et al., 2011 ; Sunamura, 2015 ; Young et al., 2016). Ces observations sont cohérentes avec l'analyse historique réalisée à l'échelle régionale sur les épisodes de recul des falaises meubles (cf. chapitre 6).

Tab. 22 : Répartition de l'érosion entre les périodes estivales et hivernales sur les sites d'étude entre 2017 et 2019.

Site d'étude	Périodes estivales	Périodes hivernales
Les Vallées (Pléneuf-Val-André)	18 %	82 %
Nantois (Pléneuf-Val-André)	17 %	83 %
Plougrescant	6 %	94 %
Trédrez-Locquémeau	37 %	63 %
Locquirec	44 %	56 %
Telgruc-sur-Mer	26 %	74 %
Plozévet	53 %	47 %

Fig. 165 : Répartition saisonnière des volumes de débris produits sur les sites d'étude entre 2017 et 2019.

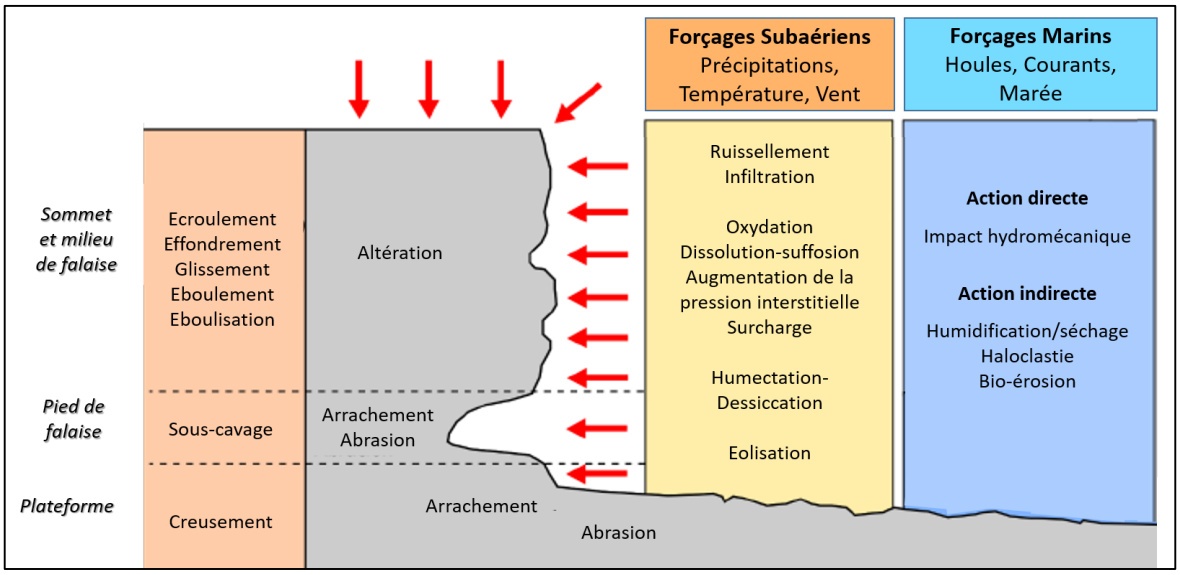


7.2.3- Répartition spatiale de l'érosion sur les sites d'étude

L'évolution des falaises meubles est conditionnée par l'interaction des forçages d'origine marine, subaérienne et anthropique (Joyal, 2015) qui présentent chacun une variété de processus et de modes d'action (Fig. 166). Bien que l'analyse historique régionale (chapitre 5) a permis de mettre en évidence les facteurs à l'origine du déclenchement des mouvements de terrain sur les falaises meubles, les facteurs préparatoires ainsi que la succession et la combinaison des processus sont mal cernés. Sans même prendre en compte les facteurs anthropiques, les interactions des différents agents physiques d'origine naturelle rendent difficile l'identification des forçages prépondérants dans le recul des falaises : est-ce que ce sont les agents subaériens (et notamment les précipitations) qui sont les principaux responsables de l'érosion et les actions marines constitueraient alors seulement un agent de transport et de déblaiement ? Ou, au contraire, le recul des falaises est-il conditionné majoritairement par les actions marines ? Enfin, le recul est-il finalement le résultat d'une combinaison de forçages d'origine marine et subaérienne ?

L'analyse diachronique de la répartition spatiale du recul sur les sites d'étude permet d'apporter des éléments de réponse sur les modalités de recul et les forçages marins et subaériens responsables de l'érosion. À titre d'exemple, une zone de départ située en haut de falaise (si le sommet de falaise est suffisamment haut pour ne pas être atteint par les vagues) est plus probablement liée à des actions subaériennes qu'à l'action des vagues (Letortu, 2013). Le volume des matériaux érodés renseigne également sur l'efficacité des forçages marins et subaériens.

Fig. 166 : Schéma conceptuel des différents processus d'altération et d'érosion affectant les falaises meubles soumises aux forçages subaériens et marins (modifié de Giuliano, 2015).



Noter que les encoches au pied de falaises meubles ne sont visibles que si la compacité des matériaux est suffisante pour que le surplomb se maintienne, du moins, temporairement.

7.2.3.1- Les Vallées (Pléneuf-Val-André)

Sur le site des Vallées, entre avril 2017 et mai 2018, c'est le haut de falaise qui enregistre le plus de départ de matériaux avec 40 à 44 % du volume total mesuré. Les volumes produits en bas de falaises sont plus faibles (28 % du volume total), le reste étant attribué aux mouvements ayant affecté le milieu de falaise (Annexe 10). La forte production de débris observée durant l'hiver 2017-2018 (Fig. 151) s'explique par la survenue de plusieurs mouvements de masse (Fig. 167). Ces mouvements de masse correspondent à des glissements superficiels, à des écroulements et à des effondrements activés notamment suite à la formation de sous-cavages (Fig. 168). La proportion plus forte en argile de la base des falaises permet une certaine tenue des sous-cavages et des talus avec une pente très redressée. Toutefois, cette cohésion apparente qui peut persister de quelques heures jusqu'à quelques mois, ne garantit pas la stabilité du versant à long terme.

Entre mai 2018 et avril 2019, l'érosion du haut de falaise reste importante mais sa contribution est moindre par rapport à l'ablation du pied de falaise en raison du déblaiement par la mer des talus d'éboulis formés durant l'hiver, et de la survenue de plusieurs grandes marées à forts coefficients durant cette période.

Fig. 167 : Évolution du front de falaise de la plage des Vallées durant l'hiver 2017-2018.

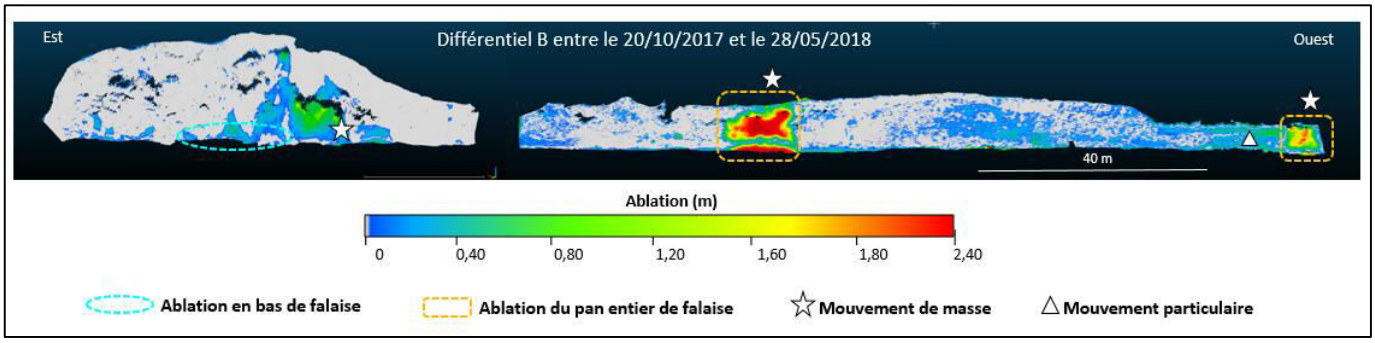
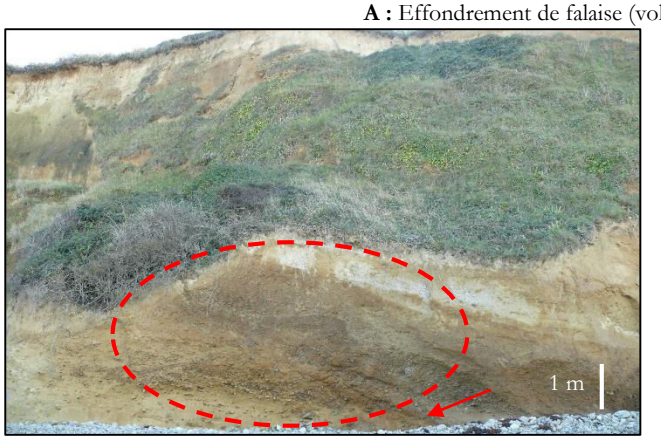


Fig. 168 : Mouvements de masse survenus entre octobre 2017 et avril 2018 au niveau de la plage des Vallées.

20 octobre 2017	13 avril 2018

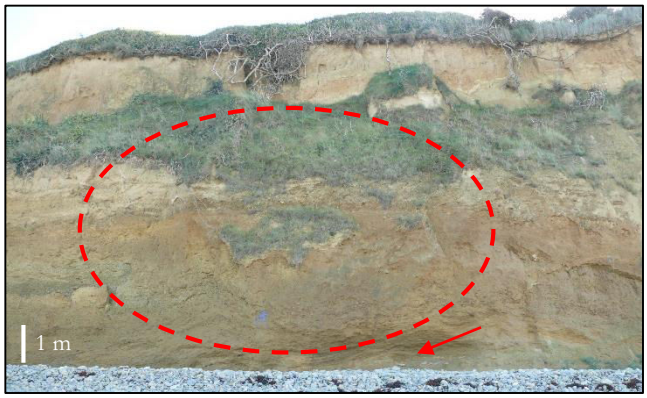
A : Effondrement de falaise (volume de matériaux libérés = 4 m³)



B : Effondrement de falaise (volume de matériaux libérés = 2 m³)

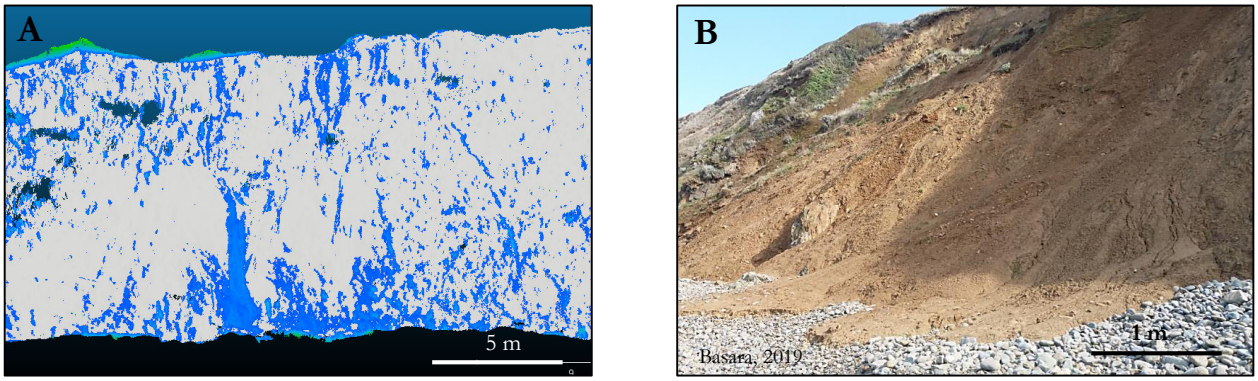
C : Glissement superficiel (volume de matériaux libérés = 252 m³)

D : Écroulement de falaise (volume de matériaux libérés = 55 m³)



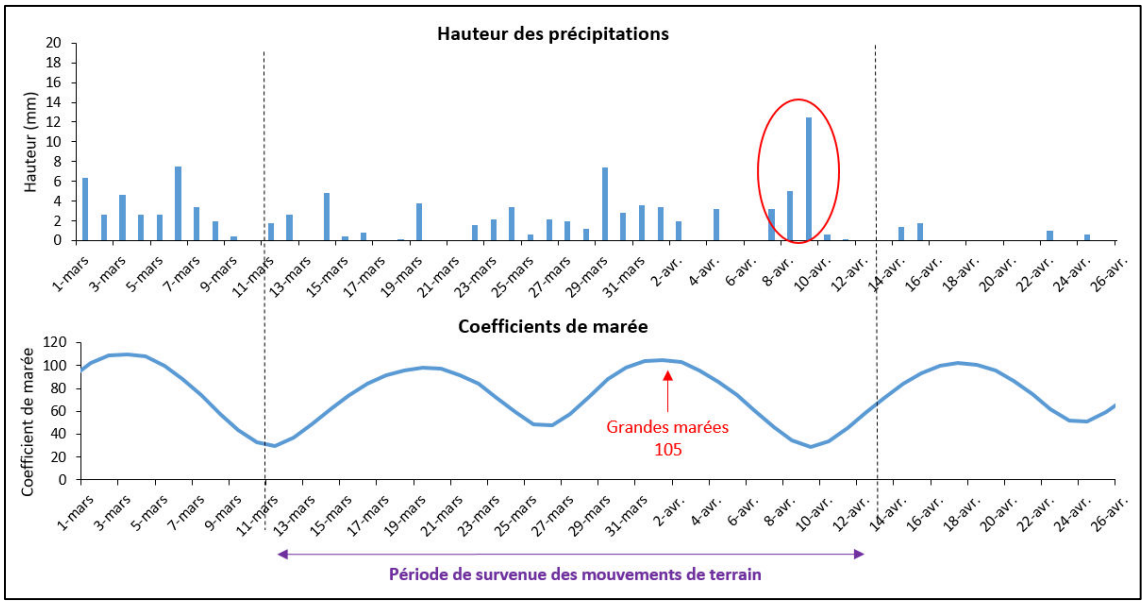
L'altitude du pied de falaise, situé entre 0,6 et 2,9 m au-dessus du niveau marin extrême décennal (+ 6,80 m NGF) et les dimensions du cordon de galets (18 m de large et 4 m de haut) suggèrent que la mer n'intervient qu'occasionnellement dans l'érosion des falaises, lors de tempêtes hivernales. De plus, le site est caractérisé par une faible agitation marine avec une hauteur significative moyenne des houles de 0,69 m (cf. chapitre 4). Mais lorsque les vagues parviennent à atteindre l'abrupt, elles creusent alors des sous-cavages en pied de falaise par délavage des formations fines et abrasion par les galets. Les actions subaériennes interviennent plus fréquemment dans le recul de l'abrupt notamment par l'infiltration et la saturation en eau des formations limono-sableuses qui perdent alors leur cohésion. La forme allongée des zones de départ correspondant aux mouvements particulaires observée sur les différentiels (Fig. 169A), les ravines et les coulées boueuses (Fig. 169B) témoignent de l'intervention des eaux de pluie dans l'érosion des falaises. La fragilisation des falaises meubles sur le site des Vallées se fait également par des processus d'humectation-dessiccation et, dans une contribution certes modérée, par la présence de trous de nidification d'hirondelles dans les formations sableuses de l'abrupt (Fig. 168B).

Fig. 169 : Formes d'érosion témoignant de l'intervention d'actions subaériennes. A : Zones de départ de forme linéaire, visibles sur les différentiels ; B : coulées boueuses visibles en pied de falaise.



Grâce à des visites de terrain successives, on sait que les mouvements de masse produits durant l'hiver 2017-2018 ont été déclenchés entre le 11 mars et le 13 avril 2018. Cette période est caractérisée par des grandes marées du 31 mars au 2 avril 2018 (coefficient 102 à 105), suivies de pluies soutenues le 8 et 9 avril 2018 (18 mm en moins de 48 h (données Météo-France)) (Fig. 170). Les grandes marées ont donc pu contribuer à fragiliser l'abrupt par la création d'encoches et le déblaiement des talus d'éboulis en pied de falaise. Les précipitations ont ensuite conduit au déclenchement de mouvements de masse sur les secteurs instables et/ou fragilisés.

Fig. 170 : Précipitations journalières (station Météo-France de Saint-Cast-le-Guildo) et coefficients de marée (marégraphe SHOM de Dahouët) en mars et avril 2018.



Au final, l'évolution des falaises meubles de la plage des Vallées se fait par les actions conjuguées de l'érosion marine et subaérienne. La mer intervient en déblayant les éboulis accumulés et en érodant le pied de falaise par action mécanique (mitraillage des galets, délavage des formations les plus fines). L'important cordon de galets en haut de plage est un élément stabilisateur lors des périodes météo-marines relativement calmes (Sunamura, 2015). Toutefois, lors de fortes tempêtes, les galets, par projection, peuvent se joindre aux effets érosifs des vagues et favoriser la formation de sous-cavages et la création de zones instables. L'action subaérienne est induite par les eaux d'infiltration qui réduisent fortement la cohésion des matériaux et génèrent des éboulements et des effondrements en exerçant des mises en charge brutales sur les portions de falaise surplombant les sous-cavages. Les processus d'humectation-dessiccation participent aussi à l'érosion par une éboulisation régulière de l'abrupt.

7.2.3.2- Nantois (Pléneuf-Val-André)

Sur le secteur de Nantois, durant les périodes hivernales, c'est le pied et le milieu de falaise qui enregistrent le plus de départ de matériaux avec 66 à 80 % du volume total (Fig. 171) tandis que, pendant les périodes estivales, les départs de matériaux sont moins volumineux et se répartissent sur l'ensemble de la falaise (Annexe 10).

Durant l'hiver, la falaise évolue donc principalement par une érosion en pied avec un déblaiement des talus d'éboulis, notamment dans la portion ouest (Fig. 171) qui ne se trouve qu'à 0,4 m au-dessus du niveau marin décennal et où le cordon de galets est peu épais. Durant les périodes estivales, l'érosion se fait sous forme de mouvements particulaires liés notamment à des processus d'humectation-dessiccation (Fig. 172A). Ces processus répétés favorisent la fissuration, l'infiltration de l'eau et provoquent une éboulisation de la paroi de falaise. Ces mouvements particulaires propagent progressivement l'instabilité vers le haut de l'abrupt conduisant ainsi à la mise en surplomb de portions de falaise (Fig. 172B).

Fig. 171 : Évolution du front de falaise au niveau de la grève de Nantois durant l'hiver 2017-2018.

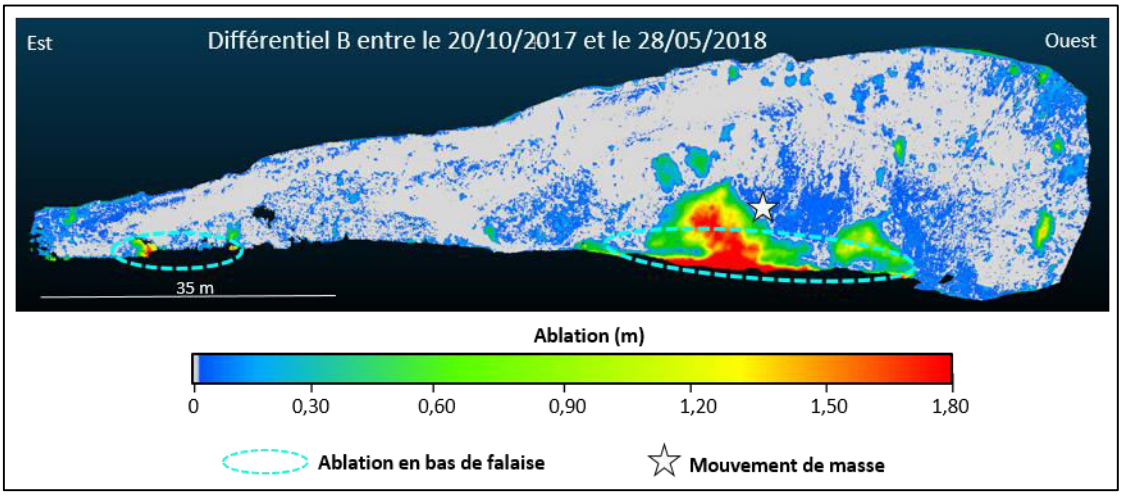
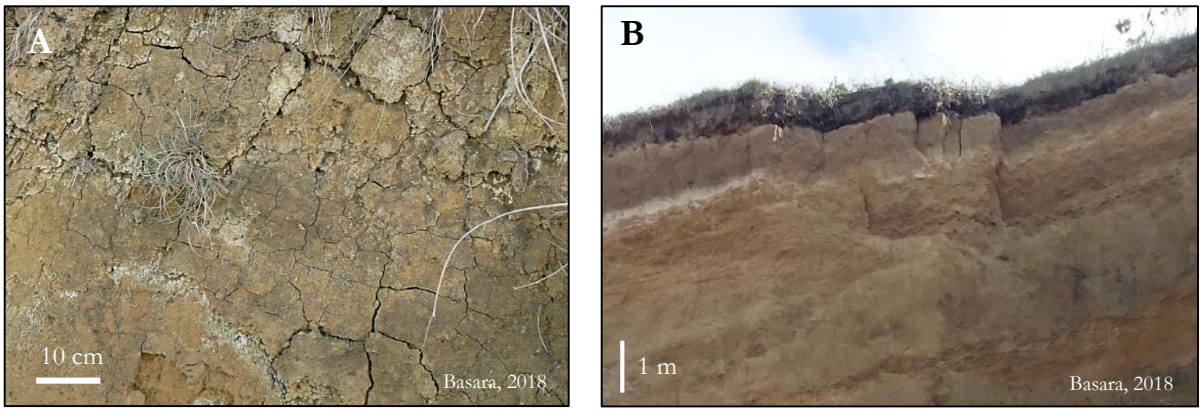


Fig. 172 : Processus subaériens conduisant à l'ablation du front de falaise sur le site de Nantois.



A : Fentes de dessiccation formées par humectation-dessiccation. B : éboulisation progressive conduisant à la mise en surplomb de portions de falaise.

Les talus d'éboulis accumulés au pied des falaises représentent des vestiges d'anciens mouvements de terrain plus ou moins volumineux, tel l'important écroulement survenu en juillet 2015 à Nantois (Fig. 173). Entre novembre 2017 et mai 2018, l'érosion basale a conduit au déblaiement de près de 50 m^3 d'éboulis en pied de falaise. Ceci montre donc le degré d'efficacité de la mer à évacuer les débris issus de l'érosion sur le secteur de falaise de Nantois.

En raison de la faible épaisseur du cordon de galets sur le secteur de Nantois, l'agent érosif principal responsable de l'évolution de la falaise sur les 22 mois de suivi reste l'action des vagues. Celle-ci agit essentiellement en déblayant les éboulis en pied de falaise induisant une augmentation de la pente et de l'instabilité du profil de falaise, ce qui peut conduire, à terme, à des mouvements de masse de grande ampleur. Néanmoins, il ne faut pas oublier l'action des eaux météoritiques qui viennent diminuer la cohésion des matériaux, par infiltration, ni les processus d'humectation-dessiccation, à l'origine de mouvements particulaires, même si leur contribution volumique dans l'ablation des falaises sur ce secteur est modeste en comparaison avec les actions marines.

Fig. 173 : Érosion du tablier d'éboulis au niveau de la falaise meuble de Nantois issu d'un écroulement survenu en juillet 2015 et qui a libéré près de 800 m³ de matériaux.

15 juillet 2015 — 11 avril 2017

7.2.3.3- Plougrescant

L'analyse de la répartition spatiale du recul des falaises meubles de Pors-Hir montre que l'érosion est plus importante dans le secteur nord avec une ablation de 1,10 m sur les 22 mois de suivi, correspondant à un taux annuel de 0,61 m/an contre 0,23 m/an dans le secteur sud (Annexe 10). Ceci peut s'expliquer par la présence d'une plateforme marine dégagée en pied de falaise dans la partie sud de l'anse, qui permet d'atténuer l'effet des actions marines (Fig. 174).

Une seconde explication quant à la différence des taux d'ablation observée entre le nord et le sud du site peut venir de la lithologie des formations composant la falaise. D'après une analyse géotechnique effectuée par le Cerema (Le Borgne, 2014) qui a réalisé huit sondages à la tarière en arrière des falaises meubles, les formations sont composées de limons sableux reposant sur un faible niveau graveleux dans la partie nord du site tandis que, dans la partie sud, il s'agit de limons sableux reposant sur un épais niveau de silts-limoneux. Les limons sableux sont peu cohésifs et très sensibles aux sollicitations physiques tandis que les niveaux silteux, plus aptes à se gorger d'eau, possèdent une meilleure cohésion et, par conséquent, seraient plus résistants à l'érosion (Carnus et Gabellini, 2014). Le profil des falaises au sud du site témoigne de l'érosion différentielle entre les couches meubles successives et de la plus forte résistance des niveaux silteux formant le pied de falaise (Fig. 174).

Fig. 174 : Taux d'ablation sur le site de Pors-Hir et présence d'un platier rocheux au sud du site.

Taux de recul reportés sur une photographie aérienne verticale de 2016 (IGN)

Vue depuis le sud de l'anse montrant la présence de la plateforme rocheuse et le profil des falaises

Sur l'ensemble de la période suivie, c'est le pied de falaise qui enregistre le plus de départ de matériaux avec 41 à 49 % du volume total. De plus, les différentiels montrent que l'ensemble de la falaise de Pors-Hir a évolué et ce, notamment durant l'hiver 2017-2018 (Fig. 175, Annexe 10). Durant cet hiver, de nombreux mouvements de masse ont affecté le front de falaise et ont été à l'origine d'une forte ablation, allant jusqu'à 1,7 m par endroit. Ces mouvements de masse semblent avoir été initiés par la création de sous-cavages en pied de falaise (Fig. 176). Le démaigrissement du haut de plage à la fin de l'année 2017 (Fig. 154) aurait effectivement favorisé l'érosion marine et la création de sous-cavages. La formation d'une encoche de sapement représenterait donc la première étape du recul de la falaise en conduisant à l'écroulement du matériel sus-jacent qui est mis en situation de déséquilibre (ou en surplomb).

Fig. 175 : Évolution du front de falaise de l'anse de Pors-Hir durant l'hiver 2017-2018.

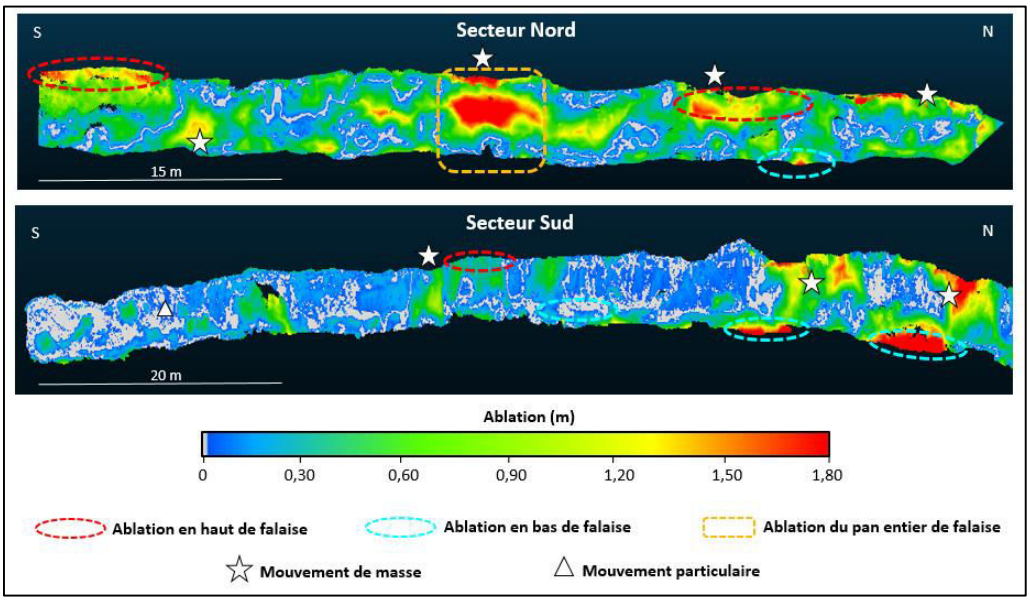


Fig. 176 : Effondrement de falaise favorisé par la présence d'un sous-cavage et d'entonnoirs de suffosion.

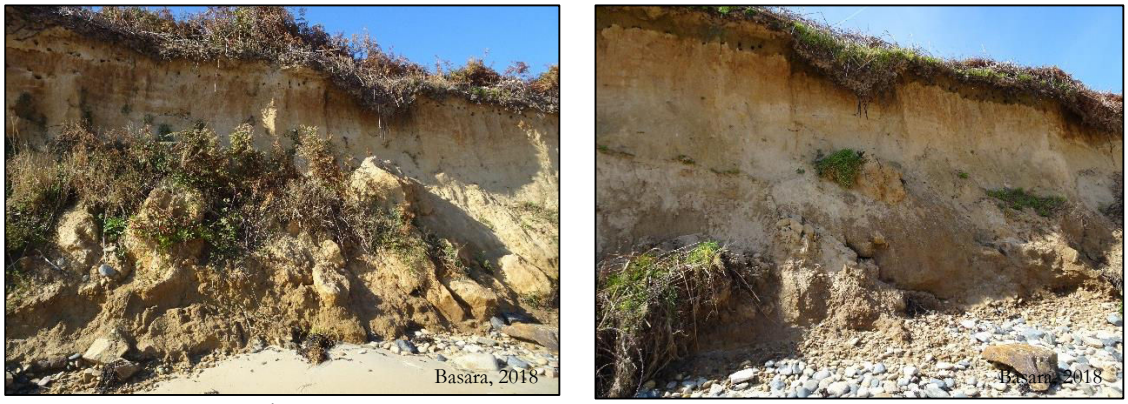
8 novembre 2017

25 juin 2018

Sur le site de Plougrescant, le pied des falaises se situe seulement entre 0,10 et 0,40 m au-dessus du niveau des PMVE (+ 4,85 m NGF). Si on considère le niveau marin extrême décennal, le pied de falaise se retrouve entre 0,50 à 1,00 m en-dessous de ce niveau. Dans ces circonstances, les falaises de Pors-Hir sont très fréquemment soumises à l'action des vagues, d'où son évolution rapide constatée depuis plusieurs décennies (cf. chapitre 6). De plus, la quasi-absence de berme ne permet pas d'atténuer l'énergie des vagues. L'action marine est d'autant plus efficace durant les périodes hivernales, propices aux

tempêtes et aux surcotes. Toutefois, l'érosion du pied de falaise et des tabliers d'éboulis peut également se faire durant la période estivale, notamment lors des grandes marées (Fig. 177). Les éboulis de matériaux fins (loess, limon, sables) sont alors rapidement délavés et entraînés par la houle tandis que les blocs rocheux du substratum et les galets présents dans les anciens cordons littoraux alimentent les dépôts de plage. Cependant, ces derniers ne représentent qu'un faible volume dans l'ensemble des formations constituant la falaise meuble.

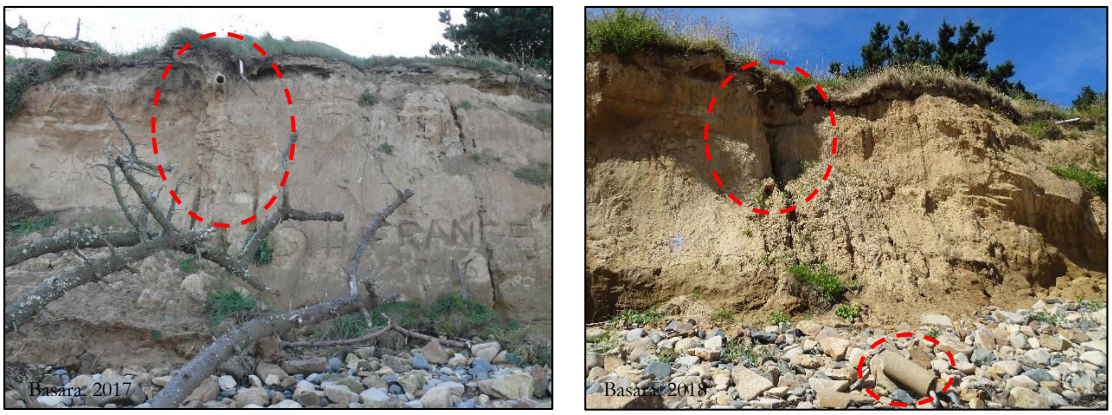
Fig. 177 : Érosion du tablier d'éboulis à Pors-Hir durant l'été 2018 et notamment lors des grandes marées de septembre 2018 (coefficient 111).



25 juin 2018 — 6 novembre 2018

Les actions marines jouent donc un rôle prépondérant sur ce site et sont efficaces toute l'année. Cependant, le suivi diachronique montre que les eaux continentales d'origine naturelle et anthropique jouent également un rôle important dans le recul des falaises meubles de l'anse de Pors-Hir. La falaise est effectivement incisée, dans la partie centrale de l'anse, par des écoulements d'eaux pluviales venant de canalisations non raccordées (Fig. 178). De plus, la présence d'entonnoirs de suffosion (Fig. 176) indique que des processus d'écoulement souterrain participeraient au recul de la falaise. Bernatchez et al. (2014) ont effectivement montré que les processus de suffosion sont très efficaces dans les formations sableuses. Les écoulements d'eau d'origine météoritique ou anthropique participent ainsi à l'ablation du front de falaise par des phénomènes de ruissellement, de suffosion et de mouvements de terrain dus à la saturation des matériaux en eau (Fig. 176).

Fig. 178 : Incision d'un pan de falaise due au déversement d'eau venant d'une canalisation située en sommet. Noter qu'un morceau de la canalisation est tombé et se retrouve au pied de la falaise.



8 novembre 2017 — 25 juin 2018

Le fort recul observé durant l'hiver 2017-2018 serait lié à la tempête Éléanor du 3 janvier 2018. Cette tempête a effectivement été concomitante avec des grandes marées (coefficient 107) et de fortes précipitations (24 mm mesurés à la station Météo-France de l'Ile de Bréhat) (Fig. 179). De plus, les forts vents qui ont soufflé à plus de 100 km/h ont été à l'origine de l'effondrement d'un arbre entraînant ainsi

une ablation du sommet de falaise (Fig. 180). L'abaissement du profil de plage qui s'est produit durant l'hiver (Fig. 161) aurait également favorisé l'érosion marine de la falaise.

Fig. 179 : Précipitations journalières (station Météo-France de l'Ile de Bréhat) et coefficients de marée (marégraphe SHOM de l'Ile de Bréhat) en janvier 2018.

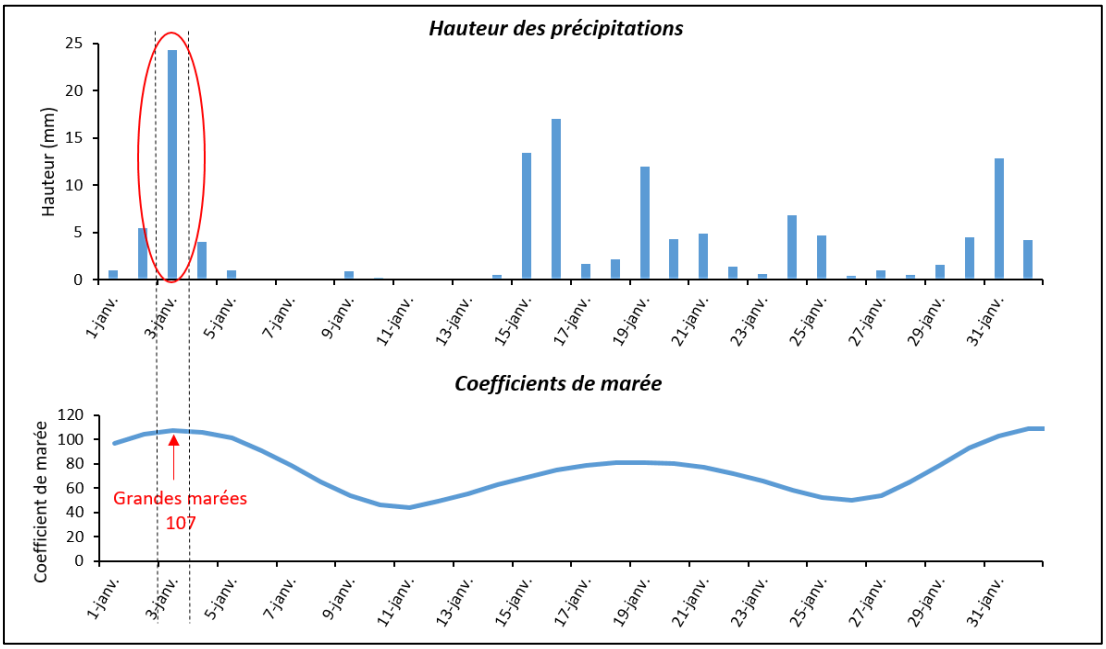
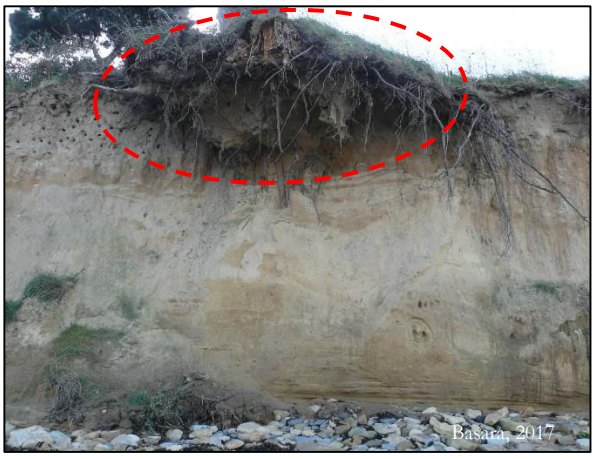


Fig. 180 : Chute d'un arbre à Pors-Hir provoquant l'ablation du sommet de falaise en janvier 2018.



8 novembre 2017

25 juin 2018

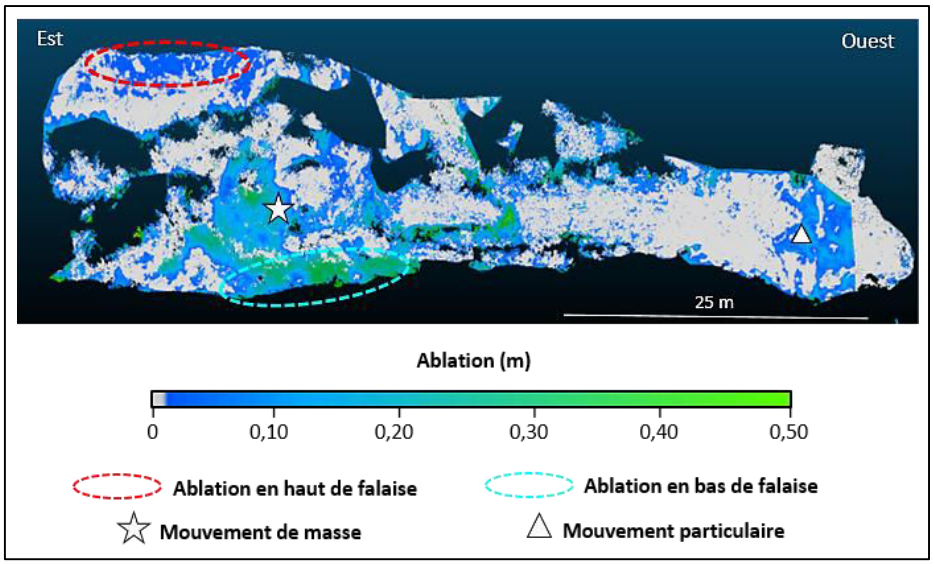
Pour résumer, l'agent érosif principal des falaises meubles de Pors-Hir est l'action des vagues qui forme des sous-cavages en pied de falaise, déblaie rapidement les éboulis et provoquent des évolutions de profils de plage pouvant accentuer l'efficacité des houles à éroder la falaise. À marée haute, lors de forts coefficients ou lorsque la mer est forte, l'enlèvement de ces matériaux entretient la verticalité de la falaise. En empêchant l'abrupt d'atteindre une pente d'équilibre, les vagues favorisent alors les mouvements gravitaires sur la paroi. Aux actions marines, s'ajoute une érosion subaérienne, induite par les eaux d'infiltration qui entrainent des phénomènes de suffosion et la mise en surcharge des portions de falaise en surplomb (fissures de traction initiées par les sous-cavages). Ceci génère des effondrements d'une partie ou du pan entier de la falaise. Enfin, à ces agents érosifs naturels se mêlent des actions anthropiques : apport d'eaux provenant de canalisations non raccordées et de surfaces étanches (bâtiments, routes…) situées en arrière des falaises et qui favorise la concentration des eaux. Les falaises

de Pors-Hir, de par leur lithologie, sont très sensibles aux processus marins et subaériens et les plus forts taux d'ablation sont enregistrés lors de la conjonction de phénomènes météo-marins.

7.2.3.4- Trédrez-Locquémeau

Dans l'ensemble, les falaises meubles de Notigou s'érodent principalement sous forme de mouvements particulaires en libérant de faibles volumes de matériaux (Annexe 10). Entre 2017 et 2019, c'est le milieu et le haut de falaise qui enregistrent le plus de départ de matériaux avec 67 à 82 % du volume total. L'ablation du pied de falaise est généralement faible mais sa contribution est toutefois plus marquée durant les périodes hivernales (31 % contre 24 % durant les périodes estivales).

Fig. 181 : Évolution du front de falaise à Notigou durant l'hiver 2017-2018.



Les falaises de Trédrez-Locquémeau semblent, *a priori*, être assez protégées des actions marines puisque le pied de falaise se situe entre 2,1 à 2,4 m au-dessus du niveau marin extrême décennal (+ 5,20 m NGF). De plus, la pente élevée du haut de plage (11 %) confère une bonne protection au site contre les actions marines. L'ablation du pied de falaise par la mer survient seulement lors de niveaux d'eau exceptionnels (surcote lors d'une tempête hivernale) associés à un niveau de plage bas. Ceci s'est produit sur la période de suivi, durant l'hiver 2017-2018 : grâce à un niveau de plage relativement bas (Fig. 157), les houles ont pu atteindre le pied de falaise et réactiver le glissement en entrainant le déplacement des matériaux sus-jacents (Fig. 157 et Fig. 182).

Toutefois, la falaise meuble de Notigou évolue essentiellement sous l'action des processus subaériens induits par les eaux d'infiltration et de ruissellement. Le bas de falaise est soumis à des phénomènes de résurgence d'eau en raison de la présence d'une formation sous-jacente moins perméable (roche altérée du substratum). À plusieurs endroits, des suintements sont visibles le long de la paroi (Fig. 183). La résurgence de la nappe en pied de falaise permet au versant de garder un profil actif et de générer de nouveaux glissements.

Fig. 182 : Glissement réactivé suite à l'érosion basale de la falaise de Notigou durant l'hiver 2017-2018.

8 décembre 2017 26 juin 2018

Fig. 183 : Résurgence d'eau et ruissellement visibles dans la partie inférieure de la falaise.

Au final, l'évolution des falaises meubles de Trédrez-Locquémeau est liée principalement aux actions subaériennes et, au niveau de la zone de glissement, à l'ablation du pied de falaise empêchant l'accrétion d'une butée susceptible de stabiliser le glissement. Cette ablation se fait par la résurgence d'eaux continentales en pied de falaise et, occasionnellement, par l'action de la mer lors de phénomènes de surcote.

7.2.3.5- Locquirec

L'analyse de la répartition spatiale de l'ablation des falaises, sur le site de Locquirec, montre que l'érosion se fait principalement dans la partie ouest du site (Fig. 184, Annexe 10). Cette portion de falaise contribue effectivement entre 62 et 71 % des volumes de matériaux libérés sur l'ensemble du site de Locquirec. Cette différence marquée, en termes d'ablation, entre le secteur est et le secteur ouest de l'anse s'explique par la nature des matériaux et la géomorphologie des falaises. Tandis que le secteur est, est constitué par des heads surmontés par des paléodunes, le secteur ouest est formé par des heads recouverts à plusieurs endroits par du remblai (Fig. 185). Ces matériaux non cohésifs sont très instables et sont fréquemment affectés par des glissements (Fig. 187).

Fig. 184 : Évolution du front de falaise de l'anse du Moulin de la Rive durant l'hiver 2017-2018.

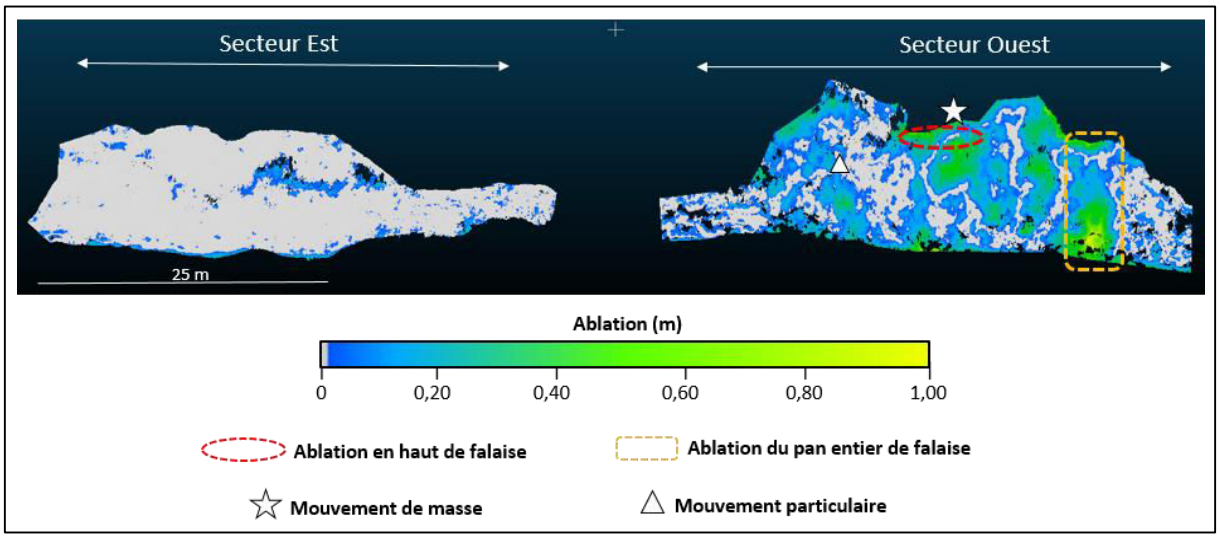


Fig. 185 : Géomorphologie des falaises du site de Locquirec.

Photo de gauche : partie est du site, formée de heads et surmontée par des paléodunes. Photo de droite : partie ouest du site, formée par des heads et du remblai.

Dans le secteur est, l'ablation se fait essentiellement en bas de falaise. Toutefois, durant l'hiver, la contribution du haut de falaise dans les volumes libérés est plus forte (45 % contre 23 % durant l'été). Les paléodunes constituant le haut de falaise sont effectivement peu cohésives et elles sont sensibles aux précipitations et aux forts vents, plus virulents pendant la période hivernale. Leur faible cohésion explique que l'abrupt possède une plus faible pente dans sa partie supérieure. Les formations de head du bas de falaise, formées par une matrice argileuse, sont aptes à se gorger d'eau et subissent des déplacements lents durant l'hiver, pouvant conduire à la rupture. Durant l'été, ces formations sont affectées par des processus d'humectation-dessiccation. La mer nettoie ensuite les éboulis accumulés en pied et érode ponctuellement la base des falaises lors des surcotes hivernales puisque le pied de falaise ne se situe qu'entre 0,3 à 0,6 m au-dessus des PMVE.

Pour les falaises situées à l'ouest de l'anse, formées par du remblai, l'ablation concerne souvent l'ensemble de l'abrupt (Annexe 10). L'érosion se fait sous forme d'éboulements et de glissements de dimensions décamétriques qui se déplacent progressivement vers le bas de falaise (Fig. 187) sous l'action conjuguée de l'érosion marine en pied et des eaux continentales qui entrainent une perte de cohésion des matériaux. D'après une étude géotechnique réalisée par Ginger-CEBTP (Fradet, 2015), les matériaux limono-graveleux constituant les falaises à l'ouest du site sont très sensibles à l'eau et sont sujets à une perte de portance pour de faibles variations de teneur en eau.

L'analyse diachronique des hauteurs de précipitations et des variations de la nappe phréatique (mesurées à partir des capteurs installés sur le site) montre, de plus, que la nappe superficielle présente au niveau de ce secteur est très réactive puisque son temps de réponse aux précipitations est de seulement 3h (Fig. 186). Ceci indique donc des écoulements et des infiltrations rapides au sein du versant. Les hauteurs d'eau mesurées par le piézomètre plus importantes que celles des précipitations (jusqu'à 38 % en plus), et l'élévation de la nappe phréatique, même en absence de précipitations sur le site, indiquent que le versant reçoit des écoulements d'eau venant de secteurs situés plus en amont.

Fig. 186 : Chroniques des précipitations et de la hauteur relative de la nappe phréatique entre le 28/10/2018 et le 01/11/2018.

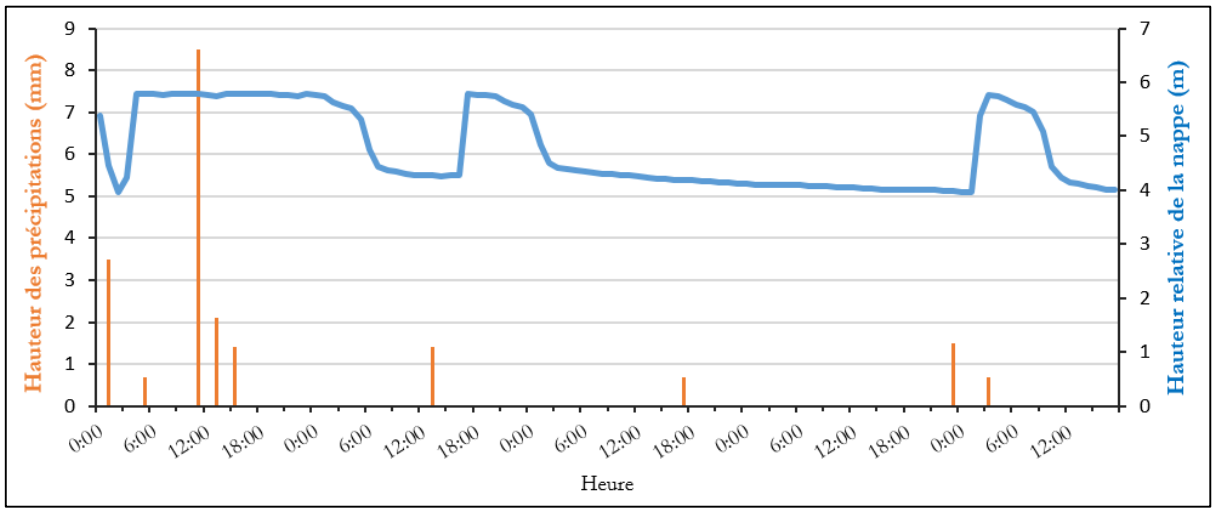


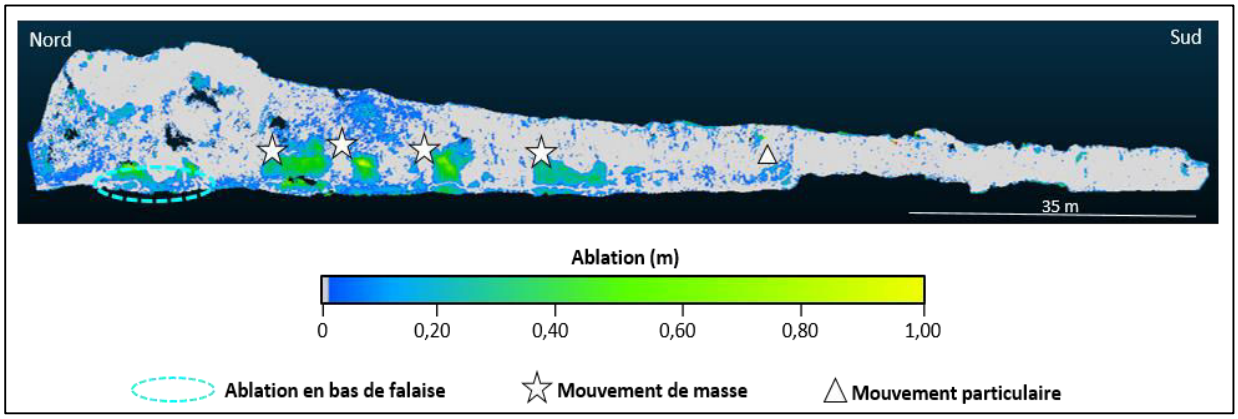
Fig. 187 : Glissements affectant les falaises situées à l'ouest du site et recouvertes par du remblai. Vue depuis le nord-est.

Au final, l'évolution des falaises meubles de Locquirec se fait sous l'action conjuguée de l'érosion marine et subaérienne. Les eaux d'infiltration provoquent un gonflement des formations de head, riches en argile, qui subissent alors des déplacements généralement lents (phénomène de fluage) mais qui peuvent s'accélérer lors d'une surcharge brutale par les eaux de pluie. Ces matériaux glissés sont déblayés par la houle de tempête qui entretient l'abrupt dans les colluvions argileuses. En s'opposant à l'atteinte de l'état d'équilibre, l'action marine entretient donc les conditions d'instabilité provoquant une régression des têtes de glissement dans le secteur ouest du site. Dans la partie est, l'érosion des paléodunes constituant le haut de falaise s'effectue principalement sous l'action du vent (éolisation) et des eaux météoritiques qui sont à l'origine de glissements de portions sableuses.

7.2.3.6- Telgruc-sur-Mer

L'analyse de la répartition spatiale de l'érosion sur le site de Telgruc-sur-Mer montre que, durant les périodes hivernales, c'est le pied et le milieu de falaise qui enregistrent le plus de départ de matériaux avec 68 à 80 % du volume total tandis que, durant l'été, les départs de matériaux sont moins volumineux et concernent principalement le milieu de falaise (Fig. 188, Annexe 10).

Fig. 188 : Évolution du front de falaise de l'anse du Caon durant l'hiver 2017-2018.



L'altitude du pied de falaise ne permet pas à la mer de l'atteindre lors de conditions météo-marines peu agitées puisque le pied de falaise se situe entre 1,5 à 1,9 m au-dessus des PMVE. Toutefois, durant l'hiver, en période de tempête et suite à l'abaissement du profil de plage (Fig. 161), la surélévation du plan d'eau peut permettre à la mer d'atteindre la base des talus. La mer déblaie alors les tabliers d'éboulis et peut désagréger la base des falaises par attrition avec les graviers et les galets (Fig. 188). Cependant la faible pente de la plage (1,6 %) et la présence de hauts fonds dans la baie de Douarnenez (Guichard, 2003) induisent une forte atténuation des houles et une érosion marine limitée.

Les falaises de l'anse du Caon semblent évoluer notamment sous l'effet de processus subaériens induits par les eaux de ruissellement et d'infiltration. Les résurgences de la nappe au pied de l'abrupt et la forme allongée des zones de départ de matériaux visibles en milieu de falaise (Fig. 189) témoignent de ces actions exclusivement subaériennes. De plus, le site de Telgruc-sur-Mer est caractérisé par des précipitations abondantes, à l'échelle de l'année, en comparaison avec les autres sites (cumul moyen annuel de 1 006 mm) (cf. chapitre 4). Durant les périodes hivernales, la saturation en eau des formations entraine l'effondrement des portions de falaise les plus instables (Fig. 190). Durant l'été, la falaise semble évoluer seulement par des mouvements particulaires liés à des processus d'humectation-dessiccation, d'où une ablation réduite.

Fig. 189 : Formes allongées créées par ruissellement sur les formations meubles moins perméables.

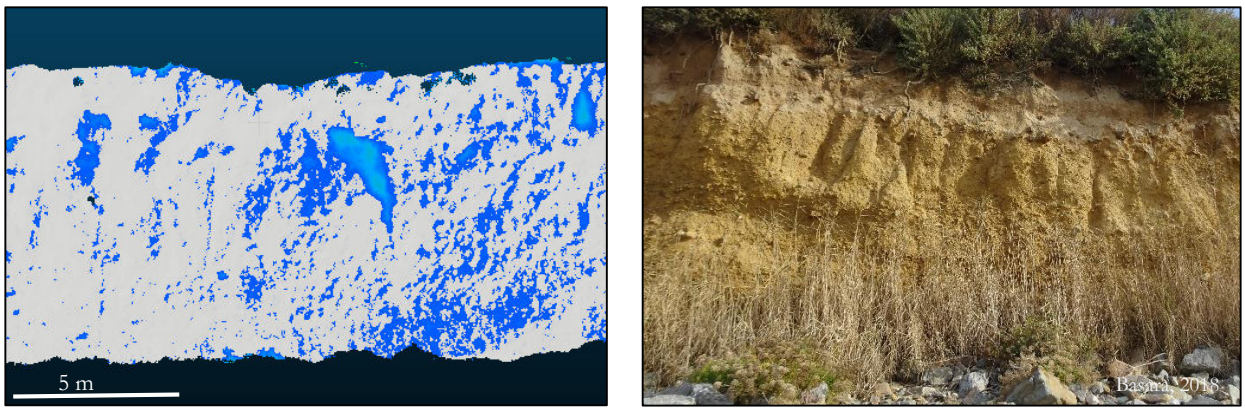


Fig. 190 : Ablation du milieu de falaise, produite entre le 26 octobre 2018 et le 12 avril 2019, sur le site de Telgruc-sur-Mer.

26 octobre 2018

12 avril 2019

Pour résumer, l'évolution des falaises meubles de Telgruc-sur-Mer se fait principalement sous l'effet des actions subaériennes induites par les eaux d'infiltration et de ruissellement qui forment des ravines et saturent les formations en eau. L'érosion de la falaise est accentuée aux endroits où il y a suintement de la nappe phréatique et les alternances d'humectation-dessiccation conduisent à une éboulisation régulière du front de falaise. La mer n'intervient que dans le déblaiement des éboulis et parfois dans l'attrition de la base des falaises, lors de surcotes hivernales où les houles parviennent à atteindre le pied.

7.2.3.7- Plozévet

L'analyse de la répartition spatiale de l'érosion sur le site de Plozévet tend à montrer que, sur la période d'étude, c'est le haut de falaise qui enregistre le plus de départ de matériaux avec 38 % du volume total (Annexe 10). Les volumes produits en bas et milieu de falaise sont plus faibles. Ceci semble indiquer une prépondérance des actions subaériennes dans l'ablation du front de falaise.

Toutefois, l'analyse de la répartition spatiale de l'érosion sur ce site montre deux modalités d'évolution différentes des falaises selon le secteur considéré. La portion nord du site est effectivement soumise à l'action des houles du fait de l'altitude peu élevée du pied de falaise (seulement 0,50 m au-dessus des PMVE et 0,20 m en-dessous du niveau marin extrême décennal) et une pente de plage généralement plus faible (8,5 %). De plus, le site de Plozévet est caractérisé par des conditions d'agitation marines élevées : la hauteur significative moyenne des houles est de 1,56 m et les vents sont majoritairement d'afflux (cf. chapitre 4). Les sous-cavages et les rentrants caractéristiques de ce secteur témoignent de l'intervention de la mer dans l'érosion des falaises en désagrégeant les roches altérées par action mécanique des vagues (attrition, mitraillage par les galets et les graviers). L'agrandissement progressif de ses cavités conduit, à terme, à l'effondrement de la portion de falaise surplombante. Dans ce secteur, la mer intervient également dans l'évolution du profil de plage et du cordon de galets. Ainsi, durant l'hiver 2017-2018, l'action des houles de tempête a conduit à un fort amaigrissement du profil de plage et à un étalement du cordon de galets (Fig. 163 et Fig. 191).

Fig. 191 : Amaigrissement du haut de plage durant l'hiver 2017-2018 dans le secteur nord du site de Plozévet. Vue depuis le nord.

À l'inverse, le secteur sud du site semble évoluer essentiellement sous l'effet d'actions subaériennes en raison de l'altitude plus élevée du pied de falaise (1,0 à 2,4 m au-dessus des PMVE). De plus, la pente élevée de la plage (10 %) et celle du cordon de galets (entre 17 et 24 %) permettent de protéger la falaise des actions marines. La forme linéaire et verticale des zones de départ dans ce secteur suggère l'intervention de processus de ruissellement le long de l'abrupt. L'érosion subaérienne se fait également par une perte de cohésion des matériaux, sous l'effet des eaux d'infiltration. Ceci peut provoquer le départ de gros volumes de matériaux, comme cela a été le cas notamment durant l'hiver 2017-2018 (Fig. 192). Ces mouvements de masse correspondent le plus souvent à des glissements translationnels (glissements banc sur banc) liés à la schistosité des micaschistes altérés dont les bancs sont inclinés vers la mer (Fig. 193).

Fig. 192 : Évolution du front de falaise à Poulbréhen durant l'hiver 2017-2018.

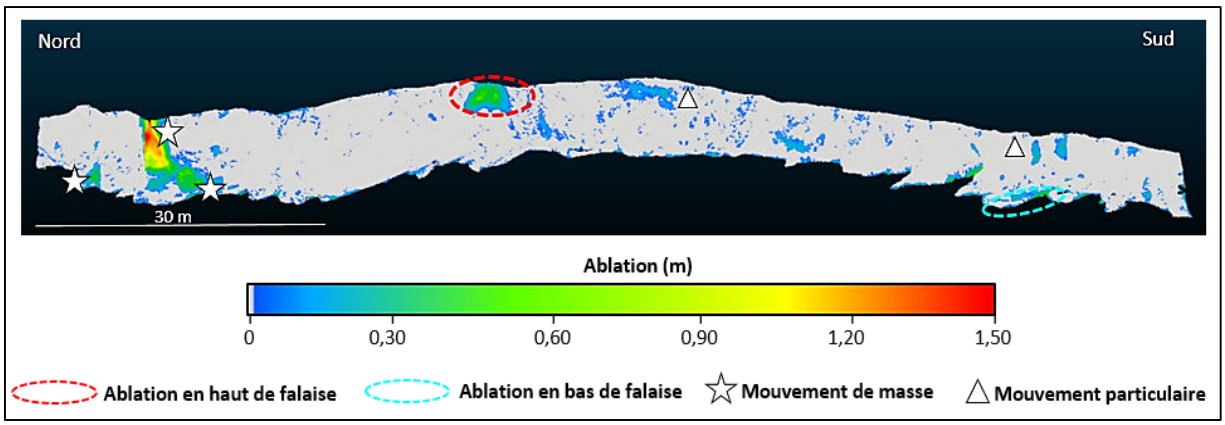
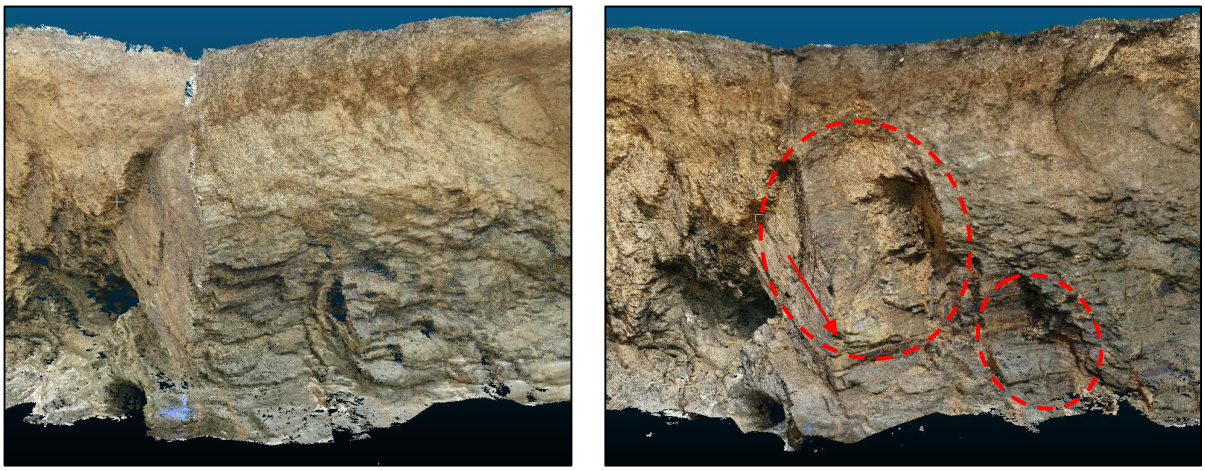


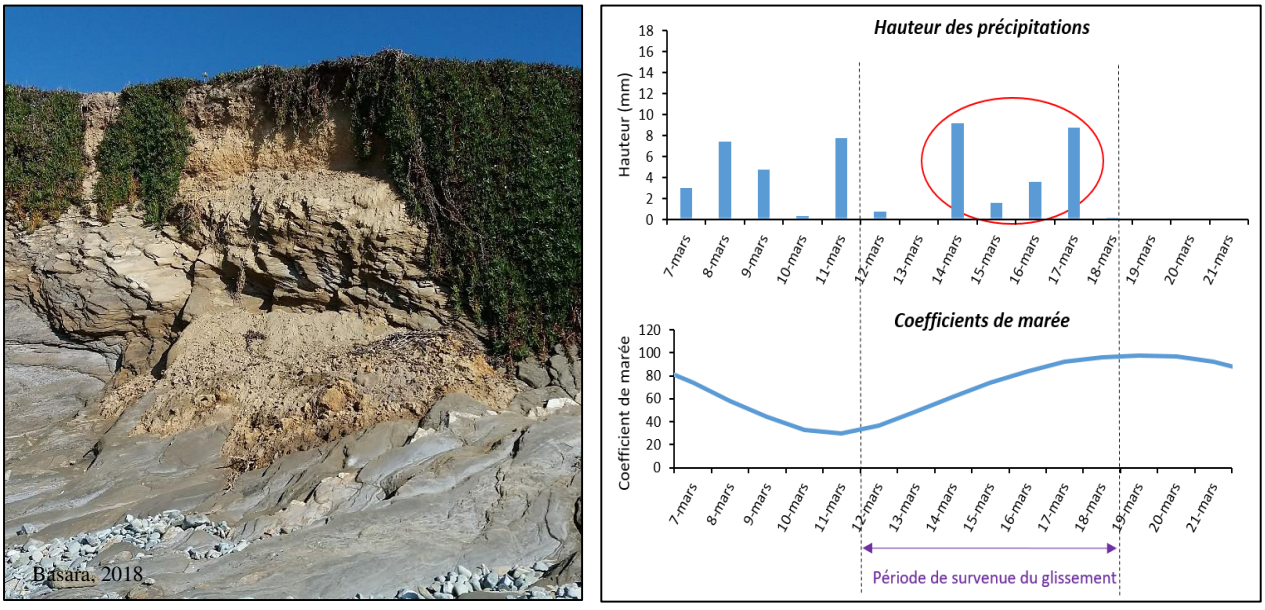
Fig. 193 : Glissements banc sur banc produits entre le 20 novembre 2017 et le 2 mai 2018 à Plozévet.



20 novembre 2017 2 mai 2018

Grâce au témoignage d'un propriétaire riverain, on sait qu'un des glissements, qui s'est produit en haut de falaise, dans le secteur sud du site, a eu lieu entre le 12 et le 18 mars 2018 (Fig. 194). L'analyse diachronique des conditions environnementales indique que, durant cette semaine, les conditions marines étaient relativement calmes (absence de grande marée, peu d'agitation marine) mais il y a eu de fortes précipitations (43 mm enregistrés dans la semaine) (Fig. 194). Les chroniques des précipitations et la position haute de l'ablation sur la paroi de falaise suggèrent donc l'intervention d'actions purement subaériennes dans le déclenchement du mouvement de masse. Le secteur sud du site évolue ainsi principalement sous l'action de processus subaériens.

Fig. 194 : Glissement des dépôts quaternaires sur les micaschistes (volume érodé : 3,2 m³) et conditions environnementales en mars 2018 (précipitations journalières (station météorologique installée sur le site) et coefficients de marée (marégraphe SHOM d'Audierne)).



Pour résumer, la prédominance des actions marines et subaériennes diffère entre les secteurs nord et sud du site de Plozévet. L'agent érosif principal pour le secteur nord est l'action des vagues qui s'exerce par la désagrégation des roches par action physico-chimique (altération par les eaux chargées en sel) et mécanique (mitraillage par les galets et abrasion du platier et du pied de falaise). L'action marine forme ainsi des sous-cavages et des cavités conduisant, à terme, à l'effondrement de la paroi. La mer déblaie ensuite rapidement les éboulis accumulés en pied et provoque des évolutions de profils de plage pouvant accentuer l'efficacité des houles à éroder la falaise.

Pour le secteur sud, l'érosion se fait essentiellement par des actions subaériennes induites par les eaux d'infiltration et de ruissellement qui provoquent une désagrégation mécanique (éboulisation) mais aussi une altération physico-chimique des roches. Les eaux continentales entrainent également une perte de cohésion des matériaux et sont à l'origine de glissements translationnels pour les niveaux micaschisteux ou d'éboulements pour les formations superficielles. L'ensemble de ces processus fait que la partie supérieure de la falaise recule généralement plus rapidement que la partie inférieure, protégée de l'action des houles par une berme épaisse.

7.2.3.8- Bilan sur la répartition spatiale de l'érosion

Finalement, l'analyse de la répartition spatiale de l'érosion à court terme sur les sites d'étude, par le suivi photogrammétrique montre que :

- Les falaises de **Nantois** (Pléneuf-Val-André), de **Plougrescant** et le **secteur nord du site de Plozévet** évoluent principalement sous l'effet d'actions marines (Fig. 195). La mer initie le processus d'ablation en pied de falaise. Les formations sus-jacentes, en surplomb, s'effondrent alors par la suite, lié au développement de fissures de traction. La faible épaisseur voire l'absence de cordon de galets sur ces sites ne permet pas au pied de falaise d'être protégé des actions marines.

- Pour les falaises des **Vallées** (Pléneuf-Val-André), de **Trédrez-Locquémeau** et de **Locquirec,** les falaises évoluent sous l'effet conjugué de processus marins et subaériens (Fig. 196). Sur ces sites, la mer a un rôle de déblaiement des matériaux accumulés en pied de falaise lors des grandes marées à fort coefficient et elle peut aussi éroder le pied de falaise. Ce départ de matériel à la base se répercute ensuite progressivement vers le haut de l'abrupt. Les eaux de ruissellement et d'infiltration viennent s'ajouter à la déstabilisation de portions de falaise en diminuant la cohésion des matériaux et en exerçant des mises en charge brutales des formations meubles. Ceci génère des éboulements, des effondrements et des glissements superficiels de portions de falaise. Les processus d'humectation-dessiccation participent aussi à l'érosion par une éboulisation fine de l'abrupt.

- Pour le site de **Telgruc-sur-Mer** et le **secteur sud de Plozévet,** les falaises évoluent principalement sous l'effet de processus subaériens (ruissellement, infiltration, alternance humectation-dessiccation) (Fig. 197). La saturation en eau et la mise en charge des formations conduit à des glissements ou à des effondrements. Les processus d'humectation-dessiccation provoquent une éboulisation régulière du front de falaise. Sur ces sites, la mer a surtout un rôle de déblaiement des éboulis accumulés en pied de falaise, lors de phénomènes de surcote. Il est à noter, toutefois, que la différence de lithologie entre les deux sites (colluvions pour Telgruc-sur-Mer, micaschistes altérés pour Plozévet) induit des processus subaériens différents. De plus, l'absence de plateforme marine héritée en pied de falaise à Telgruc-sur-Mer lui confère une plus grande sensibilité aux actions marines que sur le site de Plozévet, bien que ces actions restent limitées.

Fig. 195 : Évolution des falaises meubles par la dominance des actions marines (exemple de la falaise de Pors-Hir à Plougrescant).

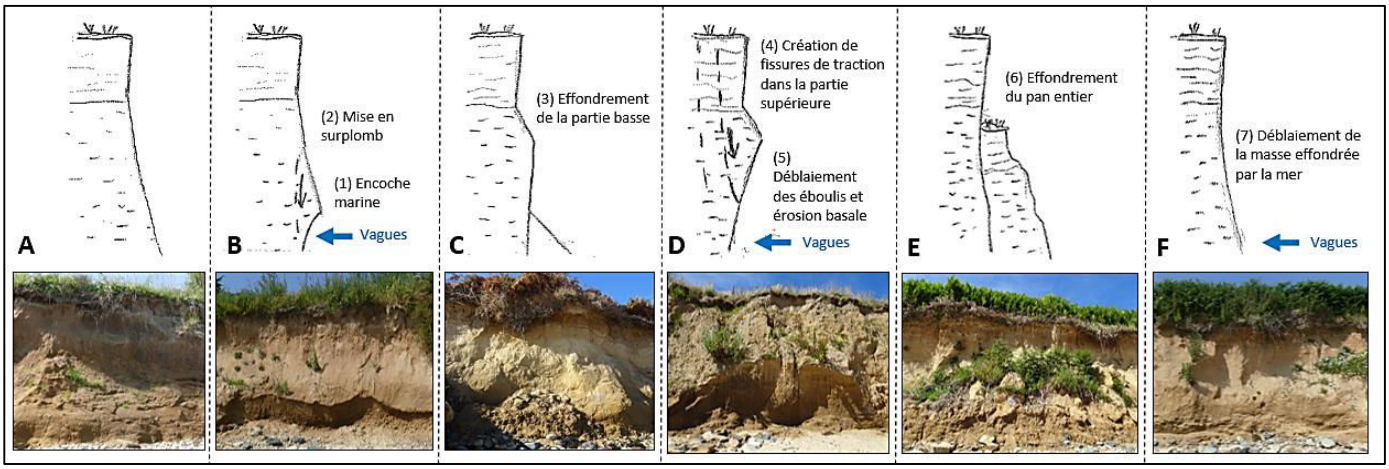


Fig. 196 : Évolution des falaises meubles par l'action conjuguée des forçages marins et subaériens (exemple de la falaise de la plage des Vallées à Pléneuf-Val-André).

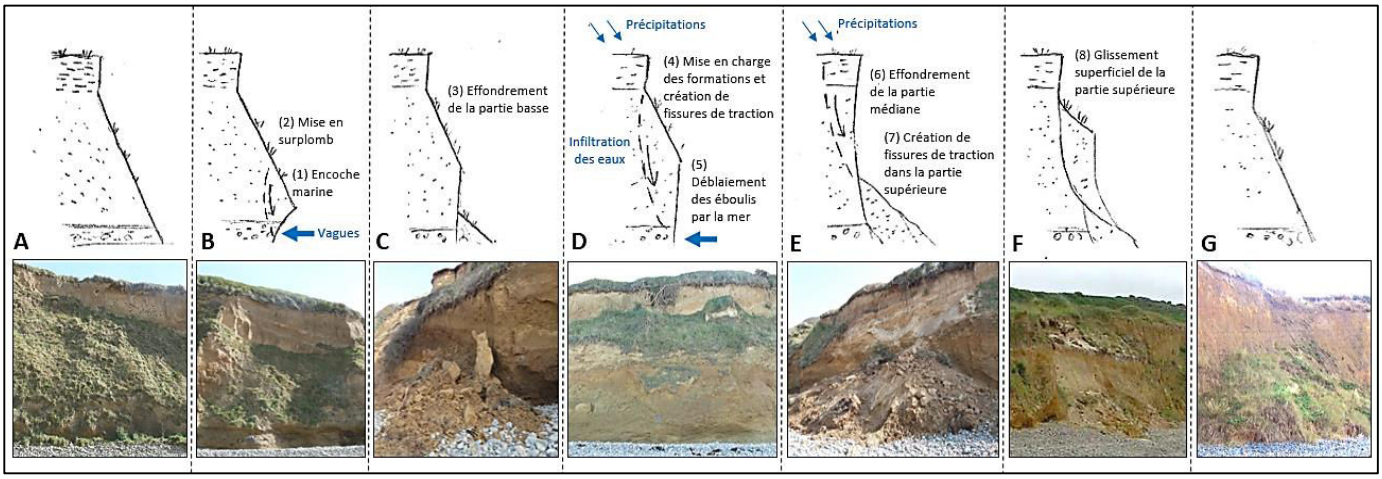
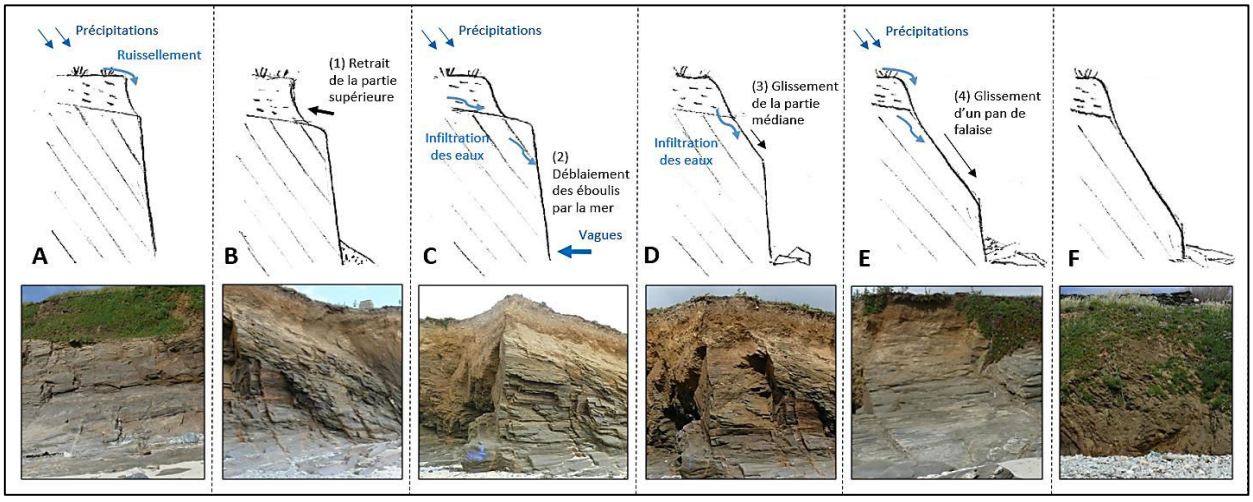


Fig. 197 : Évolution des falaises meubles par la dominance des actions subaériennes (exemple de la falaise du secteur sud de Poulbréhen à Plozévet).



Ainsi, les modalités de recul des falaises meubles diffèrent selon les forçages naturels dominants : sur certains secteurs, l'action des vagues est le processus majeur d'érosion des falaises (Carter et Guy Jr, 1988 ; Woodroffe, 2002 ; Hobbs et al., 2010 ; Barkwith et al., 2014), tandis que pour d'autres, ce sont les processus subaériens qui conditionnent majoritairement l'érosion et la mer a alors seulement un rôle de déblaiement des matériaux (Hobbs et al., 2002 ; Young et Ashford, 2006 ; Bonnot-Courtois et al., 2008). Mais, très souvent, les processus marins et subaériens sont interdépendants (Young, Guza, et al., 2009) et il s'agit plutôt d'un équilibre variant dans le temps entre les différents forçages (Brooks et al., 2012 ; Roulland et al., 2019).

Néanmoins, les falaises où les actions marines prédominent sont celles évoluant le plus rapidement car, dans ce cas, les matériaux accumulés en pied sont évacués rapidement par la mer et ne permettent pas d'assurer une protection durable contre l'érosion marine ni de stabiliser, au moins temporairement, le profil de falaise. L'action marine entretient les conditions d'instabilité et favorise le déclenchement de mouvement de masse (Carter et Guy Jr, 1988 ; Sunamura, 2015 ; Prémaillon et al., 2017).

Inversement, les falaises où les actions subaériennes prédominent sont celles évoluant le moins rapidement car les éboulis peuvent perdurer plus longtemps en pied. Le comportement de ces falaises se rapprocherait de celui des falaises mortes qui évoluent seulement sous les actions subaériennes et qui sont associés à de faibles taux d'ablation (Letortu, 2013).

Enfin, l'analyse de la répartition spatiale de l'érosion montre que l'ablation et les modalités de recul peuvent varier sur de très courtes distances, le long d'un même linéaire de falaise. Cette évolution spatiale est liée aux caractéristiques intrinsèques du milieu (variations longitudinales de la lithologie, de la géomorphologie du profil falaise-estran et de l'altitude du pied de falaise).

7.3- Comparaison des taux d'ablation avec les vitesses de recul du haut de falaise

L'objectif, ici, est de comparer les taux d'ablation mesurés par photogrammétrie sur le temps court aux vitesses de recul obtenues par photo-interprétation sur des périodes pluriannuelles (cf. chapitre 6). Afin de replacer ces évolutions sur une plus grande échelle temporelle, ces taux de recul sont également comparés aux vitesses de retrait long terme sur les sites d'étude, issues du travail de S. Morisseau (2018). Ces taux à long terme ont été obtenus par la comparaison des cartes des Ingénieurs Géographes (réalisées entre 1771 et 1785) avec les orthophotographies de 2011 venant de la base de données de l'IGN.

Il est important de noter que ces comparaisons sont, bien entendu, à prendre avec précaution du fait des périodes d'analyse, des méthodes et des marges d'erreur différentes. De plus, en raison de la faible étendue temporelle du suivi photogrammétrique, les résultats peuvent être influencés par des phénomènes ponctuels dans le temps et de forte intensité (Fenster et al., 1993 ; Martínez et al., 2011 ; Stéphan et al., 2018). Néanmoins, ces comparaisons peuvent renseigner sur la fiabilité des valeurs obtenues (Delevoie et al., 2012) et sur le caractère « exceptionnel » ou non, des 25 mois de suivi.

Pour les falaises de la plage des Vallées, le taux d'ablation obtenu par photogrammétrie est de 0,16 m/an et est donc similaire à celui obtenu par photo-interprétation sur l'échelle historique récente (Tab. 23). Les mesures obtenues sur une période de 25 mois sont donc en accord avec les mesures obtenues à l'échelle pluri-décennale (67 ans). Toutefois, ces taux à court et moyen termes semblent bien plus élevés que ceux obtenus sur le long terme (0,04 m/an sur la période 1785-2011). Ceci peut suggérer l'influence de facteurs anthropiques. Ici, l'installation d'un camping en sommet de falaise dans les années 1960 et la mise en place d'un enrochement à l'extrémité ouest du site (cf. chapitre 6) peuvent avoir accéléré le processus de retrait des falaises.

Sur le secteur de Nantois, les résultats des taux de recul des falaises meubles obtenus sur le court et le moyen termes sont différents. Le taux d'ablation obtenu par photogrammétrie est bien inférieur à celui issu des orthophotographies, même après avoir intégré la marge d'erreur (respectivement 0,03 ± 0,02 m/an contre 0,27 ± 0,08 m/an). Ceci s'explique notamment par l'absence de mouvements de masse durant la période de suivi. Les aléas de grande ampleur recensés sur ce secteur de falaise (années 1995, 2007 et 2015) montrent effectivement que la fréquence de survenue de mouvements de masse est supérieure à l'étendue temporelle du suivi (25 mois).

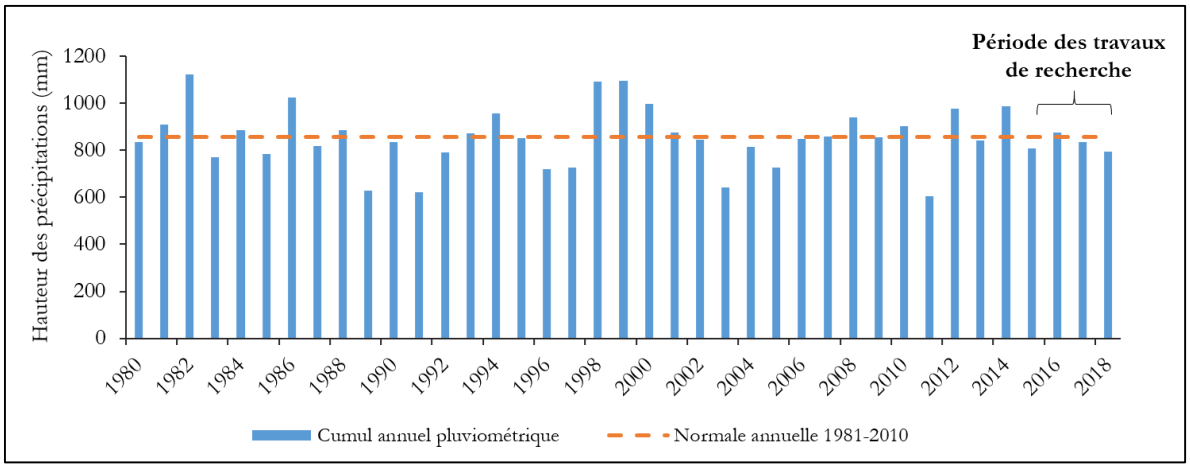
Pour les falaises du site de Plougrescant, le taux d'ablation obtenu par photogrammétrie est légèrement inférieur à celui obtenu par photo-interprétation mais, compte-tenu des marges d'erreur, les résultats sont proches (0,41 m/an sur la période 1952-2015 et 0,35 m/an sur la période 2017-2019). Les mesures obtenues sur une période de 25 mois sont donc en accord avec les mesures obtenues à l'échelle pluri-décennale (63 ans). Le taux à long terme issu de la comparaison de cartes anciennes est toutefois différent et nettement inférieur aux taux de recul récents (0,07 m/an sur la période 1785-2011). Cependant, il semble cohérent avec les taux obtenus par photo-interprétation entre 1952 et 1977, avant l'artificialisation du trait de côte, malgré la marge d'erreur élevée de ces mesures (Tab. 23).

Sur les sites de Trédrez-Locquémeau et de Locquirec, les taux de recul obtenus sur le court, le moyen et le long termes sont cohérents entre eux en tenant compte des marges d'erreur (respectivement 0,04 m/an, 0,08 m/an et 0,06 m/an pour le site de Trédrez-Locquémeau et 0,05 m/an, 0,07 m/an et 0,04 m/an pour le site de Locquirec).

En revanche, sur les sites de Telgruc-sur-Mer et de Plozévet, en raison des marges d'erreurs souvent supérieures aux taux de recul déterminés, les vitesses de retrait ne peuvent être considérées comme significatives (Bray et Hooke, 1997). Ceci est lié notamment à l'évolution lente de ces falaises (estimée à 0,02 m/an par photogrammétrie sur la période 2017-2019 et entre 0,07 et 0,09 m/an sur l'échelle historique récente d'après la comparaison des photographies aériennes verticales).

Mais globalement, sur l'ensemble des sites, on constate que les taux d'ablation obtenus par les levés photogrammétriques sont légèrement inférieurs aux taux à moyen terme issus de la photo-interprétation. Ceci peut s'expliquer par le fait que les levés photogrammétriques ne représentent que deux ans d'observation et qu'ils ont été réalisés durant un contexte météo-marin relativement calme (peu de tempêtes successives, de périodes pluvieuses et absence de concomitance entre des grandes marées et de fortes houles). La figure ci-dessous (Fig. 198) montre effectivement que les travaux de recherche se sont déroulés dans un contexte pluviométrique en baisse mais les cumuls de précipitations restent néanmoins proches de la normale calculée entre 1981 et 2010.

Fig. 198 : Précipitations annuelles enregistrées à la station Météo-France de Ploumanac'h (considérée représentative des conditions météorologiques sur le littoral breton) depuis 1980.



Un suivi à haute résolution peut donc refléter une évolution aléatoire de la cinématique du front de falaise biaisant ainsi le calcul des volumes d'ablation (Jaud, 2011 ; Letortu, 2013). Les taux à court terme sont fortement influencés par la présence ou non d'événements morphogènes sur la période de suivi (Hénaff et al., 2013). Par ailleurs, les taux de recul à long terme sont également inférieurs aux taux de recul à moyen terme obtenus par les orthophotographies (Tab. 23). Ceci suggère l'influence des aménagements, depuis la seconde moitié du 20e siècle, sur l'accélération du recul des falaises meubles. Sur les sites de Plougrescant et de Pléneuf-Val-André, les taux à long terme ont été multipliés par 5 sur la période 1950-2015.

Enfin, l'analyse des marges d'erreurs associées aux différentes techniques de quantification du recul montre que la photogrammétrie et la comparaison de cadastres/cartes anciennes semblent être les techniques les plus appropriées. En effet, ces méthodes sont associées à une marge d'erreur relativement faible (± 0,03 m/an) en comparaison de celle associée à la méthode de photo-interprétation (± 0,09 m/an en moyenne). L'intervalle de temps long d'observation pour les cartes anciennes (généralement supérieur à 200 ans) et la précision des mesures pour la photogrammétrie confèrent à ces techniques une plus faible erreur sur les vitesses de recul que les photographies aériennes verticales qui sont plus approximatives en raison notamment des fortes déformations optiques qui les caractérisent (Jego, 2003). Néanmoins, la comparaison des photographies aériennes reste un outil indispensable pour apprécier l'évolution des falaises meubles sur l'échelle historique récente et mettre en évidence l'intervention de forçages naturels et anthropiques (cf. chapitre 6).

Tab. 23 : Comparaison des taux annuels de recul des falaises sur les sites d'étude obtenus par comparaison de cartes anciennes (Morisseau, 2018), par comparaison de photographies aériennes verticales et par photogrammétrie (valeurs en grises : vitesses associées à une marge d'erreur supérieure au taux calculé).

Site d'étude	Technique	Période d'observation	Durée d'observation (années)	Taux moyen (m/an)	Marge d'erreur (m/an)
Les Vallées (Pléneuf-Val-André)	Cartes anciennes	**1785-2011**	226	**0,04**	0,03
	Orthophotographie	1948-1975	27	*0,10*	0,13
		1975-1992	17	0,26	0,18
		1992-2003	11	*0,25*	0,53
		2003-2011	8	*0,04*	0,75
		2011-2015	4	*0,15*	1,23
		Moyenne 1975-2015	40	**0,16**	0,08
	Photogrammétrie	**2017-2019**	2	**0,16**	0,03
Nantois (Pléneuf-Val-André)	Cartes anciennes	**1785-2011**	226	0,09	0,03
	Orthophotographie	1948-1975	27	0,25	0,13
		1975-1992	17	0,28	0,18
		1992-2003	11	*0,35*	0,53
		2003-2011	8	*0,25*	0,75
		2011-2015	4	*0,19*	1,23
		Moyenne 1975-2015	40	**0,27**	0,08
	Photogrammétrie	**2017-2019**	2	*0,03*	0,02
Plougrescant	Cartes anciennes	**1785-2011**	226	**0,07**	0,03
	Orthophotographie	1952-1962	10	*0,21*	0,69
		1962-1977	15	*0,10*	0,29
		1977-2003	26	0,45	0,23
		2003-2011	8	0,81	0,75
		2011-2015	4	*0,94*	1,23
		Moyenne 1952-2015	63	**0,41**	**0,11**
	Photogrammétrie	**2017-2019**	2	**0,35**	0,02
Trédrez-Locquémeau	Cartes anciennes	**1785-2011**	226	**0,06**	0,03
	Orthophotographie	1951-1972	21	*0,03*	0,13
		1972-1997	25	*0,08*	0,21
		1997-2015	18	*0,13*	0,30
		Moyenne 1951-2015	64	**0,08**	0,07
	Photogrammétrie	**2017-2019**	2	**0,04**	0,03
Locquirec	Cartes anciennes	**1785-2011**	226	***0,05***	0,05
	Orthophotographie	1951-1958	7	***0,15***	0,15
		1958-1980	22	0,17	0,07
		1980-2015	35	*0,04*	0,10
		Moyenne 1951-2015	64	**0,07**	0,05
	Photogrammétrie	**2017-2019**	2	**0,04**	0,03
Telgruc-sur-Mer	Cartes anciennes*	**1785-2011**	226	-	-
	Orthophotographie	1951-1976	25	*0,10*	0,11
		1976-1993	17	*0,07*	0,30
		1993-2012	19	*0,07*	0,21
		2012-2015	3	*0,19*	0,88
		Moyenne 1951-2015	64	**0,09**	**0,05**
	Photogrammétrie	**2017-2019**	2	***0,02***	0,03
Plozévet	Cartes anciennes	**1785-2011**	226	**0,07**	0,03
	Orthophotographie	1977-1993	16	*0,03*	0,20
		1993-2012	19	*0,08*	0,11
		2012-2015	3	*0,14*	1,17
		Moyenne 1977-2015	38	***0,06***	**0,12**
	Photogrammétrie	**2017-2019**	2	***0,02***	0,03

** Données absentes*

7.4- Discussion

Apports et limites de l'approche méthodologique

L'originalité de l'approche présentée dans ce chapitre repose, entre autres, sur la technique de suivi des sites d'expérimentation qui, à l'aide d'un matériel peu encombrant constitué d'un appareil photo et d'un tachéomètre ayant une précision millimétrique, permet de créer des différentiels à haute résolution. Cette résolution est suffisante pour quantifier les volumes d'ablation de falaises meubles à l'échelle saisonnière. De plus, la mise en place d'un tel suivi permet de connaitre finement la répartition spatiale du recul le long de l'abrupt (pied, milieu et haut de falaise) et ainsi d'apporter des éléments de réponse sur les modalités d'évolution des falaises.

Néanmoins, cette méthode de suivi présente quelques limites. Bien que la méthode soit satisfaisante pour décrire le comportement global des falaises meubles et la prédominance des forçages naturels, elle s'avère insuffisante pour identifier les événements météo-marins responsables du déclenchement des mouvements de terrain. Ceci est dû notamment à la fréquence d'acquisition inadéquate. La compréhension des processus météo-marins responsables des évolutions morphologiques observées est effectivement dépendant de la fréquence d'acquisition des levés et de la dynamique érosive des falaises (Letortu, 2013). En pratique, les acquisitions sont assujetties aux périodes de vives-eaux, aux horaires de marée et aux conditions météorologiques. Les contraintes sur les dates et l'intervalle de temps entre deux levés complexifient l'analyse des différentiels. La fréquence des levés dans cette étude (environ tous les 6 mois) ne permet pas de s'assurer qu'une zone de départ qui apparait homogène sur les différentiels soit le résultat d'un départ unique de matériel. Ainsi, il est difficile d'estimer la part respective de l'éboulisation, à l'origine de mouvements particulaires, et des mouvements de masse dans le recul total des falaises meubles.

Pour pallier ce problème, il faudrait augmenter la fréquence des levés afin qu'elle soit davantage adaptée à l'échelle temporelle des processus d'érosion côtière. L'augmentation de la fréquence d'acquisition permettrait d'avoir une meilleure précision sur la date de survenue des mouvements de masse et d'identifier plus aisément les conditions météo-marines responsables. Il serait également intéressant de connaitre les évolutions morphologiques qui suivent la survenue d'événements extrêmes (ex : tempête) mais ces événements sont souvent associés à des conditions météorologiques faisant obstacle à la réalisation des levés (Jaud, 2011).

Une autre raison expliquant la difficulté d'identifier les événements météo-marins responsables vient de l'absence de données locales sur les forçages marins (niveaux d'eau et hauteurs de vague). Les données de houles issues de la base de données HOMERE qui propose des rejeux d'un modèle hydrodynamique simulant la marée et les vagues (Maisondieu et al., 2017), ne sont disponibles que jusqu'à l'année 2016. Seules des données de hauteur d'eau des marégraphes plus ou moins proches des sites d'étude sont disponibles. Le développement de modèles pouvant intégrer la géomorphologie côtière aux niveaux d'eau et aux climats de vagues pourrait venir enrichir l'analyse (Bernatchez et al., 2014). De plus, bien que des stations météorologiques aient été installées sur les sites d'étude, l'implantation de piézomètres (comme celle du site de Locquirec) permettrait d'améliorer la connaissance sur l'influence des forçages continentaux dans le recul des falaises et notamment les variations de nappe phréatique.

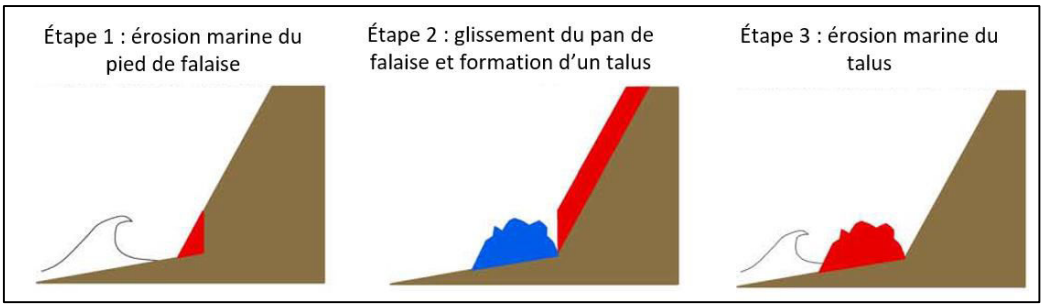
Concernant les profils de plage, une attention doit être portée sur leur caractère non exhaustif en raison du fait que, généralement seuls un ou deux profils transversaux à la plage par site sont réalisés lors de chaque levé. Les profils peuvent donc ne pas être représentatifs des variations morphologiques selon d'autres directions (dissymétrie des transferts sédimentaires, croissants de plage…). De plus, la durée courte du suivi (25 mois) ne permet pas de rendre compte de la tendance générale des profils de plage (érosion/stabilité/engraissement). La poursuite du suivi permettrait de déterminer le profil d'équilibre de

la plage, indépendamment des « climats de houle » (Larson et Kraus, 1995 ; Jaud, 2011). Elle permettrait aussi de déterminer des seuils critiques de niveau de plage dans la déstabilisation des falaises meubles et pourrait alors servir à prévoir de forts reculs et mettre en place des mesures de protection comme le rechargement de plage.

Modalités d'évolution

Le modèle théorique d'évolution des falaises meubles proposé par Brunsden et Lee (2004) et Young et al. (2009) se résume en trois étapes cycliques : (1) un premier stade facultatif d'érosion en pied de la falaise stable, (2) un stade de déclenchement de mouvement de masse, (3) un stade d'érosion des débris accumulés en pied de falaise par l'action marine (Fig. 199). Cette évolution généralisée pour les falaises permet d'établir une base de référence afin d'expliquer les causes de l'évolution, les mécanismes ainsi que les modes de transport. Toutefois, bien que ce modèle théorique d'évolution propose une alternance entre les actions marines et subaériennes, le recul général des falaises est davantage issu de l'interaction de différents processus avec une origine différente (Emery et Kuhn, 1982 ; Lim et al., 2005 ; Young, Guza, et al., 2009). L'analyse de la répartition spatiale de l'érosion sur les sites d'étude montre effectivement que les processus entrant en jeu peuvent être très variables d'un site à l'autre et sont influencés par la géologie et la morphologie du système côtier.

Fig. 199 : Schéma conceptuel du mode d'évolution d'une falaise meuble (modifié de Young et al., 2009). Les couleurs rouges et bleues indiquent respectivement l'érosion et les dépôts.



Ainsi, l'altitude du pied de falaise par rapport au niveau marin et la présence d'un cordon de galets en pied vont conditionner la part des actions marines dans l'érosion (Philpott, 1984 ; Kamphuis, 1987 ; Komar et Shih, 1993). De même, comme observée sur le site de Plozévet, la présence d'une plateforme marine héritée en pied de falaise va diminuer la sensibilité de la falaise à l'érosion marine. Enfin, les forçages anthropiques peuvent venir amplifier les forçages naturels (ex : réflexion de l'énergie des vagues par les ouvrages sur les portions de falaises adjacentes non-protégées).

La très grande variété des morphologies de falaise meuble montre que leur comportement est complexe (Bray et Hooke, 1997). Il dépend de nombreux facteurs et il est en perpétuel évolution. L'étude du recul des falaises meubles doit donc tenir compte de la dynamique spatiale et temporelle spécifique à chaque segment côtier (Lee, 2008 ; Joyal, 2015). L'action très variable des processus intervenant dans l'érosion des falaises explique également que leur taux de recul n'est pas continu (Brunsden et Lee, 2004 ; Lee, 2008).

Conclusion intermédiaire

La méthodologie basée sur la réalisation de levés photogrammétriques sur les sites d'étude, a permis de quantifier les volumes et les taux d'ablation durant deux années de suivi. L'analyse de la répartition spatio-temporelle de l'érosion a également donné la possibilité d'identifier les modalités d'évolution des falaises.

Ainsi, sur les 25 mois de suivi, le taux d'ablation des falaises est compris entre 0,02 et 0,35 m/an sur les sites d'étude. Les falaises de Plougrescant et de la plage Vallées, à Pléneuf-Val-André, sont celles ayant évolué le plus rapidement, ce qui rejoint les observations réalisées sur l'échelle historique récente (chapitre 6). L'analyse de la répartition temporelle de l'érosion met aussi en évidence des changements morphologiques saisonniers des plages qui alternent entre un profil estival et un profil hivernal et qui sont généralement concordants avec les taux d'ablation. Enfin, l'analyse temporelle de l'érosion montre que les falaises de type V1, plus sensibles à l'érosion marine, évoluent principalement durant l'hiver tandis que, pour les falaises de type V2 et RAV, l'érosion est répartie de manière plus homogène au cours de l'année. La typologie adoptée dans le cadre de la thèse (V1, V2 et RAV) permet donc de mettre en évidence l'influence de la lithologie et de la structure des falaises meubles dans leur rythme d'évolution.

En plus de quantifier la vitesse de retrait des falaises meubles sur le court terme, cette étude identifie leurs modalités de recul. Le comportement des falaises et les principaux forçages impliqués diffèrent entre les sites d'étude : tandis que pour les falaises de Nantois, de Plougrescant et le secteur nord du site de Plozévet, ce sont les actions marines qui prédominent, l'évolution des falaises de Telgruc-sur-Mer et du secteur sud de Plozévet est contrôlée davantage par des processus subaériens. Enfin, pour les falaises de la plage des Vallées, de Trédrez-Locquémeau et de Locquirec, le recul se fait sous l'effet conjugué de processus marins et subaériens.

La photogrammétrie permet aussi de constater que certains modes d'évolution sont plus efficaces que d'autres dans l'ablation des falaises meubles. Les falaises où les actions marines prédominent sont celles évoluant le plus rapidement car les houles entretiennent alors les conditions d'instabilité et favorisent le déclenchement de mouvements de masse. De plus, ces modalités de recul semblent être conditionnées par la morphologie du système côtier. L'altitude du pied de falaise par rapport au niveau marin et la présence d'une berme auront une influence sur la fréquence et le degré auxquels la falaise est soumise aux vagues.

L'analyse à haute résolution de l'érosion des falaises meubles sur les sites d'étude complète ainsi la quantification des dynamiques observées sur le moyen terme et l'identification des principaux forçages appréhendée par l'analyse historique régionale. La méthode utilisée, basée sur des levés photogrammétriques, permet un suivi global du front de falaise et peut être réutilisée facilement sur d'autres sites à falaises meubles.

Conclusion de la Deuxième Partie

Cette seconde partie qui avait pour objectif d'évaluer l'aléa « recul des falaises meubles » en quantifiant la répartition spatio-temporelle de l'érosion et en identifiant les facteurs responsables, a permis de souligner que :

- Sur l'échelle séculaire (1900-2018) et régionale, les **côtes nord et ouest de la Bretagne sont les plus impactées** et l'érosion se fait majoritairement entre les **mois de janvier et mars**. La **conjonction des facteurs marins et subaériens détermine la majorité des phénomènes d'érosion** de falaises meubles observés : au moins 68 % des aléas correspondent à la conjonction d'une période pluvieuse, d'une marée de vives-eaux et/ou d'une tempête. Les **précipitations occupent également une part importante** dans le recul des falaises meubles (elles conditionnent, à elles seules, 24 % des aléas d'érosion de falaises meubles recensés depuis la seconde moitié du 20^{e} siècle).

- Sur les soixante dernières années et sur les sites d'étude, le **taux de recul moyen des falaises** est compris entre **0,07 et 0,41 m/an**. Durant cette période, les phases d'accélération du recul des falaises sont liées à des années successives riches en forts coefficients de marée, tempêtes et/ou précipitations. Les **aménagements** mis en place sur le littoral jouent également un **rôle dans l'accélération du recul** en renforçant l'action érosive des forçages naturels.

- À l'échelle saisonnière et à nouveau sur les sites d'étude, le **taux d'ablation des falaises est compris entre 0,02 et 0,35 m/an** (période 2017-2019). Les vitesses de recul les plus fortes sont mesurées pour les falaises de Pors-Hir à Plougrescant et les falaises de la plage des Vallées à Pléneuf-Val-André. Les **modalités de recul des falaises meubles**, entre les sites d'étude, diffèrent et sont **conditionnées par les forçages marins et subaériens** mais aussi par la **lithologie et la morphologie** du système côtier. Les falaises où les **actions marines prédominent sont celles évoluant le plus rapidement** car les houles entretiennent alors les conditions d'instabilité et favorisent le déclenchement de mouvements de masse. De plus, les **falaises de type V1 apparaissent plus sensibles à l'érosion marine** car les sédiments fins dont elles sont composées sont rapidement évacués par la mer. Enfin, l'**altitude du pied de falaise** par rapport au niveau marin et la **présence d'une berme** conditionnent la fréquence et la force auxquelles la falaise est soumise aux vagues.

Les différences en termes de modalités de recul, sur les sites d'étude, montrent la nécessité d'analyser les dynamiques de retrait des falaises meubles à l'échelle locale. Par ailleurs, les différentes méthodes utilisées dans cette partie pour évaluer le recul des falaises meubles sont complémentaires et permettent d'améliorer la compréhension des processus intervenant dans leur évolution. Tandis que les échelles à moyen et long termes donnent la possibilité d'évaluer les tendances générales d'évolution, l'analyse du recul à court terme permet de mieux cerner l'impact morphogène d'événements ponctuels, parfois exceptionnels (ex : marées de tempête, précipitations intenses).

Ainsi, bien que les falaises meubles en Bretagne présentent des taux de recul souvent inférieurs à 0,40 m/an, elles peuvent être affectées par des reculs plurimétriques se produisant lors d'un seul événement. Ces évolutions ont une implication pour les enjeux situés en sommet de falaises. Il est par conséquent nécessaire d'identifier les niveaux de risque et les principaux enjeux menacés par l'érosion des falaises meubles en Bretagne. La cartographie géographique et géomorphologique peut permettre d'apporter des réponses dans l'évaluation du risque d'érosion.

PARTIE 3 – ANALYSE DES ENJEUX MENACÉS : VERS LA CARTOGRAPHIE DU RISQUE

Depuis un peu plus d'un siècle, le littoral est devenu un lieu privilégié de villégiature, notamment, en lien avec l'essor touristique et industriel, le développement économique et la modernisation des transports (Meur-Ferec, 2006). Le littoral breton est aujourd'hui caractérisé par une très forte attractivité qui conduit à une concentration importante des populations et des activités sur toute la bande côtière (Conseil Régional de Bretagne, 2014). Les enjeux sont donc conséquents sur ce littoral.

Il est désormais admis que le risque nait de la conjonction d'un aléa avec des enjeux (Leone, 2007). La densification de l'occupation du littoral combinée à l'aléa d'érosion des falaises meubles, fait du littoral breton un territoire à risque. Ainsi, l'objectif de cette troisième partie est de déterminer les principaux enjeux menacés par le recul des falaises meubles en Bretagne et les niveaux de risque.

Dans cette thèse, les enjeux sont analysés à l'échelle locale des sites d'étude, par l'intermédiaire de deux méthodologies. La première méthodologie repose sur une cartographie géomorphologique et géographique permettant de définir l'étendue des zones à risque (chapitre 8). L'approche de l'aléa consiste en l'identification et la localisation, sur les sites, des formations meubles, dépôts du versant littoral qui seront amenés à plus ou moins longue échéance à être érodés. Les enjeux sont identifiés par la cartographie de l'occupation et de l'usage du sol. Le croisement de la localisation des formations meubles avec les enjeux recensés permet d'identifier les zones à risque.

La seconde méthode est basée sur l'utilisation d'indices mettant en évidence la variabilité spatiale des niveaux de risque sur ces sites (chapitre 9). L'indice d'Aléa est déterminé en utilisant les taux de recul pluri-décennaux obtenus dans le chapitre 6 tandis que, l'indice d'Enjeux est basé sur des indicateurs représentant les enjeux d'ordre humain, économique et structurel. Le croisement de ces deux indices permet d'aboutir à un indice synthétique de Risque qui est essentiel afin de connaitre la variabilité spatiale des niveaux de risque et de définir finement les zones d'action prioritaires en termes de mesures de protection et de prévention.

CHAPITRE 8 : Apport de la cartographie géomorphologique dans l'identification des zones à risque et des enjeux menacés par l'érosion des falaises meubles

Dans les territoires littoraux confrontés aux problèmes d'évolution du trait de côte, la cartographie du risque d'érosion est primordiale pour l'identification des enjeux menacés et la mise en place d'une gestion durable des zones côtières. Elle représente également un outil essentiel pour définir les stratégies de prévention (Leone et Vinet, 2006). En France, la cartographie réglementaire des risques littoraux d'érosion s'appuie sur la connaissance du taux de recul moyen du trait de côte et de l'événement maximal de recul. Néanmoins, comme nous l'avons vu dans le chapitre 6, les taux de recul historiques sont souvent associés à une marge d'erreur importante. De plus, les taux de recul des falaises meubles sont contrôlés par le processus de dénudation de la couverture meuble, ce qui peut avoir une influence sur l'évolution de la vitesse de recul dans le temps et dans l'espace.

Pour remédier à ce problème méthodologique, la cartographie géomorphologique est proposée dans ce chapitre. Elle se base sur l'étendue des formations meubles qui définissent les « zones à risque ». Cette méthodologie est testée sur les six sites d'étude et permet d'identifier les enjeux menacés et de délimiter l'ensemble des zones qui sont assujetties aux risques d'érosion de falaises meubles et où il semblerait prudent d'interdire toute nouvelle construction. Ceci s'inscrit donc dans une approche de gestion intégrée des zones côtières sur le long terme. Ainsi, ce chapitre a pour objectif de répondre à trois principales questions :

1) Comment identifier les enjeux menacés par l'aléa érosion des falaises meubles ?
2) Quels sont les principaux enjeux sur les sites d'étude ?
3) Comment la cartographie géomorphologique peut représenter un outil d'aide à la décision pour les stratégies de gestion ?

Après avoir rappelé les méthodes existantes de caractérisation du risque d'érosion côtière, la méthode permettant d'identifier les zones à risque sera présentée. La répartition des enjeux menacés sur les sites d'étude sera ensuite étudiée. Le risque d'érosion présent sur les sites sera également analysé au regard des stratégies de gestion actuellement mises en place. Pour terminer, la nouvelle approche proposée pour évaluer les risques d'érosion des falaises meubles est discutée et comparée à la méthode classique de cartographie des risques littoraux d'érosion.

8.1- Les méthodes existantes pour la caractérisation du risque d'érosion

En France, la cartographie réglementaire des risques littoraux s'appuie sur les préconisations du guide méthodologique (MEDDE, 2014) pour l'élaboration des Plans de Prévention des Risques Littoraux (PPRL). Ces plans de prévention sont des documents réglementaires de planification, créés en France par la loi du 2 février 1995, dont l'objectif est d'adapter l'aménagement du territoire aux risques littoraux d'érosion et de submersion marine (Perherin et Roche, 2010). Cette approche, propre au gestionnaire des territoires à risques, aboutit à la production de cartes d'aléas qui sont basées - pour l'aléa érosion - sur la connaissance du taux de recul moyen du trait de côte et de l'événement maximal de recul sur une période donnée.

8.1.1- Cartographie de l'aléa érosion selon la méthode classique

L'aléa recul du trait de côte est la conséquence d'un départ de sédiments provoqué par des processus d'origine marine, subaérienne et/ou anthropique. Le trait de côte est situé à l'interface terre/mer et est

défini, selon le SHOM, comme la laisse des plus hautes mers lors d'une marée astronomique de coefficient 120. Cet aléa concerne le recul des côtes basses meubles et des falaises (Perherin et Roche, 2010). La méthode fréquemment utilisée pour délimiter les zones soumises à l'aléa érosion s'effectue par l'extrapolation de la position future du trait de côte à partir du taux de recul moyen annuel sur une échéance donnée auquel est additionné le recul correspondant à un événement maximal d'érosion observé lors d'un phénomène météo-marin extrême. La zone potentiellement soumise à l'aléa d'érosion est définie le plus souvent à échéance de 20, 50 ou 100 ans (Morton et al., 1993 ; Crowell et al., 1999). Dans le guide méthodologique (MEDDE, 2014), c'est une échéance de 100 ans qui est proposée et le recul du trait de côte est qualifié d'« aléa fort ». Pour évaluer le taux de recul moyen d'une portion de côte, une variété de techniques est utilisée (Sunamura, 1992). De l'échelle pluri-décennale à séculaire, les taux de recul sont connus en cartographiant la ligne de rivage à partir de supports iconographiques (cartes anciennes, plans cadastraux) et de photographies aériennes et sont donc associés à une incertitude dépendante de l'échelle et/ou de la résolution spatiales de ces supports (cf. chapitre 6). À l'échelle inter à pluri-annuelle, des campagnes de suivi sur le terrain à l'aide d'outils topographiques (tachéomètre, GPS différentiel, LIDAR terrestre…) permettent d'obtenir des distances de recul, voire des volumes érodés (Adams et Chandler, 2002 ; Levoy et Monfort, 2009 ; Young et al., 2010) (cf. chapitre 7). La technique la plus utilisée et préconisée dans le guide méthodologique est l'analyse des traits de côte historiques à partir de photographies aériennes verticales (Le Cornec et al., 2008 ; Bossis, 2016 ; DHI, 2016 ; Landreau, 2018). Pour les secteurs non couverts par les photographies aériennes ou sur des secteurs où le trait de côte est difficilement identifiable, l'information peut être obtenue par la confrontation de travaux issus de la littérature (DHI, 2016). L'extrapolation s'effectue aussi parfois à partir de l'Indicateur National de l'Érosion côtière (INE) qui présente l'évolution pluri-décennale du trait de côte sur le littoral français (Hédou et al., 2015 ; Landreau, 2018). Certains auteurs préconisent de prendre en compte, à la fois, les vitesses historiques et récentes dans la caractérisation de l'aléa afin de distinguer ce qui relève d'évolutions durables, d'une part, de ce qui, d'autre part, correspond à des événements ponctuels et parfois exceptionnels d'origine naturelle ou anthropique (Hénaff et al., 2013). Toutefois, Levoy et Monfort (2009) ont montré que ces deux types de vitesse de recul obtenus sur des périodes différentes, ne sont pas toujours compatibles. Les vitesses historiques et récentes sont effectivement parfois très différentes en raison d'imprécisions inhérentes à l'exploitation des photographies aériennes (échelles spatiales et résolution des documents) ou de la précision des outils utilisés lors des levés.

8.1.2- L'identification des enjeux

La notion d'enjeux recouvre l'ensemble des personnes, des biens et des activités susceptibles d'être affectés par un aléa (MEEM, 2016). L'identification et la caractérisation des enjeux soumis à l'aléa d'érosion sont une étape indispensable dans l'élaboration des cartes des risques littoraux. Il s'agit d'identifier le fonctionnement du territoire, les types d'occupation du sol et les différentes problématiques à prendre en compte. L'analyse des enjeux est réalisée indépendamment de l'aléa et s'effectue donc sur un périmètre plus grand que celui exposé à l'aléa (MEDDE, 2014). Elle consiste à dénombrer et à spécifier la nature des enjeux. Les cartes d'enjeux produites à l'échelle du 1/10 000, voire du 1/5 000 pour les zones denses nécessitant une analyse plus précise telles que les centres-villes ou les fronts de mer, ont ainsi pour objectif de distinguer les zones urbanisées des espaces naturels et agricoles, par exemple. Dans le guide méthodologique, les enjeux sont regroupés en trois catégories distinctes : les enjeux incontournables (espaces urbanisés, centres touristiques, élevages agricoles…), les enjeux complémentaires (infrastructures de transport, enjeux patrimoniaux, culturels…) et d'autres éléments qui incluent l'évolution démographique et le contexte socio-économique. L'analyse et la cartographie des enjeux s'appuient sur l'utilisation de systèmes d'informations géographiques (SIG) et des données issues de plans cadastraux, d'orthophotographies ou de SCAN25® de l'IGN. Des visites de terrain et des

rencontres avec les élus peuvent venir compléter l'analyse et améliorer la caractérisation des enjeux (Hénaff et Philippe, 2014).

8.1.3- Zonage et évaluation du risque

Le zonage est une approche planifiée préventive (Klein et al., 1999) dont l'objectif est de limiter les risques côtiers (Paskoff, 2001). Le principe du zonage est d'éviter que les zones d'aléas soient aménagées et anthropisées. Les zones à risque sont généralement définies par le croisement de l'aléa avec les enjeux (MEDDE, 2014). La superposition des cartes d'aléa avec la cartographie des enjeux permet ainsi d'établir la carte de zonage réglementaire. Le guide méthodologique préconise une échelle de restitution au 1/10 000. Le zonage et l'identification des enjeux menacés permettent ainsi de prescrire des mesures de prévention, de protection et de sauvegarde. Le plan de zonage établi présente différentes dispositions réglementaires selon le niveau de risque identifié sur un secteur. Des zones d'interdiction ou d'autorisation de construction sous conditions (ex : installation d'équipements légers) peuvent ainsi apparaitre sur le document. Les enjeux menacés identifiés par le zonage peuvent également faire l'objet d'une évaluation économique qui s'appuie sur des hypothèses de valeurs monétaires (ex : évolution du prix du foncier, coût de reconstruction d'une route…) (Hénaff et Philippe, 2014 ; Le Berre et al., 2014). Cette évaluation est notamment utilisée dans les Analyses Coûts-Bénéfices (ACB). Elle permet d'apprécier la pertinence des projets d'aménagement et des moyens de gestion au regard de la valeur des enjeux menacés (CEPRI, 2011 ; André, 2013 ; Le Berre et al., 2014 ; Créach, 2015). Elle représente donc un précieux outil d'aide à la décision (Perherin et al., 2015).

Dans le cadre de cette thèse, les observations réalisées sur la cinématique et les modalités de recul des falaises meubles (chapitres 6 et 7), nous ont conduit à proposer une nouvelle méthode de cartographie du risque, différente de celle communément employée aujourd'hui, mieux adaptée à la cinématique des falaises meubles pour évaluer l'aléa et le risque d'érosion.

8.2- Une nouvelle caractérisation adaptée aux littoraux à falaises meubles

Les falaises meubles reculent plus rapidement en comparaison des autres falaises (Woodroffe, 2002 ; Prémaillon et al., 2017). Leurs taux de recul sont généralement compris entre 10 cm et 1 m/an (Masselink et al., 2014 ; Sunamura, 2015) mais ils peuvent également être plus élevés comme sur la côte est du Royaume-Uni avec des reculs pouvant atteindre 4,7 m/an (Woodroffe, 2002 ; Quinn et al., 2009 ; Brooks et al., 2012). Pour autant, les enjeux au sommet et en arrière des falaises se sont multipliés durant le vingtième siècle (Meur-Ferec, 2006) et sont toujours en augmentation. En Bretagne, les enjeux humains et bâtis exposés au recul des falaises meubles posent désormais de nombreux problèmes de gestion du risque d'érosion qui n'ont pas, jusqu'à présent, focalisé une attention équivalente à celle portée à la gestion des risques sur les côtes basses d'accumulation.

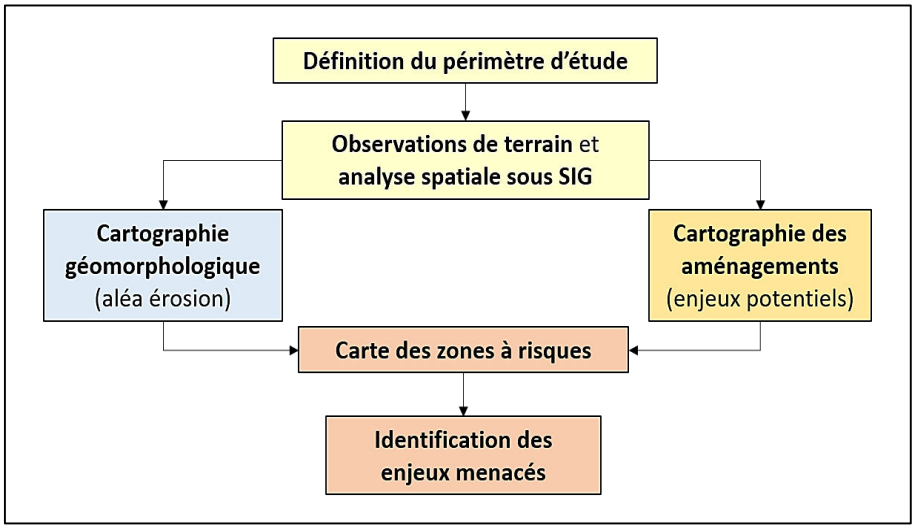
L'approche développée dans ce chapitre pour caractériser l'aléa d'érosion consiste à identifier et à localiser, sur les versants côtiers, les formations meubles qui fossilisent la falaise morte rocheuse, pour laquelle le recul progressif du rivage aboutira, si le processus est achevé au cours de la transgression actuelle, à son ravivement. Cette approche est donc applicable sur les littoraux à falaises meubles du fait de leur extension limitée par la falaise morte en arrière du littoral. Les enjeux sont analysés quant à eux par l'approche classique définie dans le guide méthodologique des PPRL. La délimitation des formations meubles et l'identification des enjeux nécessitent à la fois des mesures sur les cartes topographiques (IGN 1/25 000), de la photo-interprétation des photographies aériennes et des observations sur le terrain à l'échelle locale. La méthodologie a ainsi été appliquée sur les six sites d'étude.

Cette analyse ne remet pas en question la méthodologie mise en œuvre dans l'élaboration des PPR littoraux. S'appuyant sur l'analyse géomorphologique, elle propose des recommandations afin d'améliorer le zonage du risque d'érosion sur les côtes à falaises meubles.

8.2.1- Les grandes étapes de la cartographie du risque

L'approche géomorphologique proposée pour la cartographie du risque d'érosion des falaises meubles peut être décomposée en plusieurs grandes étapes (Fig. 200) qui seront détaillées ci-après. Cette méthodologie s'appuie tout d'abord sur des observations de terrain sur les périmètres d'étude de chaque site, qui sont complétées par une analyse spatiale sous SIG des cartes IGN à grande échelle et des photographies aériennes. À partir des observations de terrain et des informations recensées, une cartographie géomorphologique décrivant les caractéristiques de la côte et de l'estran (topographie, lithologie, formes d'érosion…) ainsi que l'extension des formations meubles en arrière des côtes est réalisée. Une cartographie des enjeux recensant l'ensemble des aménagements, dont les ouvrages de protection, est ensuite effectuée. La dernière étape repose sur le croisement de la localisation des formations meubles avec les enjeux recensés, puis l'identification de l'ensemble des enjeux susceptibles d'être menacés par l'érosion côtière dans la zone d'étude.

Fig. 200 : Déroulement du travail de cartographie de l'aléa et d'identification des enjeux.



8.2.2- Définition du périmètre d'étude et observations de terrain

Avant toute cartographie et analyse de terrain, il est essentiel de bien définir le périmètre d'étude sur chaque site où les observations géographiques seront réalisées en détail (Tab. 24). La longueur de chaque site d'étude a été choisie de façon à étudier un linéaire de falaises meubles se trouvant dans une même cellule hydro-sédimentaire, délimitée à ses extrémités par une avancée rocheuse ou des ouvrages côtiers. Le linéaire doit être suffisamment étendu pour avoir une représentativité des modalités de recul du secteur. Cependant sa longueur doit également être limitée afin de garantir la faisabilité d'un suivi géomorphologique s'appuyant sur la mesure périodique de la topographie des falaises (soit, de l'ordre de quelques centaines de mètres) et, conjointement, l'observation régulière de paramètres environnementaux. La largeur de chaque site d'étude, dans la direction perpendiculaire au trait de côte, a été limitée à l'étendue maximale des formations meubles en arrière des falaises. Sur les six sites d'étude, la largeur ne dépasse pas les 220 mètres et la longueur de côte est généralement comprise entre 400 et 700 mètres. Pour l'un des sites d'étude situé sur la commune de Pléneuf-Val-André, la longueur du linéaire

est deux fois plus grande que celle des autres sites en raison de l'analyse conjointe de deux secteurs à falaises meubles (plage des Vallées et grève de Nantois), juxtaposés et séparés par une pointe rocheuse.

Tab. 24 : Caractéristiques physiques et géographiques des sites d'étude.

Départ-tement	Commune	Site d'étude	Hauteur de falaise (m)	Longueur du linéaire étudié (m)	Périmètre d'étude (m)	Aire d'étude (m^2)
22	Pléneuf-Val-André	Les Vallées-Nantois	4 à 29	1 250	1 250 x 220	275 000
	Plougrescant	Pors-Hir	3 à 4	400	400 x 250	100 000
	Trédrez-Locquémeau	Notigou	14 à 17	600	600 x 180	108 000
29	Locquirec	Le Moulin de la Rive	7 à 14	700	700 x 300	210 000
	Telgruc-sur-Mer	L'anse du Caon	5 à 18	500	500 x 220	110 000
	Plozévet	Poulbréhen	4 à 6	480	480 x140	67 200

Lorsque les périmètres d'étude ont bien été définis, de nouvelles observations de terrain sont menées sur chaque site. Ces observations portent sur les différentes caractéristiques physiques du milieu telles que la morphologie de la falaise et de la plage, les ouvrages de protection ou les formes d'érosion en présence.

8.2.3- Cartographie géomorphologique

À partir du logiciel libre QGIS™, une cartographie à très haute résolution, au 1/150, a ensuite été réalisée en utilisant l'orthophotographie aérienne de l'IGN de 2015 comme fond de référence, pour un rendu cartographique au 1/4 000. Sur ces cartes, les formes d'érosion observées sur le terrain ont été recensées et les formations meubles ainsi que les caractéristiques morphologiques de la côte et de l'estran ont été cartographiées L'ensemble des éléments décrits sur ces cartes a été regroupé en sept rubriques (Annexe 12) : la topographie, l'hydrographie, le type de côte, la lithologie des falaises, la granulométrie de l'estran, les formes d'érosion et les paramètres morpho-dynamiques. Chacune des rubriques comprend des descripteurs qui sont renseignés dans le SIG sous forme d'entités et de données attributaires (Annexe 13).

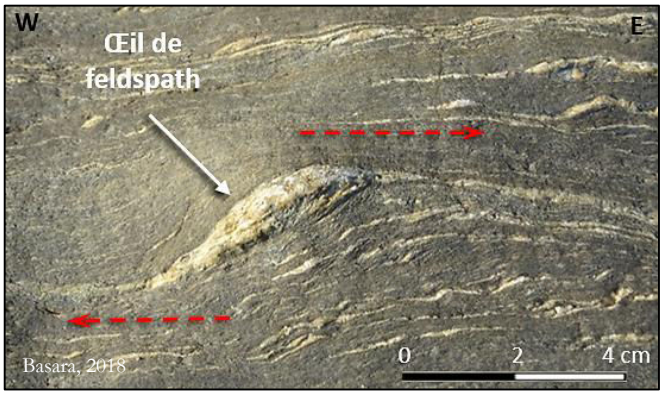
La **topographie** de chaque site est représentée au moyen de courbes de niveau, d'isobathes et de cotes d'altitude. Les courbes de niveau ont été tracées à partir du MNT issu de la base de données topographique (BD Topo) de l'IGN et les isobathes ont été tracées au moyen des fonds de carte des SCAN25® de l'IGN. Les ruptures de pente observées sur le terrain sont représentées sous forme de figurés et permettent de différencier les formes concaves et convexes du versant en s'inspirant des préconisations de la cartographie géomorphologique (Joly, 1962 ; Guérémy et Marre, 1996 ; Joly, 1997 ; Marre, 2007).

Pour l'**hydrographie**, les étangs permanents et les cours d'eau ont été tracés. Ils sont issus de la BD Topo de l'IGN et ils ont été vérifiés au moyen de photographies aériennes.

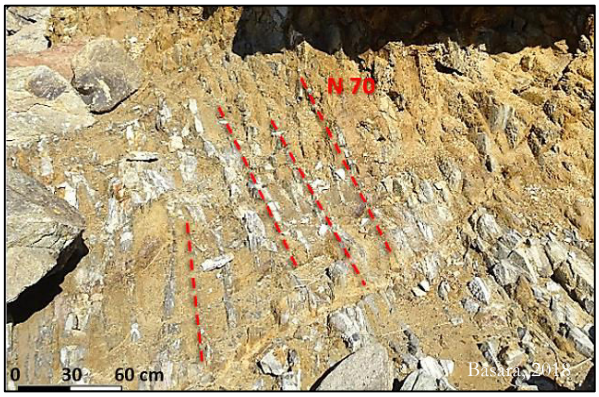
Trois types de côte, présents en Bretagne, ont été différenciés : les côtes d'érosion comprenant les falaises rocheuses et les falaises meubles, les côtes d'accumulation regroupant les dunes et les cordons de galets et les plates-formes d'érosion regroupant les tors et les platiers. Lorsque plusieurs de ces faciès sont présents sur un site, ils sont représentés selon leur position sur l'estran et le long du trait de côte.

La **lithologie des falaises meubles et des falaises rocheuses** a été identifiée à partir des cartes géologiques du BRGM au 1/50 000 et des observations de terrain permettant d'affiner la cartographie à l'échelle du 1/500 (Fig. 201). La direction et le pendage des structures tectoniques observées (failles et fractures) ont été précisés.

Fig. 201 : Observations géologiques réalisées sur les sites d'étude.



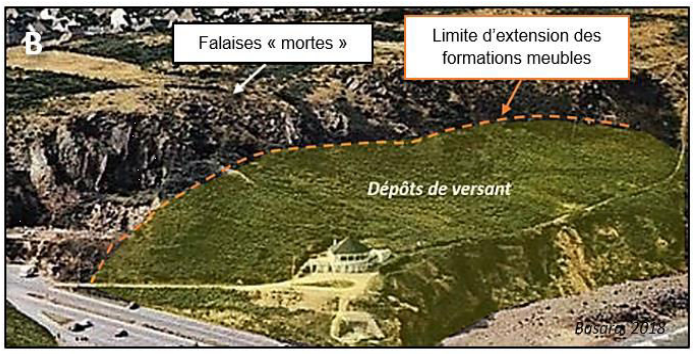
Ombre de pression visible dans les amphibolites formant le platier à Plozévet et indiquant le passage d'une zone de cisaillement dextre.



Série volcano-sédimentaire orientée Est-Ouest en pied de falaise à Notigou (Trédrez-Locquémeau).

L'**extension maximale des dépôts quaternaires** a été déterminée à partir de l'observation, sur le terrain, d'affleurements du socle (Fig. 202A) ou de la présence de falaises mortes (Fig. 202B). Pour ce travail, les cartes topographiques et les données LIDAR issues de la BD Litto3D® de l'IGN et du SHOM ont aussi été utilisées car la limite entre les dépôts quaternaires et la falaise morte est souvent marquée par une élévation rapide de la topographie. Enfin, les photographies anciennes donnent également la possibilité d'observer des affleurements avant qu'ils ne soient masqués par l'urbanisation (Fig. 202B).

Fig. 202 : Identification de l'étendue des formations meubles sur les sites d'étude.



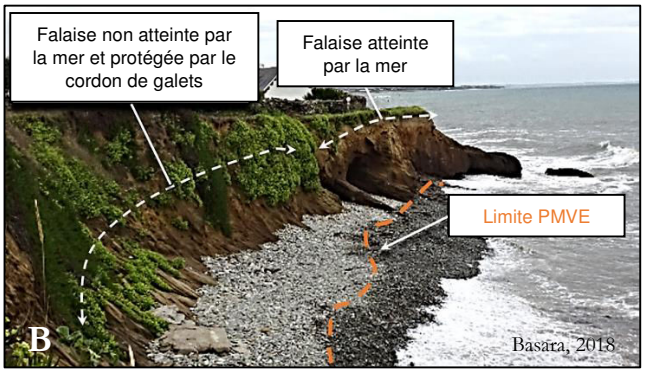
A : À partir de l'observation d'affleurement de socle sur le terrain (sud des falaises de Plougrescant, vue orientée vers le sud-ouest) ; **B** : À partir de l'observation de falaises mortes visibles sur une photographie aérienne prise dans les années 1960 (Pléneuf-Val-André, vue orientée vers le sud-ouest).

La **granulométrie de l'estran** a été représentée en sept classes granulométriques allant des sables vaseux aux blocs décamétriques, selon la classification de C.K. Wentworth (1922). Ces différentes classes se distinguent sur les cartes par la taille des points. La caractérisation est réalisée par des observations de terrain et par les données issues des cartes des formations superficielles des fonds marins accessibles sur la base de données Sextant de l'IFREMER (https://sextant.ifremer.fr).

Concernant les **paramètres morphodynamiques**, l'orientation préférentielle des houles a été déterminée à partir de la base de données HOMERE (caractéristiques hydrodynamiques des sites présentées au chapitre 4). La dérive littorale et l'écoulement des eaux continentales ont été déterminés à partir d'observations de terrain relevant notamment les changements topographiques le long de la plage et du versant (Fig. 203A et Fig. 204). Ainsi, le long d'un linéaire de plage continu, les secteurs en déficit sédimentaire représentent la zone amont de la dérive littorale et les secteurs d'accumulation, la zone aval (Fig. 203A). Le niveau de pleine mer de vive-eau (PMVE) obtenu à partir d'observations lors de grandes marées a aussi été tracé pour chaque site (Fig. 203B).

Fig. 203 : Identification des caractéristiques des processus physiques d'origine marine.

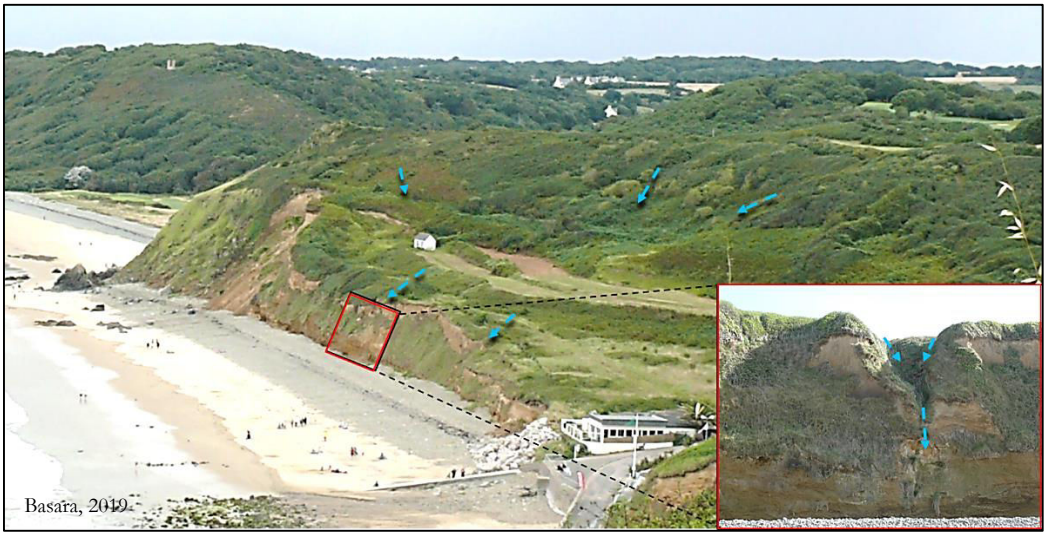
Déficit sédimentaire au sud de la cale indiquant la zone amont de la dérive littorale à Pors-Hir (Plougrescant).



Limite des pleines mers de vives-eaux identifiée lors de grandes marées (12/08/2018) à Plozévet.

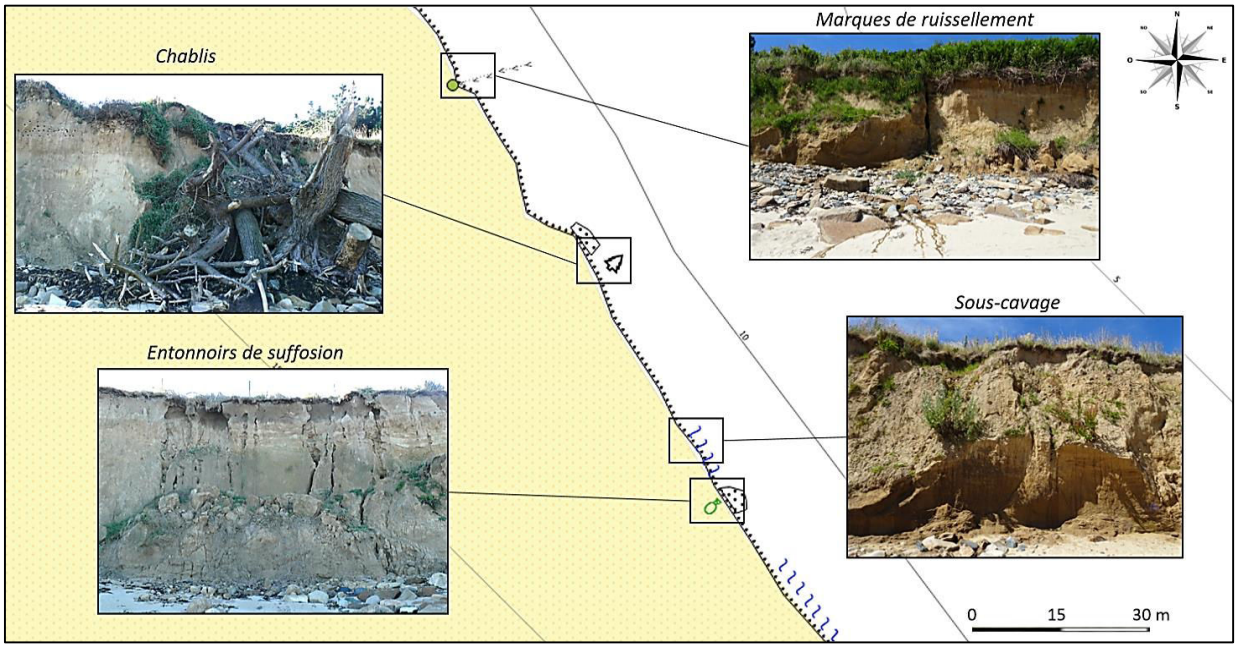
L'écoulement des eaux continentales s'effectue le long des dépressions topographiques et des fonds de vallée et leur direction est connue par le tracé des talwegs sur les cartes topographiques. Les formes d'érosion telles que les ravins ou les zones de résurgence ont également permis de retrouver la direction principale des écoulements (Fig. 204).

Fig. 204 : Écoulements préférentiels des eaux continentales à la plage des Vallées (Pléneuf-Val-André) et ravin formé par les zones de convergence des eaux de ruissellement identifiés sur le terrain et sur une image drone.



Enfin, les **formes d'érosion** observées sur le terrain ont été distinguées selon leur origine marine (ex : sous-cavage, grotte) ou continentale (ex : trou de suffosion, éboulis) (Fig. 205).

Fig. 205 : Extrait de la cartographie des formes d'érosion visibles sur la paroi des falaises à Plougrescant.



8.2.4- Cartographie des enjeux

L'évaluation des risques côtiers et leurs représentations cartographiques sont encore trop souvent réduites à la simple prise en compte de l'aléa et négligent l'autre composante fondamentale du risque que sont les enjeux présents sur le territoire (Veyret et Reghezza, 2005 ; Renard et Soto, 2015). Ces cartes d'aléas - parfois abusivement dénommées cartes de risque - et utilisées notamment dans les PPRL en France, permettent de réglementer l'occupation du territoire mais ne donnent pas la possibilité de visualiser les différents éléments exposés au risque et les pertes potentielles en termes de proportion ou de coût (Leone, 2007). Or, les cartes d'enjeux sont essentielles afin d'anticiper et de prioriser les décisions à prendre en matière de réduction des risques et de mise en place d'actions de sensibilisation et de concertation.

La cartographie détaillée des enjeux qui a été réalisée à l'échelle du 1/650 sur les six sites d'étude a utilisé l'orthophotographie aérienne de l'IGN de 2015 comme fond de référence. Une analyse sous SIG des limites des parcelles cadastrales issues de la base de données BD Parcellaire de l'IGN et les observations de terrain ont permis d'identifier tous les enjeux matériels présents sur les secteurs étudiés. Les inventaires des Zones naturelles d'intérêt écologique, faunistique et floristique (ZNIEFF) provenant de la plateforme *data.gouv.fr* ont permis de connaitre les enjeux environnementaux. Sur cette cartographie de l'occupation et de l'usage du sol, dix catégories d'éléments exposés ont été créées afin de différencier les enjeux d'ordre humain, économique, stratégique et environnemental (Annexe 13).

Des caractéristiques propres aux aménagements et apparaissant essentielles pour l'évaluation du degré de sensibilité au risque ont été précisées. Ainsi, la distinction des routes communales et départementales a été réalisée car leur fréquentation ainsi que leur coût de remise en état et de construction peuvent différer remarquablement (McLaughlin et al., 2002 ; Del Río et Gracia, 2009 ; Kienberger et al., 2009). Selon son classement, une route peut donc représenter un enjeu plus ou moins fort. De plus, ce classement détermine le gestionnaire responsable de son entretien et donc les moyens financiers permettant d'assurer sa gestion.

Pour les bâtiments, trois classes ont été distinguées : les bâtiments résidentiels comprenant toutes les résidences principales et secondaires ; les bâtiments de service comprenant le bâti à vocation de loisirs ou de services publics ; les bâtiments de stockage qui sont utilisés pour entreposer du matériel et qui ne sont

pas des lieux d'habitation (ex : hangar, abri de jardin…). Ces classes déterminent également le niveau de sensibilité des bâtiments au risque. Ainsi des bâtiments résidentiels et de service situés en zone à risque auront un degré de sensibilité plus fort car ils impliquent directement la vie humaine.

8.2.5- Identification des zones à risque et des enjeux menacés

Les zones à risque pour l'aléa d'érosion côtière ont été définies comme le croisement de la localisation et de l'extension des formations meubles avec les éléments exposés. L'identification des enjeux menacés par l'érosion des falaises meubles, à l'échelle locale, repose donc sur le croisement de la cartographie géomorphologique avec la cartographie des enjeux (Fig. 200). Le rendu cartographique des cartes est au 1/4 000.

Dans cette étude, il a été choisi de ne pas caractériser les enjeux menacés par leur valeur marchande ; l'évaluation économique des enjeux, qui n'est pas sans poser de problèmes, étant considérée hors du périmètre de cette étude. Il est en effet difficile d'avoir accès aux données sur les valeurs des biens immobiliers et de monétariser des enjeux qui n'ont pas de traduction monétaire directe comme les bénéfices résultant des services écosystémiques ou la présence d'un patrimoine culturel (Le Berre et al., 2014). La difficulté de l'évaluation économique peut porter également sur la présence de dommages indirects comme la perte d'exploitation d'une entreprise maraichère suite à la destruction d'une partie de ses terres agricoles (Bremond, 2011). Ainsi, dans cette étude, les enjeux présents dans les zones à risque ont été quantifiés par leur superficie au moyen d'un outil de mesure de surface sur le logiciel de SIG. Ces surfaces ont ensuite été rapportées à l'aire du secteur d'étude afin de connaitre leurs proportions relatives sur chacun des sites et de pouvoir les comparer d'un site à l'autre. Enfin, les stratégies de gestion actuellement mises en place sur chaque site ont été analysées au regard des enjeux menacés.

8.3- Résultats

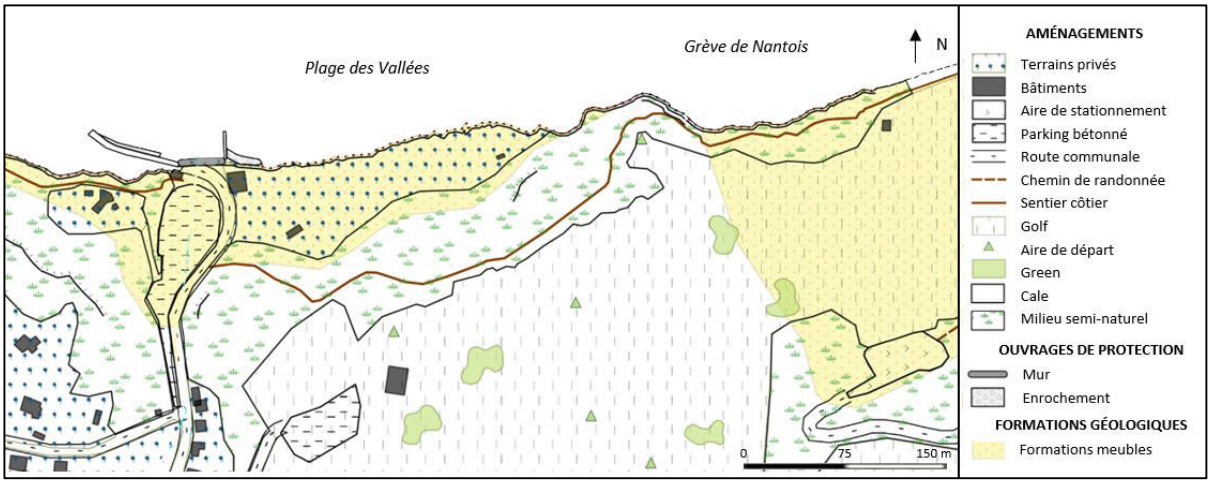
8.3.1- Identification des enjeux menacés sur les sites d'étude

L'emprise spatiale des enjeux menacés correspond à la superficie de la zone exposée au risque d'érosion des falaises meubles, c'est-à-dire à l'étendue des formations meubles. Elle est comprise entre 19 114 et 64 502 m^2 pour les six sites d'étude.

8.3.1.1- Le site des Vallées-Nantois à Pléneuf-Val-André

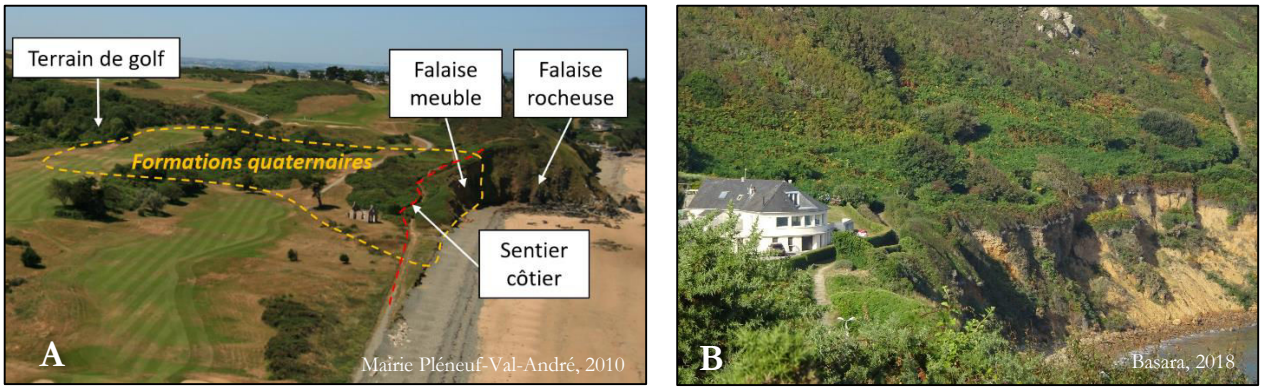
D'après la carte des zones à risque (Fig. 206), l'érosion des falaises meubles de la grève de Nantois, située dans la partie Est du site, pourrait menacer environ 185 m du sentier côtier (GR34).

Fig. 206 : Zones à risque d'érosion de falaises meubles sur la plage des Vallées-Nantois (Pléneuf-Val-André).



La cartographie montre également qu'un peu plus de 20 000 m² du golf seraient menacés par l'érosion des falaises meubles (Fig. 207A). Du côté de la plage des Vallées, l'érosion des falaises meubles pourrait affecter 16 400 m² de terrains résidentiels ainsi que le parking et les cales permettant l'accès à la plage. À l'ouest du parking, une maison située à 14 m du bord de falaise et le sentier côtier longeant ce sommet sur 260 m seraient menacés (Fig. 207B).

Fig. 207 : Enjeux menacés par l'érosion des formations meubles à Pléneuf-Val-André.



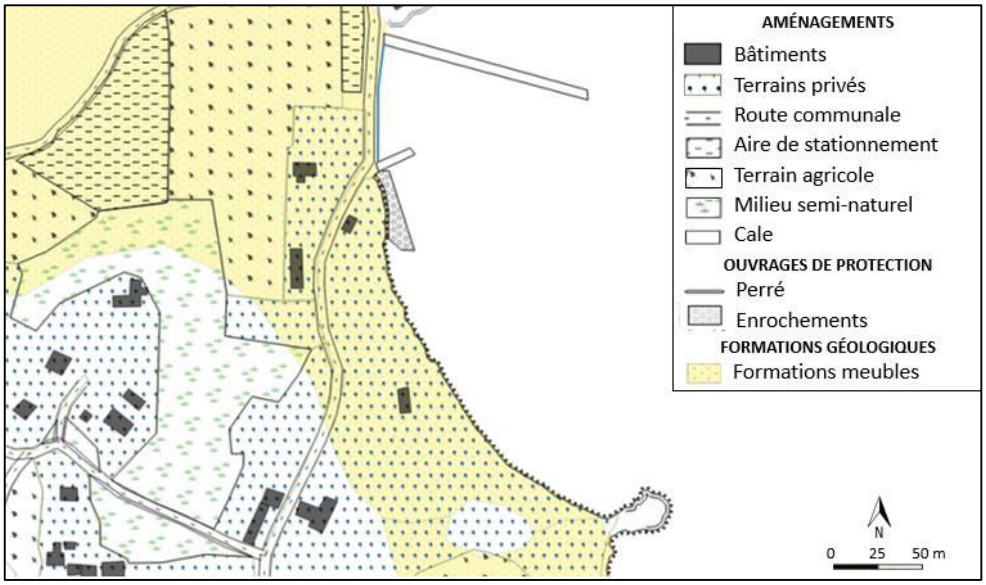
A : terrain de golf et sentier côtier (grève de Nantois) ; **B** : sentier et résidence en bordure de falaise (plage des Vallées).

Sur le plan écologique, les falaises des Vallées-Nantois correspondent à une Zone naturelle d'intérêt écologique, faunistique et floristique (ZNIEFF). L'érosion des falaises concernerait près de 19 000 m² de la ZNIEFF. Le recul des falaises meubles engendrerait donc ici une perte d'habitat. De plus, la falaise de Nantois correspond à une zone d'intérêt départemental sur le plan géologique car c'est sur cette falaise qu'a été défini le stratotype de Nantois. Cette portion de falaise représente effectivement une des coupes quaternaires les plus complètes en Bretagne en termes d'enregistrements stratigraphiques (Loyer et al., 1995).

8.3.1.2- L'anse de Pors-Hir à Plougrescant

Sur le site de Pors-Hir, à Plougrescant, l'érosion des falaises meubles menacerait quatre résidences (Fig. 208). Deux d'entre elles se trouvent actuellement à proximité du trait de côte, à 19 et 17 mètres du bord de falaise (Fig. 209A). Des ouvrages de défense contre la mer (perré et enrochements) ont été mis en place au nord du site (cf. chapitre 6).

Fig. 208 : Zone à risque d'érosion de falaises meubles à Pors-Hir (Plougrescant).



La cartographie montre qu'un peu plus de 550 mètres de la route d'accès au site seraient menacés. Cette route a déjà subi des dommages durant les grandes marées de janvier 2005. Elle représente un enjeu pour la commune car elle permet notamment l'accès au site touristique du Gouffre. Au nord du site, entre 12 500 et 13 000 m^2 de terrains agricoles seraient concernés par le recul des falaises meubles. Les deux cales situées au nord de l'anse de Pors-Hir, qui sont utilisées notamment pour une exploitation ostréicole, seraient également affectées par le phénomène d'érosion (Fig. 209B).

Fig. 209 : Enjeux menacés à Pors-Hir.

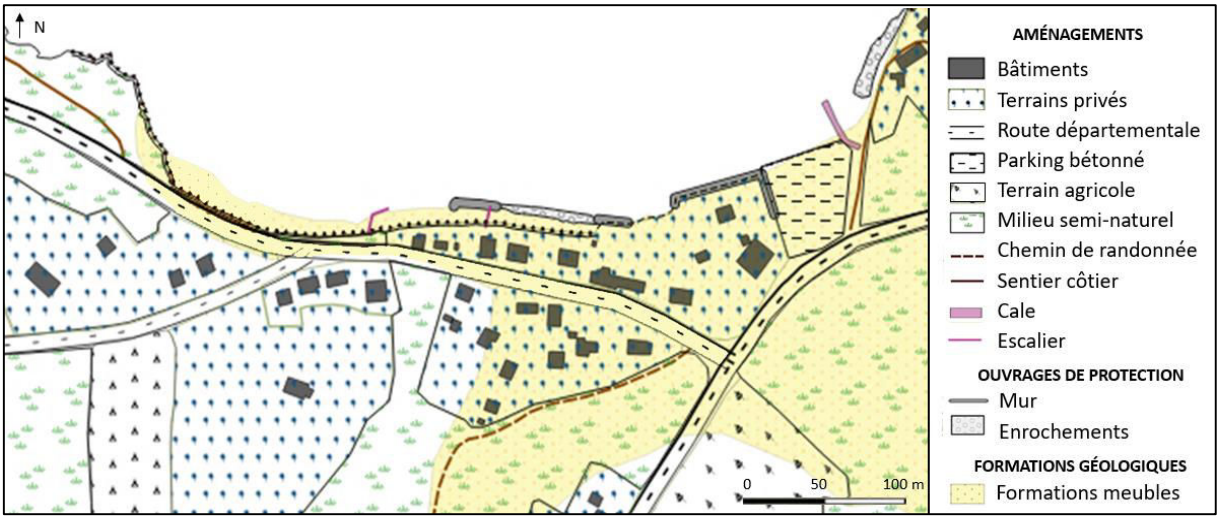
A : résidence située à 19 mètres du bord de falaise ; **B** : cale utilisée notamment par une exploitation ostréicole.

Tout comme le site de la plage des Vallées, l'érosion des falaises meubles de Pors-Hir engendrerait ici une perte d'habitat naturel car le littoral de Pors-Hir est un espace remarquable appartenant au périmètre Natura 2000. Il représente une Zone de Protection Spéciale (ZPS) liée à la Directive Oiseaux (Dernier, 2010).

8.3.1.3- L'anse du Moulin de la Rive à Locquirec

Sur le site du Moulin de la Rive, à Locquirec, le risque d'érosion des falaises meubles concernerait douze résidences (Fig. 210). Cinq d'entre elles se trouvent à moins de 12 m du front de falaise (Fig. 211A). Des murs de protection et des enrochements ont été construits le long du trait de côte afin de protéger le pied de falaise de l'érosion marine.

Fig. 210 : Zone à risque d'érosion de falaises meubles du Moulin de la Rive (Locquirec).



Une portion d'un peu plus de 650 m de la route départementale longeant le site serait menacée. Depuis les tempêtes de février 2014, des fissures sont apparues au niveau de la chaussée. Elles sont dues au glissement des formations meubles et du remblai sur lesquels la route a été construite dans les années 1960 (Fig. 211B) (cf. chapitre 6). Un projet de confortement du front de falaise dans ce secteur est actuellement en cours d'élaboration (Le Barillec, 2016).

Fig. 211 : Enjeux menacés au Moulin de la Rive.

A : résidences situées à moins de 12 m du bord de falaise ; **B** : route départementale réduite à une voie en raison de l'apparition de fissures sur la chaussée.

8.3.1.4- Notigou à Trédrez-Locquémeau

Sur le site de Notigou, à Trédrez-Locquémeau, l'érosion des falaises meubles concernerait dix-huit résidences (Fig. 212 et Fig. 213). Elle affecterait également la route communale qui longe la corniche sur environ 215 mètres (Fig. 213). Cette route représente un enjeu car elle constitue la seule voie d'accès à une dizaine de résidences ainsi qu'à la plage de Notigou.

Fig. 212 : Zone à risque d'érosion de falaises meubles de la plage de Notigou.

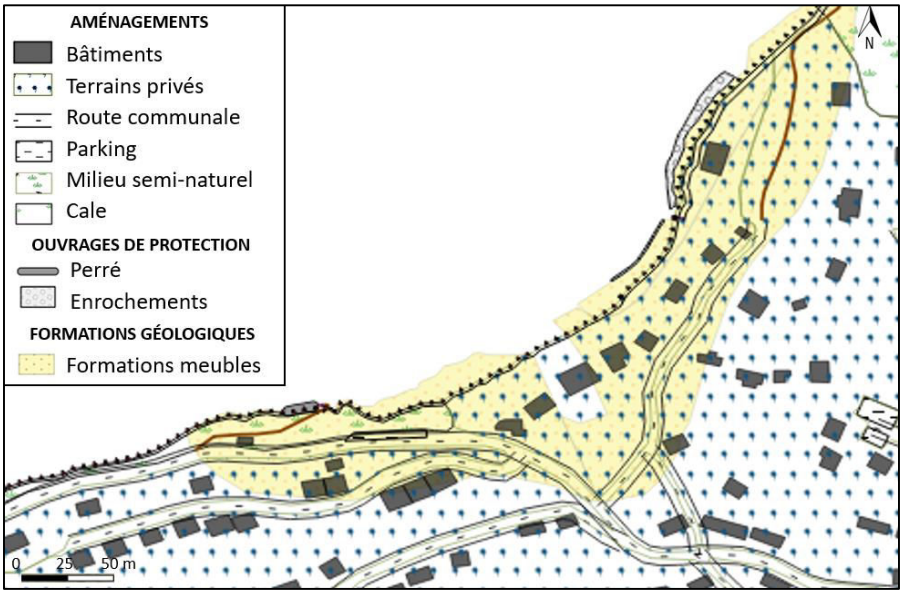
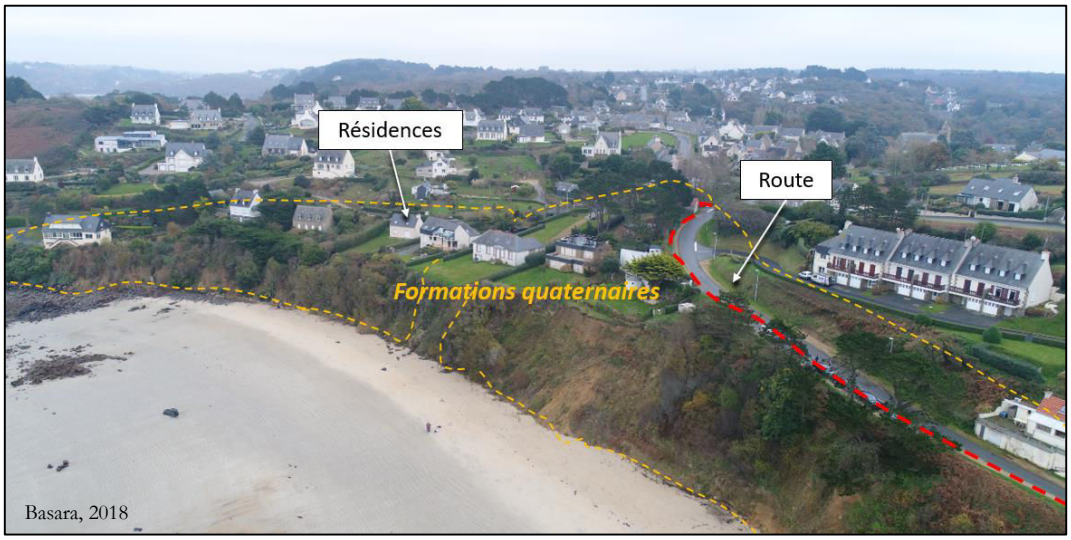


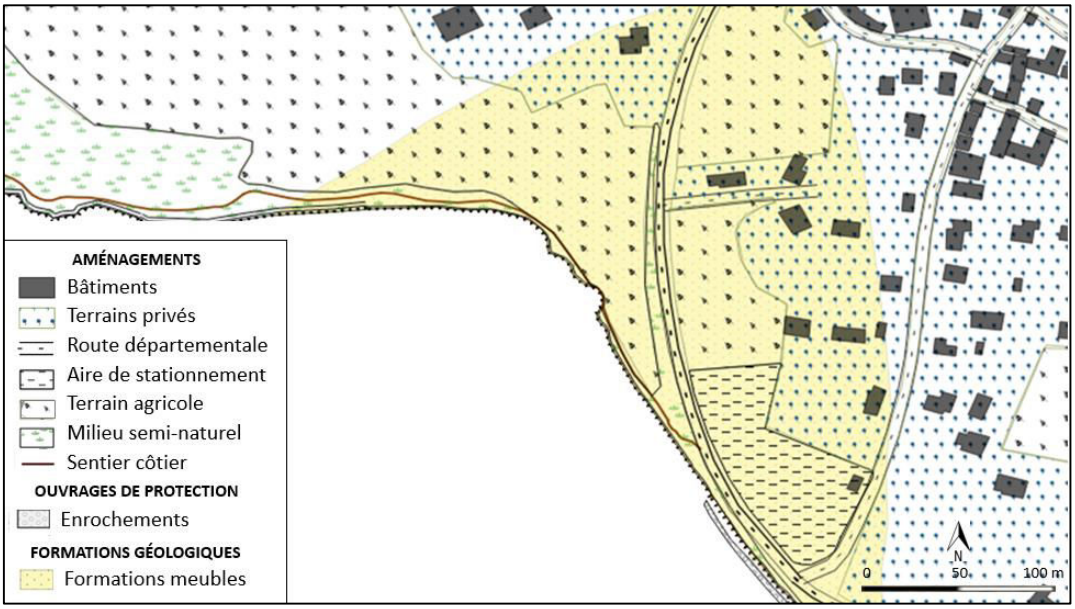
Fig. 213 : Routes et résidences menacées à Notigou (photographie : J. Ammann, 2018).



8.3.1.5- L'anse du Caon à Telgruc-sur-Mer

Sur le site de l'anse du Caon, à Telgruc-sur-Mer, dix résidences seraient concernées par l'érosion des falaises meubles (Fig. 214, Fig. 215A). Environ 250 m du sentier côtier et 19 000 m^2 de terrains agricoles reposant sur ces formations meubles seraient également affectés par le recul des falaises meubles (Fig. 215B).

Fig. 214 : Zone à risque d'érosion de falaises meubles de l'anse du Caon.



La route départementale longeant ce site serait également impactée. Cette route est actuellement protégée au sud par un enrochement de 130 mètres, à l'endroit où elle est le plus proche du sommet de falaise, c'est-à-dire entre 4 à 5 mètres du bord (Fig. 214).

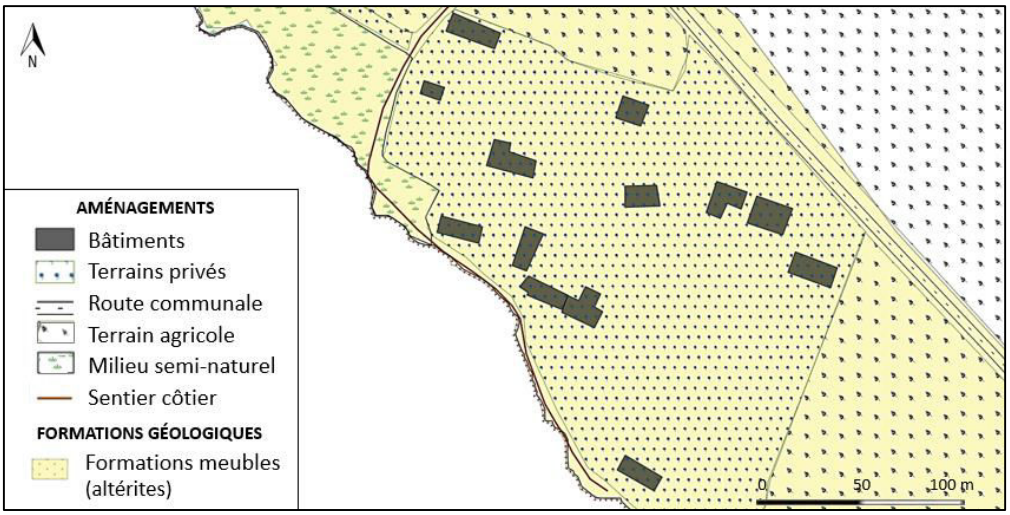
Fig. 215 : Enjeux menacés à l'anse du Caon.

A : résidences situées en arrière du front de falaise ; **B** : terrain agricole et sentier côtier.

8.3.1.6- Le site de Poulbréhen à Plozévet

Sur le site de Poulbréhen, à Plozévet, l'érosion des falaises meubles concernerait treize résidences (Fig. 216). La route communale ainsi que les terres agricoles longeant ce secteur seraient également menacées.

Fig. 216 : Zone à risque d'érosion de falaises meubles à Poulbréhen.



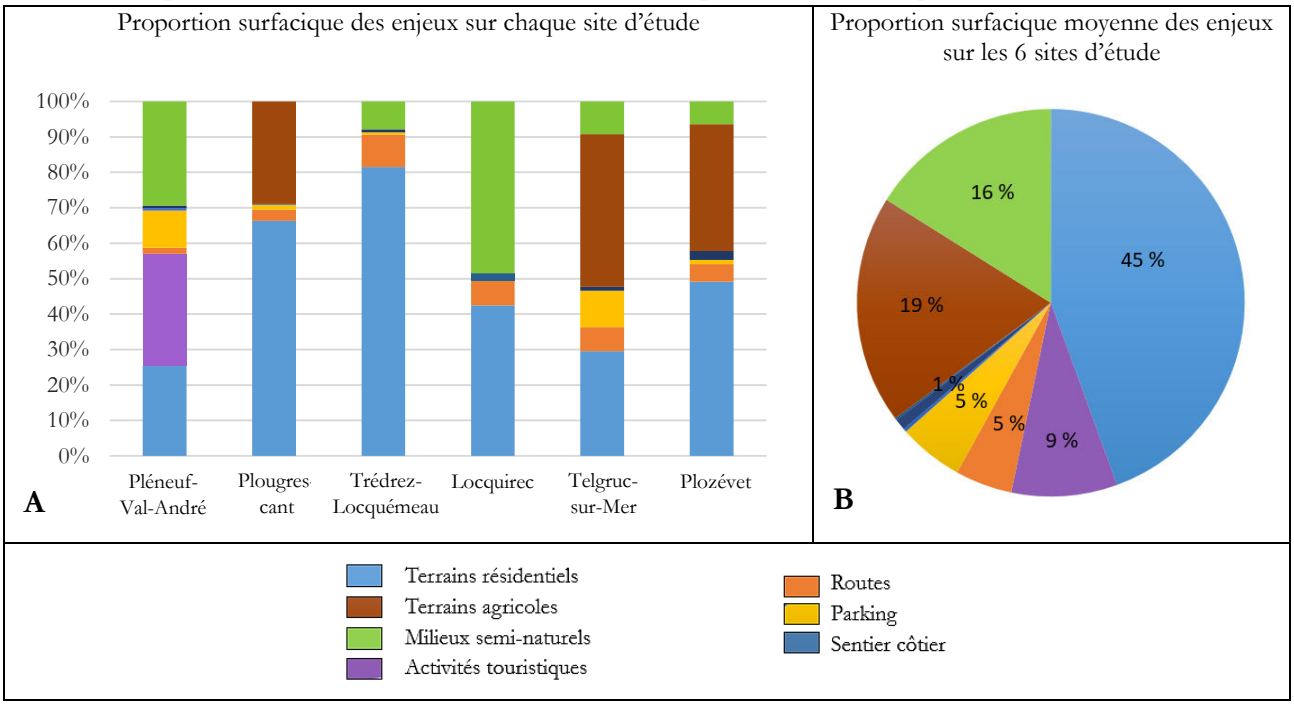
Dans ce secteur, comme sur le site de Telgruc-sur-Mer, le littoral est très exploité par l'activité agricole et l'installation de résidences principalement secondaires. Par endroits, le sentier littoral est à proximité immédiate du bord de falaise, voire a complètement disparu à la suite du recul des falaises meubles (Fig. 217). Une enquête publique sur la procédure de modification de la servitude de passage s'est effectuée en mars 2017 afin de redéfinir le tracé du sentier côtier.

Fig. 217 : Érosion du sentier côtier de Poulbréhen à Plozévet.

8.3.2- Diversité des enjeux menacés par l'érosion des falaises meubles

La quantification des enjeux par leur superficie dans les zones à risque permet d'apprécier leur proportion vis-à-vis des autres enjeux et vis-à-vis des autres sites à falaises meubles (Fig. 218).

Fig. 218 : Répartition individuelle des enjeux menacés sur chaque site d'étude et répartition globale sur les six sites.



Les **terrains résidentiels** représentent 45 % des enjeux menacés sur les six sites d'étude (Fig. 218B). Ce sont les principaux enjeux impactés par l'érosion des falaises meubles, en termes de superficie. Ce sont les enjeux les plus étendus sur les sites de Plougrescant, de Trédrez-Locquémeau et de Plozévet (Fig. 218A).

Les **terrains agricoles** occupent également une part importante dans les enjeux exposés au risque, notamment dans les communes restées rurales telles que Telgruc-sur-Mer, Plozévet ou Plougrescant (Fig. 218A). La disparition d'une partie des terres agricoles sous l'effet du recul des falaises meubles représente avant tout un enjeu économique car elle pourrait avoir un impact sur la production et le rendement agricoles (Bremond, 2011).

Les **milieux dits « semi-naturels »** représentent des terrains qui ne sont pas exploités par l'homme mais qui ont pu être modifiés et façonnés par son intervention (haie, prairie…). Ils constituent le troisième enjeu le plus impacté en termes de superficie sur les sites d'étude. Ces portions littorales non aménagées servent de zone tampon naturelle au recul des falaises et réduisent la sensibilité des sites à l'érosion (Drejza, 2010).

Les **activités de loisirs** sont représentées, ici, seulement sur le site de Pléneuf-Val-André avec la présence du golf. Celui-ci constitue un enjeu économique important pour la commune car un peu plus de 4 200 personnes fréquentent le golf chaque année et il est le lieu de compétitions de niveau international (GEOLITT, 2016). De plus, le golf représente une source de recettes importante pour la commune.

Une attention particulière doit être portée aux **routes** menacées par le recul des falaises et dont la proportion est de 5 % sur les six sites d'étude. Cette proportion ne reflète pas la fréquence d'exposition au risque du fait de leur superficie réduite en comparaison des terrains privés ou des espaces naturels. Les routes sont effectivement fréquemment impactées du fait de leur tracé à proximité du trait de côte (Schroëtter et Blaise, 2015). Elles représentent un enjeu important pour les communes, d'une part, parce qu'elles desservent la population riveraine et, d'autre part, parce qu'elles peuvent avoir un impact sur les activités économiques en permettant, par exemple, l'accès à des sites devenus touristiques. C'est le cas, par exemple, de la route de la Corniche à Locquirec ou de la route de la Plage à Telgruc-sur-Mer. Les

communes tentent le plus souvent de protéger les routes par la mise en place d'enrochements, plutôt que de chercher à les déplacer.

De même que pour les routes, les **sentiers côtiers,** représentant 1 % des enjeux, sont sous-représentés en termes de proportion dans l'analyse faite sur la base de l'étendue des zones à enjeux, du fait de leur largeur réduite. Mais ils sont fréquemment impactés par le recul des falaises meubles en raison de leur proximité avec le sommet de falaise (Biville et Van Waerbeke, 2003). La forte fréquentation des sentiers côtiers bretons en font un enjeu important. Toutefois, contrairement aux routes, ces sentiers ne sont pas souvent protégés par des ouvrages car ils sont plus faciles à déplacer en retrait du rivage. Ainsi, sur les sites de Telgruc-sur-Mer et de Pléneuf-Val-André, les sentiers côtiers ont déjà été déplacés à plusieurs reprises à la suite du recul de la falaise.

Les **parkings** et les aires de stationnement représentent 5 % des enjeux menacés sur les six sites d'étude. Il s'agit d'un enjeu important pour les communes littorales qui doivent répondre à des difficultés de stationnement surtout en période estivale (GEOLITT, 2016). C'est le cas des six sites d'étude qui voient leur population doubler en été.

L'analyse des éléments exposés au risque d'érosion des falaises meubles sur les six sites d'étude montre que le recul des falaises menace une diversité d'enjeux d'ordre humain, économique, stratégique et socio-environnemental qui peuvent être source de conflits. Face à ces difficultés, les communes choisissent de mettre en place différentes stratégies de gestion.

8.3.3- Analyse des stratégies de gestion au regard des enjeux menacés

L'échantillon de six sites ne fournit pas à lui seul une vision complète des stratégies de gestion, mais permet tout de même de mettre en évidence quelques grandes tendances. On peut observer plusieurs approches, de la fixation du trait de côte par des méthodes dites dures (aménagements) au laisser-faire. Ces différences de choix dans les stratégies de gestion s'expliquent plutôt en termes de caractéristiques du recul (cinématique à court terme et fréquence des phénomènes d'érosion) ou par les ressources financières que les communes concernées parviennent à mobiliser (Perherin, 2017). L'analyse des stratégies de gestion sur les sites d'étude ne montre pas de lien direct entre la nature ou la proportion des différents enjeux et les mesures de gestion adoptées. Le recours aux ouvrages de défense est fréquent, avec une faible efficacité.

Ainsi, par exemple, pour les sites de Pors-Hir (Plougrescant) et de Poulbréhen (Plozévet) qui présentent des enjeux comparables en termes de proportion (terrains résidentiels et agricoles représentant plus de 84 % des enjeux menacés), le premier site a été aménagé par la mise en place d'enrochements, ainsi que de murs de protection, tandis que, sur le second, aucun ouvrage de défense contre la mer n'a été installé. Si l'on considère maintenant la cinématique du recul, les falaises du site de Plougrescant présentent effectivement des taux de recul à court et moyen termes plus élevés (entre 35 à 41 cm/an) en comparaison des falaises de Plozévet (entre 2 à 6 cm/an). Par ailleurs, la présence de milieux naturels protégés ne semble pas expliquer à elle seule les stratégies adoptées car bien que les falaises des sites de Plougrescant et de Pléneuf-Val-André se situent dans une zone Natura 2000 ou dans une ZNIEFF, leur linéaire est artificialisé respectivement à 16 et 9 %.

Les enrochements représentent 68 % des ouvrages de défense utilisés. Les autres ouvrages correspondent à des murs de protection ou des perrés. Les principaux enjeux protégés par ces ouvrages sont les terrains résidentiels et les routes qui représentent respectivement 60 et 26 % des enjeux protégés. Les ouvrages de défense contre la mer ont généralement été mis en place sans concertation ni réflexion globale préalable sur leur impact ou sur leur efficacité, d'où « l'effet dominos » (Paskoff, 1985) qui appelle à la mise en place d'ouvrages supplémentaires dans la continuité des précédents. La poursuite du recul des

falaises meubles en arrière des enrochements, comme c'est le cas sur le site de Plougrescant, montre, par ailleurs, que les ouvrages de défense mis en place sur ce type de côte sont rarement adaptés.

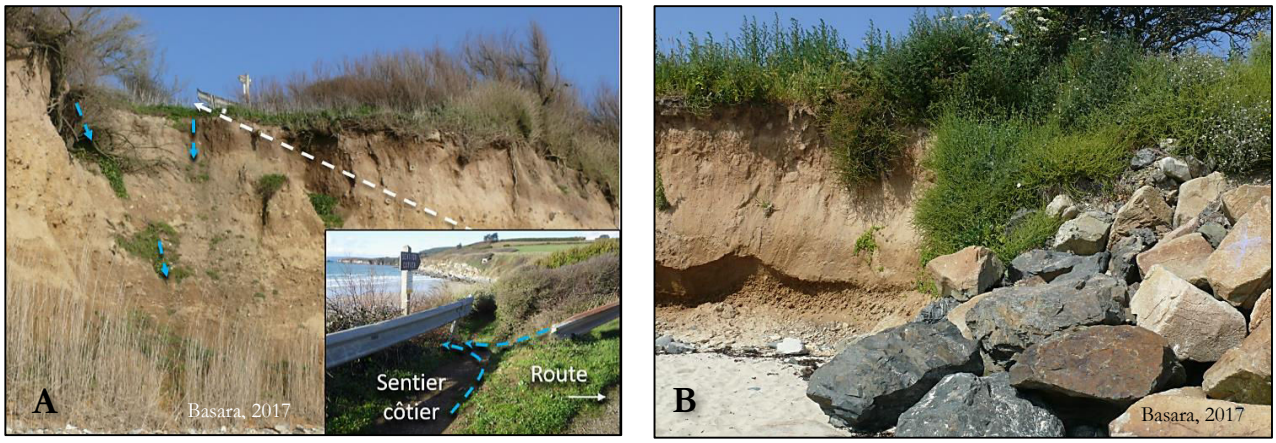
8.3.4- Apport de la cartographie géomorphologique dans l'évaluation de la sensibilité des sites à l'érosion

8.3.4.1- Identification des facteurs impliqués dans l'érosion des falaises

En l'absence d'une quantification fine du recul, comme celle effectuée par la mise en place d'un suivi photogrammétrique sur les sites d'étude (cf. chapitre 7) et permettant d'identifier les modalités de recul, la carte géomorphologique présentée dans ce chapitre permet de mettre en évidence la prépondérance de l'origine subaérienne ou marine des processus impliqués dans l'érosion des falaises meubles. Les différentes formes d'érosion observées sont effectivement des indices qui renseignent sur les agents impliqués. De plus, le géoréférencement des caractéristiques environnementales (ex : sens de la dérive littorale, direction principale d'écoulement des eaux continentales) permet de comprendre l'origine de ces formes d'érosion. Ainsi, les ravins ou les trous de suffosion observés sur les sites de Plougrescant, de Pléneuf-Val-André et de Telgruc-sur-Mer témoignent d'une érosion subaérienne. Les sous-cavages observés à Plozévet et Plougrescant témoignent quant à eux d'une érosion marine.

L'influence des aménagements identifiée par l'analyse des taux de recul historique (cf. chapitre 6) est aussi mise en évidence, ici, par l'intermédiaire des formes d'érosion recensées sur la carte géomorphologique. La formation des ravins et des trous de suffosion est effectivement favorisée par la présence de routes et de sentiers en amont qui concentrent l'écoulement des eaux de ruissellement. Ceci s'observe très bien sur le site de Telgruc-sur-Mer (Fig. 219A) où une ravinne s'est formée par le ruissellement concentré des eaux guidées par la route et le sentier côtier.

Fig. 219 : Impact des aménagements sur l'érosion des falaises.



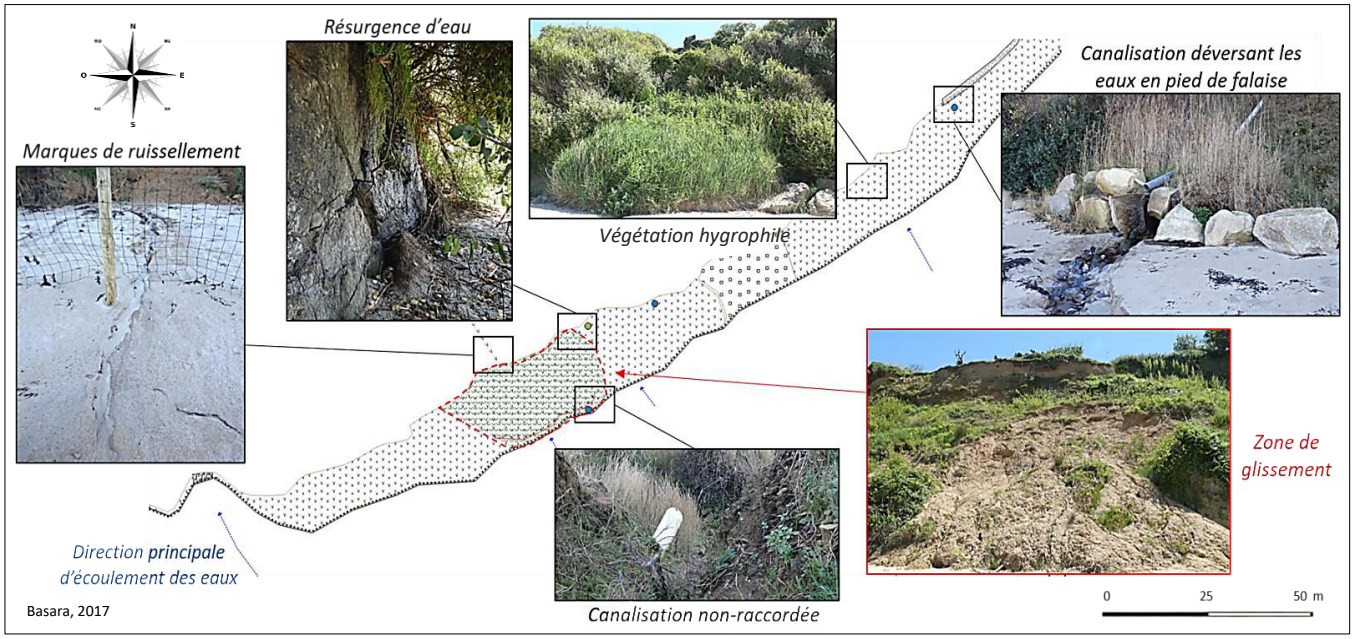
A : Ravinne formée par la concentration des eaux ruisselant le long de la route et du sentier côtier à Telgruc-sur-Mer.
B : « Effet de bout » provoqué par la réflexion des vagues à l'extrémité d'un enrochement à Pors-Hir (Plougrescant).

8.3.4.2- Détermination de la sensibilité des sites à l'érosion

La cartographie géomorphologique renseigne aussi sur la sensibilité spatiale des sites à l'érosion subaérienne ou marine. Ainsi, la présence de platier et d'un cordon de galets épais en avant des falaises diminuera cette sensibilité. À l'inverse, la présence d'un ouvrage de protection ou d'un versant rocheux à proximité l'augmentera car ils représentent une barrière à la dissipation de l'énergie des vagues qui se retrouvera accrue aux extrémités de ces structures rigides (Bernatchez et al., 2008) (Fig. 219B).

La cartographie géographique met également en évidence des problèmes de résurgence d'eau le long de la côte due notamment à des canalisations d'évacuation des eaux usées non raccordées (Fig. 220).

Fig. 220 : Ruissellement, formes d'érosion et canalisations non raccordées observés sur le site de Trédrez-Locquémeau.



La cartographie géomorphologique représente donc un outil d'analyse efficace et d'aide à la décision et à l'aménagement des zones côtières. Elle peut être utilisée dans le choix de mesures de mitigation comme le drainage et le raccordement des eaux usées ou dans le choix de techniques de protection adaptées aux modalités de recul et aux conditions environnementales. Par exemple, sur les sites dont le recul est conditionné principalement par des processus d'origine marine, les ouvrages de défense mis en place devront tenir compte de l'orientation principale des houles et du sens de la dérive littorale qui ont une incidence sur l'alimentation sédimentaire des secteurs situés en aval. Sur les sites dont l'érosion est conditionnée principalement par des processus subaériens, les systèmes de drainage devront tenir compte de la direction préférentielle d'écoulement des eaux et de la localisation des formations meubles.

8.4- Discussion

Marge d'erreur sur l'étendue des zones à risque

L'extension maximale des formations meubles en arrière des versants présente une marge d'erreur estimée à ± 6 mètres. La végétation et l'urbanisation des versants peuvent rendre difficile l'observation d'affleurements permettant d'identifier la nature des formations. La limite des formations meubles présente sur les cartes est une interprétation des observations issues des campagnes de terrain et d'analyses de photographies aériennes ainsi que de cartes topographiques. Il est donc important de noter que l'étendue des zones à risque peut être réduite ou, à l'inverse, augmentée dans les marges définies par cette incertitude. Parmi les formations meubles, les altérites - présentes par exemple sur le site de Plozévet - sont les matériaux dont l'étendue maximale est la plus incertaine. Ces formations étant issues d'une altération lente de la roche mère, il est en effet difficile de trouver une limite nette entre les dépôts meubles et les formations peu altérées. L'approche présentée dans ce chapitre suppose donc que l'extension spatiale des formations meubles soit limitée.

Choix méthodologiques concernant les enjeux

Les enjeux cartographiés sur les sites d'étude tiennent compte de tous les ouvrages pouvant être identifiés sur le terrain ou sur des photographies. Les réseaux électriques, d'adduction d'eau et téléphoniques n'ont pu être cartographiés du fait de la difficulté d'accès à ces données et de leur caractère confidentiel. De plus, dans cette analyse du risque qui s'affranchit de la notion de temps, les enjeux sont considérés comme constants. L'existence de la loi Littoral et des zones classées inconstructibles sur les secteurs d'étude permet de considérer qu'aucune nouvelle construction n'est possible. Toutefois, les éléments exposés peuvent être amenés à évoluer dans le temps, aussi bien par l'apparition d'enjeux (autres que liés au bâti) que par la disparition d'enjeux (Mineo-Kleiner, 2017). Enfin, la cartographie des zones à risque ne prend pas en compte l'éventuel effet neutralisant des ouvrages de protection existants sur l'érosion des dépôts meubles. On considère, en effet, qu'à suffisamment longue échéance, l'ouvrage sera rendu inefficace ou détruit car son entretien deviendra trop onéreux sur le long terme. Le maintien du trait de côte par l'entretien des ouvrages n'est effectivement pas toujours une option économiquement viable (Albinet, 1995).

En raison de la difficulté que pose l'évaluation économique des enjeux, les éléments exposés ont été quantifiés par leur superficie dans la zone à risque. La comparaison de leur proportion moyenne (Fig. 218B) avec celles identifiées par les travaux de Biville et Van Waerbeke (2003) à partir d'enquêtes communales réalisées sur 110 communes en Bretagne fait apparaitre certaines similitudes mais aussi des différences notables (Tab. 25). Les proportions des terrains agricoles, des activités touristiques et des routes menacées par l'érosion des falaises meubles sont équivalentes entre les deux études. Mais, tandis que les terrains résidentiels sont les enjeux les plus exposés sur les six sites d'étude (44,4 %), les travaux de Biville et Van Waerbeke (2003) montrent une faible proportion de ces enjeux (15,7 %). De même, les milieux semi-naturels représentent ici, le double de la proportion obtenue par les enquêtes. À l'inverse, le sentier côtier est le premier enjeu en termes de proportion dans travaux de Biville et Van Waerbeke (71,9 %) alors qu'il est très peu représenté dans l'analyse réalisée sur les six sites d'étude (1,0 % des enjeux). Ces différences peuvent s'expliquer par le nombre réduit de sites étudiés, mais aussi par la différence de méthodologie entre l'analyse réalisée à partir d'observations de terrain et de documents cartographiques d'une part, et les retours d'enquêtes d'autre part. Les résultats des enquêtes peuvent en effet refléter une préoccupation moindre des élus communaux pour les biens privés tels que les terrains résidentiels en comparaison des biens publics. Ainsi, les sentiers côtiers exposés à l'érosion et pouvant menacer les randonneurs sont une source d'inquiétude plus grande pour le maire du fait de sa responsabilité en matière de sécurité des cheminements imposée dans le code pénal (article 121-2, loi n°2000-647). De même, la faible valeur économique des milieux semi-naturels peut expliquer leur sous-représentation dans les réponses des communes. Ces différences en termes de proportion montrent que le choix de la méthode de quantification des enjeux conditionne fortement les résultats. On peut supposer qu'une évaluation économique des enjeux donnerait des résultats différents des deux premières approches ; le sentier côtier et les milieux semi-naturels seraient sous-représentés, du fait de leur valeur non-monétaire, en comparaison des autres enjeux.

Tab. 25 : Proportions comparées des enjeux menacés par le recul des falaises meubles en Bretagne au travers de deux approches de quantification.

Enjeux	Proportions évaluées dans ce chapitre sur les 6 sites d'étude, à partir de l'étendue spatiale	Proportions évaluées dans les travaux de Biville et Van Waerbeke (2013) sur 110 communes, à partir d'enquêtes communales
Terrains résidentiels	44,4 %	15,7 %
Terrains agricoles	19,1 %	19,5 %
Milieux semi-naturels	16,0 %	8,1 %
Activités touristiques	8,8 %	5,7 %
Routes	4,7 %	4,3 %
Parking	5,4 %	-
Sentier côtier	1,0 %	71,9 %

Originalité et intérêts de l'approche utilisée

L'analyse du risque d'érosion présentée dans ce chapitre se différencie de l'approche classique consistant à calculer une distance de recul à partir d'un taux d'érosion moyen (Forsyth, 2009 ; MEDDE, 2014 ; Perherin et al., 2015) et qui est préconisée dans les guides méthodologiques d'élaboration des plans de prévention des risques littoraux. Cette évaluation du risque est tributaire de la capacité à caractériser la cinématique régressive des falaises meubles. Or, les falaises sont des littoraux dont la cinématique, lente à modérée, présente des taux de recul souvent associés à des marges d'erreur plurimétriques (Douglas et Crowell, 2000 ; Costa et al., 2003). De plus, l'utilisation des taux historiques peut sous-estimer le risque (Bernatchez et al., 2012) et l'incertitude du zonage sera d'autant plus élevée que l'échéance sera lointaine (Levoy et Monfort, 2009). Par ailleurs, ces zonages d'aléa tiennent rarement compte de l'impact du changement climatique sur l'évolution des taux de recul car cet impact reste difficile à quantifier (Perherin et Roche, 2010). Pour autant, il est admis que le changement climatique aura des conséquences non seulement sur l'élévation du niveau des mers mais aussi sur l'intensité des précipitations et des tempêtes, augmentant ainsi les phénomènes d'érosion des falaises et la menace sur les territoires urbanisés (Bray et Hooke, 1997 ; Fairbank et Jakeways, 2006). Outre les incertitudes associées aux taux de recul, la dynamique régressive des falaises ne se fait pas de manière continue mais par à-coups (Pinot, 1998). Les taux de recul historiques ne reflètent donc pas l'ampleur du recul à court terme. Ainsi, l'indicateur INE réalisé à l'échelle nationale indique un recul « imperceptible » pour les falaises de Pors-Hir, à Plougrescant, alors que des reculs de 2 à 3 m se sont produits en l'espace d'une journée lors de l'épisode de tempête du 2 février 2014. Tandis que le recul moyen des falaises meubles est souvent inférieur à 0,50 m/an, des reculs décamétriques sont fréquemment observés lors d'un seul événement (Sunamura, 2015). Une telle dynamique a une implication pour les enjeux situés en sommet de falaises. Adoptant un regard de géomorphologue sur le recul actuel des falaises meubles qui correspond au nettoyage de la couverture meuble héritée, la caractérisation de l'aléa érosion présentée dans ce chapitre consiste à cartographier l'extension maximale des formations meubles en arrière du littoral. Cette approche est adaptée aux littoraux à falaises meubles et seulement à ce type de littoral du fait de leur étendue spatiale limitée par la falaise morte qui constitue la limite extrême qui sera, sans doute, atteinte par la transgression en cours, comme ce fût le cas lors des transgressions précédentes.

Cette cartographie de l'aléa à partir de la localisation des formations meubles et non par le biais des vitesses de recul permet de s'affranchir de la variable « temps » et des incertitudes sur les taux de recul.

Ainsi, les cartes d'aléa n'ont plus besoin d'être réactualisées régulièrement. Prendre en compte l'étendue maximale des formations meubles permet aussi de favoriser une détermination de l'aléa spatialement plus précise. Cette cartographie du risque permet ainsi d'identifier les lieux où les actions préventives seraient nécessaires, à la fois pour la population, pour le fonctionnement du territoire et en termes de coût. Il s'agit d'une nouvelle approche conceptuelle de l'évaluation du risque d'érosion qui donne la priorité à une gestion sur le long terme des territoires littoraux.

La cartographie comme outil d'aide à la réduction du risque

La carte des zones à risque débouche sur la mise en évidence de lieux à la fois stratégiques et sensibles, information essentielle pour toute politique de prévention des risques (D'Ercole et Metzger, 2009). L'analyse sous SIG des caractéristiques physiques et géographiques des territoires et l'évaluation des facteurs responsables du recul des falaises permettent d'identifier, sur chaque site, des actions possibles de réduction du risque. Celle-ci peut s'effectuer soit par la diminution des enjeux exposés (déplacement et relocalisation des installations menacées sur des terrains situés en dehors des zones à risque), soit par la diminution de l'aléa d'érosion (diminution de la sensibilité des sites à l'érosion par le drainage du versant, par exemple).

En termes d'enjeux et de planification préventive, les zones à risque identifiées sur les cartes devraient ne pas faire l'objet de nouveaux aménagements et, si ce n'est pas déjà le cas, être classées inconstructibles. Afin de limiter le risque, il est effectivement nécessaire d'éviter toute installation au sommet des falaises meubles car elles sont vouées au recul à plus ou moins long terme (Bonnot-Courtois et Lançon, 2004). Des mouvements de terrain d'ampleur significative peuvent même se produire à court terme. Le problème actuel est que, dans bien des cas, les falaises meubles sont aménagées et le risque de destruction d'enjeux est déjà présent, comme on le constate sur les sites présentés dans cette étude.

Outre l'interdiction d'habitations, des principes de gestion et d'aménagement visant à atténuer les processus érosifs doivent être retenus dans ces zones à risque (Pinot, 1993, 1997; Bonnot-Courtois et Lançon, 2004). Sur les sites dont le recul est conditionné principalement par des processus d'origine marine, des techniques dites « souples » telles que le rechargement de plage ou le reprofilage du versant, qui n'empêchent pas le recul du trait de côte mais permettent de l'atténuer, sont à privilégier (ANCORIM, 2012). De plus, en comparaison des techniques dites « dures » (enrochement, perré…), elles ont l'avantage de ne pas stopper les échanges sédimentaires entre la plage et le versant (Lageat, 2004). Pour les sites dont le recul des falaises meubles est attribué essentiellement aux processus d'origine subaérienne, des techniques visant à réduire les ruissellements concentrés et l'apport supplémentaire d'eau dans les sols sont à privilégier. L'érosion par les eaux continentales est souvent un facteur négligé par les gestionnaires qui tendent à attribuer à la mer l'essentiel de l'attaque des falaises d'où la multiplication des enrochements. Pour autant, les eaux continentales sont un des principaux facteurs de la déstabilisation des formations meubles (cf. chapitre 5 et 7). Il est tout d'abord essentiel que les eaux usées soient raccordées car les infiltrations liées aux habitations multiplieraient par deux voire trois, la vitesse de recul des falaises meubles (Bonnot-Courtois et al., 2008). Le drainage des versants permettra également de limiter les déstabilisations de terrain (Lee et Clark, 2002 ; Bromhead, 2006). Il est important aussi d'éviter les terrassements en sommet de falaise et les sentiers côtiers qui favorisent la concentration des eaux de ruissellement. L'idéal est de conserver une bande végétalisée sur plusieurs mètres en arrière des falaises qui constituera une « zone tampon » permettant de réduire la vulnérabilité des territoires à l'érosion.

Autres utilisations de la cartographie du risque

La carte des zones à risque peut être utilisée pour évaluer la valeur des enjeux menacés et ainsi identifier les projets d'aménagement les plus pertinents. Ainsi, pour des enjeux menacés à faible coût monétaire, le

laisser-faire ou l'intervention limitée par une protection souple du littoral pourront être privilégiés. À l'inverse, pour de forts enjeux pouvant menacer la vie humaine, la fixation du trait de côte ou la relocalisation sur des terrains situés en dehors des zones à risque seront à privilégier. Les cartes des zones à risque peuvent être utilisées pour hiérarchiser les enjeux au regard de leur valeur marchande (Le Berre et al., 2014 ; Bernatchez et al., 2015) ou d'utilité (économique, stratégique, environnementale, affective…) (Drejza et al., 2015).

La cartographie peut également être utilisée pour évaluer la vulnérabilité des territoires côtiers à l'érosion via l'utilisation d'indicateurs qui incluent des variables permettant de caractériser la sensibilité physique de la côte et la composante sociale de la vulnérabilité du territoire (Gornitz, 1990 ; Shaw et al., 1998 ; Boruff et al., 2005 ; Meur-Ferec, 2006 ; Del Río et Gracia, 2009 ; Gaki-Papanastassiou et al., 2010 ; McLaughlin et Cooper, 2010 ; Drejza et al., 2015).

Les informations apportées par l'utilisation de la cartographie montrent que l'étude géomorphologique de terrain, naturaliste et quantitative, associée à la géomatique, représente un outil essentiel pour une appréhension globale du risque d'érosion des falaises meubles. La méthodologie présentée dans ce chapitre est une approche qualitative qui vise à étudier le risque au sens large et sous différents angles : approche géomorphologique permettant d'étudier les facteurs et les processus physiques à l'origine de l'érosion ; approche géographique permettant d'identifier les enjeux menacés et les stratégies de gestion à adopter. Elle présente l'avantage d'être facilement réutilisable aussi bien par les équipes de recherche que par les gestionnaires des services déconcentrés de l'État et des collectivités territoriales.

Conclusion intermédiaire

La cartographie du risque d'érosion des falaises meubles présentée, ici, est basée sur le croisement de la localisation des formations meubles avec les enjeux exposés. La méthodologie s'appuie sur des observations de terrain et sur une analyse spatiale sous SIG. La cartographie du risque sur les six sites d'étude a montré que les terrains résidentiels et agricoles représentent une part importante des enjeux menacés par le recul des falaises meubles. Cette méthode de cartographie permet de s'affranchir des incertitudes sur les vitesses de recul et de délimiter l'ensemble des zones qui sont assujetties aux risques d'érosion côtière et où il semblerait prudent d'interdire toute nouvelle construction. Cette restitution cartographique du risque peut donc être utilisée comme outil de sensibilisation des décideurs et des citoyens. La technique utilisée représente aussi un moyen d'identifier les processus physiques impliqués dans le recul des falaises, ce qui est essentiel dans le choix des techniques d'adaptation.

Afin de définir les zones d'action prioritaires sur un territoire, il est essentiel de connaitre la variabilité spatiale du risque (Leone, 2007). Pour cela, des indicateurs d'aléa et d'enjeux peuvent être utilisés. Ainsi, l'analyse de la variabilité spatiale du risque sur les sites d'étude, à partir d'indicateurs, et l'identification des éléments responsables font l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE 9 : Analyse des enjeux et du risque à partir d'indicateurs

Sur les territoires littoraux caractérisés par de forts enjeux humains et socio-économiques, un travail de spatialisation du risque est nécessaire. Ceci peut être réalisé par le biais d'indices et d'indicateurs restitués sous forme cartographique. L'évaluation des risques par les collectivités peut s'avérer longue et coûteuse en termes humains et financiers (ADEME, 2013). C'est pourquoi, l'approche du risque par un travail basé sur des indicateurs permet d'obtenir une vision d'ensemble sans recourir à de lourds travaux. En plus de faire avancer la connaissance scientifique, les indicateurs permettent d'appuyer les gestionnaires dans la gestion des risques côtiers (Quillet, 2017). Ils permettent effectivement de donner une évaluation objective de la situation et de déterminer les actions prioritaires qui devraient être entreprises (Drejza et al., 2015).

Ce chapitre a pour objectif de répondre à trois principales questions :

1) Quel est le niveau de risque sur les sites d'étude ?
2) Quels sont les types d'enjeux (humains, structurels, économiques) faisant augmenter le risque ?
3) Quelle est la variabilité spatiale du risque sur les sites d'étude ?

Après avoir présenté les notions d'indices et d'indicateurs, la méthode permettant de connaitre les niveaux de risque sur les sites d'étude sera exposée. La variabilité spatiale des enjeux et des niveaux de risque sera ensuite analysée sur chacun des sites. Enfin, les limites de la méthode basée sur les indicateurs d'aléa et d'enjeux seront discutées.

9.1- Notions et concept des indicateurs et indices

Un **indicateur** quantifie l'information sous forme d'une mesure simple ou d'une mesure agrégée qui permet de suivre l'évolution ou de comparer des valeurs de référence (ADEME, 2013). Les **indices** correspondent à l'intégration de l'ensemble des indicateurs dans une composante et sont obtenus par une démarche d'évaluation multicritères (EMC). Ces indices permettent d'obtenir une représentation simplifiée et quantifiée d'une réalité souvent complexe en agrégeant des données multiples (Barroca et al., 2006 ; Leone, 2007 ; Peduzzi et al., 2009 ; ADEME, 2013 ; Nichols et al., 2019). Ainsi l'indice représente un outil pertinent pour évaluer le niveau de risque d'un territoire donné (Del Río et Gracia, 2009 ; Welle et Birkmann, 2015 ; Ferreira, 2017). C'est pourquoi, plusieurs travaux ont développé des indices de risque et de vulnérabilité, spécifiquement en lien avec les aléas côtiers (Gornitz, 1990 ; Boruff et al., 2005 ; Meur-Ferec et al., 2008 ; McLaughlin et Cooper, 2010 ; Drejza et al., 2015 ; Calil et al., 2017).

Parmi les indices les plus couramment utilisés et rencontrés dans la littérature pour étudier l'aléa érosion, se trouve le CVI (Coastal Vulnerability Index) créé par l'USGS (United States Geological Survey) puis repris et adapté à diverses régions littorales dans le monde par de nombreux auteurs (Gornitz, 1990 ; Thieler et Hammar-Klose, 2000 ; Boruff et al., 2005 ; Abuodha et Woodroffe, 2006 ; Gaki-Papanastassiou et al., 2010 ; Denner et al., 2015). Cet indice étudie l'implication des différents paramètres physiques par le biais d'indicateurs basés sur la géomorphologie, la pente de la plage, la topographie, le taux d'élévation du niveau marin, l'évolution du littoral, le marnage et la hauteur significative des vagues. Ces indicateurs conventionnellement utilisés dans les études de vulnérabilité peuvent être regroupés en trois grands thèmes : l'évolution de la côte, les facteurs de prédisposition et les facteurs générateurs (Lendre, 2016). Souvent combiné à l'indice CVI dans les études de vulnérabilité, l'indice SoVI (Social Vulnerability Index), développé par Cutter et al. (2003) est utilisé pour étudier l'influence des enjeux et des facteurs socio-économiques dans les études de risque (Boruff et al., 2005 ; Mani Murali et al., 2013 ; Tragaki et al., 2018).

Bien que de nombreux indices de risque et de vulnérabilité existent, l'analyse spatiale du risque se heurte à la difficulté d'utiliser des indicateurs développés et définis dans un autre pays dont les types d'enjeux et les modes de gestion peuvent être radicalement différents (Leone, 2008). Adapter les techniques à un autre secteur géographique peut effectivement s'avérer compliqué en raison des contextes morphologiques, socio-économiques et politiques différents. De plus, les nombreux travaux traitant des indicateurs n'expliquent pas toujours la méthodologie adoptée, les formules utilisées ni les techniques de discrétisation et d'agrégation. Enfin, les indices de risque existants ne sont généralement pas adaptés à toutes les échelles spatiales (McLaughlin et Cooper, 2010). Ainsi, il est important de définir des indicateurs et des indices selon l'échelle et le territoire considérés (Renard et Chapon, 2010). C'est pourquoi, dans le cadre du projet OSIRISC « *Vers un observatoire intégré des risques côtiers d'érosion-submersion* » (2016-2019, projet 1539, soutenu par la Fondation de France), où la Bretagne a été choisie comme territoire d'étude, des indices et des indicateurs multicritères pour les quatre composantes de la vulnérabilité côtière ont été définis : les aléas (érosion, submersion et migration dunaire), les enjeux, les mesures de gestion et les représentations (Fondation de France, 2011 ; Hénaff, 2016).

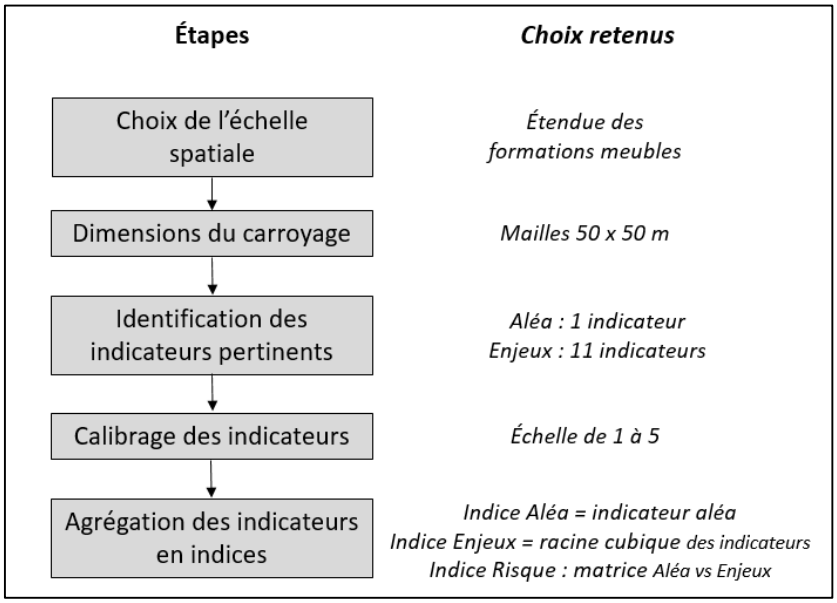
9.2- Méthodologie

Dans notre étude, une partie des indicateurs proposés dans le cadre du projet OSIRISC est mise en œuvre. Les indicateurs utilisés ici, pour analyser le risque d'érosion des falaises meubles sont ceux des composantes Aléa érosion et Enjeux. À la différence du projet OSIRISC qui souhaite établir un suivi de la vulnérabilité côtière via l'utilisation des indicateurs, l'analyse du risque est réalisée, ici, de manière rétrospective afin de déterminer son état actuel. Il s'agit donc de dresser un état des lieux et non d'effectuer un suivi de l'évolution, l'objectif étant de comparer le risque entre différents sites à falaises meubles. Un tel diagnostic permet d'ouvrir la réflexion sur la mise en place de stratégies préventives d'adaptation au risque d'érosion en fonction du niveau de danger identifié (Créach, 2015).

9.2.1- Les grandes étapes

L'analyse du risque à partir d'indicateurs repose sur l'utilisation de SIG qui permettent de représenter la variabilité spatiale du risque. Les SIG sont un des outils les plus adéquats pour exploiter des indices de risque (Cooper et McLaughlin, 1998 ; Ferreira, 2017). Ils permettent aussi bien de tester différentes combinaisons mathématiques d'indicateurs que de mettre facilement à jour les informations et d'en analyser la distribution spatiale et temporelle. Ici, l'analyse est effectuée à partir du logiciel libre QGIS™. La méthodologie utilisée peut être résumée en plusieurs étapes successives (Fig. 221) qui seront détaillées ci-après. La méthodologie s'appuie tout d'abord sur la définition de l'échelle spatiale sur laquelle doit être analysé le risque. Pour chaque composante du risque, des indicateurs sont retenus selon leur pertinence à évaluer le risque d'érosion des falaises meubles. Les indicateurs sont ensuite calibrés à partir des observations et des bases de données existantes. Enfin, l'agrégation des indicateurs permet d'obtenir un indice d'Aléa et un indice d'Enjeux. Le croisement de ces deux indices permet d'aboutir à un indice de Risque par unité de surface assimilée, dans cette étude, à une maille.

Fig. 221 : Étapes d'analyse du risque à partir d'indicateurs.



9.2.2- Choix de l'échelle spatiale

Le choix de l'échelle spatiale dans l'évaluation du risque est important. En effet, l'échelle d'analyse va déterminer le nombre et les types d'indicateurs utilisés qui vont dépendre de la disponibilité des données à une échelle définie (McLaughlin et Cooper, 2010). Dans le cadre de notre étude, l'évaluation du risque s'effectue au niveau local car c'est à cette échelle que les facteurs impliqués dans le risque d'érosion des falaises meubles peuvent être caractérisés (Drejza, 2010 ; Bernatchez et al., 2012). Les observations à partir des mesures menées à cette échelle offrent une plus grande résolution en termes de facteurs environnementaux et de caractéristiques socio-économiques (Birkmann, 2007). À cette échelle, il est effectivement plus facile de connaitre les caractéristiques de l'élément exposé (Leone, 2009) comme le nombre d'individus au sein d'une résidence ou la distance des établissements de secours les plus proches.

Afin de connaitre la variabilité spatiale du risque, un carroyage composé de mailles territoriales homogènes est utilisé sur les sites d'étude (Fig. 222). Ce carroyage est appliqué sur la largeur du territoire côtier compris entre la falaise meuble et la falaise morte ou la limite du versant fossilisé par les formations meubles. Le carroyage Carlitto, utilisé dans le cadre du projet OSIRISC (Marcel et al., 2018) est un maillage de 200 x 200 m correspondant à l'extraction, sur les territoires littoraux, du maillage produit par l'IGN pour la représentation des données statistiques de l'Institut National de la Statistique et des Études Économiques (INSEE) (https://www.insee.fr/fr/statistiques). Pour notre étude, ce maillage a été fractionné en mailles de plus petites dimensions - carreaux de 50 mètres de côté au lieu de 200 mètres - afin de l'adapter à la superficie des sites d'étude et à la variabilité rapide des évolutions des falaises meubles sur le linéaire côtier d'un même secteur. L'analyse du risque est réalisée seulement sur les mailles localisées sur les formations meubles qui ont été cartographiées précédemment (cf. chapitre 8) (Fig. 222). L'aléa érosion des falaises meubles n'existe effectivement qu'en présence des formations héritées.

Fig. 222 : Carroyage recouvrant l'étendue des formations meubles (en jaune), sur le site de Notigou, à Trédrez-Locquémeau.

9.2.3- Identification des indicateurs pertinents

D'après l'Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE, 2008), les indicateurs doivent obéir à un certain nombre de critères de qualité parmi lesquels : la pertinence politique en termes d'action publique, la qualité et la disponibilité des données, la comparabilité et la transparence. De plus, il est nécessaire de limiter le nombre d'indicateurs afin de garder l'indice opérationnel et garantir la reproductibilité de la méthode (Hénaff et Philippe, 2014). Le choix doit également se faire en évitant les redondances, par exemple des indicateurs proches qui reflètent les mêmes types d'enjeux (Del Río et Gracia, 2009 ; Klugman et al., 2011). Enfin, les indicateurs doivent être opérationnels autant pour les chercheurs que pour les gestionnaires. Ceci implique que l'accès aux données pour renseigner les indicateurs soit adapté selon les capacités techniques, financières et temporelles de l'utilisateur (Quillet, 2017).

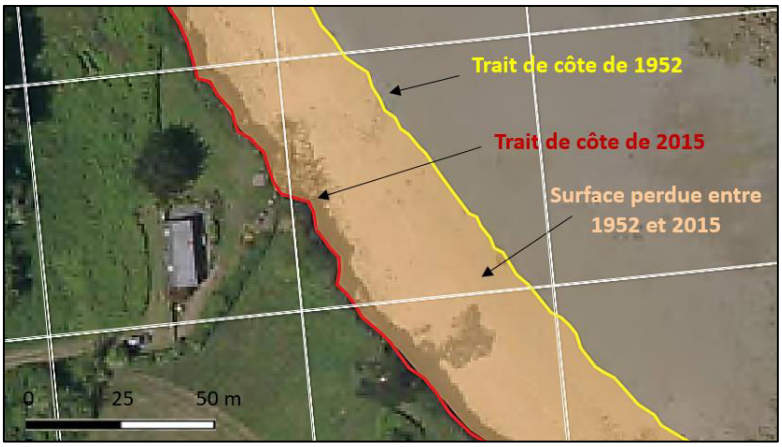
9.2.3.1- L'indice Aléa érosion

Dans le cadre du projet OSIRISC, l'indice Aléa érosion est obtenu par le biais d'indicateurs s'intéressant seulement à l'évolution de la côte (distance, surface et volume érodés annuellement). Contrairement à l'indice CVI, l'indice proposé dans le projet OSIRISC ne prend donc pas en compte les facteurs de prédisposition et les processus générateurs d'érosion car ils ne représentent pas l'aléa érosion, mais les causes (considérées par conséquent comme les éléments de forçage) de cet aléa. Ce choix méthodologique est également celui qui a été retenu par Dominguez et al. (2005) et par Drejza et al. (2015) afin d'évaluer la variabilité spatiale du risque d'érosion.

Ici, l'indice Aléa érosion est obtenu à partir d'une seule variable correspondant au taux de recul à moyen terme obtenu par la comparaison de photographies aériennes sur les sites d'étude (cf. chapitre 6). Il a été choisi de ne pas utiliser les valeurs d'évolution du trait de côte à long terme (ex : taux de recul séculaire) ni ceux obtenus sur le temps court (volumes annuels mesurés par photogrammétrie) car, dans le cadre d'une analyse du risque devant servir à faire avancer la réflexion sur les mesures de gestion et à appuyer les gestionnaires, l'échelle pluri-décennale intermédiaire parait la plus pertinente (Allain, 2012). En effet, le recul à long terme du littoral ne reflète pas nécessairement l'évolution récente des zones côtières et notamment l'anthropisation du rivage qui est venue amplifier les processus d'érosion (Hénaff et al., 2013). Le recul à court terme n'est pas non plus adapté car quelques années d'observation ne sont pas suffisantes pour évaluer la tendance et le recul représentatifs sur les prochaines décennies. Ces taux, évalués sur une très courte période, peuvent effectivement être fortement influencés par des événements intenses et rares (cf. chapitre 7).

Pour chaque maille (50 x 50 m), l'indice Aléa érosion correspond donc à la valeur moyenne du taux de recul calculée dans le carreau (Fig. 223). Ce taux correspond à la surface perdue au sein de la maille, pondérée par le linéaire côtier correspondant et par l'intervalle de temps étudié.

Fig. 223 : Intégration des surfaces perdues contenues dans le même carreau pour calculer un taux de recul moyen par maille.



9.2.3.2- L'indice Enjeux

L'indice Enjeux, défini dans le projet OSIRISC, est décomposé en trois sous-indices reflétant les différentes catégories d'enjeux : humains, économiques et structurels (Tab. 26). Parmi les 16 indicateurs d'enjeux proposés dans le projet OSIRISC, huit ont été retenus pour leur pertinence à évaluer l'implication des enjeux dans le risque d'érosion des falaises meubles et trois autres indicateurs ont été ajoutés (Annexe 14).

Parmi les **enjeux humains**, le *nombre d'habitants par maille* renseigne du risque associé à la présence de résidents permanents (Wu et al., 2002) tandis que la *part de résidences secondaires* et le *taux de fonction touristique* d'un territoire renseignent la vulnérabilité saisonnière (Morrow, 1999 ; Wu et al., 2002). Selon le guide méthodologique d'élaboration des PPRL (MEDDE, 2014), il est en effet préconisé de prendre en compte les populations touristiques dans l'évaluation des risques littoraux car elles sont moins familières des niveaux de risque auxquels elles peuvent être exposées.

Les **enjeux économiques** sont évalués en fonction du *nombre de bâtiments par maille* et de la *valeur moyenne par m² des habitations,* estimée à l'échelle de la commune. Ces indicateurs expriment le potentiel de perte de valeur immobilière (Wu et al., 2002). Ils sont fréquemment utilisés dans les indices d'enjeux car ils reflètent la demande croissante de biens sur le littoral, le caractère attractif de la mer ainsi que la rareté du foncier (Bolin et Stanford, 1991 ; Cutter et al., 2000 ; Créach, 2015). Parmi les enjeux économiques, la *part de surface agricole par maille* renseigne le potentiel de perte d'exploitation (Meur-Ferec, 2006) et le *nombre de travailleurs dans l'entreprise affectée* permet d'estimer le nombre d'employés qui pourraient potentiellement se retrouver au chômage technique si leur entreprise se trouve dans la zone d'aléa (Mileti, 1999 ; Kienberger et al., 2009).

Parmi les **enjeux structurels**, *la présence d'une route et son classement* (ex : communal, départemental) sont pris en compte car leur fréquentation, leur coût de remise en état et de construction peuvent différer remarquablement (McLaughlin et al., 2002 ; Del Río et Gracia, 2009 ; Kienberger et al., 2009 ; McLaughlin et Cooper, 2010). La *distance des établissements de secours* est également prise en considération car la proximité d'un centre de secours augmente la capacité de réaction des territoires lors de la survenue d'un aléa et participe donc à la réduction du risque (Kienberger et al., 2009). La *présence d'un sentier côtier* et *l'accès à la plage* sont également pris en compte car ils représentent des atouts en termes de fréquentation touristique (Meur-Ferec, 2006).

Les autres indicateurs proposés dans le projet OSIRISC et portant sur l'âge des résidents, la vulnérabilité structurelle du bâti (ex : *présence d'étages*) et la capacité d'accueil des établissements susceptibles d'abriter les populations sinistrées n'ont pas été retenus car ils ont été jugés non-pertinents pour étudier les enjeux liés au risque d'érosion des falaises meubles (Annexe 14). De même, la *part du linéaire côtier artificialisé* est un indicateur non retenu en raison de son ambivalence sur la vulnérabilité. En effet, la présence d'un ouvrage de défense peut aussi bien augmenter ou diminuer la vulnérabilité selon son efficacité de protection et le « faux sentiment de sécurité » qu'il induit (Guerrin et Bouleau, 2014).

Tab. 26 : Liste des indicateurs d'enjeux utilisés pour évaluer le risque d'érosion des falaises meubles sur les sites d'étude.

Type d'enjeu	Indicateur	Nature	Sources
Humain	Nombre d'habitants par maille	quantitatif	Enquête de terrain
	Part de résidences secondaires par maille	quantitatif	Enquête de terrain
	Taux de fonction touristique	quantitatif	INSEE
Économique	Nombre de bâtiments par maille	quantitatif	Orthophotographie IGN
	Valeur moyenne par m² des habitations	quantitatif	Sites immobiliers (OuestFrance.fr, MeilleursAgents.fr, NetVendeu.fr, Efficity.fr)
	Pourcentage de terres agricoles par maille	quantitatif	Orthophotographie IGN
	Nombre total de travailleurs dans l'(es) entreprise(s) affectée(s)	quantitatif	Enquête de terrain
Structurel	Classement de la route	qualitatif	OpenStreetMap.fr
	Accès à la plage	qualitatif	Enquête de terrain
	Présence d'un sentier côtier	qualitatif	Orthophotographie IGN et enquête de terrain
	Distance des établissements de secours	quantitatif	Geobretagne.fr et Viamichelin.fr

L'ensemble des indicateurs d'enjeux est renseigné au moyen de bases de données accessibles sur le site de l'INSEE, d'analyse d'orthophotographies IGN et d'enquêtes de terrain (Tab. 26). Des fiches méthodologiques réalisées dans le cadre du projet OSIRISC renseignent sur la méthode de collecte et de traitement des données (Hénaff, 2016). Deux exemples de fiche sont présentés en Annexe 15. L'ensemble des fiches réalisées dans le cadre de ce projet est disponible à l'adresse suivante : https://www-iuem.univ-brest.fr/pops/projects/osirisc-vers-un-observatoire-integre-des-risques-cotiers-d-erosion-submersion. Ces fiches permettent à quiconque, gestionnaires ou chercheurs, de s'approprier les indicateurs retenus afin d'évaluer leur impact sur le risque pour un territoire donné.

9.2.4- Calibrage des indicateurs

Les indicateurs ont été calibrés sur une échelle de 1 à 5 ; 1 correspondant à une forte réduction du risque et 5 correspondant à une très forte augmentation (Annexe 16). Ce même calibrage a été utilisé pour calculer des indices de risque ou de vulnérabilité dans de nombreux travaux (Abuodha et Woodroffe, 2006 ; Meur-Ferec et al., 2008 ; Fontaine et Steinemann, 2009 ; McLaughlin et Cooper, 2010) et a été repris dans le projet OSIRISC. L'échelle d'évaluation permet de s'affranchir des valeurs propres à chaque indicateur et facilite leur comparaison et leur combinaison (Weiss, 2018). Le calibrage des indicateurs permet ainsi de les agréger en un indice.

Pour l'indicateur *Taux de recul à moyen terme*, les classes ont été déterminées par une discrétisation basée sur l'observation de « seuils naturels » à partir de l'ensemble des taux de recul donnés par l'Indicateur National de l'Érosion côtière (INE) sur les secteurs à falaises meubles en Bretagne (Annexe 17). La discrétisation par seuils naturels permet de prendre en compte les discontinuités observables sur l'ensemble de la série. Par ailleurs, pour les portions de côte protégées par un ouvrage de défense,

l'indicateur *Taux de recul à moyen terme* correspond au taux de recul pluri-décennal mesuré avant l'installation de l'ouvrage.

Pour les indicateurs d'enjeux, les classes ont été établies sur des valeurs numériques, lorsque cela était possible. Pour les variables qui ne pouvaient être quantifiées, une approche semi-quantitative a été adoptée selon une échelle de contribution croissante à la vulnérabilité comme recommandé par Cooper et McLaughlin (1998). Pour les trois indicateurs qualitatifs, les classes ont été définies « à dire d'expert » (Tab. 26, Annexe 16). Pour les huit indicateurs quantitatifs, les classes s'appuient sur celles proposées dans le projet OSIRISC, définies par une discrétisation par quantile à partir des bases de données régionales comme celles qui sont présentes sur le site de l'INSEE (https://www.insee.fr/fr/statistiques). La discrétisation par quantile (1er quartile, médiane, 3e quartile et 9e décile) permet à la fois de préserver la distribution de la donnée source et de faire ressortir les valeurs extrêmes (Bouland, 2018).

9.2.5- Agrégation en indice

La pondération est parfois utilisée dans les analyses de risque afin de hiérarchiser les indicateurs selon une logique d'intensité croissante entre un minimum (faible impact de l'indicateur sur le risque ou la vulnérabilité) et un maximum (fort impact de l'indicateur sur le risque ou la vulnérabilité) (Fattal et al., 2007). Ici, les indicateurs n'ont pas été pondérés car le choix des pondérations est arbitraire et implique une certaine subjectivité (Doukakis, 2005 ; Szlafsztein et Sterr, 2007 ; Créach, 2015). Les indicateurs composant chaque indice ont donc un poids équivalent. Ainsi, c'est dans l'objectif de donner une même importance aux facteurs constitutifs de chaque indice que les indicateurs ne sont pas pondérés.

Le calcul d'indice nécessite de définir l'expression mathématique par laquelle les indicateurs vont être assemblés. Actuellement, il n'existe pas de consensus sur la méthode d'agrégation des indicateurs à utiliser. Tandis que McLaughlin et al. (2002) et ManiMurali et al. (2013) utilisent la moyenne des indicateurs pour calculer le CVI, de nombreux auteurs préfèrent utiliser la racine carrée du produit des indicateurs divisé par le nombre d'indicateurs (Gornitz, 1990 ; Szlafsztein et Sterr, 2007 ; Drejza et al., 2015 ; Pramanik et al., 2016).

Dans notre étude, la conversion de l'indicateur d'aléa vers un indice ne pose aucun problème dans la mesure où cette composante est évaluée par le biais d'une seule variable. L'**indice Aléa** est donc équivalent à la classe de l'indicateur *Taux de recul à moyen terme,* déterminée pour chaque maille.

$$\mathbf{Indice}_{\text{Aléa érosion}} = \text{Classe}\left(\text{Indicateur}_{\text{Taux de recul à moyen terme}}\right)$$

Pour les enjeux, le choix de la méthode d'agrégation d'indicateurs en indice est effectué en comparant les résultats de différentes méthodes et en retenant celle qui est à la fois conforme à l'expertise et la plus proche du ressenti (Fig. 224). Cette approche, basée sur les tests et l'observation, est couramment utilisée dans les analyses employant des indicateurs afin de retenir la méthode d'agrégation la plus adaptée (Del Río et Gracia, 2009 ; Bouland, 2018). Cinq expressions mathématiques ont été testées pour le calcul des indices :

1) **La moyenne** des indicateurs :

$$\boldsymbol{Indice} = \frac{\prod_{i=1}^{n} x_i}{n}$$

2) **La racine carrée des produits** des indicateurs :

$$\boldsymbol{Indice} = \sqrt{\prod_{i=1} x_i}$$

3) **Le maximum** des indicateurs **:**

$$\boldsymbol{Indice} = Max_{i=1}\,(x_i)$$

4) **La racine carrée de la somme des indicateurs à la puissance 2**, divisée par le nombre d'indicateurs :

5) **La racine cubique de la somme des indicateurs à la puissance 3**, divisée par le nombre d'indicateurs :

$$\boldsymbol{Indice} = \sqrt[2]{\frac{\sum_{i=1}^{n} x_i^2}{n}} \qquad \boldsymbol{Indice} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^{n} x_i^3}{n}}$$

Avec x *: indicateur ;* n *: nombre d'indicateurs.*

Les outils d'automatisation présents dans le logiciel QGIS™ sont utilisés afin de faciliter le calcul d'indices pour chaque maille et de tester les différentes méthodes d'agrégation. Ils ont servi à calculer les trois sous-indices d'enjeux (humains, économiques et structurels) et l'indice global d'Enjeux (Tab. 27). Le choix d'agrégation influençant directement l'indice et sa représentation cartographique (Créach, 2015 ; Bouland, 2018), les effets des différentes méthodes d'agrégation ont été analysés par le biais de l'étendue des valeurs (Tab. 27) et de leur représentation cartographique (Fig. 224).

Tab. 27 : Étendue des valeurs obtenues pour chaque méthode d'agrégation testée sur l'ensemble des mailles des six sites d'étude.

		Sous-indices			Indice
		Enjeux humains	Enjeux économiques	Enjeux structurels	Enjeux totaux
Moyenne (1)	**Min**	1	1	1,6	1,1
	Max	4	2,7	3	2,8
Racine des produits (2)	**Min**	0,8	0,5	0,6	0,2
	Max	3,5	3,1	3,5	1,3
Maximum (3)	**Min**	1	1	2	1
	Max	5	5	5	5
Racine des indicateurs à la puissance 2 (4)	**Min**	1	1	1,3	1,1
	Max	4,1	2,9	3,6	3,2
Racine des indicateurs à la puissance 3 (5)	**Min**	1	1	1,4	1,2
	Max	4,2	3,2	3,8	3,5

Fig. 224 : Effets des méthodes d'agrégation sur la représentation cartographique des indices sur le site de Notigou, à Trédrez-Locquémeau.

Méthode d'agrégation	Enjeux humains	Enjeux économiques	Enjeux structurels	Enjeux totaux
Moyenne (1)				
Racine des produits (2)				
Maximum (3)				
Racine des indicateurs à la puissance 2 (4)				
Racine des indicateurs à la puissance 3 (5)				

La **moyenne des indices** (1) a un effet de lissage des valeurs et ne permet pas de mettre en évidence la présence de forts enjeux dans les zones à risque. Certaines mailles sont effectivement classées en vulnérabilité faible alors qu'elles englobent des habitations (Fig. 224). De plus, la valeur maximale de l'indice d'enjeux sur l'ensemble des mailles étant de 2,8, ceci implique une faible variabilité spatiale de l'indice (Tab. 27).

La **racine des produits** (2) des indicateurs a un effet de minimisation du risque dès lors qu'un des facteurs est très faible (Tab. 27). Par exemple, sur le site de Trédrez-Locquémeau, les enjeux économiques

sont « très faibles » par cette méthode, sur toute la zone, en raison de l'absence d'entreprise affectée (Fig. 224).

La **valeur maximale** (3) des indicateurs a l'effet inverse de la racine en exagérant le risque dès lors qu'un des facteurs est fort. Sur le site de Trédrez-Locquémeau, l'indicateur *Part de résidences secondaires* tend à augmenter fortement les valeurs d'enjeux humains (Fig. 224).

La **racine des indicateurs à la puissance 2** (4) se rapproche des résultats obtenus par l'utilisation de la moyenne. La valeur maximale de l'indice d'enjeux est légèrement supérieure à celle obtenue par la moyenne mais les enjeux restent encore sous-évalués (Tab. 27). Plusieurs mailles sont encore classées en vulnérabilité faible alors qu'elles englobent des habitations (Fig. 224).

Enfin, la **racine des indicateurs à la puissance 3** (5) a un effet de rehaussement des facteurs forts sans toutefois les exagérer. Dans les mailles où se trouvent plusieurs habitations, les enjeux humains sont classés en vulnérabilité forte, tandis que dans les secteurs moins urbanisés, les enjeux sont faibles à modérés. Les représentations cartographiques issues de cette dernière méthode d'agrégation apparaissent comme les plus proches de la réalité terrain et sont un compromis entre les méthodes qui tendent à sous-évaluer les enjeux (e.g. la moyenne et la racine carrée des produits) et celles qui surévaluent les enjeux (e.g. le maximum).

L'utilisation des puissances a donc tendance à rehausser les valeurs moyennes des indicateurs. Des puissances de 4, de 5 voire supérieure à 5 pourraient être utilisées mais l'objectif est de rester le plus proche de la réalité et de ne pas surestimer le risque. La méthode d'agrégation des indicateurs par la racine cubique a donc été retenue pour évaluer et mettre en évidence les enjeux sur les sites d'étude. La formule retenue pour calculer les **sous-indices d'enjeux humains, économiques et structurels** pour chaque maille est donc la suivante :

$$\boldsymbol{Sous\ indice} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^{n} x_i^3}{n}}$$

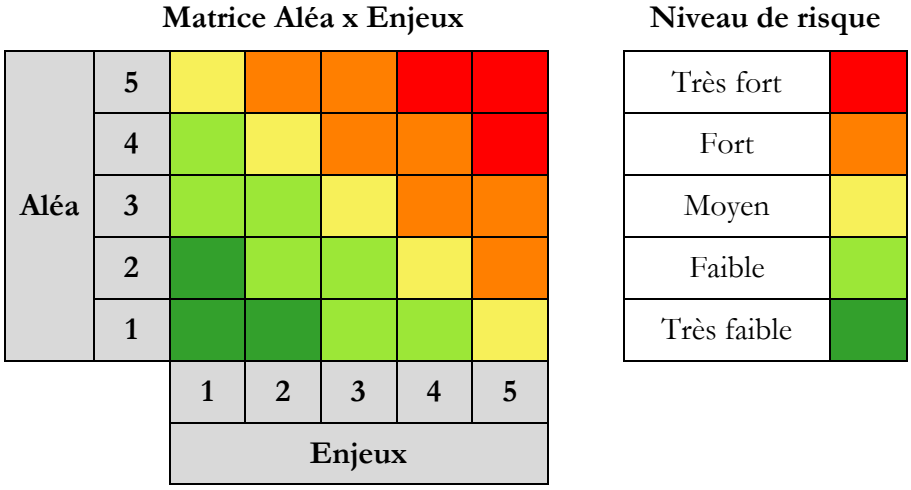
Avec x *: indicateur de la composante ;* n *: nombre d'indicateurs de la composante.*

L'**indice d'Enjeux global,** pour chaque maille, est obtenu par la racine cubique des trois sous-indices d'enjeux :

$$\boldsymbol{Indice_{EnjeuxTot}} = \sqrt[3]{\frac{\left(\mathrm{Indice_{EnjeuxHumains}}\right)^3 + \left(\mathrm{Indice_{EnjeuxÉconomiques}}\right)^3 + \left(\mathrm{Indice_{EnjeuxStructurels}}\right)^3}{3}}$$

Les valeurs d'indices d'Aléa et d'Enjeux obtenues pour chaque maille sont ensuite reportées sur une matrice qui permet d'identifier le niveau de risque associé (Fig. 225). Ce type de matrice a été utilisé dans de nombreux travaux pour évaluer le niveau de risque à des aléas naturels (Muralidhar et al., 2012 ; Jaboyedoff et al., 2014 ; van Westen et al., 2014 ; Haimes, 2015). La matrice de risque est un outil également utilisé pour visualiser les effets et les conséquences des mesures de réduction de risque (Jaboyedoff et al., 2014).

Fig. 225 : Matrice d'évaluation du risque selon les valeurs des indices d'Aléa et d'Enjeux.



9.3- Résultats

9.3.1- Variabilité spatiale du risque sur chaque site

L'échelle de représentation des cartes est au 1/2 000. L'échelle de couleurs a été limitée à cinq niveaux afin que les cartes restent facilement lisibles (Lahousse et Piédanna, 2000). Elle correspond à la même échelle de calibrage, de 1 à 5, utilisée pour les indicateurs.

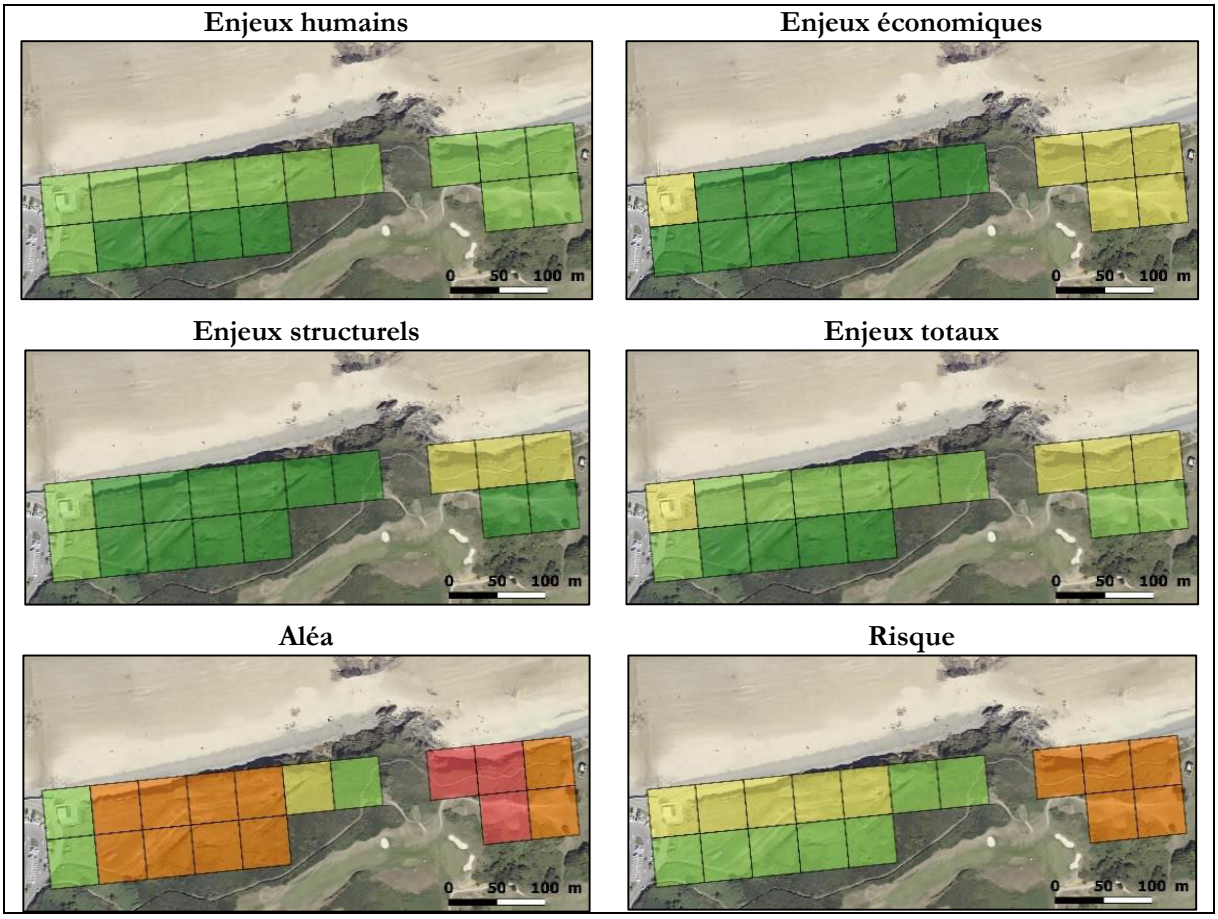
9.3.1.1- Pléneuf-Val-André

Sur le site des Vallées-Nantois, à Pléneuf-Val-André, les enjeux humains sont faibles à très faibles en raison d'une absence d'habitation (Fig. 226). Les enjeux humains, légèrement plus élevés au niveau des sommets et des pieds de falaise sont liés à la présence du sentier côtier et à la fréquentation touristique de la commune. Les enjeux économiques à l'ouest s'expliquent par la présence d'une cale et d'un parking alors que ceux localisés à l'est sont liés à la présence du terrain de golf. Les enjeux structurels sont faibles sur l'ensemble du site excepté à l'est de la pointe de Nantois où se trouve un sentier côtier qui ne peut pas être facilement déplacé. En effet, la proximité du terrain de golf avec le sentier côtier empêche de déplacer ce dernier plus en arrière du fait de la trajectoire des balles partant du trou n°11 du parcours, situé sur le point culminant du versant. La trajectoire de ces balles de golf passerait au-dessus du sentier, ce qui pourrait représenter un danger pour les randonneurs empruntant le chemin côtier.

La variabilité spatiale du risque sur le site est très marquée (Fig. 226). Tandis qu'à l'ouest, le risque d'érosion est faible à modéré, à l'est, le risque d'érosion est fort. Ce niveau de risque élevé, à l'est, s'explique non seulement par un aléa d'érosion plus fort mais aussi par la concentration des enjeux dans ce secteur (présence du golf et du sentier côtier).

Le recul des falaises à l'est, au niveau du secteur de Nantois, préoccupe actuellement la commune car l'érosion du terrain de golf pourrait affecter plusieurs greens ce qui aurait directement un impact sur l'activité économique de l'entreprise et sur l'attractivité touristique de la commune. De plus, la difficulté de reculer le sentier côtier situé actuellement à quelques mètres du bord de falaise pose également problème à la commune.

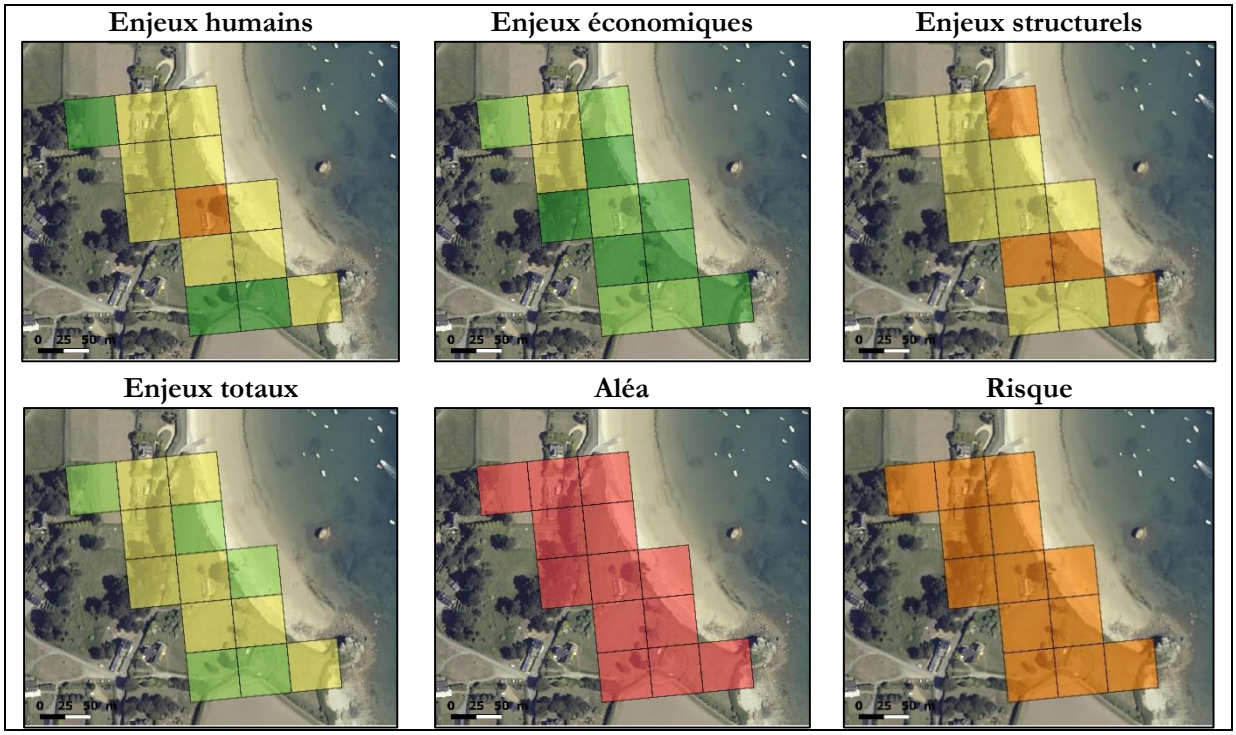
Fig. 226 : Variabilité spatiale des indices d'enjeux, d'aléa et du risque d'érosion sur le site des Vallées-Nantois, à Pléneuf-Val-André.



9.3.1.2- Plougrescant

Sur le site de Pors-Hir, à Plougrescant, les enjeux humains sont modérés à fort en sommet de falaise du fait de la présence de résidents et du fort taux touristique de la commune (Fig. 227). Les enjeux économiques se localisent principalement au nord du site et sont liés à la présence d'activités agricoles et ostréicoles. Les enjeux structurels forts à modérés sur le site sont dus à la distance du centre de secours le plus proche (supérieure à 16 min) et à la présence d'infrastructures (cale et route). Ces infrastructures qui sont fréquemment endommagées lors des événements météo-marins extrêmes (Le Quellec, 2015) sont importantes pour la commune car elles permettent l'accès à la plage et au site touristique du Gouffre. De plus, elles sont utilisées fréquemment par une entreprise d'ostréiculteurs qui possède un parc à huîtres à environ 500 mètres de la plage. L'aléa d'érosion fort sur l'ensemble du site, lié au recul chronique depuis plusieurs dizaines d'années (cf. chapitre 6), amène à un niveau de risque fort sur l'ensemble de la zone (Fig. 227).

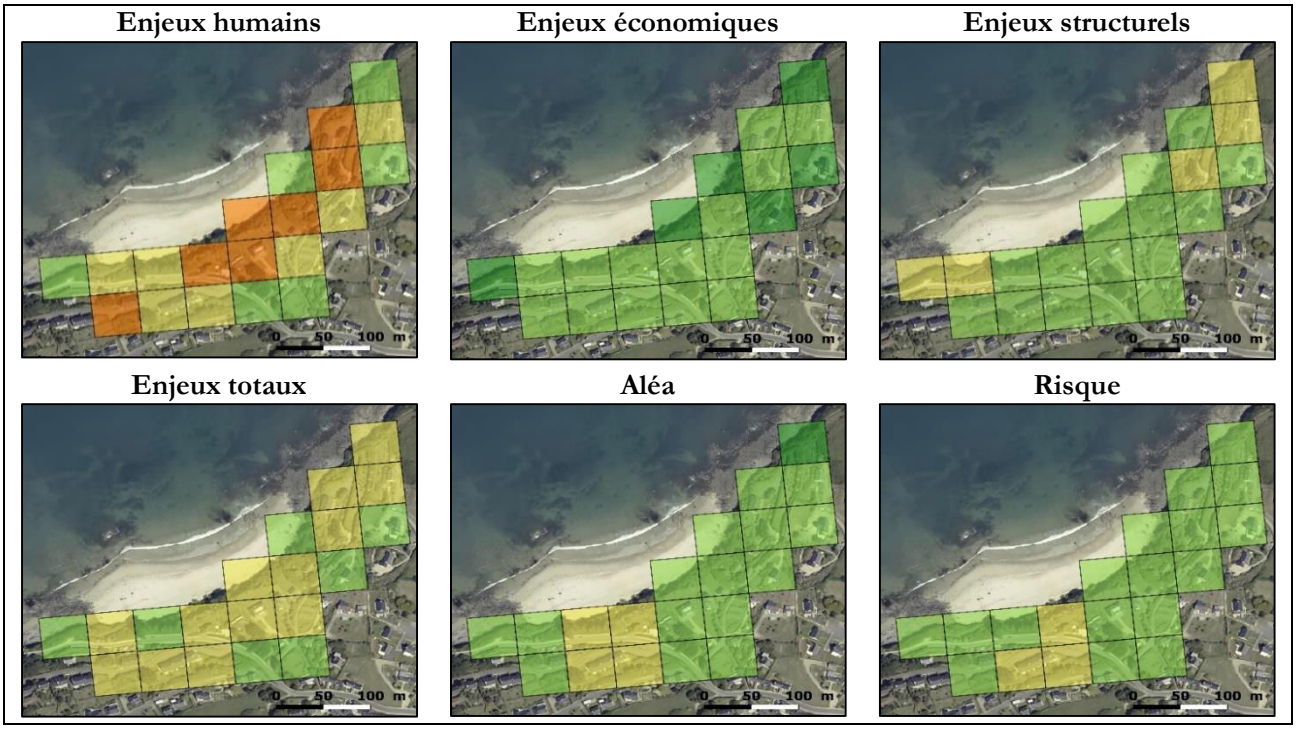
Fig. 227 : Variabilité spatiale des indices d'enjeux, d'aléa et du risque d'érosion sur le site de Plougrescant.



9.3.1.3- Trédrez-Locquémeau

Sur le site de Notigou, à Trédrez-Locquémeau, les enjeux humains sont forts en raison d'une forte urbanisation en sommet de falaise (Fig. 228). À l'inverse, du fait de l'absence d'entreprise, les enjeux économiques sont relativement faibles. Les enjeux structurels sont également faibles sur l'ensemble du site excepté aux extrémités ouest et est, en raison de la présence d'un sentier côtier. L'aléa d'érosion étant globalement faible, le risque est faible sur la totalité du site, excepté dans sa partie centrale où l'aléa est modéré et où se concentrent des habitations.

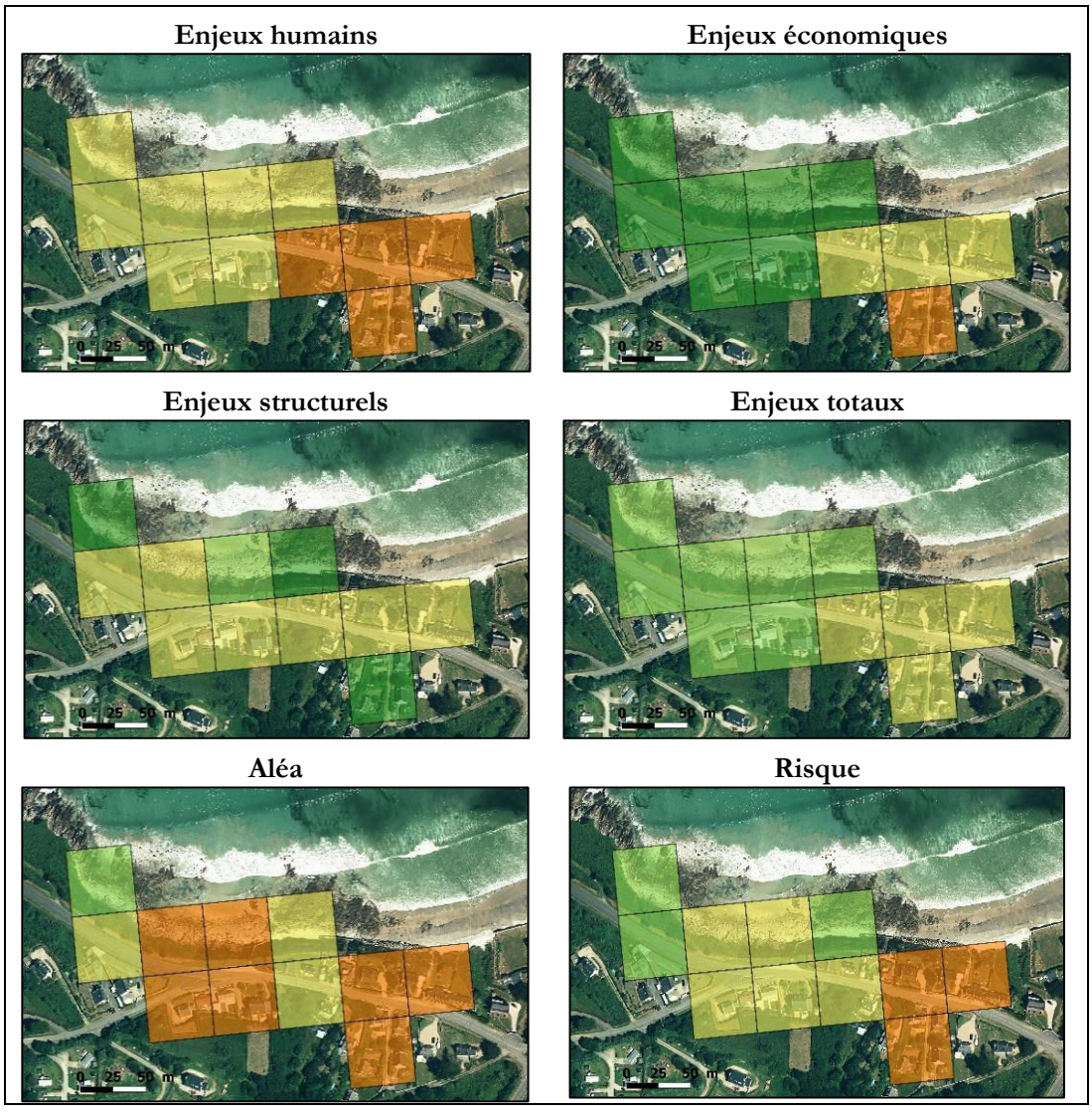
Fig. 228 : Variabilité spatiale des indices d'enjeux, d'aléa et du risque d'érosion sur le site de Notigou.



9.3.1.4- Locquirec

Le site du Moulin de la Rive, à Locquirec, présente des enjeux humains forts dans sa partie est, en raison de la présence d'habitations en arrière de la falaise et de la forte proportion de résidences secondaires (Fig. 229). En effet, plus de 90 % des résidences sur ce site sont occupées seulement l'été ou durant les vacances scolaires. De plus, le taux de fonction touristique est relativement élevé dans la commune, impliquant une forte augmentation de la population durant la saison estivale. La présence d'une route départementale en sommet de falaise contribue à augmenter les enjeux structurels sur ce site. La variabilité spatiale du risque est marquée entre la partie est, fortement urbanisée et caractérisée par un risque d'érosion fort, la partie centrale avec un niveau de risque modéré et l'extrémité ouest caractérisée par un niveau de risque faible (Fig. 229).

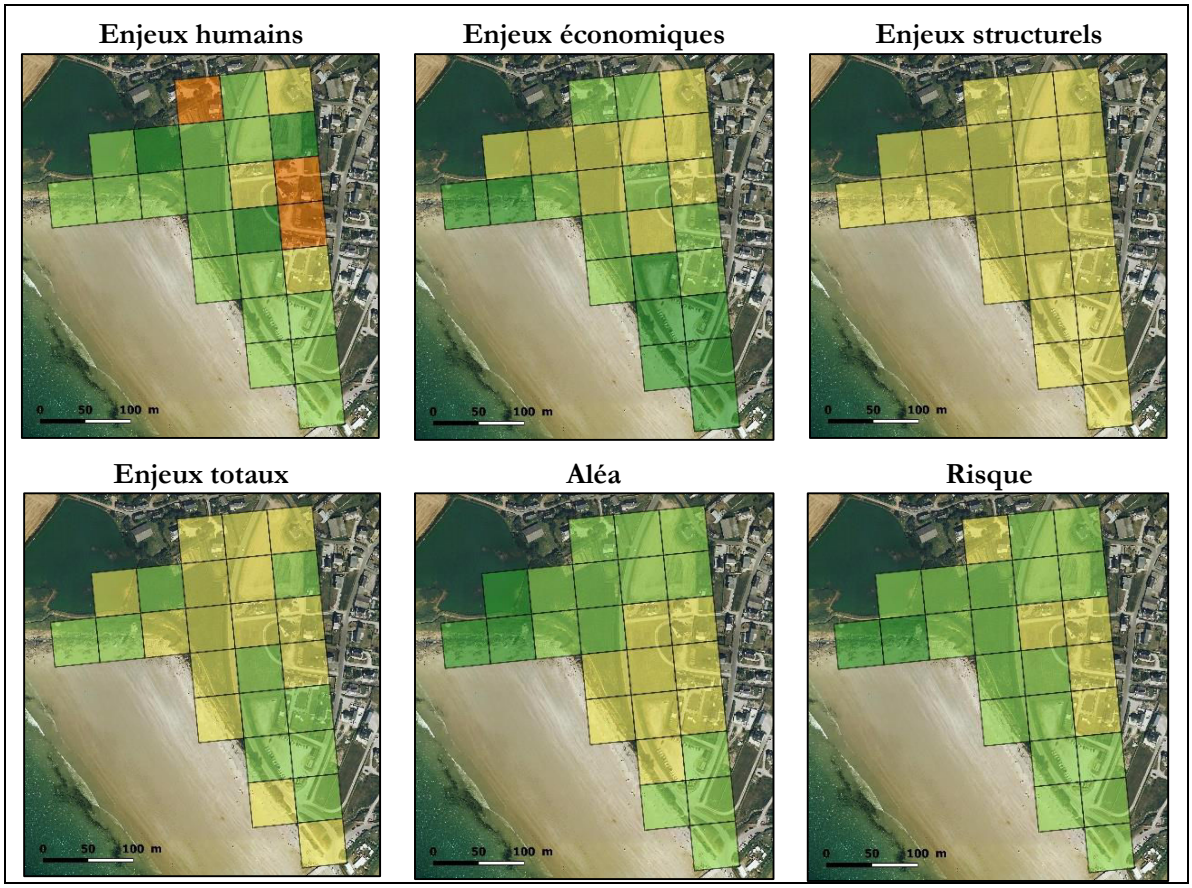
Fig. 229 : Variabilité spatiale des indices d'enjeux, d'aléa et du risque d'érosion sur le site du Moulin de la Rive, à Locquirec.



9.3.1.5- Telgruc-sur-Mer

Sur le site de l'anse du Caon, à Telgruc-sur-Mer, les enjeux humains forts se concentrent essentiellement au nord-ouest du site où se trouvent des lotissements (Fig. 230). Les enjeux économiques se localisent principalement au nord en raison de la présence d'habitations et de terrains agricoles. Les enjeux structurels qui apparaissent modérés sur l'ensemble du site s'expliquent par la distance du centre de secours le plus proche, situé à 17 minutes du site. Au niveau de ce secteur, le risque varie d'un niveau très faible, à l'extrémité ouest, à un niveau modéré à l'est où se concentrent des habitations.

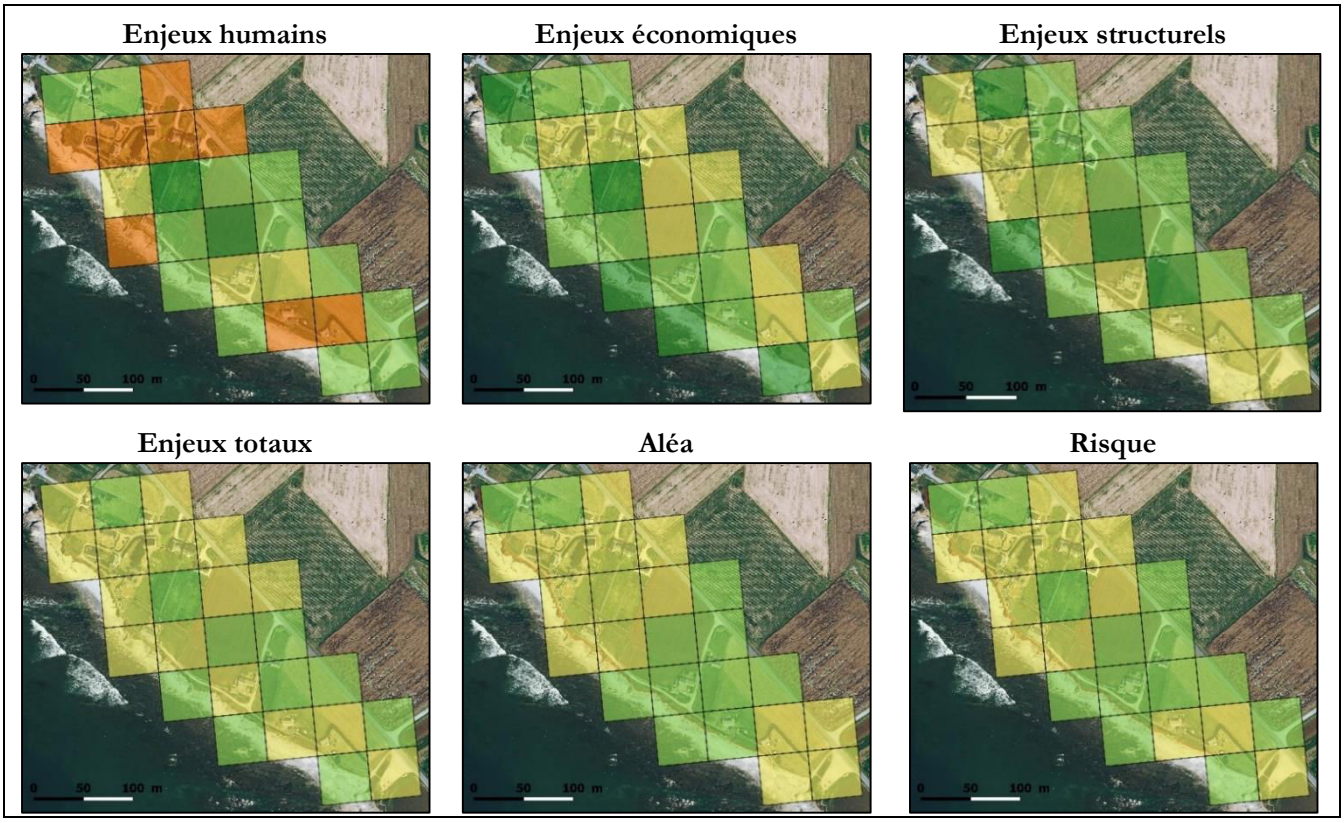
Fig. 230 : Variabilité spatiale des indices d'enjeux, d'aléa et du risque d'érosion sur le site de l'anse du Caon, à Telgruc-sur-Mer.



9.3.1.6- Plozévet

Sur le site de Poulbréhen, à Plozévet, les enjeux humains sont forts en raison de la forte proportion de résidences secondaires (Fig. 231). Les enjeux économiques sont davantage marqués dans les terres du fait de la présence d'exploitations agricoles. Les enjeux structurels sont modérés en sommet de falaise en raison de la présence d'un sentier côtier qui peut être difficilement déplacé car il longe déjà la limite des propriétés. Ce sentier est le premier enjeu affecté par l'érosion en raison de sa proximité avec le bord de falaise et il a fait l'objet d'un arrêté municipal d'interdiction de passage, à la suite des tempêtes de février 2014. Le recul des falaises meubles a rendu cette partie du littoral trop dangereuse pour les promeneurs et la servitude de passage est actuellement suspendue sur cette portion du trait de côte (Tanguy, 2018). L'aléa d'érosion étant faible à modéré sur ce site, le risque est modéré dans les secteurs concentrant les habitations et il est faible dans les autres secteurs.

Fig. 231 : Variabilité spatiale des indices d'enjeux, d'aléa et du risque d'érosion sur le site de Poulbréhen, à Plozévet.



Sur les six sites d'étude, le niveau de risque est variable spatialement et est dépendant non seulement du niveau d'aléa mais aussi des différents enjeux présents sur le territoire. Les niveaux de risque les plus élevés correspondent, souvent, à des secteurs urbanisés.

La représentation en carte des indices permet de connaitre, ici, à grande échelle, la variabilité spatiale des enjeux menacés par l'érosion des falaises meubles. Elle permet donc de définir finement les zones d'action prioritaires, là où se concentrent les enjeux potentiels (Leone, 2007). Le découpage par maille donne, de plus, la possibilité d'étudier l'impact des différents facteurs sur le risque d'érosion d'un site. L'utilisation de la même méthode sur l'ensemble des sites rend également possible la comparaison des situations, ce qui représente un précieux outil pour les gestionnaires, afin de prioriser les actions sur un territoire étendu.

9.3.2- Comparaison des enjeux et des niveaux de risque inter-sites

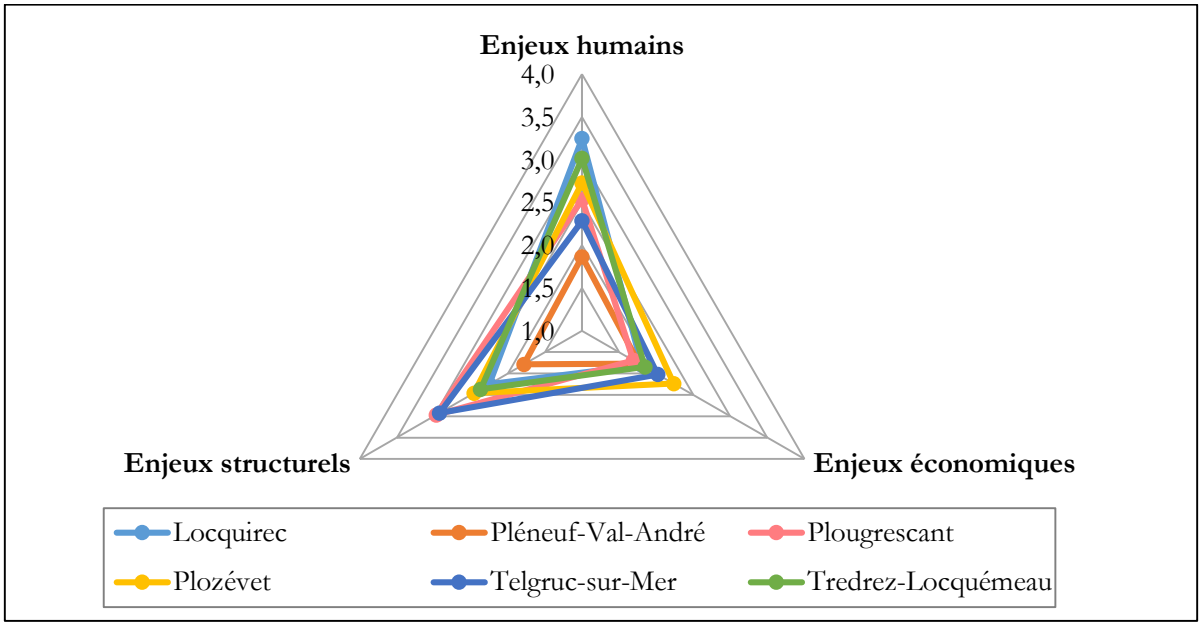
L'utilisation des indices présente l'intérêt de pouvoir comparer, de manière relativement simple, les situations entre plusieurs sites. Afin de connaitre les profils d'enjeux sur chaque site d'étude et de les comparer, la valeur obtenue pour les indices de chaque maille a été moyennée par site (Tab. 28).

Tab. 28 : Valeur moyenne des indices d'enjeux, d'aléa et de risque sur les six sites d'étude.

Site d'étude	Enjeux humains	Enjeux économiques	Enjeux structurels	Enjeux totaux	Aléa	Risque
Pléneuf-Val-André	1,9	1,8	1,8	1,9	3,8	2,9
Plougrescant	2,5	1,7	3,0	2,6	5,0	4,0
Trédrez-Locquémeau	3,0	1,8	2,4	2,6	2,2	2,1
Locquirec	3,2	1,8	2,3	2,7	3,5	3,0
Telgruc-sur-Mer	2,3	2,0	2,9	2,5	2,3	2,2
Plozévet	2,7	2,2	2,5	2,6	2,6	2,5

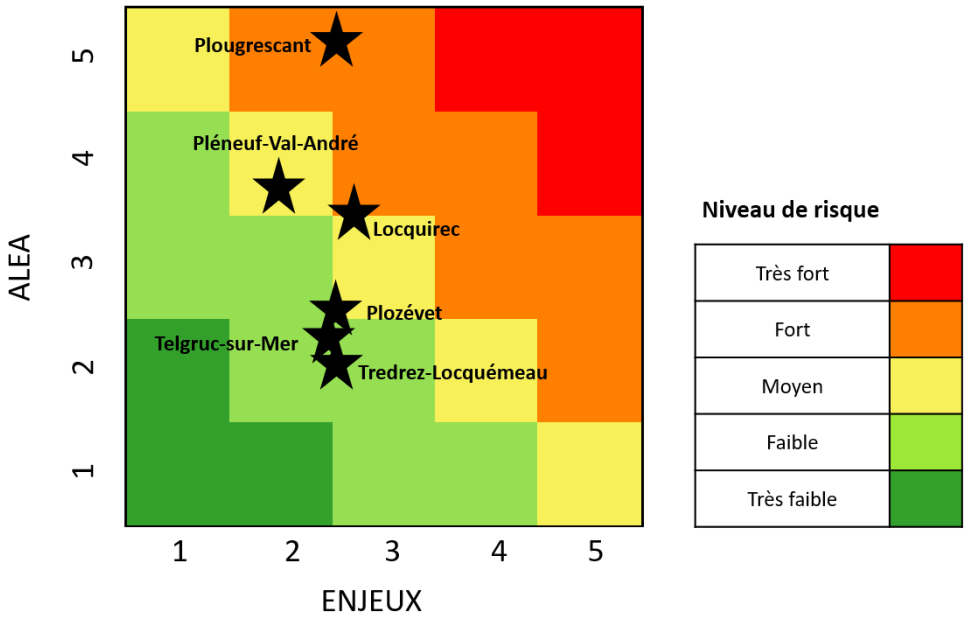
La représentation des trois catégories d'enjeux au sein d'un radar triangulaire fait apparaitre des profils différents selon les sites (Fig. 232). Les sites de Telgruc-sur-Mer et de Plougrescant sont caractérisés par des enjeux structurels plus forts que sur les autres sites, notamment en raison de leur situation « rurale » qui implique une plus grande distance aux centres de secours et augmente leur durée d'intervention. Les sites de Locquirec et de Trédrez-Locquémeau sont ceux qui possèdent les enjeux humains les plus forts en raison de la forte urbanisation des sommets de falaise. Le site de Plozévet représente le site où les enjeux économiques sont les plus marqués en raison de la présence de grandes surfaces agricoles. Enfin, le site de Pléneuf-Val-André se différencie nettement des autres sites par un profil d'enjeux beaucoup plus faible s'expliquant par des enjeux humains, économiques et structurels moindres. Bien que le prix du foncier soit élevé sur cette commune, les enjeux économiques sont faibles car le site d'étude est dépourvu d'habitations. Cette représentation permet d'identifier quel(s) type(s) d'enjeux fait augmenter le niveau de risque sur un site. Toutefois, il est important de noter que le nombre de mailles par site qui est fonction de l'étendue des formations meubles, à tendance à lisser les valeurs d'enjeux.

Fig. 232 : Profils « radars » des enjeux pour les six sites d'étude.



Les indices moyennés d'Enjeux et d'Aléa sur chaque site (Tab. 28) sont ensuite reportés sur la matrice de risque afin d'avoir un aperçu des différents niveaux de risque (Fig. 233). Les six sites d'étude se répartissent alors selon trois niveaux de risque : un niveau de risque faible pour les sites de Trédrez-Locquémeau, de Telgruc-sur-Mer et de Plozévet, un niveau de risque moyen pour les sites de Pléneuf-Val-André et de Locquirec et un niveau de risque fort pour le site de Plougrescant. Toutefois, il est important de rappeler que, pour chaque site, des mailles à haut niveau de risque existent et qu'ici, c'est l'ensemble des mailles sur chaque site qui est considéré.

Fig. 233 : Niveaux de risque des sites d'étude identifiés dans la matrice Aléa vs Enjeux.



De plus, il est à noter, à nouveau, que la moyenne de l'ensemble des indices d'enjeux sur un site conduit à un lissage des valeurs et à une faible variabilité de l'indice entre les sites (Tab. 28). L'indice d'Enjeux sur les six sites est effectivement compris entre 1,9 et 2,7 tandis que l'indice d'Aléa est compris entre 2,2 et 5. L'indice d'Enjeux variant peu, les niveaux de risque entre les sites se différencient, ici, notamment par la valeur de l'indice d'Aléa (Fig. 233).

Les indices de risque permettent d'obtenir une vision générale de la situation d'un site et permettent de la comparer avec d'autres sites. Toutefois, il est important de noter que les indices de risque peuvent également biaiser les comparaisons. En effet, le poids de l'aléa et des enjeux n'étant plus différenciable, deux situations différentes peuvent présenter la même valeur d'indice (Meur-Ferec, 2006 ; ADEME, 2013 ; Renard et Soto, 2015). Les sites de Pléneuf-Val-André et de Locquirec possèdent effectivement un indice de Risque comparable (respectivement 2,9 et 3,0) (Tab. 28) alors que leur situation au regard des enjeux et de l'aléa diffère. La représentation des niveaux de risque par l'intermédiaire de la matrice Aléa versus Enjeux (Fig. 233) se révèle être un bon outil pour effectuer cette distinction.

La matrice de risque permet également d'identifier quelle composante (aléa et/ou enjeux) fait augmenter le niveau de risque sur un territoire et donc savoir sur quel élément agir. Que leur représentation soit sous forme cartographique ou sous forme de diagrammes, les indices représentent donc un outil efficace afin de prioriser les actions sur un site donné et de réfléchir à des mesures de prévention et/ou de protection adaptées.

9.4- Discussion

Limites de la méthode

La méthodologie présentée dans ce chapitre offre une évaluation spatialisée fine des risques potentiels liés au recul des falaises meubles. Toutefois, cette méthodologie requiert, au préalable, de connaitre la localisation des formations meubles sur les versants. Or, bien que les cartes géologiques du BRGM au 1/ 50 000 donnent une information sur l'étendue de certaines formations superficielles, celle-ci n'est pas suffisante pour une exploitation à une échelle plus locale. Il est donc nécessaire que les formations meubles soient cartographiées finement par des observations de terrain car l'évaluation des

risques et des enjeux menacés est tributaire de la capacité à identifier la zone d'aléa (Maurizot et Lafoy, 2001 ; Peter-Borie et al., 2010).

De plus, la résolution fine de l'analyse (mailles de 50 x 50 m) demande une grande précision spatiale des données et, par conséquent, du temps pour réaliser des observations de terrain et des enquêtes auprès des habitants et des élus pour disposer de l'information (Tab. 26). Incontestablement, le *nombre de résidents par maille* est l'indicateur le plus difficile à renseigner mais, bien que cette variable n'est pas communément utilisée (Cutter et al., 2003), la plupart des analyses du risque côtier reconnait l'importance de cette donnée (Cooper et McLaughlin, 1998).

Les indicateurs qui ont été définis, ici, à une échelle locale, ne peuvent être utilisés pour évaluer le risque d'érosion sur des échelles spatiales beaucoup plus étendues, comme l'échelle départementale ou régionale par exemple. L'utilisation d'un indicateur est effectivement souvent limitée à l'échelle spatiale sur laquelle il a été défini (Cooper et McLaughlin, 1998). Par exemple, le *taux de recul à moyen terme par maille* et la *distance des établissements de secours* ne conviendraient pas pour une analyse des risques sur des échelles supra-communales. Toutefois, la variabilité spatiale du risque marquée sur certains sites montre la nécessité d'analyser l'aléa et les enjeux de manière très locale. L'échelle spatiale fine permet de fournir des informations suffisantes pour comprendre les niveaux de risque. L'échelle d'analyse est donc adaptée pour soutenir les décisions et les mesures de gestion pouvant être entreprises par les communes.

Le maillage utilisé ici est adapté à la superficie des sites d'étude mais, pour faciliter l'accès aux données et réduire le temps nécessaire à l'évaluation, des mailles légèrement plus larges, de 200 mètres de côté, comme celles utilisées dans le projet OSIRISC, peuvent être utilisées. De nombreuses données de l'INSEE sont effectivement définies à cette échelle ce qui représente un avantage pour disposer facilement des informations. La taille des mailles peut donc être adaptée à l'espace étudié, tout en restant dans une échelle locale. Toutefois, les mailles ne devront excéder 500 mètres de côté pour éviter un rendu imprécis qui amènerait à des résultats inexploitables (Renard et Soto, 2015).

Indicateur utilisé pour l'aléa

Le principe d'utiliser seulement le taux de recul à moyen terme (années 1950-2015) pour obtenir un indice d'Aléa présuppose que les conditions qui ont engendré l'érosion dans le passé sont toujours les mêmes de nos jours et seront également similaires dans le futur (Drejza, 2010). Or, ces taux historiques sous-estiment souvent l'aléa et par conséquent les niveaux de risque (Griggs, 1994 ; Teixeira, 2006 ; Bernon et al., 2016). Ceci est lié notamment à l'accélération de l'érosion qui est observée depuis la fin du 20^{e} siècle (cf. chapitre 6). L'évolution du stade de dénudation des falaises meubles peut également provoquer des changements dans la vitesse de recul. Mais, les taux d'érosion récents à disposition ne sont pas représentatifs car, trois ans de mesure représentent une période d'analyse trop courte. De même, les taux de recul séculaires ne sont pas considérés comme représentatifs car ils reflètent une période où le contexte sédimentaire (ex : faible exploitation des sédiments marins) était certainement différent et où l'évolution de la côte était peu influencée par les facteurs anthropiques. Il est donc important d'avoir conscience que l'aléa et le niveau de risque peuvent être, ici, sous-estimés, notamment au regard des changements qui auront lieu sur les côtes durant le prochain siècle mais qui ne peuvent être prédits simplement (Bird, 2011). La solution serait donc de compléter l'indice Aléa par un indicateur de taux de recul à court terme, lorsque les mesures seront disponibles sur une dizaine d'années, et de les actualiser tous les cinq à dix ans.

Indicateurs utilisés pour les enjeux

D'après Meyer (2013) et Cogswell et al. (2018), l'évaluation d'un indice nécessite de limiter le nombre de ses constituants. En effet, plus l'indice est composé d'indicateurs, plus son interprétation devient

complexe. Il apparait donc nécessaire de limiter au maximum le nombre d'indicateurs pour établir un indice. Dans l'étude, le calcul de l'indice d'Enjeux s'appuie sur 11 indicateurs, ce qui est acceptable au vu de la diversité des enjeux humains, économiques, sociaux-culturels, écologiques et politiques présents sur les littoraux (Robert et Melin, 2015).

Parmi les enjeux économiques, l'indicateur *valeur moyenne par m² des habitations* est renseigné par l'intermédiaire de plusieurs sites d'estimation de valeur immobilière communale (Tab. 26). Il peut donc y avoir un biais entre cette estimation et le prix réel des transactions finales. Néanmoins, depuis le 24 avril 2019, le Ministère de l'économie a rendu public l'ensemble des transactions immobilières des cinq dernières années via l'application Etalab (https://app.dvf.etalab.gouv.fr/). L'utilisation de ces données, en se basant sur les transactions dans les zones d'étude, permettrait de se rapprocher au mieux de la valeur réelle des habitations.

La présence de réseaux électriques, d'adduction d'eau et téléphoniques n'a pas été prise en compte dans l'étude pour les mêmes raisons que lors de la cartographie des enjeux (cf. chapitre 6), c'est-à-dire du fait de la difficulté d'accès à ces données et de leur caractère parfois confidentiel. La présence de patrimoine (historique, architectural ou naturel) n'a pas non plus été prise en compte dans l'analyse en raison de la difficulté à leur attribuer une valeur. Prigent (2001) montre que le patrimoine dépasse effectivement la simple valeur d'usage qui affecte la plupart des biens ordinaires. La difficulté vient également des multiples définitions données au patrimoine et de la question des éléments à considérer. Qu'est-ce que le patrimoine ? Représente-t-il seulement des objets rares et particuliers ? Ou des éléments qui sont des témoins de l'histoire ? Alors, pouvons-nous considérer qu'une falaise meuble représente un patrimoine dans la mesure où elle renferme une mémoire géologique, la mémoire de la formation des matériaux, leur dépôt et leur évolution au grés des climats passés ? La Réserve naturelle des sites géologiques de la presqu'île de Crozon, créée en 2013 et labellisée « Espace Remarquable en Bretagne » (Bruley et Coat, 2014) témoigne de l'importance du patrimoine géologique dans la région. Ces quelques réflexions montrent que l'évaluation du patrimoine est délicate et implique souvent des jugements de valeurs.

Le choix a donc été fait de ne pas prendre en compte certains enjeux d'ordre écologique et sociaux-culturels tels que les patrimoines dans le calcul de l'indice d'Enjeux. Toutefois, le rôle des indicateurs n'est pas d'évaluer l'intégralité des variables composant les risques côtiers mais de mettre en avant des situations générales et particulières afin de faire avancer la réflexion autour de la gestion des risques côtiers et de la réduction de la vulnérabilité.

Choix méthodologiques sur les méthodes d'agrégation

La difficulté du calcul des indices vient du choix de la méthode d'agrégation (Ahsan et Warner, 2014 ; Bouland, 2018). Celle-ci impacte effectivement la façon dont les indicateurs contribuent au résultat final de l'indice (Créach, 2015). Le choix de la racine des indicateurs élevés à la puissance 3, comme méthode d'agrégation, peut être discutée car il implique des calculs relativement lourds, bien qu'ils soient facilités par l'utilisation des SIG. De plus, cette méthode d'agrégation peut être complexe à se représenter. Toutefois, il n'existe pas d'agrégation « parfaite » (Runfola et al., 2017). La méthode adoptée dépend principalement de l'orientation que l'on souhaite donner à l'analyse (Weiss, 2018) et des objectifs visés. Ici, la racine des indicateurs à la puissance 3 a été retenue car elle représente le meilleur compromis pour évaluer et mettre en évidence les enjeux sur les sites d'étude.

Pour le calcul des indices, il a été choisi de ne pas pondérer les indicateurs afin qu'ils possèdent un poids équivalent dans l'analyse du risque. La pondération permet effectivement de hiérarchiser les enjeux selon leur niveau d'importance et leur contribution à la vulnérabilité globale. Ainsi, certains auteurs tels que Del Rio et Gracia (2009) ou Renard et Soto (2015) suggèrent de donner un poids plus élevé aux enjeux

humains qui sont considérés comme des « enjeux suprêmes à préserver » (Leone, 2007). Cependant la pondération est difficile en raison du nombre élevé de jugements de valeurs qu'impliquent les poids combinés. Le choix des pondérations est effectivement arbitraire et, pour le moment, aucun consensus n'a été établi (Doukakis, 2005 ; Szlafsztein et Sterr, 2007 ; Créach, 2015). C'est pourquoi, il a été jugé préférable de donner une même importance aux facteurs constitutifs de l'indice d'Enjeux pour obtenir un résultat qui pourra éventuellement être amélioré par une pondération locale (Birkmann, 2007 ; CGDD, 2011 ; Bouland, 2018). Il est effectivement possible d'adapter les indices d'enjeux à des zones spécifiques en intégrant des facteurs de pondération. Cette pondération devra être définie selon les éléments jugés prioritaires pour le territoire (ex : préservation des espaces naturels, développement des équipements de loisirs…) et en cohérence avec les documents d'urbanisme de la commune. Cette pondération devra être manipulée avec précaution car toutes les parties d'un territoire ne sont pas concernées par les mêmes orientations d'aménagement.

Conclusion intermédiaire

Dans ce chapitre, la méthodologie présentée permet d'évaluer la variabilité spatiale du risque d'érosion des falaises meubles et elle est appliquée aux six sites d'étude. La méthodologie présente des indicateurs adaptés à une évaluation locale du risque d'érosion par le biais d'une approche semi-quantitative. Pour cela, une agrégation de variables physiques et de facteurs socio-économiques est proposée sous la forme d'un indice d'Aléa et d'un indice d'Enjeux. Le croisement de ces deux indices permet d'aboutir à un indice synthétique de Risque.

Ces indices permettent d'effectuer un diagnostic territorial et comparatif des risques, ici, à l'échelle locale des sites d'étude. Il en ressort qu'aucun secteur n'est à l'abri du risque d'érosion et que les sites d'étude se répartissent principalement selon trois niveaux de risque : un niveau de risque faible pour les sites de Trédrez-Locquémeau, de Telgruc-sur-Mer et de Plozévet, un niveau de risque moyen pour les sites de Pléneuf-Val-André et de Locquirec et un niveau de risque fort pour le site de Plougrescant et qui est lié notamment à la sévérité de l'aléa d'érosion. Toutefois, même pour les sites à faible recul, des zones à risque modéré peuvent exister, là où se concentrent des habitations.

La méthode utilisée dans ce chapitre représente un outil relativement simple d'application pour analyser la variabilité spatiale du risque. Cet outil, destiné aussi bien aux scientifiques qu'aux élus, a pour objectif d'approfondir la connaissance du territoire local et d'aider les gestionnaires dans la priorisation des mesures de prévention (Winter et al., 2005 ; Drejza et al., 2015). De plus, les cartes obtenues présentent un intérêt pour comprendre les logiques spatiales du risque et identifier les territoires qui partagent des problématiques similaires. Enfin, la méthode décrite est réutilisable, à travers le monde, sur des littoraux à falaises meubles dont les vitesses de recul historiques sont bien connues.

Conclusion de la Troisième Partie

Cette troisième partie avait pour objectif d'identifier les principaux enjeux menacés par le recul des falaises meubles sur les sites d'étude et d'évaluer les niveaux de risque. Pour cela, deux méthodologies utilisant une représentation cartographique de l'aléa et des enjeux ont été utilisées.

Une première cartographie du risque d'érosion des falaises meubles, basée sur le croisement de la localisation des formations meubles avec les enjeux exposés a permis de délimiter l'étendue des zones à risque et de montrer que les terrains résidentiels et agricoles représentent une part importante des enjeux menacés par le recul des falaises sur les sites d'étude. Cette méthode de cartographie du risque d'érosion permet de s'affranchir des incertitudes sur les vitesses de recul et de délimiter l'ensemble des zones qui sont assujetties aux risques d'érosion côtière et où il semblerait prudent d'interdire toute nouvelle construction.

Une seconde cartographie du risque, basée sur l'utilisation d'indicateurs, a été utilisée. À partir de l'agrégation de variables physiques et de facteurs socio-économiques sont définis un indice d'Aléa et un indice d'Enjeux. Le croisement de ces deux indices permet d'aboutir à un indice synthétique de Risque. Cette méthodologie permet d'évaluer la variabilité spatiale du risque d'érosion des falaises meubles. À la suite de l'analyse sur les sites d'étude, par le biais de cette méthodologie, il en ressort qu'aucun secteur n'est à l'abri du risque d'érosion et que le site de Plougrescant et, dans une moindre mesure, les sites de Locquirec et de Pléneuf-Val-André présentent des secteurs à risque d'érosion élevé. Cette méthode de cartographie des différents niveaux de risque constitue un outil de planification appropriée de l'utilisation des sols, notamment sur les secteurs non aménagés en sommet de falaise afin d'empêcher le développement d'infrastructures sur des zones d'aléa élevé. Le problème actuel est que, dans bien des cas, les falaises meubles sont aménagées et le risque de destruction d'enjeux est déjà présent, comme on le constate sur les sites d'étude.

Face au risque d'érosion de falaises meubles, les outils et mesures de gestion sont les principaux leviers que la société peut mettre en place pour réduire sa vulnérabilité (Quillet, 2017). De nombreux outils et principes ont été développés dans ce sens (Meur-Ferec, 2006 ; Hénaff et Philippe, 2014). Toutefois, à la suite de l'événement dramatique de la tempête Xynthia, l'insuffisance des outils et de l'application de ces principes a été montrée du doigt (Mercier, 2012 ; Przyluski et Hallegatte, 2013). Cet événement a montré, de plus, que la gestion des risques littoraux se fait davantage dans « l'urgence » que dans une stratégie de gestion à long terme. Il est donc nécessaire d'évaluer l'état de la gestion qui, mis au regard du risque, est révélatrice du degré de vulnérabilité.

PARTIE 4 – LA GESTION DU RISQUE D'ÉROSION DES FALAISES MEUBLES ET APPROCHE DE LA VULNÉRABILITÉ COTIÈRE

Face aux phénomènes d'érosion des falaises meubles en Bretagne, la mise en place d'une gestion de ce risque est nécessaire afin de réduire au mieux la vulnérabilité des territoires côtiers affectés. Cette gestion s'inscrit globalement dans un processus de Gestion Intégrée des Zones Côtières (GIZC) faisant intervenir des principes d'intégration et de gouvernance (Denis et Henoque, 2001). Malgré de nombreux outils de gestion développés pour tenter de réduire la vulnérabilité des territoires (Meur-Ferec, 2006 ; Bordereaux et Braud, 2009 ; Meur-Ferec et Rabuteau, 2014), les derniers événements ayant impactés le littoral breton (tempête Johanna de 2008, coups de vent et tempêtes de l'hiver 2013-2014) ont montré que la gestion du risque d'érosion des falaises meubles n'était pas optimale (Stéphan, 2008 ; Le Quellec, 2015 ; Lestréhan, 2016). Afin de comprendre les éléments préjudiciables, il apparait nécessaire d'évaluer l'état de la gestion et d'identifier son impact sur la vulnérabilité des territoires littoraux bretons.

La quatrième partie de cette thèse est consacrée à l'analyse de l'état actuel de la gestion du risque d'érosion des falaises meubles en Bretagne et s'articule en trois chapitres. Le premier chapitre s'attache à rappeler l'organisation générale de la gestion des risques côtiers en France et les principaux outils existants (chapitre 10). Le chapitre suivant s'intéresse à identifier les mesures de gestion manquantes sur les sites d'étude et qui font augmenter leur vulnérabilité (chapitre 11). Ce travail se base sur les indicateurs de vulnérabilité, développés dans le cadre du projet OSIRISC. Le troisième chapitre s'interroge sur les besoins des gestionnaires bretons en matière d'adaptation et d'outils d'aide à la décision (chapitre 12). Une enquête régionale auprès d'acteurs institutionnels permet d'identifier ces besoins et d'expliquer les difficultés de gestion observées à l'échelle régionale et locale. À la suite de cette analyse, des préconisations sur la gestion sont émises afin de réduire la vulnérabilité des territoires littoraux à falaises meubles en Bretagne.

CHAPITRE 10 : Quelques rappels sur l'organisation de la gestion des risques côtiers en France

La gestion du risque d'érosion mobilise un grand nombre d'acteurs qui disposent de différentes responsabilités et qui interviennent à plusieurs échelles spatiales (Meur-Ferec, 2006 ; Deboudt, 2010 ; Hénaff et Philippe, 2014 ; Veyret, 2016). De plus, l'augmentation croissante des enjeux sur le littoral a amené à la création de nombreux outils de prévention des risques (Bordereaux et Braud, 2009 ; Mineo-Kleiner, 2017). C'est pourquoi, avant d'analyser la gestion du risque d'érosion des falaises meubles en Bretagne, il apparait important, sans pour autant entrer dans le détail des législations et fonctionnements qui ne sont pas le sujet de ce travail, de rappeler l'organisation de la gestion des risques côtiers et les principaux outils existants.

10.1- Des compétences réparties entre différents acteurs et différentes échelles d'action

À l'échelle nationale, l'**État** intervient dans la gestion des risques côtiers, de par son pouvoir législatif. Ainsi, il instaure la loi dite Littoral du 3 janvier 1986 « relative à l'aménagement, la protection et la mise en valeur du littoral ». Suite au Grenelle de la Mer (2009-2012) et au rapport Cousin (2011), il adopte la Stratégie Nationale de Gestion Intégrée du Trait de Côte (SNGITC) qui établit un plan d'actions et détaille une méthode d'élaboration de cette stratégie à l'échelle locale. Tandis que le **Ministère de l'environnement, du développement durable et de l'énergie (MEDDE)** est chargé de définir la politique nationale de prévention des risques, le **Ministère de l'Équipement, du Transport et du Logement (METL)** s'occupe des questions relatives à la gestion du trait de côte.

À l'échelle de la région, la **Direction Régionale de l'Environnement et de l'Aménagement du territoire et du Logement (DREAL)** a pour mission de mettre en œuvre les politiques de l'État et, notamment celles du MEDDE et du METL (Faure et al., 2013). Elle participe au financement de projets comme le Litto3D ou l'Atlas des aléas littoraux (Schroëtter et Blaise, 2015). Le **Conservatoire du littoral**, créé en 1975, intervient également à l'échelle de la région. Il a reçu de l'État, la charge de protéger les sites littoraux les plus significatifs, notamment par une politique d'acquisition foncière. Après avoir effectué des travaux de remise en état (ex : revégétalisation, ouvrages de gestion de l'eau), il confie la gestion des terrains aux collectivités locales.

À l'échelle départementale, les politiques de l'État sont mises en place par la **Direction Départementale des Territoires et de la Mer (DDTM).** Le service *Maritime et littoral* est notamment en charge de la gestion du domaine public maritime (DPM) et du contrôle des usages. Ainsi, tous les travaux effectués sur le domaine public maritime nécessitent au préalable une autorisation de la DDTM. Le service *Risque et gestion de crise* de la DDTM est en charge, quant à lui, de la mise en place des Plans de Prévention des Risques (PPR). Le **Préfet** qui représente l'État, à l'échelle départementale, est en charge du contrôle de la légalité des permis de construire et peut, dans certains cas, se substituer au maire lorsqu'un danger menace les biens et/ou les personnes et qu'il n'est pas pris en compte (article L. 2215-1 du Code général des collectivités territoriales). Le préfet est aussi en charge d'établir les plans de prévention des risques s'il les juge utiles.

Les **Conseils régionaux et départementaux** peuvent participer à la gestion des risques côtiers en finançant des actions de formation ou de sensibilisation sur les risques (Mineo-Kleiner, 2013). Ils peuvent également financer des travaux de protection, par exemple lorsque le risque affecte le domaine routier départemental.

À l'échelle des intercommunalités, les **EPCI** (Établissements Publics de Coopération Intercommunale) à fiscalité propre (communautés de communes, communautés d'agglomération, communautés urbaines) ont la possibilité d'entreprendre des opérations de défense contre la mer qui ont un caractère d'intérêt général ou d'urgence, suivant la loi sur l'eau de 1992. De plus, ils ont en charge, très souvent, la compétence GEMAPI (Gestion des Milieux Aquatiques et Prévention des Inondations) instaurée le 1er janvier 2018 (loi MAPTAM, Modernisation de l'Action Publique Territoriale et d'Affirmation des Métropoles, de 2014) et doivent alors entretenir et contrôler l'état des ouvrages de protection.

À l'échelle communale, le **maire** a pour mission la mise en œuvre des stratégies nationales au niveau de sa commune et d'assurer la sécurité de la population sur son territoire, d'après l'article L.212 du code général des collectivités territoriales. Ceci passe notamment par l'élaboration et la mise en place de différents dispositifs réglementaires. Le maire a ainsi en charge l'information de la population sur les risques et leur prise en compte dans les documents d'urbanisme. Il est responsable de la délivrance des permis de construire qui doivent respecter les mesures réglementaires d'urbanisme. Il peut également financer des travaux de protection à caractère d'intérêt général ou en cas d'urgence. Enfin, d'après la loi de 1807, le **propriétaire riverain** est responsable de la protection de sa propriété et des dommages causés par les phénomènes d'érosion sur son terrain. Afin de supporter la dépense des travaux de défense contre la mer, les propriétaires peuvent se regrouper en associations syndicales (loi du 21 juin 1865).

10.2- Les principaux outils de gestion des risques littoraux

Suite aux événements météo-marins de la fin du 20e siècle et à l'accroissement des enjeux sur le littoral, les politiques publiques relatives aux risques côtiers se sont développées (Meur-Ferec, 2006 ; Rocle, 2017 ; Lascoumes, 2018). Cela se traduit par la création de nouveaux outils de gestion et la définition de stratégies nationales de prévention. Les préoccupations sont accompagnées aussi par l'émergence des notions de développement durable et de gestion intégrée des zones côtières (GIZC). Ce processus vise à réunir l'État, les collectivités et la société en vue de planifier la protection et le développement des ressources côtières. Les politiques d'aménagement du territoire et de gestion des risques ont ainsi évolué avec la société et les orientations de l'État.

Ainsi, la **Stratégie Nationale de Gestion Intégrée du Trait de Côte (SNGITC)**, définie par le MEDDE en 2012, représente un changement dans la stratégie de gestion des zones côtières : la gestion n'est plus axée vers la défense et la protection contre la mer mais vers l'adaptation au recul du trait de côte. La stratégie passe par une phase d'observation et de suivi d'évolution du trait de côte afin de développer les connaissances de l'aléa et du risque. Sur la base de ces observations, des stratégies locales coordonnées entre les différents acteurs privés et publics, doivent être établies et mises en place. La SNGITC privilégie deux options : la relocalisation des activités et des biens, et le recours à des dispositifs de protection plus respectueux de l'environnement (MEDDE, 2012). La stratégie doit également être accompagnée de dispositifs réglementaires de prévention des risques (PPR) et de gestion de crise ainsi que des actions de sensibilisation de la population.

En raison de la multitude d'outils relatifs à la gestion des risques littoraux, seuls les principaux sont présentés ci-dessous.

10.2.1- Outils d'information et de sécurité civile

La politique nationale de gestion des risques côtiers s'appuie sur l'information du citoyen et sa sensibilisation (MEDDTL, 2012). La loi du 22 juillet 1987 stipule que tout citoyen a le droit de connaitre les risques majeurs auxquels il est exposé, les mesures préventives envisageables et les moyens de protection et de secours établis par les pouvoirs publics (Mineo-Kleiner, 2013).

Le **Dossier Départemental des Risques Majeurs (DDRM),** établi par le préfet, décrit à l'échelle départementale, les risques majeurs auxquels les communes sont soumises, les conséquences prévisibles pour les personnes et les biens, ainsi que les événements importants qui s'y sont produits.

Le **Document d'Information Communal sur les Risques Majeurs** (**DICRIM),** établi par le maire, est l'équivalent du DDRM, à l'échelle communale. Le maire doit compléter les informations transmises par le préfet pour informer les habitants sur les risques présents dans la commune et les mesures de prévention et de protection.

L**'Information Acquéreur Locataire (IAL)** correspond à l'obligation des vendeurs ou des bailleurs d'informer les acquéreurs ou les locataires des risques présents sur un territoire couvert par un PPR (loi du 30 juillet 2003).

Le **Plan Communal de Sauvegarde (PCS),** établi par le maire, est un document visant à préparer la commune à la gestion de crise. Il diagnostique les risques sur le territoire, recense les moyens communaux, définit les procédures d'alerte de la population et le rôle de chaque acteur en cas de crise. Dans les communes concernées par un PPR, le PCS est obligatoire dans les deux ans suivant sa réalisation (loi du 13 août 2004 relative à la modernisation de la sécurité civile).

10.2.2- Outils de prévention des risques

La politique nationale de prévention des risques s'appuie sur la loi du 2 février 1995 (dite **loi Barnier**) qui favorise la mise en place de plans de prévention des risques et l'utilisation de pratiques plus respectueuses de l'environnement en associant les différents acteurs aux décisions (Rocle, 2017).

Les **Programmes d'Actions de Prévention des Inondations (PAPI)**, créés en 2003, ont pour objectif d'inciter les acteurs locaux à se concerter sur les problématiques d'inondation et, depuis 2011, sur les problématiques des risques côtiers afin de réfléchir en commun à une stratégie d'actions à mettre en œuvre. Ce programme permet de mobiliser des fonds de l'État sur des projets globaux.

Les **Plans de Prévention des Risques Littoraux (PPRL)** définissent les zones d'exposition et déterminent la réglementation applicable en fonction des risques littoraux, selon le code de l'urbanisme (article L.121-10). Ils prévoient les mesures de prévention, de protection et de sauvegarde à mettre en œuvre par les collectivités locales et les propriétaires. Il est prescrit par le préfet et il est élaboré par les services de l'État qui peuvent avoir recours à des bureaux d'études. Après concertation avec les élus locaux, le PPRL est annexé dans les documents d'urbanisme. La vocation des PPRL est ainsi d'améliorer la sécurité des personnes et de limiter l'occupation des zones côtières à risque.

La **loi Littoral** du 3 janvier 1986 constitue, indirectement, un moyen de prévention et de limitation des risques côtiers (Becet, 1987 ; Meur-Ferec, 2006). Elle pose le principe de limiter ou d'interdire les constructions proches de la mer, notamment dans la bande côtière des 100 mètres, dans certaines conditions. De plus, elle impose aux gestionnaires de protéger les « espaces naturels remarquables » (Gélard, 2004).

10.2.3- Outils d'aménagement et d'urbanisme

Le **Schéma de Cohérence Territoriale (SCOT)**, créé par la loi du 13 décembre 2000, est établi par les EPCI. Il s'agit d'un document d'urbanisme qui détermine, à l'échelle de plusieurs communes, un projet de territoire visant à mettre en cohérence l'ensemble des politiques sectorielles notamment celles centrées sur l'organisation de l'espace et de l'urbanisme, la mobilité, l'environnement et aussi l'exposition au risque (Secrétariat général de la mer, 2007).

Le **Plan Local d'Urbanisme (PLU)**, élaboré par le Conseil municipal, est un document d'urbanisme qui décrit les règles d'aménagement et d'utilisation des sols à l'échelle d'une commune. Il doit intégrer les mesures réglementaires de la loi Littoral et des PPR et doit être en cohérence avec le SCOT.

La matrice des principaux instruments de gestion des risques côtiers (Fig. 234) donne un aperçu de la complexité des compétences et de mises en œuvre qui se déclinent à plusieurs échelles d'initiatives.

Fig. 234 : Les principaux instruments de gestion des risques côtiers (modifié de Meur-Ferec et Rabuteau, 2014).

	État et services déconcentrés	**EPCI**	**Commune**
Origine et/ou initiatives	DDRM DICRIM PCS PAPI PPRL		
Contrôle des mesures réglementaires	PCS PAPI PPRL		
Élaboration de l'outil	PPRL	PAPI SCOT	DICRIM PCS PLU
Espace de mise en application des outils		PAPI PPRL SCOT	DICRIM PCS PAPI PPRL SCOT PLU

L'élaboration de ces nombreux outils et mesures de gestion peut être prise en charge par le fond de prévention des risques naturels majeurs (dits **fonds Barnier**) (Deboudt, 2010). Ce fond est alimenté par la surprime des catastrophes naturelles (12 %) prélevée sur chacun des contrats d'assurance contre les dommages. Ce fond permet de financer les mesures de prévention et de réduction de la vulnérabilité dans des territoires couverts par un PPR ou de financer des opérations menées dans le cadre d'un PAPI (CEPRI, 2017).

10.3- Les modalités de gestion du trait de côte

La présence d'enjeux et de risques sur un territoire vont influencer la façon dont le littoral est géré. Face à l'évolution du littoral, il existe quatre grandes modalités de gestion du trait de côte (CESER de l'Atlantique, 2015) (Fig. 235) :

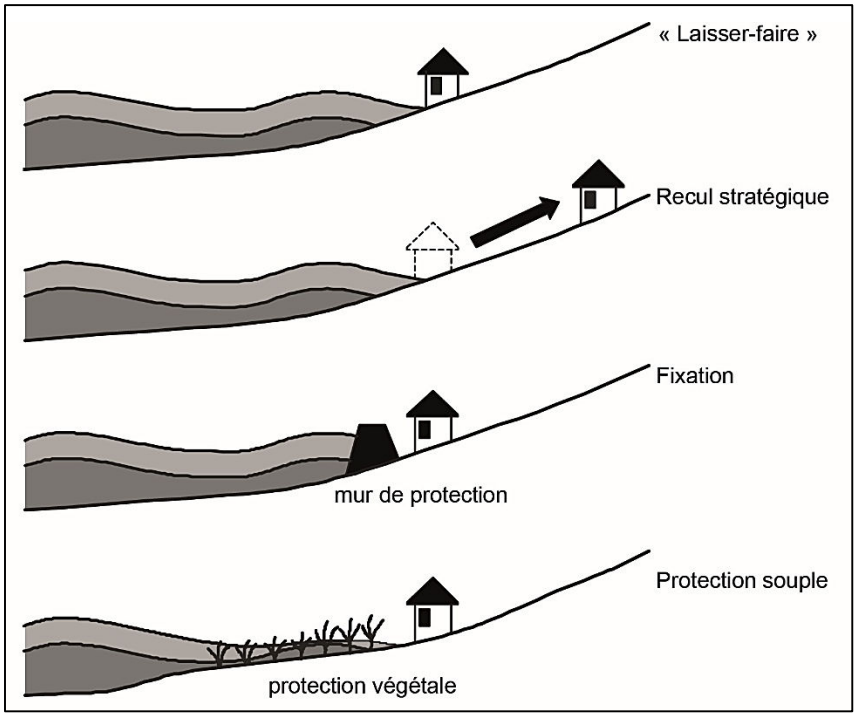
-**l'évolution naturelle** : il s'agit de « laisser-faire » la nature. C'est, bien entendu, le mode de gestion le moins coûteux mais, il n'est possible que dans les zones où il y a peu, voire pas du tout d'enjeux ;

-**la protection souple du trait de côte** : il s'agit d'accompagner les processus naturels à l'aide de protections souples (ex : plantations, rechargement de sable, pieux hydrauliques pour atténuer l'énergie des vagues…). Ce mode de gestion présente l'avantage de ralentir le recul du trait de côte et d'être généralement peu coûteux ;

-**la fixation** : elle consiste à maintenir le trait de côte à tout prix à l'aide de protections dures (ex : enrochements, murs). Cette gestion est souvent très coûteuse autant par la mise en place que par l'entretien des ouvrages et peut avoir des conséquences néfastes sur le fonctionnement hydro-sédimentaire (ex : érosion induite sur les secteurs littoraux adjacents) ;

-**le recul stratégique** : il consiste en la suppression, le déplacement ou la relocalisation de biens et d'activités en dehors des zones d'aléa. Ce mode de gestion, coûteux dans la mise en place, est encore peu évoqué sur les territoires pour des raisons d'acceptabilité sociale, de disponibilité du foncier et de contraintes juridiques (Hénaff et Philippe, 2014).

Fig. 235 : Les quatre grandes modalités de gestion (modifié d'EUROSION, 2004).



CHAPITRE 11 : Analyse de la gestion et de la vulnérabilité à l'échelle des sites d'étude

Au-delà d'un véritable besoin de connaissance de l'aléa et des enjeux menacés par le recul des falaises meubles, la compréhension de la vulnérabilité des secteurs littoraux nécessite de considérer la façon dont le risque d'érosion est géré. Les risques d'érosion se sont accentués notamment avec l'urbanisation du littoral mais aussi, parfois, suite à des mesures de gestion qui ont amplifié les processus naturels et ont accru les endommagements (Pinot, 1998; Meur-Ferec, 2006; Elliott et al., 2014).

Face à ce constat, ce chapitre est organisé autour de quatre questions principales :

1) Comment est géré le risque d'érosion des falaises meubles sur les sites d'étude ?
2) Quels sont les mesures et outils de gestion absents sur les territoires et qui font augmenter leur vulnérabilité ?
3) Quels sont les sites d'étude les plus vulnérables ?
4) Quelles sont les composantes (aléa, enjeux et/ou gestion) qui expliquent leur niveau de vulnérabilité ?

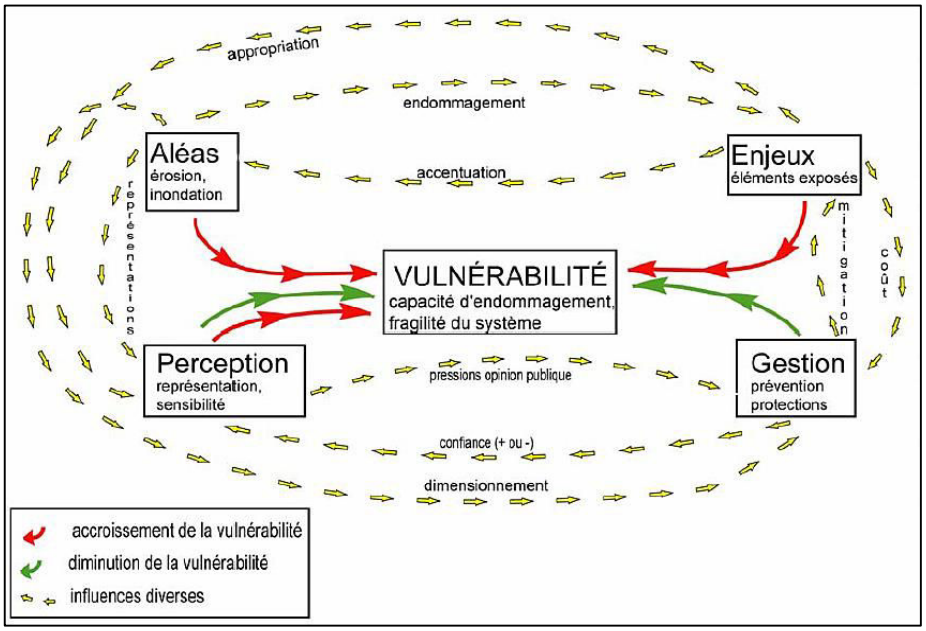
Après avoir présenté la notion de vulnérabilité, la méthode permettant d'étudier la gestion sur les sites d'étude, à partir d'indicateurs, sera exposée. Les points forts et les points faibles de la gestion, identifiés sur les sites, seront ensuite présentés. À partir d'un indice, les niveaux de vulnérabilité seront comparés entre les sites d'étude. Enfin, les apports et les limites de la méthode basée sur les indicateurs seront discutés.

11.1- Notion de vulnérabilité : l'indispensable intégration de la gestion avec les analyses de risque

Contrairement à l'aléa, le terme de vulnérabilité n'est apparu que très tardivement dans les études des risques naturels (Ruin et Lutoff, 2004 ; Veyret et Laganier, 2013 ; Koks et al., 2015). Pour autant, les nombreuses définitions présentes dans la littérature révèlent son fort intérêt dans les analyses récentes des risques mais aussi son caractère plurivoque (Meur-Ferec, 2006 ; Leone et Vinet, 2006 ; Birkmann, 2006 ; Becerra, 2012 ; Lummen et Yamada, 2014). La vulnérabilité est effectivement un concept qui varie selon les auteurs et les objectifs poursuivis par les différents travaux (Drejza et al., 2015). C'est une notion polysémique, multiscalaire et multidimensionnelle (Becerra, 2012). Ainsi, *« la caractérisation de la vulnérabilité s'avère être très souvent un exercice extrêmement délicat »* (Haziza, 2007). De plus, d'après Griot (2007), de nombreuses études de vulnérabilité ne tiennent pas compte de l'ensemble des éléments vulnérables.

La définition de la **vulnérabilité systémique (ou globale**) adoptée dans le cadre du projet OSIRISC, correspond à la proposition de Hellequin et al. (2013) comme l'intégration de quatre composantes (Fig. 236) : l'**aléa**, les **enjeux** qui sont exposés, la **gestion** mise en œuvre et la perception (ou **représentations sociales**) du risque. Afin d'évaluer la vulnérabilité, il ne suffit donc pas simplement connaître les aléas et les enjeux présents qui n'informent que sur le risque, mais aussi la capacité de réaction des territoires et la façon dont les habitants appréhendent ces risques. Les quatre composantes peuvent avoir un effet d'augmentation ou de diminution de la vulnérabilité d'un territoire (Meur-Ferec, 2006). La figure ci-dessous (Fig. 236) fait apparaitre les nombreuses interactions entre les composantes, propres à la notion de système. Ces interactions font varier les capacités de chacune à augmenter ou réduire la vulnérabilité.

Fig. 236 : Représentation de la vulnérabilité systémique (Meur-Ferec, 2006).



Dans notre étude, la vulnérabilité n'intègre pas les représentations sociales et son sens diffère donc de la vulnérabilité systémique (ou globale). L'analyse des représentations des risques requiert des travaux spécialisés de psychologie cognitive et une bonne appropriation d'outils spécifiques (Leneveu et Mary Laville, 2012 ; Hellequin et al., 2013 ; Krien, 2014 ; Rulleau et al., 2015) qu'il n'est pas possible d'envisager dans ce travail. L'évaluation de la vulnérabilité proposée, dans ce chapitre, repose donc sur l'analyse conjointe des facteurs du risque (e.g. l'aléa et les enjeux) et de leur gestion.

Par définition, la gestion des risques regroupe l'ensemble des outils et des mesures mises en place par des structures compétentes afin de diminuer la vulnérabilité (Quillet, 2017). Bien que revêtant un caractère essentiel pour réduire les risques, la gestion a, jusqu'alors, rarement été prise en compte dans les analyses de vulnérabilité côtière (Lendre, 2016). Elle n'est en effet, pas incluse dans les principaux indices qu'on retrouve dans la littérature (ex : l'indice SoVI développé par Cutter et al. (2003)). La prise en compte de la gestion dans les analyses de vulnérabilité côtière est assez récente (Nicholls et Klein, 2005 ; Meur-Ferec et al., 2008 ; Thomas et al., 2012). Son implication dans la vulnérabilité est complexe et soulève encore aujourd'hui de nombreuses interrogations (Lendre, 2016).

Afin d'étudier la gestion sur les sites d'étude, des indicateurs et indices sont utilisés, dans la même approche que celle retenue pour étudier l'aléa et les enjeux (cf. chapitre 9). Les indicateurs permettent effectivement d'apporter une information simplifiée de la vulnérabilité et de cibler les points forts et les points faibles des mesures de gestion en place. L'objectif de ce chapitre n'est pas de porter un jugement sur ce qui relève d'une bonne ou d'une mauvaise gestion mais d'identifier les mesures présentes et les mesures absentes sur un territoire et qui permettraient de réduire sa vulnérabilité. Par exemple, l'apport des connaissances sur les processus d'érosion permet une meilleure caractérisation du risque et aide à la mise en place de mesures de gestion adaptées.

11.2- Méthodologie

11.2.1- Choix de l'échelle spatiale et des indicateurs retenus

Les indicateurs portant sur la gestion sont définis à l'échelle communale car c'est à cette échelle que sont principalement appliquées les préconisations générales et que sont mises en place les mesures de réduction de la vulnérabilité (Meur-Ferec, 2006).

Les indicateurs retenus dans l'étude s'appuient sur ceux proposés dans le cadre du projet OSIRISC (http://www.risques-cotiers.fr/fr/projets). Ces indicateurs sont issus d'un travail de concertation entre gestionnaires et scientifiques afin d'obtenir les meilleurs compromis entre exigences scientifiques et opérationnalisation des méthodes (Quillet, 2017). Les indicateurs tentent d'analyser plutôt les effets que les actions de la gestion car ils révèlent davantage l'efficacité de ce qui est mis en œuvre (Dejean et al., 1998). Parmi les 20 indicateurs proposés dans le projet OSIRISC pour la composante gestion, 4 indicateurs n'ont pas été retenus du fait de leur faible pertinence à étudier la gestion associée au risque d'érosion des falaises meubles (Annexe 18). Par exemple, les indicateurs de gestion de crise « *Mode d'alerte à la population* » et « *Intégration du SDIS (Service Départemental d'Incendie et de Secours) dans le PCS* » n'ont pas été retenus car, dans le cas des phénomènes d'érosion de falaises meubles, il est difficile de prévoir un tel événement. Parmi les 16 indicateurs retenus, les critères d'évaluation de plusieurs indicateurs ont été adaptés au contexte d'érosion des falaises meubles. À titre d'exemple, l'indicateur « *Repères inondation* » a été remplacé par l'indicateur « *Panneaux d'avertissement* » pour évaluer l'entretien de la culture du risque d'érosion. Afin de compléter l'analyse sur la gestion du risque d'érosion, 7 indicateurs ont été ajoutés tels que « *La réduction de la sensibilité du site à l'érosion* », « *L'archivage des phénomènes d'érosion* » et « *La mise en place de mesures de sécurisation post-événement* » (Annexe 18). Il est important de souligner que, ici, contrairement au projet OSIRISC, l'objectif n'est pas d'effectuer un suivi de la gestion mais de réaliser un état des lieux correspondant à la deuxième année de la thèse, soit l'année 2018.

Au total, ce sont donc 23 indicateurs qui ont été retenus afin d'évaluer la gestion du risque à l'échelle des six communes (Tab. 29). Ces indicateurs permettent de décrire **cinq aspects liés à la politique de gestion** : la démarche locale, la gestion du trait de côte, la prise en compte du risque dans l'aménagement, la sensibilisation de la population aux risques et la gestion de crise.

- La **démarche locale de gestion** décrit la gouvernance de la gestion des risques, centrée sur la construction d'une stratégie locale et l'intégration des acteurs à différents niveaux. La démarche locale est aussi appréhendée selon son état d'avancement et la prise en compte de la relocalisation comme solution à la réduction de la vulnérabilité. Concernant l'intégration des acteurs, celle-ci est appréhendée selon la diversité d'acteurs qui participent à la démarche locale, les moyens humains qui travaillent sur les risques côtiers, la mise en réseau des gestionnaires et l'implication des scientifiques sur le territoire.

- La **gestion du trait de côte** est centrée sur la mise en application de la stratégie. Elle s'intéresse notamment à la mise en place de la compétence GEMAPI, obligatoire pour les EPCI depuis le 1er janvier 2018. Cette compétence a pour objectif d'établir une responsabilité des collectivités dans la gestion publique des ouvrages de protection contre les inondations et contre la mer. Cela concerne donc l'entretien, la gestion et la surveillance des protections existantes, une fois la compétence définie. L'état actuel des ouvrages est donc un deuxième indicateur de l'état de cette gestion. L'implication de la commune est appréhendée par le biais d'un archivage des phénomènes d'érosion, la réalisation d'études techniques sur les solutions pouvant être adoptées ainsi que par des techniques visant à réduire la sensibilité des sites à l'érosion (ex : drainage des eaux, reprofilage du versant…).

- La **prise en compte du risque dans l'aménagement** est une mesure de prévention des risques consistant à éviter que des enjeux soient exposés à l'aléa d'érosion. Elle est renseignée notamment par la présence ou non d'un PPR qui délimite les zones exposées et par l'intégration du risque via des contraintes de constructibilité dans les différents documents d'urbanisme (SCOT et PLU).

- L'**information et la sensibilisation aux risques** reposent sur différents outils et moyens dont la présence d'associations sur les risques côtiers, des actions de sensibilisation dans les établissements scolaires et la présence d'un DICRIM, analysé selon des critères de mode de diffusion et de pédagogie du document.

- La **gestion de crise** est analysée par le biais de deux indicateurs. Le premier est la « *mise à jour du PCS* » qui considère la dernière date d'actualisation des données et qui recense l'ensemble des renseignements indispensables pour la gestion lors de la survenue d'un événement météo-marin extrême. Le second est l'indicateur « *mise en place de mesures de sécurisation post-événement* » qui peut consister en l'installation de barrières et de panneaux informatifs afin d'éviter que la population s'approche trop près de la zone instable et/ou endommagée.

L'ensemble des indicateurs de gestion est renseigné notamment au moyen des informations disponibles sur les sites internet des communes, d'entretiens auprès des élus et des gestionnaires et d'enquêtes de terrain (Tab. 29). De même que pour les indicateurs d'aléa et d'enjeux (cf. chapitre 9), des fiches méthodologiques réalisées dans le cadre du projet OSIRISC renseignent sur la méthode de collecte et de traitement des données et sont disponible à l'adresse suivante : https://www-iuem.univ-brest.fr/pops/projects/osirisc-vers-un-observatoire-integre-des-risques-cotiers-d-erosion-submersion.

Tab. 29 : Indicateurs utilisés pour décrire les cinq domaines de la gestion du risque d'érosion et sources des données.

Domaine	Indicateur de Gestion	Sources
Démarche locale de gestion	Présence d'une stratégie locale	Sites internet de la commune et de l'EPCI
	Prise en compte de la relocalisation	Entretiens auprès des élus
	Acteurs partenaires de la démarche	Entretiens auprès des élus, site internet de la commune
	Intégration extraterritoriale	Entretiens auprès des élus
	Publications scientifiques sur les risques d'érosion	Sites internet Google scholar, Web of Science, Hal archives ouvertes
	Compétences humaines sur les risques côtiers	Entretiens auprès des élus, site internet de la commune
Gestion du trait de côte	Archivage des phénomènes d'érosion	Entretiens auprès des élus
	Mise en place de la compétence GEMAPI	Entretiens auprès des élus et de la structure porteuse du projet
	État des ouvrages	Enquêtes de terrain
	Efficacité des ouvrages	Enquêtes de terrain
	Études techniques sur les solutions d'aménagement	Entretiens auprès des élus et des DDTM
	Réduction de la vulnérabilité - mitigation	Observations de terrain, entretiens auprès des élus
Prise en compte du risque dans l'aménagement	État général du PPRL	Sites internet des départements
	Prise en compte du risque d'érosion de falaises meubles dans le SCOT	SCOT à disposition sur le site internet de l'EPCI
	Contraintes de construbilité	PLU à disposition sur le site internet de la commune
Information et sensibilisation aux risques	État et mode de diffusion du DICRIM	Entretiens auprès des élus, site internet de la commune
	Analyse pédagogique du DICRIM	DICRIM à disposition sur le site internet de la commune
	Présence de panneaux d'avertissement	Enquêtes de terrain
	Publications dans la presse locale sur les risques côtiers	Site internet Europresse
	Événements de sensibilisation dans les établissements scolaires	Entretiens auprès des établissements scolaires
	Présence d'associations sur les risques côtiers	Site internet de la commune
Gestion de crise	Mise à jour du PCS	Site internet de la commune
	Mise en place de sécurisation post-événement	Enquêtes de terrain

11.2.2- Calibrage des indicateurs et agrégation en indices

Pour chaque indicateur, il est nécessaire d'évaluer dans quelles mesures ils participent à une augmentation ou à une diminution de la vulnérabilité. Alors que certains indicateurs ne posent aucun doute quant à leur implication dans la vulnérabilité côtière, d'autres présentent une ambivalence (Lendre, 2016). Par exemple, ce n'est pas parce qu'il y a plus de mesures de gestion et d'aménagements destinés à la réduction de l'aléa que cela diminue forcément la vulnérabilité. Certains ouvrages de protection peuvent effectivement être inefficaces voire amplifier les processus d'érosion tels que les enrochements (Paskoff, 1985 ; Pinot, 1998).

Le calibrage des indicateurs de gestion a été déterminé « à-dire d'expert », suite aux échanges menés entre gestionnaires et scientifiques et avec l'expertise de l'équipe du projet OSIRISC. De la même façon que pour les indicateurs d'aléa et d'enjeux (cf. chapitre 9), les indicateurs de gestion sont calibrés sur une échelle de 1 à 5. Toutefois, l'échelle de vulnérabilité est inversée par rapport à celle utilisée pour les indicateurs d'aléa et d'enjeux : la gestion étant une variable qui atténue la vulnérabilité, les valeurs élevées correspondent aux mesures ou outils de gestion les plus efficaces. Ainsi, 1 correspond à une forte augmentation de la vulnérabilité et 5 correspond à une forte réduction.

Pour le choix de la méthode d'agrégation en indices de gestion, la même approche que celle employée pour les indices d'aléa et d'enjeux (cf. chapitre 9) a été utilisée. Ainsi, le choix est basé sur la comparaison des résultats issus des différentes méthodes d'agrégation et la proximité avec l'expertise et le ressentis (Tab. 30).

Tab. 30 : Valeurs de l'indice de Gestion global obtenues pour chaque méthode d'agrégation sur les six sites d'étude.

Méthode d'agrégation	Pléneuf-Val-André	Plougrescant	Trédrez-Locquémeau	Locquirec	Telgruc-sur-Mer	Plozévet
Moyenne des sous-indices	3,3	2,7	2,4	2,3	2,3	2,6
Minimum des sous-indices	2,3	2,2	2,0	1,2	1,8	2,0
Racine carrée des produit des sous-indices	3,4	3,0	2,6	2,6	2,4	2,7
Racine carrée des indicateurs à la puissance 2	3,4	3,0	2,6	2,6	2,4	2,8
Racine cubique des indicateurs à la puissance 3	3,7	3,3	2,9	2,9	2,7	3,1

Les formules utilisant les puissances 2 et 3 n'ont pas été retenues car les puissances ont un effet de rehaussement des valeurs et ont alors tendance à surestimer la gestion. Ceci va donc dans le sens inverse de notre objectif de mettre en évidence la vulnérabilité sur les sites. De plus, avec l'utilisation de ces formules ainsi qu'avec celle de la racine carrée des produits, la commune de Locquirec présente une gestion équivalente à la commune de Trédrez-Locquémeau (Tab. 30). Pourtant, les discussions avec les élus et les propriétaires riverains ont révélé une gestion moindre sur la commune de Locquirec (absence de communication et de concertation, mauvais état des ouvrages…). L'utilisation des puissances et des racines carrées des produits conduit donc à s'éloigner de la « réalité locale » et du ressenti en maximisant la gestion.

Dans la logique de mettre en évidence la vulnérabilité sur les sites d'étude, la valeur minimale des sous-indices a été testée. Cette méthode d'agrégation sous-estime fortement la gestion dès lors qu'un des sous-indices est faible (Tab. 30).

La moyenne des indices a un effet de lissage des valeurs et ne permet pas de différencier facilement l'état de la gestion entre les sites. Toutefois, les résultats issus de cette méthode d'agrégation apparaissent plus proches de la réalité des terrains et sont un compromis entre les méthodes qui tendent à surévaluer la gestion (e.g. les puissances et les racines carrées des produits) et celles qui sous-évaluent la gestion (e.g. le minimum).

La formule retenue pour calculer les cinq sous-indices de gestion est donc la suivante :

$$\boldsymbol{Sous\ indice} = \frac{\prod_{i=1}^{n} x_i}{n}$$

Avec x *: indicateur de la composante de gestion ;* n *: nombre d'indicateurs de la composante de gestion.*

L'indice de Gestion global est obtenu par la moyenne des cinq sous-indices de gestion comme suit :

$$\boldsymbol{Indice_{Gestion}} = \frac{I_{Démarche} + I_{Application} + I_{Aménagement} + I_{Sensibilisation} + I_{Gestioncrise}}{5}$$

Le recours, ici, à la moyenne des sous-indices et non pas à la moyenne de l'ensemble des indicateurs permet d'attribuer le même poids pour chacune des composantes de la gestion. Les composantes ne possèdent effectivement pas le même nombre d'indicateurs (ex : 6 indicateurs pour « *La démarche locale de gestion »* et 2 indicateurs pour « *La gestion de crise* ») (Tab. 29).

11.3- Résultats

11.3.1- État général de la gestion sur les sites : l'indice de Gestion global

La gestion étant une variable qui atténue la vulnérabilité, un indice de gestion élevé correspond donc à une gestion efficace. L'indice de Gestion global est compris entre 2,3 et 3,3 sur les six communes (Tab. 31).

Les communes de Telgruc-sur-Mer et de Locquirec possèdent les indices de Gestion les plus faibles (indice de 2,3). Le faible score obtenu pour la commune de Locquirec est notamment lié à une quasi-absence de démarches locales (pas de stratégie, peu de concertation avec les acteurs, aucune participation à des travaux sur la thématique des risques côtiers…). La faible gestion sur la commune de Telgruc-sur-Mer s'explique également par de faibles démarches locales mais aussi par une sensibilisation insuffisante de la population aux risques. La commune de Trédrez-Locquémeau possède également un faible indice de Gestion (2,4) en raison d'une prise en compte insuffisante du risque dans l'aménagement du territoire. Les communes de Plougrescant et de Plozévet présentent un indice de Gestion plus satisfaisant en raison de démarches locales plus développées. Enfin, la commune de Pléneuf-Val-André présente l'indice de Gestion le plus élevé (3,3). Ce résultat est lié à de nombreuses actions de gestion du trait de côte, une bonne mise en réseau des gestionnaires ainsi que par la mise en place et le développement d'outils de prévention.

Les indices et sous-indices permettent de comparer facilement l'état de la gestion entre les six communes et d'identifier la ou les composantes de gestion qui augmentent leur vulnérabilité. L'analyse détaillée de chacune des composantes de gestion, par le biais des indicateurs, est maintenant nécessaire afin de déterminer précisément les mesures et outils absents sur les territoires et qui augmentent leur vulnérabilité.

Tab. 31 : Valeurs des indices, sous-indices et indicateurs de gestion sur les six communes.

Domaine	Indicateur	Pléneuf-Val-André	Plougres-cant	Trédrez-Locquémeau	Locquirec	Telgruc-sur-Mer	Plozévet	
Démarche locale de gestion	Présence d'une stratégie locale	3	2	2	1	2	2	
	Prise en compte de la relocalisation	1	1	1	1	1	1	
	Acteurs partenaires de la démarche	5	5	4	1	4	5	
	Intégration extraterritoriale	3	3	3	1	1	1	
	Publications scientifiques sur les risques d'érosion	2	2	2	2	2	2	
	Compétences humaines sur les risques côtiers	1	2	2	1	1	3	**Moy.**
	Sous-indice Démarche locale	**2,5**	**2,5**	**2,3**	**1,2**	**1,8**	**2,3**	**2,1**
Gestion du trait de côte	Archivage des phénomènes d'érosion	3	2	3	1	5	3	
	Mise en place de la compétence GEMAPI	3	5	5	5	3	3	
	État des ouvrages	5	3	4	4	4	4	
	Efficacité des ouvrages	3	2	2	2	3	2	
	Études techniques réalisées sur les solutions d'aménagement	5	3	3	3	3	3	
	Réduction de la sensibilité du site à l'érosion	4	2	3	3	2	2	**Moy.**
	Sous-indice Application	**3,8**	**2,8**	**3,3**	**3,0**	**3,3**	**2,8**	**3,3**
Prise en compte du risque dans l'aména-gement	État général du PPRL	1	1	1	1	1	1	
	Prise en compte du risque dans le SCOT	5	1	1	1	2	5	
	Contraintes de construbilité	5	5	3	5	3	5	**Moy.**
	Sous-indice Aménagement	**5,0**	**3,0**	**2,0**	**3,0**	**2,5**	**5,0**	**3,4**
Information et sensibilisation aux risques	État et mode de diffusion du DICRIM	2	3	1	1	1	1	
	Analyse pédagogique du DICRIM*	5	2	-	-	-	-	
	Panneaux d'avertissement	3	1	3	1	1	3	
	Publications dans la presse locale sur les risques côtiers	2	5	5	5	3	3	
	Événements de sensibilisation dans les établissem. scolaires	1	1	1	1	1	1	
	Présence d'associations sur les risques côtiers	1	1	2	4	3	4	**Moy.**
	Sous-indice Sensibilisation	**2,3**	**2,2**	**2,4**	**2,4**	**1,8**	**2,4**	**2,3**
Gestion de crise	Mise à jour du PCS	1	5	1	1	1	1	
	Mise en place de mesures de sécurité post-événement	5	1	3	3	3	3	**Moy**
	Sous-indice Gestion de crise	**3,0**	**3,0**	**2,0**	**2,0**	**2,0**	**2,0**	**2,3**
	INDICE de Gestion global	**3,3**	**2,7**	**2,4**	**2,3**	**2,3**	**2,9**	

*Absence de cotation pour les communes ne disposant pas de DICRIM

11.3.2- Les démarches locales de gestion

Les démarches locales entreprises par la commune reflètent son implication dans la gestion du risque d'érosion et sa volonté de prémunir son territoire du risque.

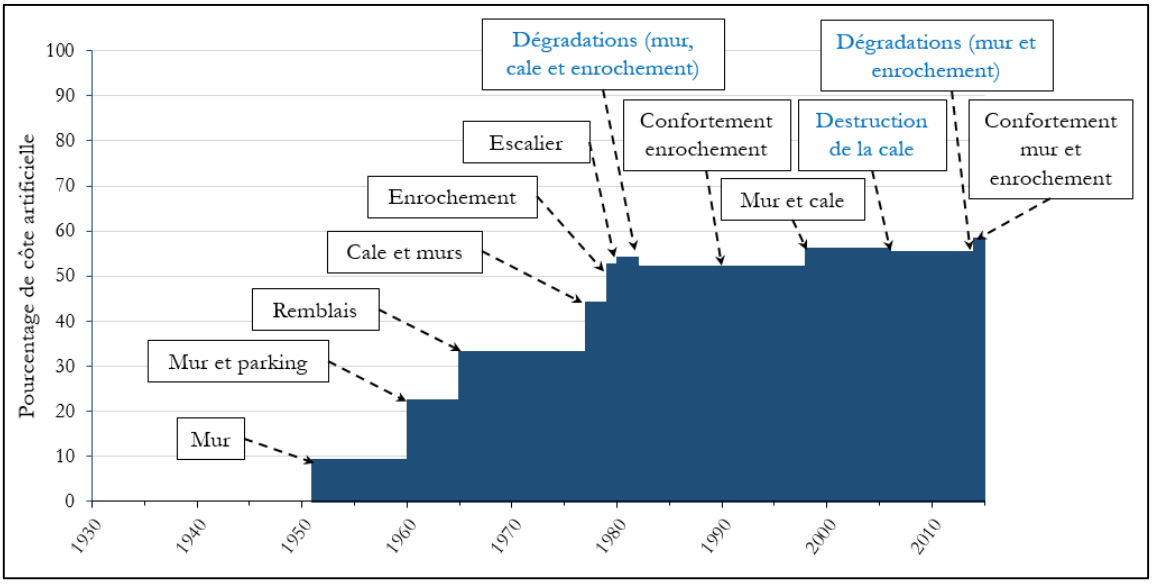
- **Réflexions autour de la stratégie**

L'élaboration et la définition d'une stratégie locale sont un préalable indispensable à l'identification des actions prioritaires à mener sur un territoire pour gérer le risque d'érosion. L'indicateur « *Présence d'une stratégie locale* » montre que, sur les six communes, trois d'entre elles n'ont entrepris aucune démarche tandis que, sur les trois autres communes, une stratégie de gestion des risques côtiers est en cours de construction (Tab. 31). Par ailleurs, aucune des six communes n'est intégrée dans un PAPI, bien que ce dispositif permet de réunir les acteurs pour réfléchir en commun à un programme d'actions sur plusieurs années. Cette insuffisance dans les réflexions stratégiques, au niveau communal, reflète la situation générale constatée à l'échelle des intercommunalités (Bégué et al., 2017). L'absence de stratégies de gestion se traduit par la mise en place, fréquemment, dans l'urgence, d'ouvrages de défense contre la mer et qui sont souvent inadaptés car aucune étude préalable n'est réalisée (Fig. 237). De par cette absence d'études prospectives et de réflexions concertées, les ouvrages côtiers sont régulièrement détruits ou endommagés par des événements météo-marins de forte ampleur. Pour autant, ils sont restaurés à chaque fois, quasiment à l'identique (Fig. 239). La répétition des travaux de reconstruction, de réparation et de renforcement des ouvrages représente, à terme, des coûts considérables (Albinet, 1995). La diversité des ouvrages (enrochements, murs, perrés), installés en avant des falaises meubles, tels que ceux observables sur le site du Moulin de la Rive ou le site de Pors-Hir, témoignent également de la dispersion des initiatives (Fig. 238).

Fig. 237 : Enrochement d'urgence réalisé à Pors-Hir, à la veille des grandes marées du 2 février 2014.

Fig. 238 : Succession d'ouvrages de défense contre la mer installés au Moulin de la Rive, à Locquirec.

Fig. 239 : Travaux successifs d'ouvrages côtiers réalisés sur le site du Moulin de la Rive, à Locquirec, entre 1950 et 2018.



Pour autant, d'après le Conseil Économique, Social et Environnemental Régional (CESER) de l'Atlantique (2015), il est « *aujourd'hui urgent que les territoires littoraux s'engagent dans des réflexions stratégiques pour assurer leur résilience face aux risques et, plus largement, assurer le développement durable des espaces côtiers* ». Une démarche de gestion du trait de côte a toutefois été identifiée sur la commune de Pléneuf-Val-André (IDEA Recherche, 2017b). À la suite d'un appel à projet lancé par la DREAL Bretagne en 2016, la commune a bénéficié d'un diagnostic dégageant les enjeux propres au trait de côte et des pistes pour l'élaboration de stratégies. Cet appel à projet a concerné trois territoires volontaires pour l'expérimentation en Bretagne : la Côte de Penthièvre (22) qui intègre la commune de Pléneuf-Val-André, le Pays de Lesneven-Côte des Légendes (29) et le Parc naturel régional du Golfe du Morbihan (56). Ce projet a permis de rassembler de nombreux acteurs publics et privés impliqués dans la gestion des risques littoraux (IDEA Recherche, 2017a). Lors des ateliers, les acteurs ont pu travailler sur des scénarios d'aménagement. Ceci a abouti à la définition de stratégies à court, moyen et long termes. À l'issue de ces ateliers, un « livret d'alerte » a été réalisé pour chaque territoire participant dans l'objectif de leur permettre de poursuivre l'élaboration de leurs plans d'action. Ces livrets possèdent des « fiches repères » (Annexe 19) pour permettre aux gestionnaires de mieux anticiper les enjeux à venir sur leurs territoires littoraux. Ces actions sont donc un bon exemple des démarches qui pourraient être entreprises sur les autres territoires littoraux bretons.

Toutefois, il est important de noter que les démarches engagées par une commune sont influencées par le soutien technique et/ou financier des services de l'État. Sur la commune de Telgruc-sur-Mer, une réflexion stratégique sur la gestion du risque d'érosion des falaises de l'anse du Caon a été entreprise, depuis 2015, notamment en faisant appel à un bureau d'études et à un groupe de chercheurs (Furiga, 2015 ; Merodi, 2015). Cependant, suite à la réponse défavorable de la préfecture du Finistère en 2017, pour une demande de financement de confortement de falaise, les élus se sont complètement désintéressés de la problématique. Le manque de moyens financiers des communes peut effectivement représenter, pour elles, un obstacle à toute mise en application de stratégies, d'où un désintérêt à lancer ou à poursuivre les réflexions sur la thématique. Par contre, ces insuffisances financières permettent aussi de limiter très largement le nombre d'ouvrages de protection, avec toutes les éventuelles perturbations des dynamiques naturelles qui pourraient en résulter, en particulier quand les enjeux ne justifient pas ces aménagements (cas certainement des falaises de l'anse du Caon à Telgruc-sur-Mer, par exemple).

- **Prise en compte de la relocalisation**

La stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte (SNGITC) spécifie la nécessité de planifier, à long terme, des actions de relocalisation des activités et des biens exposés aux risques littoraux (MEDDE, 2012). Toutefois, sur les six communes, il n'y a actuellement aucune prise en compte de ce mode de gestion (indicateur « *Prise en compte de la relocalisation* », Tab. 31). La relocalisation est une mesure très rarement évoquée dans les stratégies de gestion actuelles des risques côtiers car la mise en place complexe de cette solution nécessite une forte anticipation (Mineo-Kleiner et Meur-Ferec, 2016). Cela implique, en premier lieu, la connaissance et l'appropriation des risques et des enjeux auxquels les territoires littoraux doivent faire face, avant de réorganiser et de recomposer, de manière concertée, l'aménagement du territoire. Or, nous l'avons vu précédemment que les connaissances sur l'aléa mais aussi sur les enjeux menacés par l'érosion des falaises meubles sont encore insuffisantes. De plus, corollaire indispensable à la relocalisation, les communes doivent disposer de réserves foncières sur leur territoire afin de pouvoir planifier ces mesures et éviter le départ d'habitants hors de leur commune. Or, souvent sur les communes littorales, la réserve foncière est limitée en raison de la densité de logements et des prescriptions du SCOT et du PLU pour la préservation des espaces affectés aux activités agricoles et des espaces naturels (Balland et al., 2008).

La relocalisation des biens et des activités implique également un financement important pour effectuer ces opérations. C'est pour cela que, dans bien des cas, les élus écartent cette stratégie (Mineo-Kleiner et Meur-Ferec, 2016). De plus, la relocalisation souffre de la dimension péjorative liée à la notion de risque (Krien, 2014 ; Rulleau et al., 2015 ; Mineo-Kleiner, 2017). Le recul stratégique est effectivement une option mal perçue par les riverains et est encore très peu acceptée. Pour autant, ces mesures d'adaptation représentent aussi des opportunités, sur le plan économique et écologique avec la réhabilitation de « zones tampons », la réinstallation d'espèces végétales et animales qui offrent la possibilité de développer de nouvelles activités (CESER de l'Atlantique, 2015). Les actions menées par le Conservatoire du Littoral vont dans ce sens (Meur-Ferec, 2006). Cette institution mène une politique foncière de sauvegarde du littoral qui permet de préserver des sites côtiers, de les réhabiliter et de les ouvrir au public (Fig. 240) (Gallet et al., 2011).

Fig. 240 : Travaux de restauration des végétations des hauts de falaises par le Conservatoire du littoral (Gallet et al., 2011).

Photo de gauche : réhabilitation de litière et de biomasse sur la falaise de Pen-Hir (Presqu'ile de Crozon). Photo de droite : Pose de géotextile pour favoriser le couvert végétal sur la falaise de Port-Coton (Belle-Ile).

La relocalisation est une mesure de gestion coûteuse et qui est, encore aujourd'hui, rarement évoquée dans les communes bretonnes, très souvent pour des raisons d'acceptabilité sociale et de contraintes juridiques et financières (Hénaff et Philippe, 2014). L'absence de prise en compte de la relocalisation dans les stratégies de gestion communales reflète une certaine « déconnexion » entre le cadre national de définition du dispositif et les réalités locales de leur application.

- **Concertation et échanges autour de la stratégie**

Les démarches de réflexion globale sur la gestion des risques côtiers doivent réunir l'ensemble des acteurs d'un territoire autour de la définition d'une stratégie (Denis et Henoque, 2001). La SNGITC de 2012 met effectivement en avant la nécessité d'élaborer des stratégies partagées entre acteurs (MEDDE, 2012).

Le degré d'intégration des acteurs est très variable selon les communes (indicateur « *Acteurs partenaires de la démarche* », Tab. 31). Pour Pléneuf-Val-André, il y a une très bonne intégration intra et extra-territoriale, impliquant de nombreux acteurs (EPCI, communes, département des Côtes-d'Armor, région, Conservatoire du Littoral…), notamment grâce à sa participation à l'appel à manifestation organisée par la DREAL en 2016. Les communes de Plougrescant et de Plozévet présentent également une bonne intégration en sollicitant les citoyens notamment par l'intermédiaire d'enquêtes publiques pour des questions portant sur la servitude de passage ou la révision du PLU (Dernier, 2010 ; Fauconier, 2013 ; Dumortier, 2017 ; Quintric, 2017). Les communes de Telgruc-sur-Mer et de Trédrez-Locquémeau sollicitent également différents acteurs mais n'impliquent pas la population locale dans les réflexions stratégiques. Comme le fait remarquer le CESER de l'Atlantique dans son rapport émis en 2015, les citoyens sont encore peu sollicités dans la prise de décision. En prenant l'exemple des PPRL ou des servitudes de passage qui comportent des mesures contraignantes pour les habitants, les personnes concernées sont souvent informées très peu de temps avant l'enquête publique et la concertation s'effectue parfois de manière incomplète et réservée. Ceci expliquerait l'incompréhension et la faible acceptation, par les riverains, des mesures de prévention et de gestion mises en œuvre sur les territoires par les collectivités locales (Meur-Ferec, 2006 ; Perherin, 2017). Enfin, sur la commune de Locquirec, l'intégration des acteurs est quasi-inexistante. Les difficultés de communication entre les différents acteurs ont été identifiées, dès le début de la thèse, notamment auprès des propriétaires et des services de l'État, qui ne sont pas informés des mesures de gestion entreprises par la commune. Ainsi, les riverains sont inquiets de l'absence de retour des élus et des services de l'État sur la problématique de gestion du risque d'érosion des falaises du Moulin de la Rive et de la dégradation de la route de la Corniche RD64A. Depuis 2008, plusieurs études ont été menées sur l'érosion des falaises meubles, au Moulin de la Rive, mais aucune de leurs conclusions n'a été donnée aux résidents du site qui sont pourtant les premiers concernés par le risque (Tab. 32).

Tab. 32 : Études de diagnostic réalisées sur les falaises meubles du Moulin de la Rive, à Locquirec, entre 2008 et 2015.

Date	Objet	Demandeur	Réalisateur
Juillet 2008	Étude du phénomène d'érosion du littoral sur l'anse du Moulin de la Rive et étude de solutions de protection	Mairie	In Vivo
Novembre 2008	Rapport circonstancié sur les effondrements de la falaise du Moulin de la Rive	Mairie	UBO
Octobre 2014	Diagnostic géotechnique (G5) - Étude de la stabilité de la RD64A – Moulin de la Rive à Locquirec	Conseil général 29	Ginger-CEBTP
Mars 2015	Étude de l'érosion du trait de côte du site du Moulin de la Rive	DDTM 29	Cerema
Septembre 2015	Étude géotechnique de conception phase projet (G2) - Confortement de la falaise du Moulin de la Rive - RD64A	Conseil général 29	Ginger-CEBTP

L'avancée sur les réflexions doit se faire entre les acteurs d'un même territoire mais aussi avec des gestionnaires appartenant à d'autres territoires afin de partager les expériences et les connaissances. L'indicateur « *Intégration extra-territoriale* » permet de mesurer la mise en réseau des élus de la commune avec d'autres gestionnaires, leur participation et leur implication à des « travaux » (tables-rondes, ateliers, colloques, formations…) sur le thème des risques côtiers (Annexe 20). Sur les six communes, l'intégration extra-territoriale est relativement faible car chacune d'elles a participé, au cours de l'année 2018, à moins de cinq travaux voire aucun pour les communes de Locquirec, de Telgruc-sur-Mer et de Plozévet

(Tab. 31). Cette faible participation viendrait, d'une part, des gestionnaires qui ne sont pas suffisamment informés des événements et, d'autre part, d'un manque d'événements organisés à l'échelle locale. En Bretagne, des tables-rondes et des colloques sur les risques littoraux ont lieu régulièrement mais ils sont effectivement organisés en grande majorité dans le Finistère (ex : colloque « *IXème Journées Nationales Génie Côtier* » (Brest, 2006), colloque *Cocorisco* (Brest, 2014 ; https://cocorisco.sciencesconf.org/), table-ronde « *Érosion et submersion marines, s'adapter ou résister* » (Quimper, 2016), table-ronde « *Érosion côtière et submersion marine, Quel avenir pour les espaces naturels littoraux* » (Ile-Tudy, 2018)). Ces événements sont souvent à l'initiative de scientifiques travaillant dans les laboratoires de recherche à Brest, Vannes ou Dinard.

Toutefois, l'indicateur « *Publications scientifiques sur les risques d'érosion* » montre une faible implication des chercheurs dans la gestion des risques (Tab. 31). Le faible nombre de publications sur les risques d'érosion des falaises meubles (1 à 2 travaux de recherche par commune) montre effectivement que les scientifiques sont insuffisamment consultés. Pour autant, la connaissance de l'aléa et des enjeux menacés sur un territoire est la base pour mener une réflexion sur les stratégies de gestion, d'autant plus que les connaissances actuelles sur les phénomènes d'érosion sont encore insuffisantes (ex : rythmes et modalités de recul des falaises meubles, ampleur des impacts du changement climatique sur le littoral…).

- **Les moyens humains à disposition**

Pour mettre en place une stratégie de gestion des risques côtiers sur un territoire, il est également indispensable de disposer de personnels (ex : ingénieur, élu) en capacité de traiter spécifiquement de la thématique. Le nombre de personnes travaillant sur la gestion des risques côtiers dans une commune doit être fonction du nombre total d'habitants car, plus le poids démographique est important, plus les enjeux et les risques sont susceptibles d'augmenter. Ceci demande alors davantage de personnels pour traiter la problématique. L'indicateur « *Compétences humaines sur les risques d'érosion* » tient compte du nombre d'habitants par commune (Tab. 31).

Dans les six communes étudiées, il n'existe pas de gestionnaire qui traite de la thématique des risques côtiers à temps plein ni de poste spécifique sur cette problématique. Bien souvent, ce sont les chargés de l'urbanisme et de l'environnement, dans les plus grandes communes (cas de Pléneuf-Val-André) ou les adjoints au maire, dans les plus petites communes (cas des cinq autres sites d'étude), qui traitent des questions relatives à la gestion du littoral. Il ne s'agit donc pas de leur mission principale mais d'un sujet dont ils sont susceptibles de s'occuper partiellement notamment lorsque la situation, à un moment donné (ex : enjeux menacés à la suite d'un événement météo-marin), le demande. Lors de ces situations, ils font généralement appel aux EPCI et aux services de l'État, notamment la DDTM, afin de mettre rapidement en place des mesures de gestion. Cette absence de personnels traitant spécifiquement de la thématique des risques côtiers pourrait expliquer les retards dans l'élaboration de stratégies locales.

La démarche locale est donc globalement insuffisante sur les six communes étudiées. Il s'agit de la composante de gestion qui possède l'indice le plus faible (Tab. 31). Ce résultat s'explique notamment pas un défaut de concertation et de communication entre les différents acteurs.

11.3.3- La gestion du trait de côte

Les dispositifs de gestion du trait de côte mis en œuvre par la commune renseignent de la cohérence des actions et de la prise en compte des risques côtiers sur son territoire.

- **Archivage des phénomènes d'érosion**

La mémoire du risque, basée sur la connaissance des événements passés, est un préalable au développement de la culture du risque et des techniques à adopter afin de réduire la vulnérabilité. La mémoire du risque participe effectivement à la résilience des territoires : une population qui connait le risque est mieux préparée à l'affronter (Leone, 2007). L'archivage des aléas d'érosion constitue le premier support au développement de la mémoire du risque et il peut se faire de multiples façons : recueil de photographies, enquêtes auprès des habitants, observations de terrain par un bureau d'études ou par les services municipaux… (cf. chapitre 5).

Sur les six communes, l'archivage des phénomènes d'érosion s'arrête bien souvent au stockage des études et de photographies sans recensement des dates d'aléas ni de recueil de témoignages auprès des riverains (indicateur « *Archivage des phénomènes d'érosion* », Tab. 31). La commune de Locquirec ne possède, quant à elle, aucune archive sur les risques côtiers. Ce manque d'archivage et de stockage des données est à relier avec l'absence de démarche de la commune sur la gestion des risques côtiers.

- **Gestion des ouvrages de défense contre la mer**

La gestion des ouvrages de défense contre la mer est appréhendée par les indicateurs « *État et efficacité des ouvrages de défense* » ainsi que par l'indicateur « *Mise en place de la compétence GEMAPI* » (Tab. 31). La GEMAPI affecte aux communes les compétences de défense contre les inondations et contre la mer par la loi MAPTAM du 24 janvier 2014 (MEDDE, 2016). Cette compétence intègre les problématiques de recul du trait de côte et elle joue un rôle majeur dans la gestion des risques côtiers, notamment à travers son rôle de suivi du bon état des ouvrages. Cette compétence peut être transférée par la commune à l'EPCI dont elle est membre. Les Établissements Publics Territoriaux de Bassin (EPTB) et les Établissements Publics d'Aménagement et de Gestion de l'Eau (EPAGE) peuvent également exercer tout ou une partie des missions relevant de la compétence GEMAPI. La structure porteuse de la compétence peut imposer une taxe, plafonnée à 40 € par habitant et par an, pour lui permettre d'assurer financièrement la gestion des ouvrages de protection (Jacquier-Laforge, 2017). Le montant de la taxe est évalué sur la base d'un budget prévisionnel pour l'exercice de la compétence durant l'année.

Du fait que la GEMAPI est devenue une compétence obligatoire au 1er janvier 2018, les six communes ont identifié une structure porteuse du projet (Tab. 33). Très souvent, la compétence est confiée à la communauté de communes à laquelle appartient la municipalité. En 2018, trois des six structures porteuses de la compétence GEMAPI ont instauré une taxe comprise entre 4 et 12 €.

Tab. 33 : Structure porteuse de la compétence GEMAPI pour les six communes.

Site d'étude	Pléneuf-Val-André	Plougrescant	Trédrez-Locquémeau	Locquirec	Telgruc-sur-Mer	Plozévet
Structure porteuse	Lamballe Terre et Mer	Lannion Trégor Communauté (LTC)		Communauté d'Agglomération Morlaix Communauté	Établissement Public de gestion et d'Aménagement de la Baie de Douarnenez	Communauté de communes du Haut Pays Bigouden et Syndicat mixte SAGE Ouest-Cornouaille
Statut	EPCI	EPCI		EPCI	EPAGE	EPCI et EPAGE
Présence d'une taxe	Non	Entre 6 et 12 €		4,38 €	Non	Non

Bien que les structures porteuses de la GEMAPI ont été identifiées dans chaque commune, il est important de connaitre le niveau de suivi et l'entretien des ouvrages de protection. C'est ce que renseigne l'indicateur « *État des ouvrages de défense contre la mer* ». Sur les six communes, les ouvrages sont majoritairement en bon état et bien entretenus (Tab. 31). Toutefois, un bon entretien de l'ouvrage ne garantit pas une protection efficace de la côte. Les dégâts générés au droit des enrochements des sites

de Pors-Hir et du Moulin de la Rive, lors des tempêtes de février 2014, illustrent ce propos (Fig. 241). Ainsi, l'indicateur « *Efficacité des ouvrages* » renseigne leur capacité à protéger les secteurs littoraux en fonction de leur adaptation aux processus d'érosion impliqués. Les ouvrages mis en place pour stopper ou freiner l'érosion des falaises meubles sont effectivement souvent inadaptés car ils ne prennent pas en compte l'implication de processus subaériens (ex : infiltration des eaux de pluie, ruissellement…) dans le recul des falaises (Albinet, 1995). Il en résulte que des murs s'effondrent ou que des enrochements s'affaissent et se dégradent (Fig. 242) et que l'érosion de la plage au droit de l'ouvrage soit amplifiée par la réflexion des vagues. Certains ouvrages accélèrent même l'érosion dans les secteurs voisins (Fig. 243). Ainsi, sur les sites de Pléneuf-Val-André, de Plougrescant, de Locquirec et de Telgruc-sur-Mer, on observe une érosion accrue par « effets de bout » à l'extrémité des enrochements ou des murs.

Fig. 241 : Enrochements détruits à la suite des tempêtes de février 2014 et érosion des terrains en arrière, sur le site de Pors-Hir, à Plougrescant (photo de gauche) et au Moulin de la Rive, à Locquirec (photo de droite).

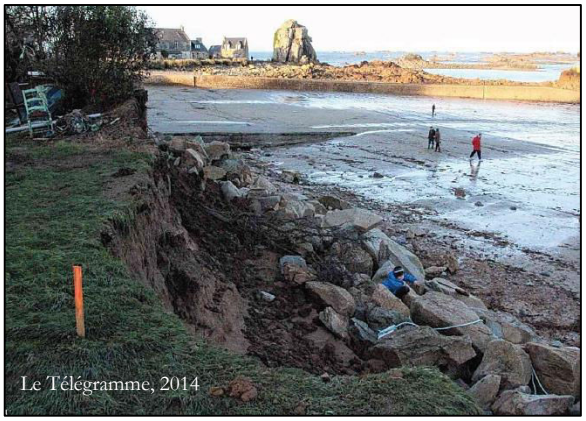


Fig. 242 : Ouvrages de défense contre la mer endommagés suite au recul en arrière des falaises meubles par les eaux de ruissellement et d'infiltration. Photo de gauche : mur de protection effondré à Plougrescant (2007). Photo de droite : glissement des blocs de l'enrochement à Plovan et mise à nu du géotextile (2019).

Fig. 243 : Érosion exacerbée à l'extrémité du mur de protection ("effet de bout") au Moulin de la Rive, à Locquirec.

- **Recherche de solutions d'aménagement**

Face à l'érosion des falaises meubles et les enjeux menacés, les communes cherchent souvent à mettre en place des dispositifs efficaces contre l'érosion tout en essayant de minimiser les coûts. Elles ont donc recours, bien souvent, à des bureaux d'études spécialisés qui leur proposent différentes solutions d'aménagement.

Les six communes ont fait réaliser au moins 1 à 2 études portant sur les solutions d'aménagement de secteurs à falaises meubles présents sur leur territoire (indicateur « *Études techniques réalisées sur les solutions d'aménagement* », Tab. 31 et Annexe 21). Toutefois, rares sont les cas où ces études ont abouti à l'adoption d'une des solutions préconisées par le bureau conseil. Les dispositifs de gestion préconisés sont en réalité souvent trop coûteux au regard des moyens financiers dont dispose la commune (Tab. 34), d'autant plus que la fixation du trait de côte est une mesure de gestion de moins en moins subventionnée par l'État (Deboudt, 2010). En plus du coût qu'ils impliquent, ces ouvrages, du fait de leur dimensionnement, peuvent également venir dénaturer le paysage et l'aspect attrayant du rivage (Fig. 244). Certains des dispositifs proposés par les bureaux d'études proposent, en effet, d'armer la totalité de la hauteur de falaise, de sorte que la protection peut conduire à un résultat particulièrement inesthétique. Ceci peut avoir un impact négatif en termes d'attractivité touristique et, par là même, de retombées économiques (Albinet, 1995).

Tab. 34 : Exemples de solutions préconisées par des bureaux d'études et coûts associés sur les sites à falaises meubles de Nantois, du Moulin de la Rive et de l'anse du Caon.

Site d'étude	Dispositifs proposés	Coût total TTC estimé
Falaise de Nantois (Pléneuf-Val-André)	Confortement de falaise comprenant : - un reprofilage de crête - des enrochements (L= 40 m, H = 3 m) - un système d'ancrage et de géogrille (L= 40 m, H = 9 m) - un captage du ruissellement	252 000 €
	Dispositif Stabiplage : remblai et filtre en géotextile (L = 130 m, H = 2,4 m)	200 340 €
Falaise du Moulin de la Rive (Locquirec)	Confortement de falaise comprenant : - une purge des matériaux et démolition de l'escalier - un reprofilage de talus - des travaux de clouage de paroi (L = 70 m) - des travaux de béton projeté - des travaux d'enrochements (L = 70 m, H = 4 m)	858 000 €
Falaise de l'anse du Caon (Telgruc-sur-Mer)	Protection du pied de falaise comprenant : - un reprofilage des talus - un enrochement avec géotextile	358 180 €

Fig. 244 : Dispositifs de confortement de falaises meubles.

Photo de gauche : coupe schématique du dispositif proposé pour conforter la falaise meuble à Nantois (Desparmet, 2007). Photo de droite : exemple de confortement sur toute la hauteur de falaise (béton projeté et enrochement) installé à Trestraou en Perros-Guirec.

La mise en place d'ouvrages est également contrainte par la présence d'espaces naturels faisant l'objet d'une protection au titre des espaces remarquables (ex : zones Natura 2000, Zones naturelles d'intérêts écologique, faunistique et floristique (ZNIEFF)). C'est le cas de nombreux secteurs littoraux bretons tels que les sites des Vallées à Pléneuf-Val-André, de Pors-Hir à Plougrescant et du Moulin de la Rive à Locquirec. Ainsi, selon les articles L.146.6 et R.146.1 du code de l'urbanisme, un des principes de gestion retenu sur ces espaces protégés est d'interdire toute artificialisation du trait de côte. Seuls les « *aménagements légers* » peuvent être réalisés lorsqu'ils sont nécessaires à la gestion des espaces, leur mise en valeur ou leur ouverture au public.

- **Mitigation**

La réduction du risque peut passer par des mesures visant à atténuer l'aléa en limitant les facteurs anthropiques qui aggravent l'érosion tels que les rejets d'eaux usées dans les sols. Le degré de mitigation des secteurs à falaises meubles est appréhendé par l'indicateur « *Réduction de la sensibilité du site à l'érosion* » qui tient compte de la présence d'un système d'assainissement collectif et de l'existence d'un système de drainage du versant (Tab. 31).

Les communes de Plougrescant, de Telgruc-sur-Mer et de Plozévet ne disposent pas de réseaux de collecte des eaux usées (Fig. 245). En effet, dans les communes rurales caractérisées par un bâti très dispersé, l'assainissement est rarement collectif (Berland, 2004). Les eaux usées sont alors rejetées dans les sols et viennent augmenter la sensibilité de la falaise à l'érosion (Pinot, 1998). Sur les communes de Locquirec et de Trédrez-Locquémeau, bien qu'il y ait un réseau d'assainissement collectif, toutes les résidences ne sont pas raccordées.

Fig. 245 : Buse d'évacuation des eaux, visible sur le site de Pors-Hir à Plougrescant, et incisant la falaise par le déversement des eaux.

La gestion du trait de côte est la composante de la gestion qui présente l'indice le plus élevé sur les six communes (Tab. 31). Ceci montre la volonté des communes de se protéger de l'aléa érosion, notamment par la mise en place et l'entretien des ouvrages ainsi que par la recherche de solutions d'aménagement. Néanmoins, les communes tentent rarement de diminuer le risque par une réduction des enjeux, par exemple en déplaçant ou en relocalisant les biens exposés.

11.3.4- La prise en compte du risque dans l'aménagement

La prévention du risque passe par sa prise en compte dans les documents d'urbanisme, ce qui permet notamment de maîtriser l'urbanisation en zone à risque.

- **Un dispositif de prévention encore peu développé : le PPRL**

Le PPRL est l'outil réglementaire qui impose l'intégration des risques côtiers dans les documents d'urbanisme. Son état d'avancement (prescription, concertation, consultation, révision…) permet d'identifier le degré d'intégration du risque dans le PLU. Un PPRL n'est véritablement efficace qu'une fois approuvé et intégré au PLU. À ce jour, il n'existe aucun plan de prévention des risques littoraux sur les six communes (indicateur « *État général du PPRL* », Tab. 31). L'érosion des falaises meubles menaçant moins directement la vie humaine en comparaison des phénomènes d'inondation, le risque d'érosion ne fait pas encore l'objet d'une attention importante par les services de l'État et de la préfecture qui prescrit le PPRL (Martin et al., 2010 ; Gérin, 2011).

L'absence actuelle des PPRL s'explique aussi par le fort poids réglementaire qui impose d'intégrer les risques côtiers, leurs zonages et les prescriptions dans les documents d'urbanisme. Le zonage du PPRL a effectivement des conséquences majeures à l'échelle de la commune et des habitants : il est annexé au PLU en tant que servitude d'utilité publique et comprend des interdictions et/ou des prescriptions applicables au bâti futur et existant. Ainsi, un PPRL peut interdire toute construction ou aménagement en zone d'aléa fort mais aussi modéré. La mise en œuvre des plans de prévention est donc souvent délicate et accompagnée de contentieux (CESER de l'Atlantique, 2015). L'élaboration de ces plans doit souvent faire face à des conflits, notamment sur les territoires où la pression foncière est forte (Pottier et al., 2003 ; Perherin, 2017). C'est pourquoi, la durée d'élaboration des PPRL est souvent bien plus longue que le délai de trois ans prévu par l'article de loi R562-2 du code de l'environnement. Dans certains secteurs, le retard est tel que les préfets sont contraints de proroger le délai. Ceci a, par exemple été le cas pour le PPRL de la baie de Saint-Brieuc prescrit le 14 octobre 2011 et prorogé jusqu'au 14 avril 2016 (Soubelet, 2014).

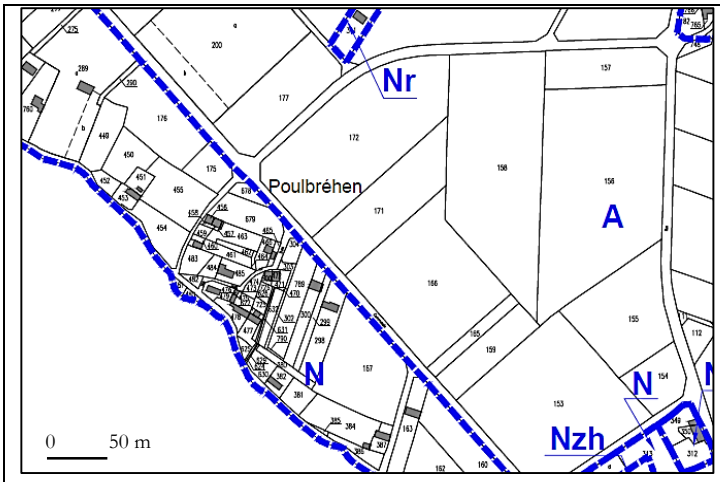
- **Prise en compte du risque dans les documents d'urbanisme : le PLU et le SCOT**

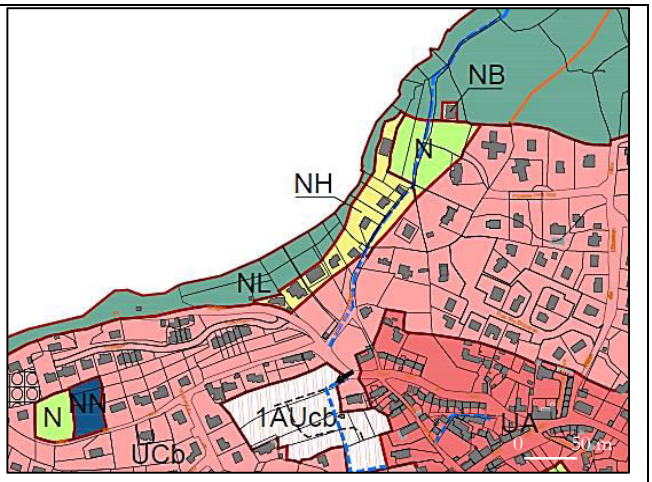
L'analyse des instruments de maîtrise de l'urbanisme (PLU, SCOT) renseigne sur la limitation de l'urbanisation dans le but de restreindre le plus possible les enjeux exposés au risque d'érosion.

Les Schémas de Cohérence Territoriale (SCOT) constituent un outil permettant de mettre en adéquation l'aménagement du territoire, sur plusieurs communes, avec leur exposition aux risques naturels. Pour autant, le risque d'érosion des falaises meubles n'est pas toujours pris en compte dans les SCOT (Tab. 31). Ainsi, dans le SCOT du Trégor (approuvé en 2013 et actuellement en révision) et dans le SCOT de Morlaix Communauté (approuvé en 2014), le risque d'érosion des falaises meubles n'est pas décrit, alors que les falaises meubles sont relativement étendues sur ces territoires. L'absence de prise en compte du risque dans les SCOT serait davantage due à une méconnaissance et à une difficulté de l'appréhender (CEPRI, 2016). *A contrario*, les SCOT du Pays de Saint-Brieuc et de l'Ouest Cornouaille présentent, de façon détaillée, le risque d'érosion des falaises meubles en expliquant les causes et en donnant des exemples d'aléas avec une localisation du risque à l'échelle du territoire. Ces secteurs bénéficient de la présence de travaux de recherche permettant ainsi d'apporter des informations pouvant être intégrées au SCOT (Hallégouet et Hénaff, 1993 ; Bonnot-Courtois et Lafond, 1995 ; Bousquet-Bressolier et Bonnot-Courtois, 1998 ; Faye et al., 2007 ; Bonnot-Courtois et al., 2008 ; Hénaff et al., 2013).

La prise en compte du risque dans les documents d'urbanisme, à l'échelle communale, est renseignée par l'indicateur « *Contraintes de constructibilité* » (Tab. 31). Dans les PLU, les limites de constructibilité d'une zone se mesurent selon l'autorisation, la limitation ou l'interdiction d'urbanisation ou d'aménagements futurs. Sur les secteurs à falaises meubles des six communes, les zones exposées à l'aléa d'érosion sont interdites à toute construction (Fig. 246). Seuls les aménagements légers conformément à l'article L121-24 du code de l'urbanisme sont possibles : « *aménagements nécessaires à la gestion, à la mise en valeur ou à l'ouverture au public de ces espaces ou des travaux de conservation ou de protection de ces espaces* ». Sur les sites d'étude, les zones exposées sont classées en Zone naturelle (dénomination N) (Fig. 246). Pour les constructions déjà existantes, les PLU n'y permettent aucune extension mais uniquement la rénovation des bâtiments dans les volumes existants. Toutefois, sur la commune de Trédrez-Locquémeau, des secteurs adjacents au site d'étude, non urbanisés mais exposés à l'aléa, sont classés en « zone NH » et « zone UCb » où les constructions sont autorisées et limitées seulement par une hauteur maximale au faitage de 8 mètres (Fig. 246).

Fig. 246 : Extraits des cartes de zonage des PLU de la commune de Plozévet (photo de gauche) et de la commune de Trédrez-Locquémeau (photo de droite).





Légende des cartes :

N : Zone naturelle
Nr : Zone naturelle où des réfections sont possibles
Nzh : Zones humides
A : Zone agricole

NL : Espaces littoraux remarquables
NH : Zone naturelle offrant une construction limitée
NB : Bâtiments exclus des espaces remarquables
NN : Site archéologique
UCb : Zone urbaine de construction individuelle

Pour les communes de Telgruc-sur-Mer et de Locquirec, il n'existe pas encore de PLU. Le document d'urbanisme existant correspond au Plan d'Occupation des Sols (POS). Ces POS encore en vigueur sont en cours de remplacement par des PLU comme la loi Alur de 2014 l'impose désormais (ADU-Montbéliard, 2014).

11.3.5- Les actions d'information et de sensibilisation

La prévention du risque passe également par l'information et la sensibilisation de la population. Les documents d'information sur les risques présents sur le territoire, élaborés par le maire et ses conseillers municipaux, doivent être mis à la disposition des citoyens dans les communes.

- **Les outils et dispositifs d'information**

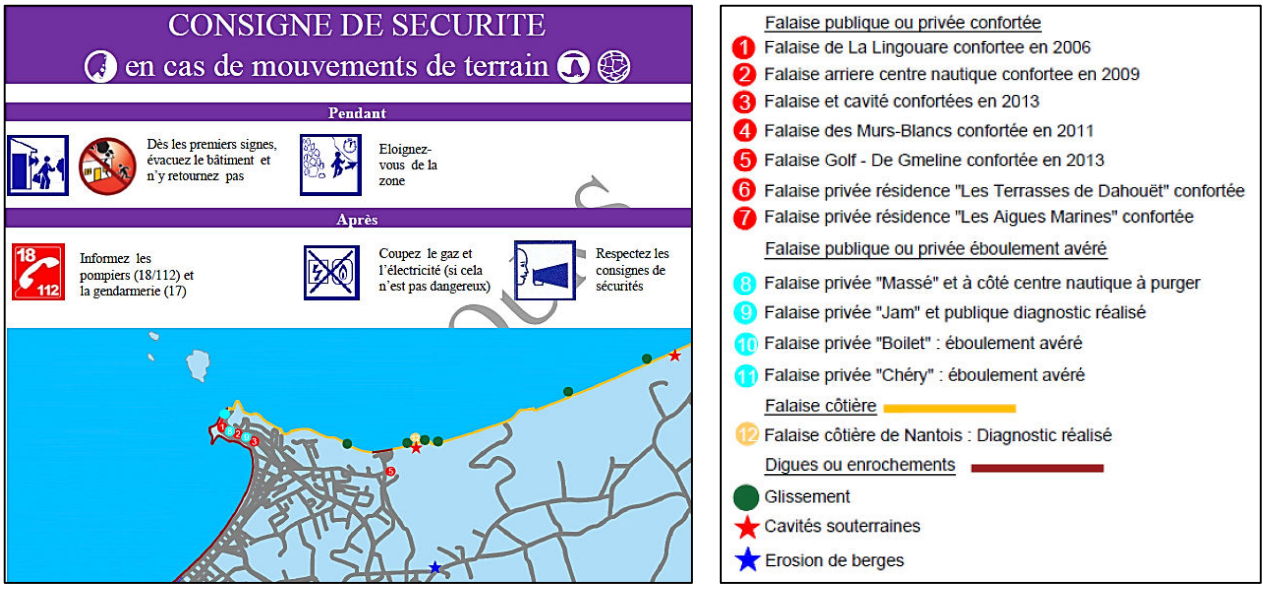
Le DICRIM est un document visant à renseigner tout citoyen des risques majeurs présents dans la commune et des mesures de prévention. Pour autant, ce document informatif est très peu utilisé car, sur les six communes, seulement deux en possèdent un (indicateur « *État et mode de diffusion du DICRIM* », Tab. 31). Le DICRIM n'étant obligatoire que pour les communes dotées d'un PPR (Clément et al., 2011), c'est un document encore peu répandu. L'article R. 125-11 du code de l'environnement indique que le document doit être consultable gratuitement en mairie. Mais, pour qu'il soit réellement considéré, il est nécessaire qu'il soit diffusé à la population par d'autres moyens (ex : internet, voie postale). Sur les communes où le DICRIM est présent, c'est-à-dire, ici, Plougrescant et Pléneuf-Val-André, il est seulement consultable en mairie ou sur le site internet de la commune et n'a pas fait l'objet d'une distribution par voie postale. Les maires préfèrent souvent éviter de communiquer sur les risques présents sur leur territoire craignant un éventuel impact sur l'attractivité de leur commune (CESER de l'Atlantique, 2015). C'est une des raisons pour laquelle, lors de la phase d'élaboration de ce document, les habitants sont rarement consultés (Hubert et Reliant, 2003).

L'existence et la diffusion du DICRIM ne garantissent pas une bonne appropriation du document par la population. Il est en effet nécessaire que le DICRIM soit aisé à lire (rapport clair et synthétique, définition

des termes techniques…) afin que le document soit lu et bien compris par l'ensemble de la population. L'indicateur « *Analyse pédagogique du DICRIM* » permet d'étudier la qualité instructive du DICRIM dans les communes qui en disposent un. Pour les communes où le DICRIM est absent, aucune valeur n'a été attribuée à cet indicateur (Tab. 31).

Dans le DICRIM des communes de Plougrescant et de Pléneuf-Val-André, le risque d'érosion littorale et de mouvement de terrain est décrit avec une localisation des secteurs concernés sur une carte communale (Fig. 247). Dans ces DICRIM, les actions de prévention, de protection et de sauvegarde sont explicitées et se résument principalement à « *rester toujours le plus éloigné possible du pied de falaise (30 ou 40 mètres minimum)* » et à « *signaler à la mairie, toute chute de pierres ou fissuration suspecte visible sur le replat en arrière de la crête de falaise* ». Ces mesures sont concises mais les DICRIM ne sont pas suffisamment synthétiques étant donné qu'ils comportent chacun plus de 30 pages. De plus, dans le DICRIM de Plougrescant, les pages sont denses et les termes scientifiques (ex : « *aléa* », « *trait de côte* ») ne sont pas clairement définis. Le nombre élevé de pages, leur mauvaise structuration et la complexité des termes scientifiques peuvent avoir pour effet un manque d'attention ou une perte d'intérêt accordé à la lecture du document.

Fig. 247 : Extrait du DICRIM de Pléneuf-Val-André (Mairie de Pléneuf-Val-André, 2017) sur les consignes de sécurité en cas de mouvements de terrain.



Il est également nécessaire que les DICRIM décrivent les aléas d'érosion antérieurs, survenus dans la commune, afin de sensibiliser les habitants au passé ou au vécu de leur territoire (Clément et al., 2011). Pour autant, les DICRIM de Plougrescant et de Pléneuf-Val-André ne contiennent pas d'historique d'aléas, faute d'archivage et de recensement des phénomènes d'érosion, et se restreignent à citer seulement ceux ayant fait l'objet d'un arrêté CatNat.

Les panneaux signalétiques installés à proximité des zones à risque sont un autre moyen pouvant être mis en place par le maire pour informer la population de la présence d'un danger. De par son pouvoir de police et de sécurité civile, le maire se doit de signaler les risques naturels, connus ou prévisibles, présents sur le territoire de sa commune (article L.212 du code général des collectivités territoriales). Pour autant, sur les six communes, seules trois ont disposé des panneaux informatifs pour prévenir du risque de mouvements de terrain (indicateur « *Présence de panneaux d'avertissement* », Tab. 31 et Fig. 248). Ces instruments sont pourtant essentiels pour informer les citoyens (riverains et touristes) et entretenir la

culture du risque. Il est également nécessaire que ces panneaux signalétiques soient régulièrement nettoyés et entretenus, car leur dégradation avec le temps peut rendre l'information illisible (Fig. 248C).

Fig. 248 : Panneaux signalétiques installés pour prévenir du risque d'instabilité de falaise ; de gauche à droite : à Pléneuf-Val-André, à Trédrez-Locquémeau et à Plozévet.

L'information du public sur les phénomènes d'érosion récents peut se faire également par l'intermédiaire des médias qui utilisent différents supports d'information (articles de presse, radio, télévision, internet…). Les médias participent ainsi au développement de la culture du risque sur un espace dépassant l'échelle communale. Sur les six communes, le nombre de publications, dans la presse locale, traitant des risques d'érosion de falaises meubles est très variable d'une commune à l'autre (indicateur « *Publications dans la presse locale* », Tab. 31). En effet, tandis que les communes de Plougrescant, de Trédrez-Locquémeau et de Locquirec comptabilisent plus de 7 articles de presse, depuis le début des années 2000, les autres communes ne comptent que 2 à 3 articles traitant du sujet. L'intérêt plus grand des médias sur un secteur donné est notamment lié aux enjeux qui y sont exposés et/ou à l'ampleur des dommages occasionnés (Mercier, 2006). C'est pourquoi, sur les secteurs urbanisés, l'érosion des falaises meubles fait l'objet d'une plus grande attention et les médias entretiennent alors souvent un discours catastrophique (Tabeaud et Bardou, 1996) : « *La falaise s'effondre au désespoir d'Alain Le Coadou* » (Le Télégramme, 28/11/2013) ; « *Grande marée. À Plougrescant, Pors-Hir est devenu une île* » (Ouest-France, 02/02/2014) ; « *Quand la catastrophe ne s'arrête pas* » (Le Télégramme, 08/05/2014). En revanche, lorsque seul le sentier côtier est touché par l'érosion des falaises meubles, le recul du trait de côte suscite un moins grand intérêt.

- **La sensibilisation des citoyens**

La prévention des risques passe nécessairement par la sensibilisation des citoyens. Celle-ci peut se faire par l'intégration de la thématique des risques côtiers aux programmes d'enseignement afin de transmettre aux générations futures la connaissance du risque et la mémoire des événements passés pour qu'elles soient en mesure de se prémunir (Vinet, 2002). Les écoliers (primaire-collège-lycée), qui sont plus réceptifs à la sensibilisation, sont également susceptibles de transmettre le message à leurs parents. Pour autant, l'indicateur « *Événements de sensibilisation dans les établissements scolaires* » (Tab. 31) montre que, sur les six communes, il n'existe aucun événement de sensibilisation aux risques côtiers dans les établissements scolaires.

La sensibilisation des citoyens peut également se faire par l'intermédiaire de syndicats de propriétaires riverains et d'associations environnementales qui participent à la surveillance régulière du littoral. Sur les six communes, quatre d'entre elles présentent une association traitant des problèmes liés au risque d'érosion (indicateur « *Présence d'associations sur les risques côtiers* », Tab. 31). Les associations les plus actives sont les syndicats des propriétaires riverains car, dans ce cas, des intérêts privés sont engagés dans la problématique de gestion du risque. L'association des *Riverains du Moulin de la Rive*, à Locquirec, créée suite aux tempêtes de février 2014 qui ont fortement endommagé le front de mer et les ouvrages de

défense privés qui s'y trouvaient, en est un bon exemple. À l'inverse, d'autres associations sont plutôt axées sur la protection et la préservation de la bande côtière telles que le *Comité pour la sauvegarde du littoral de la commune de Plozévet* qui veille notamment à la continuité et à l'accès du chemin de servitude le long du littoral. Pour se faire entendre, ces associations font souvent appel à des journalistes, ce qui permet de médiatiser les risques d'érosion et d'entretenir la mémoire du risque.

Les associations participent également à des expositions afin de sensibiliser les citoyens (permanents et touristes) au risque d'érosion. À Plozévet une exposition sur l'évolution du littoral a été réalisée durant l'été 2018. La sensibilisation du public saisonnier est tout aussi importante que celle des riverains permanents car le risque augmente en période estivale en raison de la forte fréquentation du littoral. De plus, les résidents saisonniers sont généralement moins sensibilisés aux risques littoraux du fait de l'absence de vécu sur le territoire (Vinet et al., 2012 ; Rulleau et al., 2015).

Le développement d'associations de riverains reflète une certaine déresponsabilisation du citoyen vis-à-vis des risques littoraux car, nombreux sont ceux qui considèrent que c'est aux pouvoirs publics d'agir pour éviter ou limiter les éventuels dommages liés à l'érosion des falaises meubles. Pour autant, la loi du 16 septembre 1807 qui, à ce jour, n'a jamais été remise en cause, pose le principe de non obligation de l'État à réaliser ou financer les travaux de défense contre la mer (Clus-Auby, 2003 ; CESER de l'Atlantique, 2015). Leur charge financière reviendrait donc, en principe, aux propriétaires des terrains. La réaction vive des riverains face à l'absence d'aide financière de la part de l'État ou des collectivités peut s'expliquer par un déficit d'information et de sensibilisation des citoyens au risque d'érosion et à sa gestion.

11.3.6- La gestion de crise

À l'approche ou suite à la survenue d'un aléa, il est nécessaire que la population soit prévenue et informée rapidement. La gestion d'urgence et post-événement donne une première indication sur la capacité de réponse de la commune face au risque d'érosion.

Le Plan Communal de Sauvegarde (PCS) est dédié à l'organisation, par le maire, d'une réponse d'urgence à tout événement majeur survenant sur le territoire de sa commune (Belin, 2005). Ce document recense l'ensemble des éléments pouvant être mobilisés lors de la survenue d'un aléa (ex : numéros de téléphone, matériels disponibles, localisation des services de secours…). L'indicateur « *Mise à jour et état du PCS* » (Tab. 31) montre que, sur les six communes, seule Plougrescant dispose d'un PCS qui a été élaboré en 2017. La faible présence de ce document peut s'expliquer par le fait qu'il n'est obligatoire que pour les communes soumises à un risque majeur identifié par un PPR (Vinet, 2007).

Bien que les communes ne disposent pas de PCS, elles se doivent de mettre en place des mesures pour sécuriser les zones devenues dangereuses après la survenue d'un aléa. À la suite de l'érosion d'une falaise meuble, des portions de côte peuvent effectivement devenir dangereuses pour les promeneurs (ex : sentier côtier effondré ou devenu trop proche du bord de falaise). Le maire peut alors faire la demande d'un arrêté préfectoral d'interdiction ou de modification de la servitude de passage sur le littoral ou mettre en place des barrières de protection accompagnées de panneaux explicatifs. L'indicateur « *Mise en place de mesures de sécurisation post-événement* » (Tab. 31) renseigne sur les dispositifs adoptés. Sur les six communes, suite à des phénomènes d'érosion, les maires choisissent souvent de mettre en place des barrières en haut de falaise ou de baliser les secteurs effondrés par une bande de signalisation (Fig. 249). Toutefois, ces dispositifs sont rarement accompagnés de panneaux expliquant la nature du danger et les précautions à prendre. De plus, dans la majorité des cas, seulement une partie des zones à risque est balisée. La difficulté dans ce dispositif réside dans le fait que les instabilités de falaise impliquent bien souvent un grand linéaire de côte et, on comprend dans ce cas, que l'implantation de barrières sur tout le

linéaire est peu envisageable, d'autant plus que les autorités seraient amenées à déplacer régulièrement ce dispositif en raison du recul relativement fréquent des falaises.

Fig. 249 : Balisage des zones devenues dangereuses pour les promeneurs à Plozévet (photo de gauche) et à Telgruc-sur-Mer (photo de droite).

11.3.7- Bilan

L'analyse de la gestion réalisée sur les sites d'étude, à partir des indicateurs décrits, met en évidence un manque d'anticipation et d'adaptation face à l'augmentation des risques littoraux et une absence de stratégie de gestion à long terme. Il n'y a, en effet, pas de prise en compte de la relocalisation pour des raisons d'acceptabilité sociale, de contraintes juridiques et financières, d'incertitudes sur les niveaux de risque et des réserves foncières assez faibles. L'absence de stratégie observée dans les communes reflète ainsi le problème d'adéquation entre les orientations nationales et les spécificités locales (Deboudt, 2010).

L'analyse de la gestion à partir d'indicateurs montre également une concertation insuffisante entre les différents acteurs. Les scientifiques sont rarement impliqués dans la gestion des risques et les citoyens sont encore peu sollicités dans la prise de décision. Il en résulte une faible acceptabilité sociale des mesures de prévention. Ces défauts de concertation et de communication sont fréquemment observés dans les politiques de gestion des risques (Pottier et al., 2003 ; Martin et al., 2010 ; Gérin, 2011).

Le transfert de la compétence GEMAPI aux EPCI illustre le renforcement du rôle des intercommunalités en matière de gestion des risques littoraux. Face au manque de moyens humains, financiers et techniques, la gestion des risques se fait effectivement de plus en plus par le biais des intercommunalités. L'EPCI permet ainsi de regrouper et de mutualiser les compétences.

L'analyse à partir des indicateurs montre la volonté des communes de se protéger de l'aléa érosion, notamment par la mise en place et l'entretien des ouvrages ou par la recherche de solutions d'aménagement. Néanmoins, les communes tentent rarement de diminuer le risque par une réduction des enjeux, par exemple en déplaçant ou en relocalisant des biens exposés.

Sur les sites d'étude, il n'existe aucun PPRL prescrit ou validé. Le retard constaté dans l'élaboration des PPRL s'expliquerait par de nombreuses difficultés liées à la démarche d'élaboration des cartographies d'aléa (concertation insuffisante, manque de moyens humains et techniques) et des difficultés liées au contexte territorial (désaccords sur les restrictions de développement urbain et économique) (Perherin, 2017). Toutefois, la loi Littoral et la présence de zones naturelles protégées permettent de limiter le développement d'enjeux dans les zones à risque.

L'entretien de la mémoire du risque est insuffisant sur les sites d'étude. Il y a, en effet, très peu d'événements de sensibilisation du public et d'outils permettant d'informer les résidents permanents et saisonniers (peu de DICRIM et de panneaux signalétiques). Le déficit d'informations sur le risque

d'érosion et sa gestion conduit à une certaine déresponsabilisation du citoyen face à la prise en charge des dommages liés à l'érosion des falaises meubles, ce qui explique les nombreuses associations de riverains présentes dans les secteurs à risque.

À la suite de l'analyse de la gestion à partir d'indicateurs, il en ressort des points forts et des points faibles communs entre les sites d'étude. Ceux-ci sont résumés dans le tableau ci-dessous (Tab. 35).

Tab. 35 : Points forts et points faibles de la gestion du risque d'érosion des falaises meubles, mis en évidence sur les sites d'étude à partir des indicateurs.

	Forces	**Faiblesses**
Concertation et réflexion	- Regroupement intercommunal dans la démarche de gestion des risques.	- Très peu de stratégies locales, surtout à l'échelle du long terme et absence de PAPI. - Pas d'anticipation de l'urbanisation future, ni de prise en compte de la relocalisation. - Peu d'ateliers participatifs. - Faible sollicitation des habitants dans la prise de décision. - Nombre limité de personnes traitant de la thématique des risques côtiers dans les collectivités.
Mise en application	- Démarche d'études de solutions d'aménagement des secteurs à risque.	- Archivage incomplet des phénomènes d'érosion. - Actions insuffisantes de mitigation, notamment sur les secteurs ruraux.
Prévention	- Contraintes de constructibilité (PLU) relativement suffisantes mais qui pourraient être renforcées sur certains secteurs.	- Prise en compte du risque insuffisante dans les SCOT.
Sensibilisation	- Publications fréquentes de la presse locale sur les phénomènes d'érosion. - Nombreuses associations traitant des problèmes liés aux risques côtiers.	- Absence de DICRIM (sur 4 des 6 communes). - Faible diffusion de l'information, description souvent brève et incomplète du risque dans les DICRIM existants. - Manque d'événements de sensibilisation aux risques côtiers (scolaires, riverains permanents et public saisonnier). - Très faible culture du risque.
Organisation de l'alerte	- Mesures de sécurisation post-événement relativement suffisantes mais qui pourraient être renforcées par des panneaux informatifs.	- Absence de PCS (excepté pour Plougrescant).

Cette synthèse permet de se rendre compte que la concertation entre les acteurs pour l'élaboration de stratégies locales est largement insuffisante sur les six communes étudiées. Au niveau communal, l'absence d'action de sensibilisation et le manque de documents réglementaires (PPRL, DICRIM, PCS…) expliquent que les citoyens soient faiblement informés (Tab. 36).

Tab. 36 : Récapitulatif de l'état des instruments de gestion des risques côtiers sur les six communes.

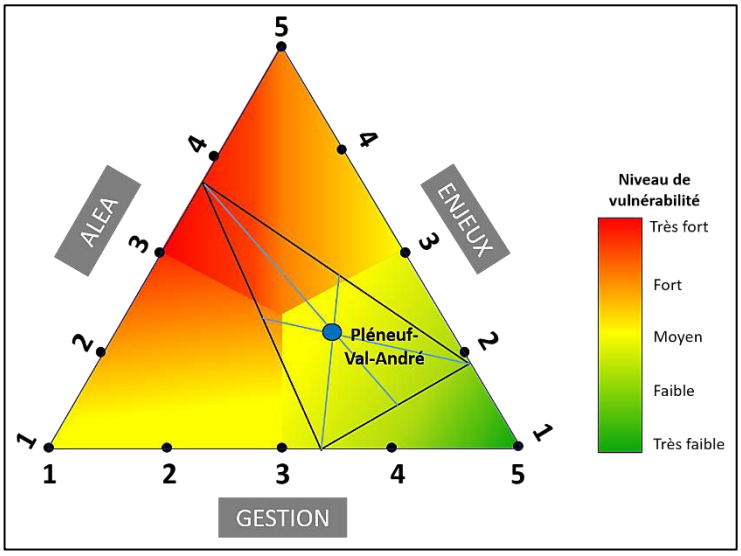
		Sites d'étude					
Élaboration de l'outil	**Dispositifs de gestion**	**Pléneuf-Val-André**	**Plougrescant**	**Trédrez-Locquémeau**	**Locquirec**	**Telgruc-sur-Mer**	**Plozévet**
État et services déconcentrés	DDRM	DDRM Côtes-d'Armor (2015)			DDRM Finistère (2012)		
	PPR	Absent	Absent	Absent	Absent	Absent	Absent
EPCI	SCOT	Pays de Saint-Brieuc (2015)	Absent	Lannion-Trégor (2013)	Morlaix Communauté (2007)	Pays de Brest (2011)	Ouest-Cornouaille (2013)
	état du SCOT	Approuvé en 2015	Sera intégré au nouveau SCOT du Trégor	Nouveau SCOT en cours d'élaboration	Révision effectuée et approuvée en 2014	Révision effectuée et approuvée en 2018	Approuvé en 2015
	PAPI	Absent	Absent	Absent	Absent	Absent	Absent
Commune	PLU	PLU (2016)	PLU (2016)	PLU (2017)	POS, PLU en cours de rédaction	POS, PLU en cours de rédaction	PLU (2014)
	DICRIM	DICRIM (2017)	DICRIM (2011)	Absent	Absent	Absent	Absent
	PCS	Absent	PCS (2017)	Absent	Absent	Absent	Absent

11.4- Analyse de la vulnérabilité des sites

La compréhension et l'évaluation de la vulnérabilité des secteurs littoraux nécessitent d'analyser la gestion conjointement à l'aléa et aux enjeux. Si l'aléa érosion est relativement limité sur un territoire, le fait de ne pas le gérer ne constitue pas, à court ni à moyen terme, un danger (Meur-Ferec, 2006). De même, si les enjeux sont très limités, il ne parait pas indispensable de gérer le recul des falaises meubles. Des mesures de gestion peu nombreuses sur un espace donné n'équivaut donc pas forcément à une plus forte vulnérabilité.

Les indices d'Aléa, d'Enjeux et de Gestion obtenus précédemment (Tab. 37, chapitres 9 et 11), pour chaque site d'étude, sont reportés dans un diagramme triangulaire (Fig. 251) afin d'identifier les niveaux de vulnérabilité. Cette représentation de la vulnérabilité, sous la forme d'un diagramme triangulaire, a été utilisée dans les travaux de Bohle et al. (1994) pour représenter les trois dimensions de la vulnérabilité sociale au changement climatique. La position des sites dans le diagramme est obtenue en traçant les médianes du triangle formé par les trois indices (Fig. 250). L'échelle de couleurs (du vert foncé au rouge) permet ensuite de connaitre le niveau de vulnérabilité du site. Plus la position d'un site est haute dans le diagramme (dans la gamme des couleurs oranges et rouges, c'est-à-dire un aléa et des enjeux proches de 5), plus la vulnérabilité est élevée. Plus un site est situé vers la droite du diagramme (dans la gamme des couleurs vertes), plus la gestion contribue à réduire le risque et donc à diminuer la vulnérabilité. L'échelle de couleurs du diagramme est donc cohérente avec les facteurs d'atténuation ou d'amplification des indices sur la vulnérabilité.

Fig. 250 : Tracé de l'indice de vulnérabilité dans un diagramme triangulaire.

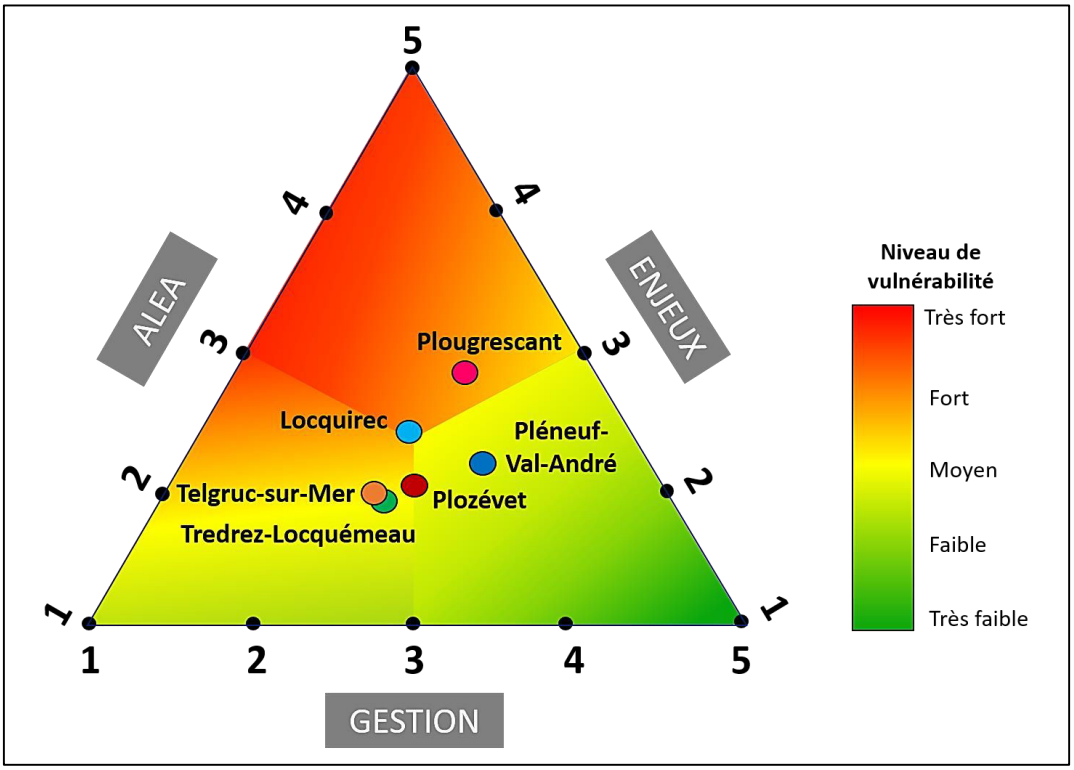


Tab. 37 : Récapitulatif des indices d'Aléa, d'Enjeux et de Gestion obtenus sur les six sites d'étude.

Indices	Aléa	Enjeux	Gestion
Pléneuf-Val-André	3,8	1,9	3,3
Plougrescant	5,0	2,6	2,7
Trédrez-Locquémeau	2,2	2,6	2,4
Locquirec	3,1	2,7	2,3
Telgruc-sur-Mer	2,5	2,5	2,3
Plozévet	2,8	2,6	2,9

Sur les communes de Trédrez-Locquémeau et de Telgruc-sur-Mer, bien que les mesures de gestion soient peu développées, la vulnérabilité est moyenne au regard de l'aléa (Tab. 37 et Fig. 251). Le recul des falaises meubles étant très modéré, les communes n'ont donc pas jugé utile de développer des stratégies de gestion, y compris sur le long terme. La situation de la commune de Locquirec est, par contre, plus préoccupante (Tab. 37 et Fig. 251). En effet, la faible gestion de la commune au regard de l'aléa et d'enjeux humains très exposés, sur le site du Moulin de la Rive, conduit à une forte vulnérabilité du site. Sur les communes de Plozévet, de Plougrescant et de Pléneuf-Val-André, les mesures de gestion sont les plus développées (Tab. 37). Pour autant, ceci ne signifie pas que les sites d'étude ne sont pas vulnérables (Fig. 251). En effet, bien que la commune de Plougrescant ait développé récemment des outils de prévention des risques en se dotant d'un DICRIM et d'un PCS (Tab. 36), la vulnérabilité reste forte au regard de la sévérité de l'aléa. Ce secteur mériterait des interventions plus adaptées (ex : rechargements de la plage en sable ou galets, par exemple, au lieu d'enrochements) et surtout une politique de gestion à long terme plus avancée. Pour les communes de Pléneuf-Val-André et de Plozévet, la vulnérabilité est faible pour la première et moyenne pour la seconde grâce à une gestion relativement développée au regard du niveau de risque (Fig. 251).

Fig. 251 : Représentation des niveaux de vulnérabilité des sites d'étude dans le diagramme triangulaire.



Le report des indices dans le diagramme triangulaire permet d'identifier les sites les plus vulnérables parmi ceux étudiés mais aussi de faire ressortir les éléments qui augmentent la vulnérabilité ou qui la réduisent. Ainsi, la vulnérabilité est forte sur le site de Plougrescant en raison notamment d'un aléa fort, tandis que,

sur le site de Locquirec, c'est l'état de la gestion qui est remis en cause (Fig. 251). La vulnérabilité est faible sur le site de Pléneuf-Val-André grâce à une bonne politique de gestion tandis que sur les sites de Trédrez-Locquémeau, de Telgruc-sur-Mer et de Plozévet, la vulnérabilité est faible à moyenne grâce à un aléa relativement modéré.

Plus la vulnérabilité d'un site est faible, moins l'application de solutions est urgente. Toutefois, la recherche de solutions est recommandée dans un esprit d'anticipation afin de l'intégrer plus facilement et à moindre coût (Drejza et al., 2015). Pour réduire la vulnérabilité, il est ainsi possible d'intervenir soit sur l'exposition des enjeux (notamment par le retrait ou la relocalisation des enjeux), soit sur l'atténuation de l'aléa (par la mise en place de mesures de protection adaptées), soit par des mesures de prévention en informant et en sensibilisant les citoyens.

11.5- Limites de la méthode et discussion

Les indices : entre simplicité d'utilisation et complexité du système étudié

Malgré leur forte utilisation, les indices sont controversés (Nardo et al., 2005 ; Leone, 2009). D'un côté, leur simplicité d'application permet de donner des résultats explicites sur un ensemble complexe de variables et l'indice est facilement lisible et compréhensible par tout un chacun. D'un autre côté, cette simplification est critiquée car elle peut donner une vision réductrice de la vulnérabilité puisque les indices ne reposent que sur quelques variables sélectionnées.

La simplification apportée par l'utilisation d'indicateurs fait face au caractère éminemment complexe de la gestion des risques côtiers en France (Quillet, 2017). Le nombre élevé d'indicateurs utilisés pour évaluer l'état de la gestion sur les sites d'étude (Tab. 31) reflète la difficulté à avoir une représentativité suffisante des politiques de gestion et des nombreux dispositifs qui ont un impact variable sur la vulnérabilité. Toutefois, l'objectif n'est pas de faire un état des lieux exhaustif de la gestion sur les territoires mais de faire ressortir les points forts et les points faibles de la gestion des risques littoraux en prenant l'exemple des sites d'étude.

Les indicateurs mettent ainsi en évidence les situations générales, ce qui permet de faire avancer la réflexion autour de la gestion, et plus largement, autour de la réduction de la vulnérabilité. De plus, les critères utilisés représentent un compromis acceptable entre la complexité des politiques de gestion et le temps nécessaire à collecter et traiter les données. Parmi les limites inhérentes à l'utilisation d'indices, le temps et l'accessibilité à l'information constituent effectivement une des principales contraintes (Meur-Ferec, 2006). Le renseignement de tous les indicateurs composant l'indice requiert un travail de recherche et de synthèse important. Néanmoins, une fois renseignés, les indicateurs constituent une base de donnée utile pour la gestion des risques.

Dans cette étude, les indices composant la vulnérabilité (aléa, enjeux et gestion) ont été construits de façon à synthétiser différents paramètres dans l'objectif qu'ils puissent servir d'outil d'aide à la décision et de priorisation d'interventions. L'observation des trois indices permet d'identifier rapidement le type et le degré de vulnérabilité d'un site.

Cependant, il est important d'analyser les valeurs des sous-indices et des indicateurs qui les composent afin de bien comprendre ce qui a conduit à un tel niveau de vulnérabilité et ainsi savoir sur quels paramètres les mesures de gestion doivent être entreprises afin de réduire la vulnérabilité (Drejza et al., 2015). En effet, plusieurs raisons peuvent être à l'origine d'un même score de vulnérabilité. Ainsi, les actions à entreprendre ne seront pas les mêmes. Il convient donc de se référer aux résultats de chaque sous-indice, puis aux résultats de chaque indicateur afin d'identifier le ou les éléments faisant augmenter la vulnérabilité.

Enfin, il est important de rappeler que la vulnérabilité présentée ici n'est pas entendue dans le sens de la vulnérabilité systémique (Hellequin et al., 2013) car elle n'intègre pas la composante Représentations du risque. Il n'en reste pas moins que cette composante peut représenter un facteur atténuateur ou exagérateur de la vulnérabilité.

Choix des indicateurs de gestion retenus

Du fait que les indices reposent sur des choix à chaque étape de leur réalisation (sélection des indicateurs, calibrage, méthode d'agrégation…), ils sont, par nature, discutables et sujets aux questionnements et aux débats. La méthode de construction des indicateurs qui s'appuie sur les idées et les considérations propres à ceux qui les conçoivent, induit effectivement une part de subjectivité (Créach, 2015). Pour que l'indice gagne une certaine validité, le choix des indicateurs de gestion et des méthodes d'agrégation s'est fait de la façon la plus objective possible, en s'appuyant sur de nombreux travaux existants dont ceux développés dans le projet OSIRISC, en concertation avec les gestionnaires praticiens. De plus, les choix ont été basés sur des principes émanant du développement durable et de la stratégie nationale établie par l'État (MEDDE, 2012 ; Quillet, 2017).

Il est important de noter que les indicateurs utilisés dans cette étude considèrent les outils et les mesures de gestion à un instant donné. Toutefois, ces dispositifs sont susceptibles d'évoluer rapidement (Quillet, 2017). Par exemple, les communes doivent actuellement s'approprier la compétence GEMAPI. L'indicateur relatif à sa mise en place ne représentera donc plus un si grand intérêt, dans trois à quatre ans, pour comparer la vulnérabilité des sites étant donné que la compétence doit obligatoirement être intégrée au sein des collectivités. Il est également possible que de nouveaux outils et mesures de gestion apparaissent dans les années à venir. Afin d'assurer leur pérennité, ces indicateurs devront s'adapter à l'évolution de la gestion, notamment devant la décentralisation des compétences en cours.

Facteurs explicatifs des différences constatées dans l'état de la gestion

La variabilité de la gestion entre les communes amène à s'interroger sur les facteurs qui expliquent l'état d'avancement des stratégies ou des outils d'adaptation. Est-ce la sévérité de l'aléa qui pousse les élus à s'impliquer davantage dans la gestion des risques côtiers ? Est-ce la concentration des enjeux à proximité du rivage ou bien le niveau du risque ? L'attention est-elle davantage portée lors de la présence d'enjeux humains, économiques ou structurels ?

L'analyse des indices montre que la présence d'enjeux humains ne constitue pas un facteur explicatif des niveaux de gestion. En effet, alors que la gestion est la plus efficace sur les sites de Pléneuf-Val-André et de Plougrescant, c'est sur ces sites que les enjeux humains sont les plus faibles (Annexe 22). Il n'existe pas non plus de corrélation entre le niveau de gestion et la présence d'enjeux structurels ou économiques. Les enjeux n'apparaissent donc pas comme un facteur explicatif de l'état de la gestion sur les six sites d'étude. La sévérité de l'aléa semble, par contre, davantage expliquer les niveaux de gestion. En effet, ce sont sur les sites de Pléneuf-Val-André et de Plougrescant que la gestion est la plus développée et que l'aléa érosion est le plus fort. Toutefois, ce facteur ne peut expliquer entièrement les niveaux de gestion comme l'illustre le site de Locquirec, caractérisé par un aléa relativement fort mais un niveau de gestion faible (Tab. 37 et Annexe 22).

La sévérité de l'aléa influence donc les mesures entreprises par les communes. Toutefois, d'autres facteurs vont venir influencer l'efficacité de la gestion comme les ressources humaines/financières de la commune ou ses orientations politiques (Meur-Ferec, 2006).

Conclusion intermédiaire

L'analyse de la gestion, à partir d'indicateurs, a permis d'identifier des mesures absentes sur les sites d'étude, qui contribuent à augmenter leur vulnérabilité. Il a, en effet, été constaté un manque de documents réglementaires (PPRL, DICRIM, PCS…), une faible sensibilisation des citoyens et une quasi-inexistence de stratégies locales à long terme. Du fait de l'absence de stratégie et d'anticipation au sein des communes, la gestion se fait souvent dans l'urgence. Elle est à l'origine de la mise en place d'ouvrages côtiers parfois inadaptés, aggravant l'érosion des secteurs adjacents et impliquant des mesures de gestion coûteuses. L'analyse de la gestion à partir d'indicateurs montre également une concertation insuffisante entre les différents acteurs.

L'état de la gestion sur les sites d'étude met donc en évidence de nombreux outils et mesures absentes. Toutefois, ces niveaux de gestion et cette apparente vulnérabilité sont à nuancer au regard de l'aléa et des enjeux. En effet, sur les sites de Trédrez-Locquémeau et de Telgruc-sur-Mer, bien que les mesures de gestion soient peu développées, la vulnérabilité est faible au regard du recul relativement modéré des falaises. Néanmoins, il ne faut pas oublier que ces falaises peuvent être affectées par des reculs soudains, plurimétriques (cas du glissement produit sur le site de Telgruc-sur-Mer le 2 février 2014). La situation de Locquirec est plus préoccupante car, à l'importance de l'aléa et des enjeux humains exposés sont associées des mesures de gestion trop ponctuelles et un manque de communication entre les acteurs. Sur le site de Plougrescant, bien que les mesures de gestion soient plus développées, la vulnérabilité est également forte au regard de la sévérité de l'aléa.

La méthodologie développée dans ce chapitre permet donc non seulement de comparer les niveaux de vulnérabilité entre plusieurs sites mais aussi de connaitre les éléments faisant augmenter la vulnérabilité. Ceci est indispensable pour planifier les interventions et atténuer les impacts liés au recul des falaises meubles.

CHAPITRE 12 : Caractérisation des besoins exprimés par les gestionnaires bretons sur le risque d'érosion des falaises meubles

La gestion du risque d'érosion des falaises meubles en Bretagne implique de nombreux acteurs (DREAL, DDTM, préfectures, EPCI, communes…) qui œuvrent à différentes échelles (cf. chapitre 10) et qui ont, par conséquent, des besoins différents en matière d'adaptation et d'outils d'aide à la décision. Dans un contexte de décentralisation, les gestionnaires doivent acquérir de plus en plus de compétences (Miossec, 1986). En termes de gestion du risque, ces compétences vont de l'évaluation de l'aléa à l'identification de solutions d'aménagement pour protéger les enjeux menacés. Malgré la multitude d'outils existants, les difficultés de gestion suggèrent des dispositifs qui ne sont pas adaptés aux missions des différents acteurs. C'est pourquoi il est important de cerner les besoins des gestionnaires afin que les scientifiques produisent les données nécessaires pour la réflexion et la mise en place de stratégies de gestion sur le littoral.

Un questionnaire en ligne, inspiré des travaux du Laboratoire de Dynamique et de Gestion Intégrée des Zones Côtières (LDGIZC) (Marie et al., 2017), a été élaboré pour connaitre les besoins des gestionnaires bretons concernant le risque d'érosion des falaises meubles. Le principal objectif du questionnaire est d'identifier et de prioriser les outils utilisés ou souhaités par les différentes institutions de la gestion du littoral (de l'échelon régional jusqu'aux mairies).

Par ailleurs, à la suite de l'analyse de la gestion effectuée sur les sites d'étude (cf. chapitre 11), il apparait essentiel de se demander si les difficultés mises en évidence sur ces sites sont représentatives de l'échelle régionale et si d'autres éléments peuvent poser problème pour la gestion du risque. Ainsi, ce chapitre a pour objectif de répondre à trois principales questions :

1) Quels sont les besoins en termes d'outils de connaissance et de méthodologie pour la gestion du risque d'érosion des falaises meubles en Bretagne ?

2) Quels sont les outils de gestion priorisés selon les acteurs ?

3) Comment les besoins exprimés par les gestionnaires bretons expliquent-ils les difficultés de gestion observées à l'échelle régionale et à l'échelle locale des sites d'étude ?

Pour répondre à ces questions, ce chapitre s'organise en quatre parties. La première partie sera consacrée à la description de la méthode d'enquête et la seconde à l'analyse des réponses par institution (communes, EPCI, DDTM, préfectures, conseils départementaux et DREAL). La troisième partie présentera des réflexions cherchant à mettre en lumière l'origine des difficultés de la gestion du risque, révélées par l'analyse à l'échelle locale des sites d'étude et par l'enquête régionale. Enfin, des préconisations seront émises dans la dernière partie, tant sur l'aspect opérationnel que stratégique, afin d'améliorer la gestion des risques côtiers d'érosion des falaises meubles en Bretagne.

12.1- Méthodologie

12.1.1- Composition du questionnaire

Le questionnaire, réalisée sous l'interface Limesurvey™, se structure en trois parties (Annexe 23) : une première partie sert à renseigner le profil du répondant (département, institution, fonction, âge et nombre d'années au sein du poste), une seconde partie porte sur les besoins liés au risque d'érosion des falaises meubles et, enfin, une troisième partie est focalisée sur les outils d'adaptation au risque d'érosion des falaises meubles.

La première partie, relative au profil du répondant, comporte cinq questions qualitatives nominales visant à sélectionner une réponse parmi celles proposées (Tab. 38). Pour deux de ces questions, une réponse « Autre » permet au répondant d'indiquer une réponse qui ne figure pas parmi la liste de propositions grâce à un champ de texte à remplissage libre.

Tab. 38 : Questions et liste des propositions dans la partie 1 du questionnaire « Informations sur le répondant ».

Questions	Propositions
1) Dans quel département se trouve votre institution ?	- Côtes-d'Armor - Finistère - Ille-et-Vilaine - Morbihan
2) Quelle est votre institution ?	- Conseil régional de Bretagne - Conseil départemental - EPCI - Commune - DREAL - Préfecture - DDTM - Autre : (préciser)
3) Quelle est votre fonction ?	- Directeur - Ingénieur/Chargé d'études - Technicien - Maire - Autre élu - Autre : (préciser)
4) Depuis combien d'années occupez-vous ce poste ?	- Moins de 2 ans - De 2 à 5 ans - De 5 à 10 ans - 10 ans et plus
5) Quel est votre âge ?	

La deuxième et la troisième parties du questionnaire comportent des questions qualitatives ordinales associées à une échelle de mesure permettant de hiérarchiser les réponses pour donner un ordre de préférence ou d'importance aux éléments proposés. Cette échelle correspond à un classement de 1 à 5 des réponses (1 = pas important, 5 = très important) qui permet de prioriser les besoins et les outils pour chacun des répondants.

Dans la deuxième partie, la liste des propositions comporte douze types de besoin de gestion à classer selon l'échelle de valeurs (Tab. 39), tandis que, dans la troisième partie, ce sont huit outils liés aux connaissances et sept outils liés à la méthodologie qui sont proposés (Tab. 40).

Ces besoins et outils proposés dans le questionnaire ont été identifiés d'une part, à la suite des échanges entre gestionnaires et scientifiques et, d'autre part, après l'obtention des résultats apportés par l'analyse

de la gestion sur les sites d'étude (cf. chapitre 11). Les propositions sont également inspirées de l'analyse des besoins de gestion réalisées, dans l'Est du Québec, par le LDGIZC (Marie et al., 2017).

Tab. 39 : Question et liste des besoins à noter dans la partie 2 du questionnaire « Besoins liés au risque d'érosion des falaises meubles ».

Parmi les éléments contribuant à la gestion du risque d'érosion des falaises, des quels estimez-vous avoir le plus besoin ? Noter de 1 à 5 (1 = pas de besoin, 5 = besoin important)	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Connaissances et accès aux données					
Suivi et mesures sur le terrain					
Sensibilisation citoyenne					
Définition des responsabilités entre les acteurs					
Échanges entre gestionnaires et scientifiques					
Ressources humaines qualifiées					
Formations professionnelles					
Définition de stratégies de gestion locales					
Mise en œuvre des stratégies de gestion					
Financement					
Adaptation de la réglementation					
Développement d'un système de vigilance local aux risques d'érosion des falaises meubles					

Tab. 40 : Questions et listes des outils à noter dans la partie 3 du questionnaire « Outils d'adaptation au risque d'érosion des falaises meubles ».

Noter sur une échelle de 1 à 5 (1 = pas important, 5 = très important), les OUTILS suivants qui seraient utiles, selon vous, en termes de CONNAISSANCES sur les risques d'érosion des falaises	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Cartographie des processus actifs sur les falaises (glissement, éboulement, ruissellement…)					
Cartographie de l'évolution passée du trait de côte et taux de recul					
Cartographie des enjeux exposés à l'érosion à terme					
Fiche d'informations communale (type de côte, changements historiques et récents, photos…)					
Diagnostic sur l'état et l'efficacité des ouvrages de défense contre la mer présents sur votre territoire					
Recueil des lois et des règlements liés aux risques côtiers					
Annuaire des ressources spécialisées en milieu côtier (bureaux d'études publics ou privés, groupes de recherche…)					
Plateforme web pour l'accès aux données actualisées sur les zones côtières					
Noter sur une échelle de 1 à 5 (1 = pas important, 5 = très important), les OUTILS suivants qui seraient utiles, selon vous, en termes de MÉTHODOLOGIE pour la gestion des risques côtiers	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Fiche protocole de diagnostic de risque					
Fiche protocole de suivi du territoire					
Supports pour la sensibilisation citoyenne (diaporama, poster, vidéo…)					
Enquêtes auprès de la population					
Guide d'évaluation économique de solutions (analyse multicritère, analyse coûts-bénéfices)					
Guide d'identification de solutions (clé décisionnelle, ouvrages à favoriser ou à éviter…)					
Guide des procédures administratives (autorisations, étapes…) pour la mise en place de mesures d'adaptation					

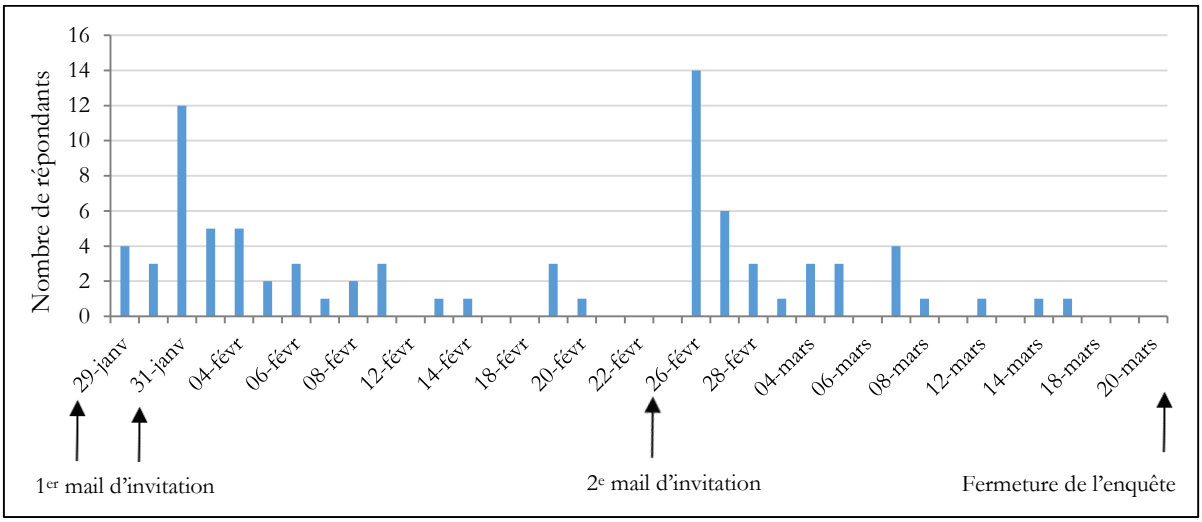
Les parties 2 et 3 du questionnaire se terminent chacune par une question ouverte donnant la possibilité au répondant d'indiquer d'autres éléments (besoins, outils) qui ne figurent pas parmi la liste des propositions et qui lui apparaissent importants (Annexe 23). Ces idées ont été analysées au même titre que les éléments proposés ; certaines d'entre elles sont citées en italique dans ce chapitre.

12.1.2- Collecte et traitement des données

Le questionnaire anonymisé a été mis en ligne via l'interface Limesurvey™. Un premier mail d'invitation avec un lien d'accès au questionnaire a été envoyé aux gestionnaires le 29 janvier 2019 pour les services

régionaux et départementaux et le 31 janvier 2019 pour les communes et les EPCI. Un second mail de relance a été envoyé le 26 février 2019. L'observation de l'évolution du nombre de réponses (Fig. 252) a déterminé la clôture du questionnaire le 20 mars 2019.

Fig. 252 : Évolution du nombre de répondants au questionnaire durant les jours ouvrés entre le 29 janvier et le 20 mars 2019.



L'intérêt de diffuser le questionnaire en ligne permet d'envoyer l'enquête à un plus grand nombre de personnes, d'optimiser les coûts liés à l'envoi des invitations, les relances et la collecte des données ainsi que de suivre la participation et les résultats de l'enquête à n'importe quel moment. Les enquêtes en ligne permettent également de garder l'anonymat des répondants et donnent la possibilité de répondre au questionnaire en plusieurs sessions. Ce mode de diffusion a prouvé son efficacité, non seulement en termes de taux de retour, mais aussi de richesse et de qualité de réponses (Ganassali et Moscarola, 2004).

12.2- Identification des besoins des gestionnaires aux différentes échelles territoriales

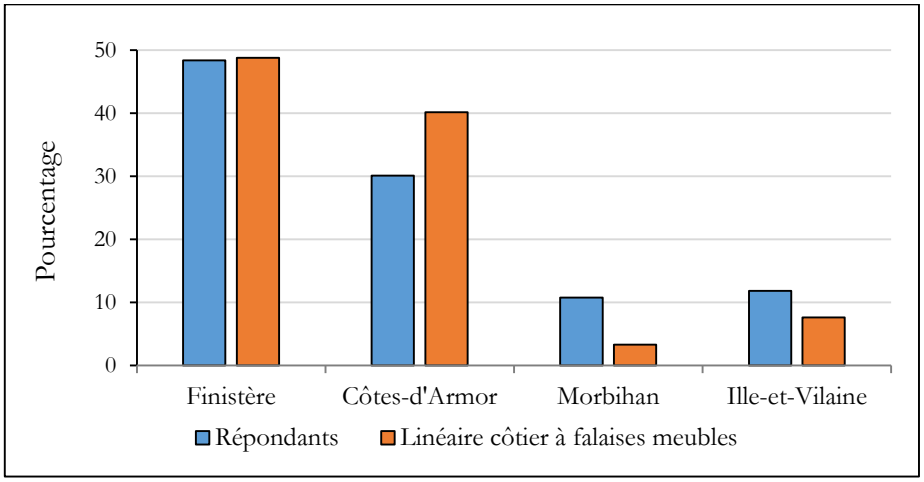
12.2.1- Profil des répondants

Au total, 94 gestionnaires ont répondu à l'enquête. Ce nombre de répondants représente environ un tiers des personnes contactées, c'est-à-dire un taux de réponse de 34 %. Ce taux de réponse est considéré satisfaisant pour ce type d'enquête (Aragon et al., 2000) et montre l'intérêt manifesté par cette problématique. L'exploitation des résultats s'appuie sur ces 94 réponses. Parmi eux, 5 participants n'ont pas répondu entièrement au questionnaire : la troisième partie du questionnaire concernant les « Outils de gestion » n'a pas été remplie par ces personnes. Néanmoins, leurs réponses aux deux premières parties ont été exploitées et utilisées pour l'analyse. La durée moyenne de remplissage du questionnaire est de 8 min et 32 secondes (avec un minimum de 2 min et un maximum de 15 min).

- **Répartition par département**

La majorité des répondants se localise dans le Finistère (48 %) et dans les Côtes-d'Armor (30 %). Cette répartition est cohérente avec la proportion du linéaire côtier à falaises meubles dans chaque département (Fig. 253). Les personnes qui ont le plus répondu à l'enquête sont celles qui se sentaient le plus concernées car étant impactées par les problématiques d'érosion de falaises meubles présentes dans leur département.

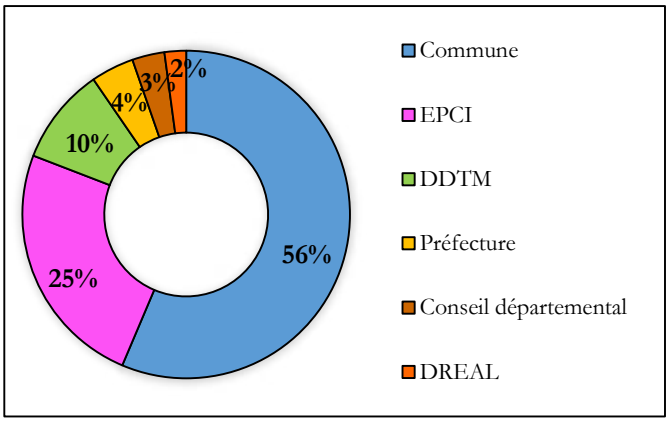
Fig. 253 : Proportion de répondants par département comparée à la proportion de linéaire côtier à falaises meubles.



- **Répartition par institution**

Le terme « institution » est employé ici, de manière générique, pour désigner les collectivités territoriales et les établissements publics contactés pour répondre à l'enquête. En termes d'effectifs, ce sont les gestionnaires (élus et personnel confondus) dans les mairies et les EPCI qui se sont le plus exprimés avec respectivement 53 et 23 répondants (Fig. 254). Toutefois, en termes de taux de réponse, ils ne représentent que 34 et 42 % du nombre de personnes contactées respectivement dans les mairies et les EPCI. Aucune personne travaillant au sein du Conseil régional n'a répondu à l'enquête. Cette collectivité territoriale n'est donc pas représentée. Cette absence de réponse peut s'expliquer par le fait que la Région est faiblement impliquée dans la gestion du risque d'érosion car elle ne possède pas de compétence directe à cet égard. Sa participation est surtout financière (Mineo-Kleiner, 2013). Pour la DREAL, les Conseils départementaux et les préfectures, moins de 5 répondants par institution ont répondu à l'enquête. Ces différences en termes de nombre de réponses entre les échelles régionales et départementales, d'une part, et les échelles intercommunales et communales, d'autre part, montrent le plus grand intérêt de l'échelon communal et intercommunal pour l'enquête. Ce sont les niveaux les plus proches des problèmes qui sont donc directement concernés par la question.

Fig. 254 : Proportion et taux de réponse des répondants par institution.

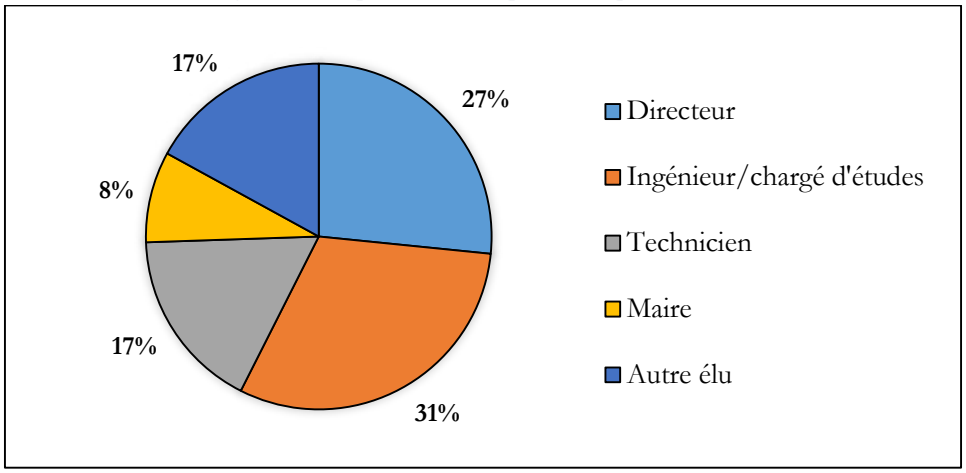


Institution	Nombre de répondants	Nombre de destinataires	Pourcentage de répondants
Commune	53	157	34 %
EPCI	23	55	42 %
DDTM	9	21	43 %
Préfecture	4	12	33 %
Conseil départem.	3	17	18 %
DREAL	2	10	20 %
Conseil régional	0	1	0 %
Total	94	273	34 %

- **Répartition par fonction des répondants**

Les répondants sont représentés par une assez bonne homogénéité dans leur fonction (Fig. 255). Les maires sont la catégorie la moins représentée avec 8 % des répondants.

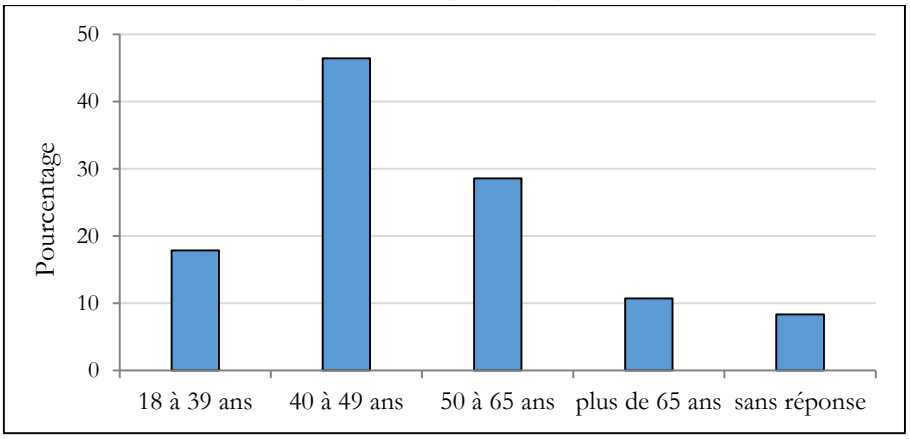
Fig. 255 : Proportion des répondants par fonction.



- **Répartition selon les catégories d'âge des répondants**

Les [40 à 49 ans] constituent la catégorie d'âge la plus représentée avec 46 % des répondants (Fig. 256). Les personnes de moins de 40 ans ou de plus de 65 ans représentent moins de 20 % des répondants. Cette répartition est cohérente avec la part des actifs bretons en emploi (CCI Bretagne, 2016) et des maires français en fonction (Lemarc, 2019).

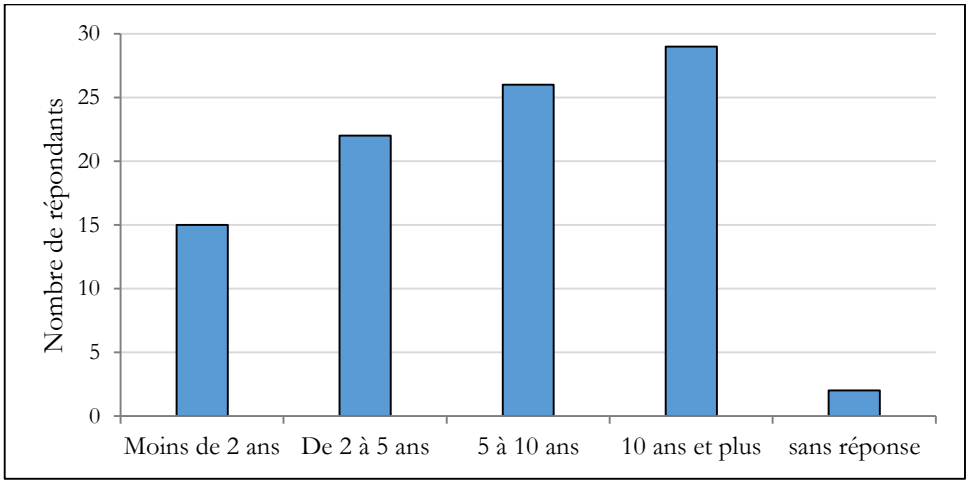
Fig. 256 : Proportion des répondants par catégorie d'âge.



- **Répartition selon le nombre d'années dans le poste**

La proportion des répondants augmente avec le nombre d'années occupées dans le poste (Fig. 257). Ce résultat est rassurant dans la mesure où on considère que plus une personne possède de l'expérience dans un domaine, plus elle a conscience et connaissance de la situation, des enjeux et des difficultés liées au contexte (Préfontaine et al., 2009).

Fig. 257 : Proportion des répondants selon le nombre d'années dans le poste.



12.2.2- Écarts-types et dispersion des réponses

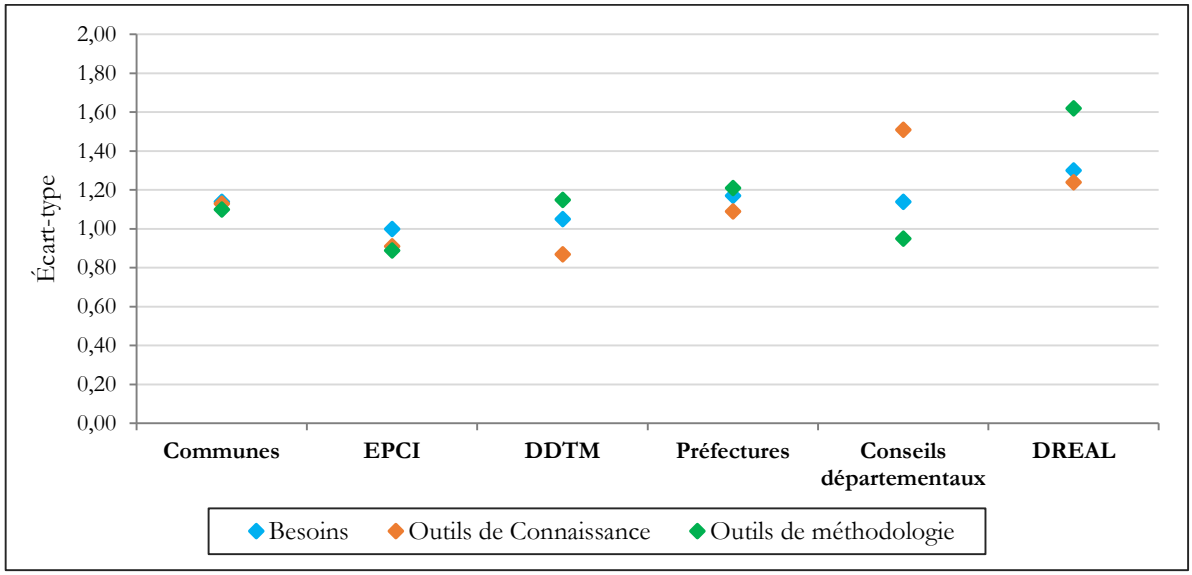
L'écart-type est un indice statistique obtenu en prenant la racine carrée de la variance qui décrit la variabilité d'une distribution et donc la dispersion des scores individuels autour d'une valeur moyenne (www.irdp.ch). L'écart-type minimal est de 0, lorsque les réponses (notes attribuées) sont identiques et l'écart-type maximal est ici de 2 lorsque les réponses sont complétement divergentes.

Pour les besoins de gestion, les répondants au sein des DDTM et des EPCI sont plutôt d'accord entre eux puisque l'écart-type moyen est respectivement de 1,02 et 0,93 (Fig. 258). Néanmoins pour les DDTM, l'écart-type est un peu plus élevé pour les outils de méthodologie car il est de 1,15 en moyenne, révélant ainsi des points de vue divergents concernant l'importance de ces outils.

Pour les communes, on observe un plus fort écart-type (1,14 en moyenne) qui peut s'expliquer par une plus grande variété de fonctions au sein de cette institution (technicien, ingénieur, élu), ce qui implique donc des besoins différents.

Pour les préfectures, les Conseils départementaux et la DREAL, l'écart-type moyen est également plus fort (respectivement 1,17 ; 1,14 et 1,30) et est notamment lié au faible nombre de répondants (entre 2 et 4 selon les institutions). Pour les Conseils départementaux, ce sont avant tout les outils de connaissance sur lesquels les répondants ne semblent pas d'accord (écart-type moyen de 1,51) tandis que pour la DREAL, ce sont avant tout les réponses sur les outils de méthodologie qui divergent (écart-type moyen de 1,62). Néanmoins, les réponses de ces institutions ne se basent que sur celles de deux ou trois répondants, donc les notes et leurs dispersions sont peu significatives.

Fig. 258 : Écarts-types de la notation des besoins et des outils de connaissance et de méthodologie pour chaque institution.



Afin de savoir sur quels types de besoin ou d'outil les répondants sont en désaccords, l'écart-type a été calculée pour chaque proposition de l'enquête (Annexes 24 et 25). Dans les deux parties qui suivent, les écarts-types remarquables indiquant des valeurs proches ou, à l'inverse, des valeurs éloignées de la moyenne, sont discutés conjointement à l'analyse de la priorisation des besoins et des outils.

12.2.3- Les besoins relatifs à la gestion du risque d'érosion des falaises meubles

L'analyse des réponses de l'enquête est effectuée par institution, c'est-à-dire par échelon territorial, afin de cerner les besoins prioritaires en fonction des acteurs et de leur échelle d'action (communale, intercommunale, départementale et régionale). En première approche, l'analyse des réponses permet de définir, par institution, la note moyenne obtenue par question (Annexes 24 et 25). Ceci permet d'effectuer un classement et donc de connaitre la priorisation des besoins.

- **Les communes**

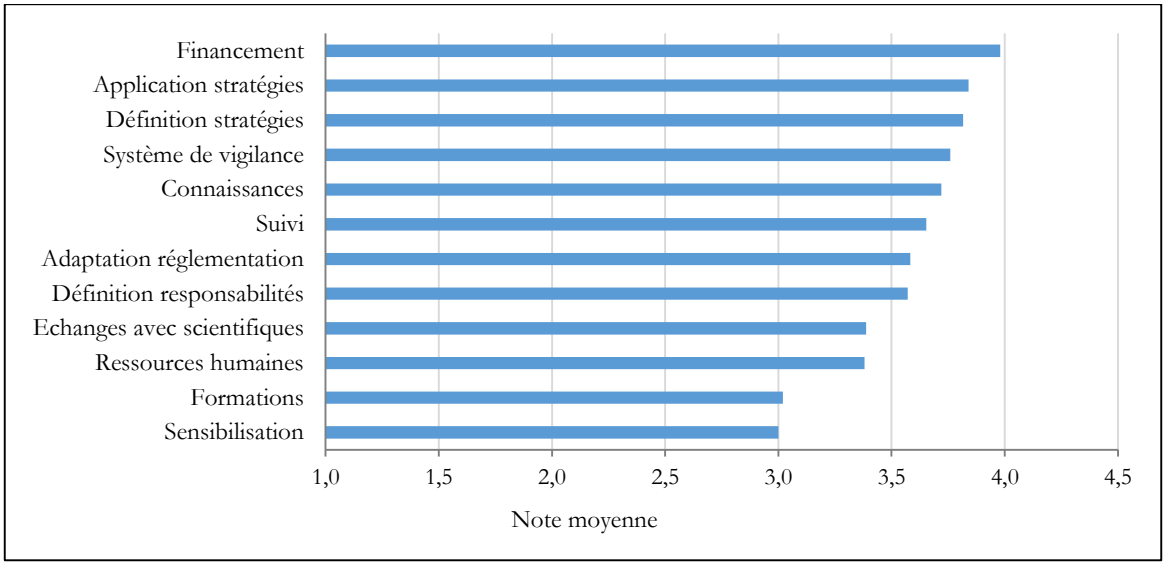
Dans les communes, le besoin de **financement** est l'élément qui obtient la note d'importance la plus élevée (Fig. 259). Pour de nombreuses communes, le manque de moyens financiers apparait être un obstacle pour toute mise en place de stratégie de gestion des risques (Veyret, 2016). Sans ressources financières suffisantes, l'identification (études préalables) et la mise en place de solutions restent effectivement difficiles et les actions municipales sont limitées.

Ensuite, ce sont les besoins d'**élaborer et de mettre en place des stratégies** qui se manifestent le plus nettement au sein des communes (Fig. 259). Ceci reflète la difficulté liée à la mise en application des stratégies et le problème d'adéquation entre les orientations nationales et les spécificités locales (Deboudt, 2010). Un des répondants souligne effectivement le besoin de « *cohérence des stratégies des différents acteurs (ex : État, services publics de protection de l'environnement…)* ».

Le **système de vigilance** est le quatrième élément classé par ordre d'importance. Ceci est lié au fait que le maire, de par ses responsabilités, doit assurer la sécurité des riverains et être en mesure de les prévenir en cas de survenue d'éléments dangereux (loi sur l'organisation de la sécurité civile du 22 juillet 1987). Pour autant, la **sensibilisation citoyenne** est le besoin le moins priorisé par les communes (Fig. 259).

Au sein des communes, les chargés d'étude et les élus (autres que le maire) ont également exprimé le **besoin de connaissances, d'accès aux données et de suivi de terrain**. Les chargés d'études (au sein des plus grandes communes, comptant plus de 1 500 habitants (Dulon et al., 2009)) et les élus (dans les plus petites communes) ont effectivement un rôle d'expertise et de préconisations sur la question du risque d'érosion alors qu'ils ne sont pas experts dans la thématique. Ils souhaitent donc le plus souvent obtenir un meilleur **accompagnement** pour le choix (« *faut-il faire des travaux ou non ?* ») et la mise en place de solutions : *« avoir des conseils objectifs en dehors des entreprises intervenantes* », « *connaitre les travaux palliatifs en cas d'instabilité de falaise* ». Face à la complexité des processus intervenant dans les phénomènes d'érosion et les nombreuses procédures et règlements, ils s'interrogent notamment sur la « *réalité et la possibilité des travaux à entreprendre* ». Enfin, face aux problèmes liés au recul des falaises meubles, notamment à leurs impacts sur la continuité de la servitude de passage sur le littoral, le **besoin d'adapter la réglementation** est aussi mentionné par un répondant qui suggère même « *une remise à niveau des lois et des réglementations* ».

Fig. 259 : Priorisation des besoins exprimés par les communes (53 répondants).



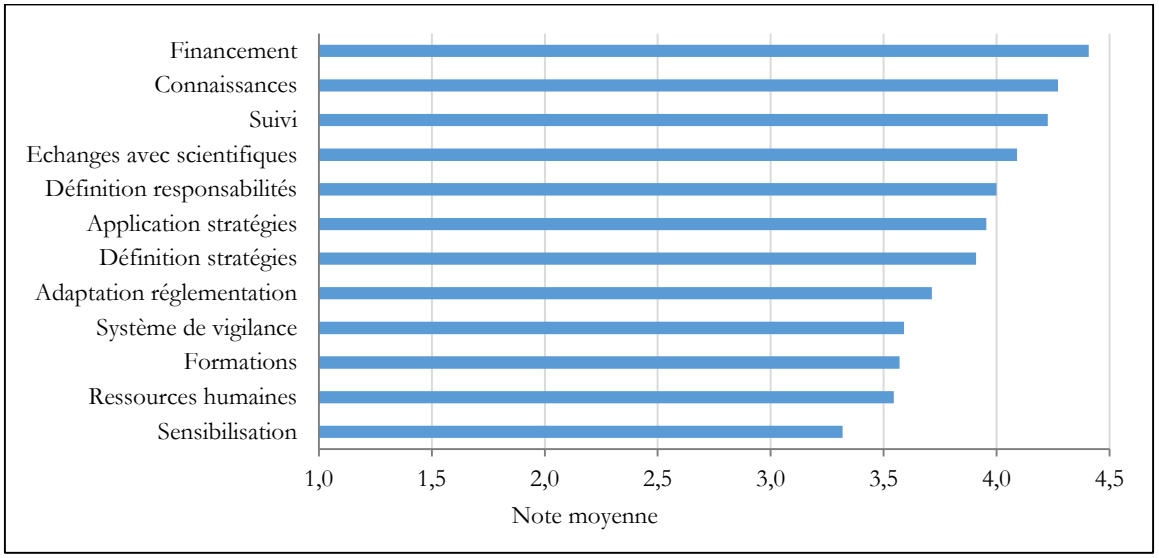
- **LES EPCI**

Les EPCI expriment en priorité, à l'instar des communes, le besoin de **financement** pour la gestion du risque d'érosion (Fig. 260). Ce sont ensuite les besoins de **connaissances et de suivi de terrain** qui apparaissent clairement prioritaires. Il est suggéré une **formation technique** pour « *mesurer l'érosion sur le terrain* ». Cette priorisation des besoins reflète les nouvelles responsabilités attribuées aux EPCI en matière de gestion des risques littoraux dans le cadre de la compétence GEMAPI (cf. chapitre 10). L'augmentation des responsabilités, et donc des coûts de fonctionnement, expliquent l'importance du financement exprimée par les EPCI. La gestion du risque se faisant de plus en plus par le biais des intercommunalités, celles-ci souhaitent également **développer les échanges avec les scientifiques** afin de renforcer les connaissances et l'expertise scientifique. Un autre répondant indique également des besoins de **formations à destination des élus** et portant sur les « *responsabilités en matière de risque et d'urbanisme* ». Une telle réponse est particulièrement étonnante car des organisations existent déjà. C'est le cas de l'ANEL, l'Association Nationale des Élus du Littoral et aussi de l'association Rivages de France qui, toutes les deux, organisent des sessions de formations délocalisées sur les communes de France. Durant ces sessions, elles font appel à des scientifiques, des experts et des gestionnaires qui exposent tout à la fois connaissances et expériences acquises sur divers territoires littoraux. Le besoin de **création d'un réseau** entre les EPCI littoraux « *concernés par des problématiques similaires* » est également mentionné. Les échanges entre collectivités et le regroupement des communes permettraient

effectivement d'optimiser la gestion des risques côtiers par la mutualisation des services techniques et d'urbanisme (CESER de l'Atlantique, 2015). Ceci serait une des solutions face au manque de moyens humains et financiers car la majorité des collectivités, notamment les plus rurales, ne dispose pas en interne de personnes traitant de la thématique des risques côtiers (Lafon et Treyer, 2009). Le regroupement en intercommunalités aiderait à la création de pôles de gestion des risques aux compétences renforcées ainsi que le partage des expériences et des savoir-faire. Le regroupement au sein des EPAGE et des EPTB, encouragé dans le cadre de la compétence GEMAPI, permettrait également d'optimiser la gestion des risques littoraux. Ceci permettrait aussi de réduire les coûts des politiques de gestion.

La **sensibilisation citoyenne est l'élément le moins priorisé** à la fois par les communes (Fig. 259) et par les EPCI (Fig. 260). Ce constat est révélateur du faible intérêt accordé au développement de la culture du risque alors que l'analyse de la gestion par le biais d'indicateurs (cf. chapitre 11) a souligné son insuffisance sur le territoire breton.

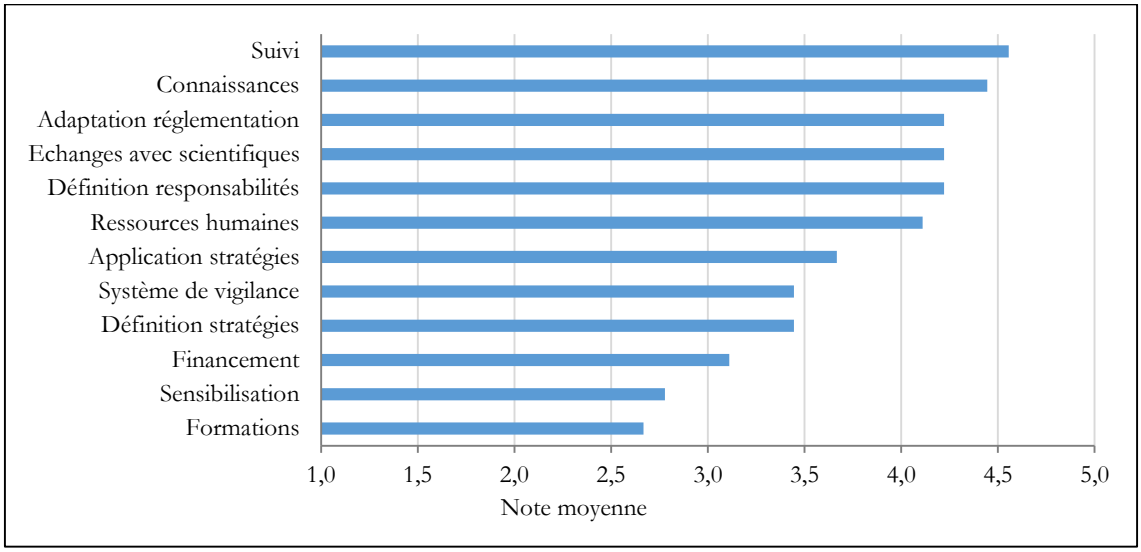
Fig. 260 : Priorisation des besoins exprimés par les EPCI (23 répondants).



- **LES DDTM**

Pour les DDTM, le **suivi de terrain** et les **connaissances** sont les éléments qui obtiennent les notes les plus élevées (Fig. 261). Les répondants sont relativement d'accord entre eux, notamment pour ces deux types de besoin qui affichent les plus faibles écarts-types avec respectivement 0,50 et 0,83 de dispersion autour de la moyenne, à savoir 4,56 et 4,44 (Annexe 24). Ce classement en termes de besoins s'explique par les missions attribuées aux DDTM qui interviennent en tant que maîtres d'ouvrages, par exemple dans la mise en place de structures de protection (cf. chapitre 10). À ce titre, les DDTM souhaitent également renforcer les **échanges avec les scientifiques** pour avoir une meilleure connaissance des rythmes et des modalités de recul des falaises meubles. Du fait de leur rôle dans la mise en application des plans de prévention des risques, les DDTM expriment également le besoin de **définition de responsabilités** et **d'adaptation de la réglementation** (Fig. 261). Par ailleurs, un des répondants exprime le besoin de connaitre les politiques publiques d'aide aux collectivités pour la gestion du risque d'érosion. La gestion du littoral peut effectivement être facilitée par l'accompagnement de politiques publiques spécifiques impliquant l'État et les différents niveaux des collectivités territoriales (Grosvalet, 2014). Enfin, les besoins les moins priorisés par les DDTM sont à nouveau la **sensibilisation citoyenne** et **les formations**.

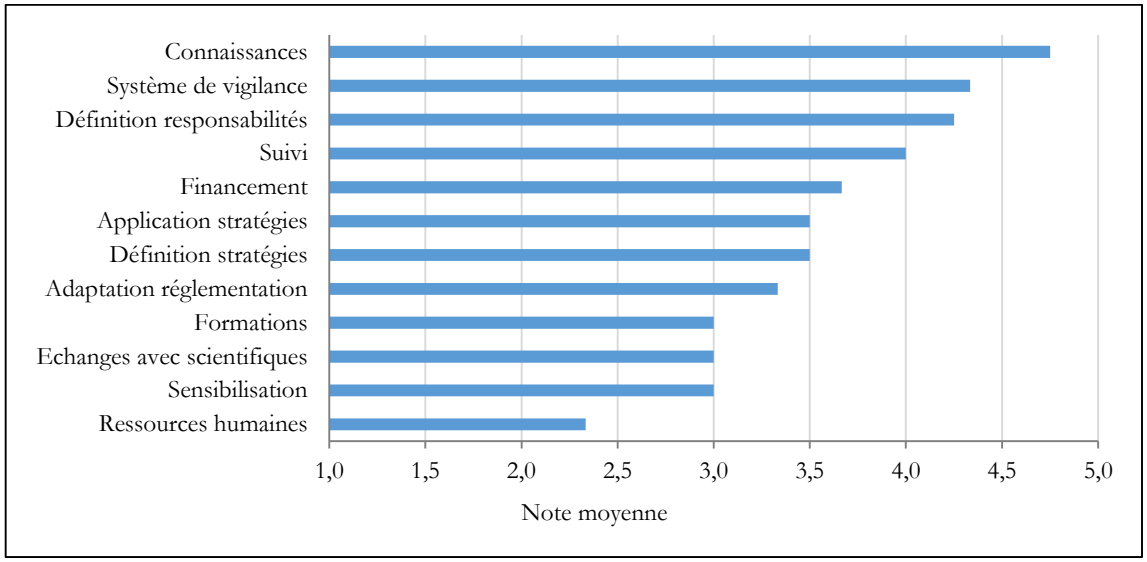
Fig. 261 : Priorisation des besoins exprimés par les DDTM (9 répondants).



- **Les préfectures**

Malgré le faible nombre de répondants au sein des préfectures (4 répondants sur 12 contactés), on considère que les quatre départements bretons sont représentés car une personne par département a répondu à l'enquête. Au sein des préfectures, c'est le besoin de **connaissances** qui se démarque des autres (Fig. 262). Ceci s'explique par le rôle de la préfecture dans la conception et l'élaboration des plans de prévention des risques. Les préfectures accordent également une importance à un **système de vigilance** et à **la définition des responsabilités**. Le préfet a effectivement le devoir d'intervenir pour le compte et sous la responsabilité des communes lorsqu'un danger menace les biens et/ou les personnes et qu'il n'est pas pris en compte (source : https://www.mementodumaire.net). Il possède donc un pouvoir de substitution mais aussi un pouvoir de police générale consistant à assurer la sécurité et la sûreté publique en cas de carence du maire d'une commune ou de risques s'étendant sur plusieurs communes. Les besoins les moins priorisés par les préfectures sont les **ressources humaines qualifiées**.

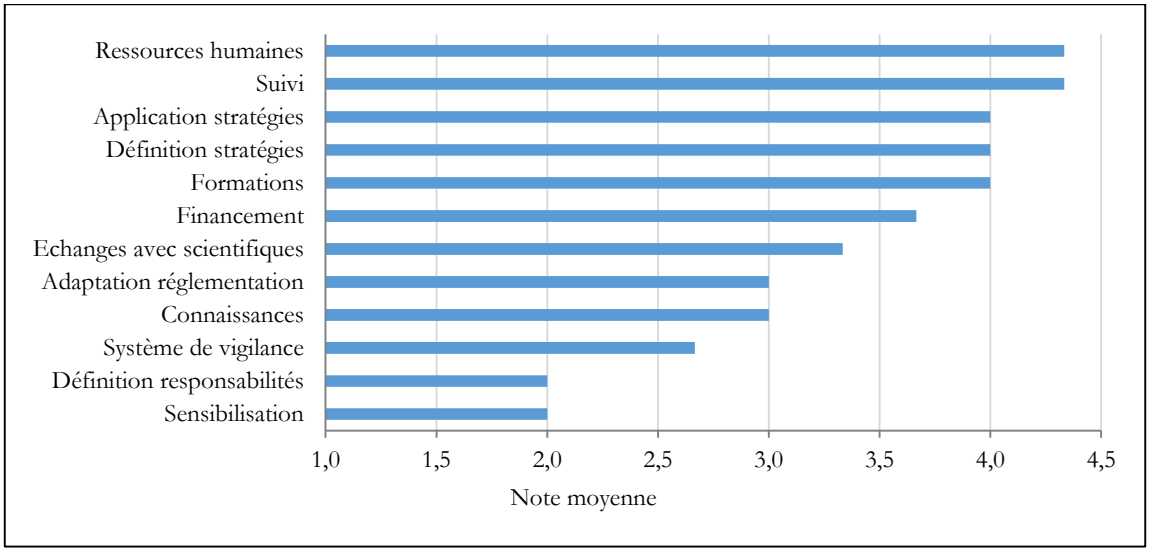
Fig. 262 : Priorisation des besoins exprimés par les préfectures (4 répondants).



- **Les Conseils départementaux**

À la différence des autres institutions, les **ressources humaines** avec le **suivi de terrain** apparaissent parmi les premiers besoins des Conseils départementaux (Fig. 263). Dans ce sens, le Conseil départemental du Finistère a participé au financement de Litto3D (modèle numérique altimétrique continu terre-mer à haute résolution) sur son littoral, mis à disposition libre en 2014 (https://diffusion.shom.fr/pro/amenagement/altimetrie-littorale/litto3dr-finistere-2014.html). Ceci a été possible grâce à un partenariat incluant le SHOM, l'IGN, la Région Bretagne, la préfecture du Finistère, l'Agence des aires marines protégées, le Parc National marin d'Iroise, l'IFREMER et le Service d'infrastructure de la défense. Face aux besoins financiers des communes pour réaliser des études préalables ou pour mettre en place des moyens de gestion de l'érosion voire des ouvrages de défense, les Conseils départementaux sont fréquemment sollicités. Ils ont régulièrement recours à des bureaux d'études spécialisés tels que le Cerema, pour accompagner l'élaboration et l'application de stratégies de gestion. Cette demande explique que la **définition et la mise en application des stratégies** ainsi que les **formations** figurent au deuxième rang des besoins exprimés par les Conseils départementaux (Fig. 263). Par exemple, le Conseil départemental du Finistère a signé, en 2019, une convention de partenariat avec l'Université de Bretagne Occidentale et le Cerema répondant à ces besoins. *A contrario*, la **définition des responsabilités** et la **sensibilisation citoyenne** sont les éléments les moins priorisés. Toutefois, il est important de rappeler que les résultats associés aux Conseils départementaux sont peu significatifs car ces collectivités territoriales ne sont représentées que par trois personnes et seulement deux des quatre départements bretons. Aucune réponse du Morbihan et de l'Ille-et-Vilaine n'a été reçue (Fig. 254).

Fig. 263 : Priorisation des besoins exprimés par les Conseils départementaux (3 répondants).

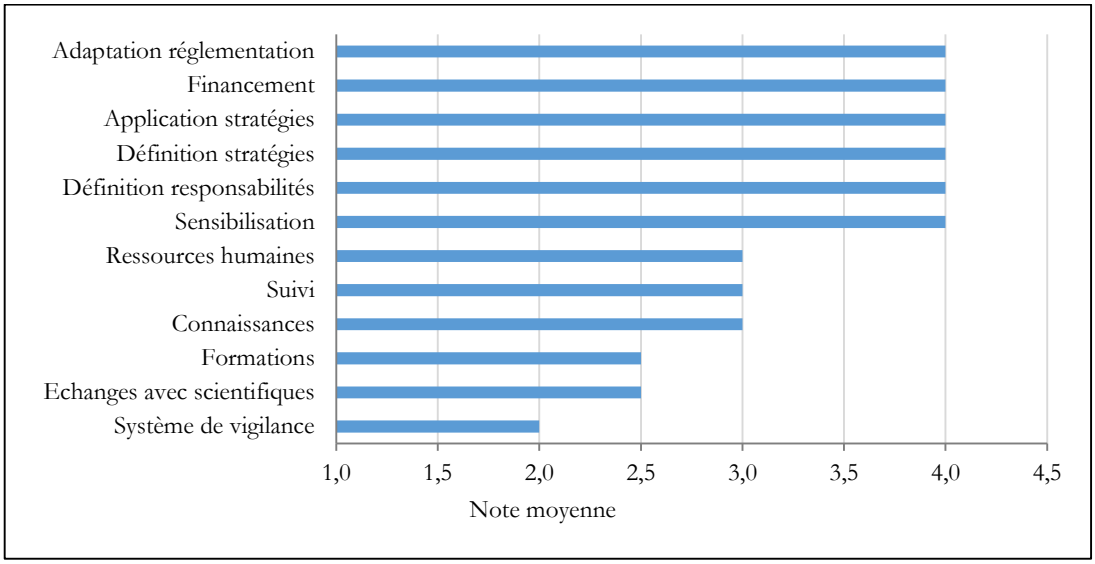


- **La DREAL**

Les services régionaux semblent assez faiblement impliqués dans la gestion du risque d'érosion car ils ne possèdent pas de compétence directe à cet égard (Mineo-Kleiner, 2013). Ceci explique que seulement deux répondants appartenant à la DREAL ont répondu à l'enquête. De ce faible nombre de réponses, il ne ressort pas réellement de besoins primordiaux (Fig. 264). Toutefois, une priorisation d'un groupe de besoins se dégage comprenant l'**application et la définition de stratégies**, **l'adaptation de la réglementation** et le **financement** et enfin la **sensibilisation citoyenne** et la **définition des responsabilités**. À l'inverse, le **système de vigilance** est le besoin le moins priorisé par la DREAL étant

donné que les mesures de prévention et d'alerte de la survenue d'un risque se font à une plus grande échelle, c'est-à-dire, celles des communes et des intercommunalités, voire du département.

Fig. 264 : Priorisation des besoins exprimés par la DREAL (2 répondants).



Le sujet de la gestion des risques littoraux n'est pas traité de manière similaire selon les institutions en raison des différences dans les missions qui leur sont attribuées et de leurs échelles d'action. Il en résulte une priorisation différente des besoins. Face à ces différents besoins, des outils de connaissance et de méthodologie sont nécessaires pour que les acteurs de la gestion du risque parviennent à atteindre leurs objectifs. L'identification des outils prioritaires selon les institutions sera traitée dans la partie suivante.

12.2.4- Priorisation des outils en termes de connaissance et de méthodologie

- **Les communes**

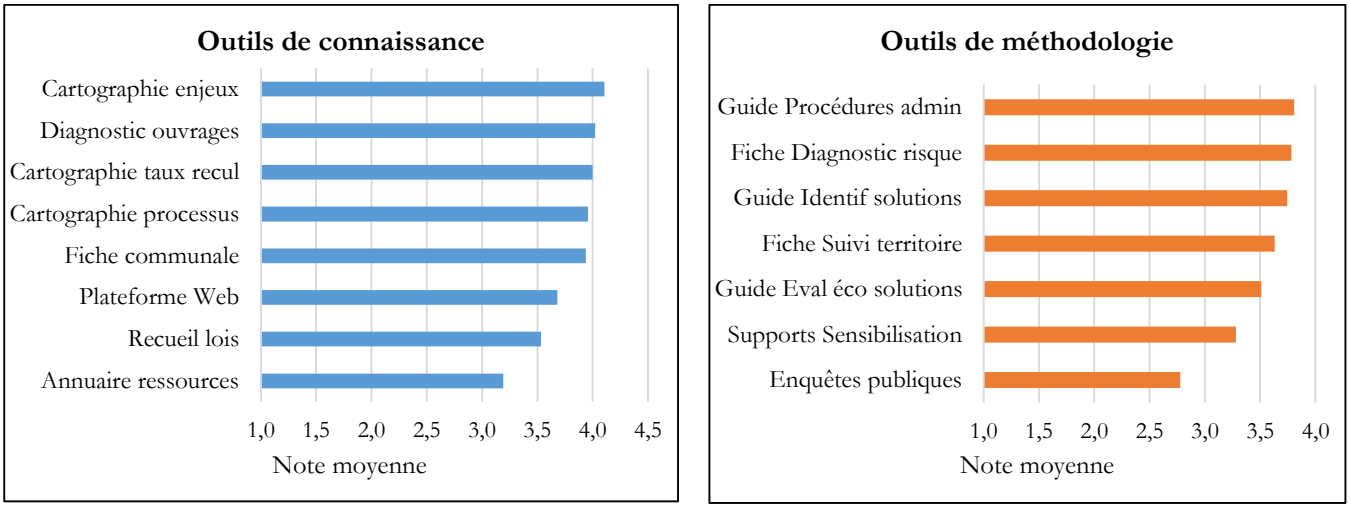
Parmi les huit outils de connaissance sur les risques d'érosion des falaises meubles proposés dans le questionnaire (Tab. 40), ce sont les **cartographies d'enjeux** et le **diagnostic des ouvrages** qui sont les plus plébiscités par les communes (Fig. 265). Ceci reflète l'importance accordée à la gestion des ouvrages de défense et les responsabilités du maire de protéger la population et d'assurer la pérennité des infrastructures publiques. L'accent mis sur cet aspect de gestion des ouvrages est peut-être en lien avec l'actualité du déploiement de la compétence GEMAPI dans les intercommunalités. Un des répondants indique la nécessité de prendre en compte l'ensemble des enjeux pouvant être présents dans les communes tels que les espaces naturels remarquables ou les sites archéologiques. En Bretagne, les sentiers côtiers figurent parmi les enjeux les plus exposés au recul des falaises meubles (Biville et Van Waerbeke, 2003). Ainsi, un des répondants souhaite qu'une « *étude du GR34 définisse le niveau de risque existant par portion en fonction de la distance du sentier au sommet de falaise, de la hauteur de falaise et de la nature géotechnique des formations* ». Cette étude permettrait de « *déboucher sur une priorisation des portions à éloigner de la crête* » et, à la suite d'un recul de falaise dans un secteur, de *« connaitre le nouveau niveau de risque (toujours vert ? ou passage en orange, rouge, noire... ?)* » qui serait déterminé en fonction de la distance restante entre le sentier et le sommet de falaise. En plus de connaitre les enjeux exposés sur leur territoire, les communes souhaitent appréhender l'évolution du trait de côte par des **cartographies des taux de recul** et des **processus physiques** et avoir à disposition des **fiches communales** décrivant les caractéristiques géomorphologiques du territoire (Fig. 265).

Parmi les outils de connaissance, la **plateforme web** donnant accès aux données actualisées sur les zones côtières n'apparait qu'au 6e rang (Fig. 265). Toutefois, cet outil est associé à un plus grand écart-type (1,23) témoignant de la dispersion des réponses (Annexe 25). Enfin, les **annuaires de ressources spécialisées** représentent l'outil de connaissance le moins priorisé par les communes.

En termes d'outils de méthodologie, ce sont les **guides des procédures administratives**, les **fiches de diagnostic du risque** et les **guides d'identification de solutions** qui sont priorisés (Fig. 265). Cette classification est cohérente avec les besoins de définition et de mise en application des stratégies exprimés dans la première partie du questionnaire (Fig. 259). Cette priorisation d'outils est étonnante car certains de ces guides sont disponibles sur internet tel le guide du Cerema « *Études des aléas littoraux dans le cadre d'une analyse coûts-bénéfices (ACB)* » (Perherin et al., 2015). Ce constat révèle certainement un manque de connaissances des sources d'informations (Billé, 2006). Par ailleurs, la complexité des lois, la multiplicité des outils de gestion et la difficulté d'évaluation du risque pourraient aussi expliquer l'absence de stratégie de gestion dans de nombreuses communes littorales. Enfin, les **enquêtes auprès de la population** et les **supports de sensibilisation** sont les outils de méthodologie les moins priorisés (Fig. 265) alors que c'est à l'échelle des communes que leur utilisation parait la plus pertinente pour informer et sensibiliser les citoyens.

Bien que le besoin d'outils est exprimé par une majorité d'élus, un des répondants indique que, pour lui, les outils existants sont déjà trop nombreux et ne sont pas adaptés : « *les études, les outils, les guides se multiplient mais quand un cas concret se présente, on ne sait pas quoi faire, il faut des réponses au plus proche du terrain. Exemple : la falaise s'érode sous un sentier côtier : on attend qu'il tombe puis on ferme ? Le danger est-il réel de suite ? Faut-il procéder à un aménagement quelconque de protection de la falaise ? Penser d'ores et déjà à reculer les sentiers ? Établir des scénarios avec les habitations ?* […] *Je pense que les outils sont nombreux et je m'interroge sur l'efficacité réelle concrète* ». C'est donc une remise en question de la pertinence et de l'efficacité des outils qui est exprimée ici. Il est primordial que les guides puissent apporter une aide en prenant en compte le contexte local et ses particularités. De plus, à travers ce discours est exprimé le fort besoin d'accompagnement et de conseil dans le choix des stratégies de gestion, en raison de l'absence de spécialistes des questions des risques littoraux au sein des communes.

Fig. 265 : Priorisation des outils de gestion des risques par les communes (53 répondants).

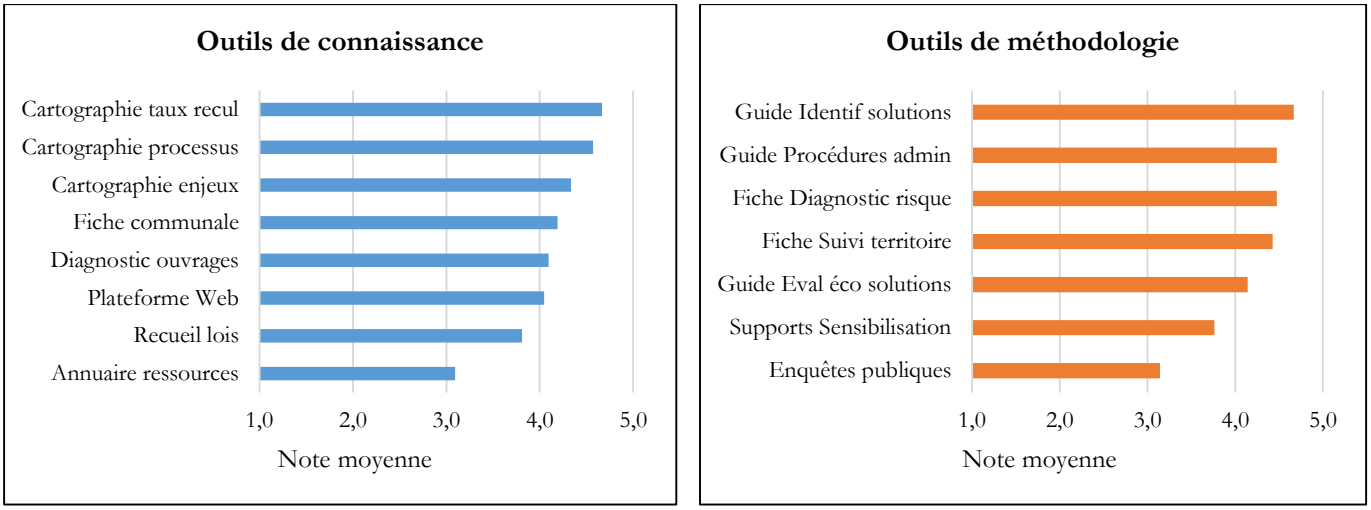


- **LES EPCI**

Le besoin de **cartographie des taux de recul** et des **processus physiques** est fortement exprimé par les EPCI (Fig. 266). Viennent ensuite la **cartographie des enjeux** et les **fiches communales**. Les faibles écarts-types associés à ces outils (entre 0,55 et 0,90) montrent que les répondants partagent globalement

le même avis (Annexe 25). Parmi les outils de méthodologie, sont priorisés les **guides d'identification de solutions** pour « *modérer les enrochements de la côte* », les **guides des procédures administratives**, le **diagnostic du risque** et le **suivi du territoire** (Fig. 266). La priorisation des outils de connaissance et de méthodologie par les EPCI est donc relativement proche de celle des communes. De plus, cette classification est cohérente avec les besoins de connaissances et de suivi de terrain exprimés par les EPCI (Fig. 260) qui sont indispensables à la définition de stratégies à l'échelle intercommunale et à leur prise en compte dans les documents d'urbanisme tels que les SCOT. La gestion des risques sur un territoire étendu de plusieurs communes a l'avantage de mieux appréhender les processus littoraux qui s'expriment à l'échelle de la (ou des) cellule(s) hydro-sédimentaire(s) et non en fonction des seules limites administratives communales (MEDDE, 2016). Parmi les derniers outils priorisés par les EPCI, figurent les **annuaires de ressources spécialisées** et les **enquêtes publiques** (Fig. 266).

Fig. 266 : Priorisation des outils de gestion des risques par les EPCI (23 répondants).



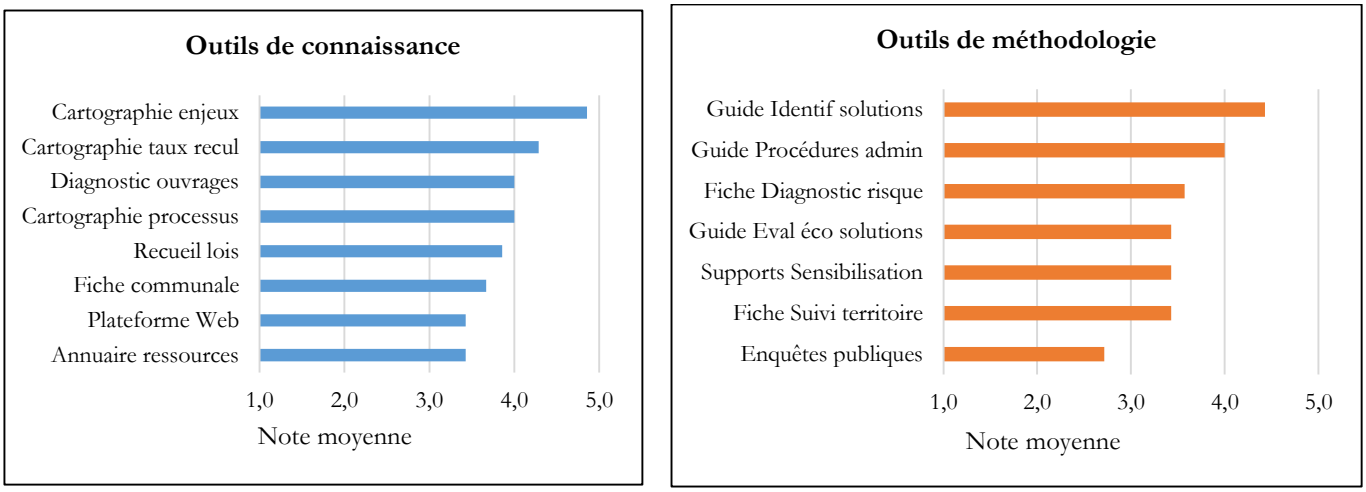
- **LES DDTM**

La **cartographie des enjeux** est le premier outil priorisé par les DDTM (Fig. 267) et également celui associé à un plus faible écart-type (0,35) (Annexe 25). La **cartographie des taux de recul** apparait en seconde position du classement. Viennent ensuite le **diagnostic des ouvrages** et la **cartographie des processus physiques**. Cette priorisation des outils reflète les missions de la DDTM de contrôle des ouvrages installés sur le domaine public maritime ainsi que la mise en place des plans de prévention des risques. Un des répondants précise la nécessité d'analyses très localisées des falaises meubles mais est conscient qu'« *une échelle très fine va au-delà de tout ce qui est réalisable par catalogue* ». Pour lui, les études générales « *ne sont pas complètement inutiles mais n'auront jamais la précision ou le niveau de définition adapté* ». Un autre répondant de la DDTM suggère de créer une page internet décrivant précisément les démarches que doivent faire les collectivités ou les particuliers confrontés à une problématique d'érosion côtière car, bien souvent, les élus et les particuliers sont désemparés face à la complexité réglementaire et à la multiplicité des lois (Belliard, 2005 ; Bordereaux et Braud, 2009).

À l'instar des communes et des EPCI, les DDTM priorisent les **guides d'identification de solutions** et **de procédures administratives** (Fig. 267). Ceci est cohérent avec leur rôle de maîtrise d'ouvrage des installations situées sur le domaine public maritime et la gestion des infrastructures départementales. Les **enquêtes auprès de la population** figurent à nouveau parmi les derniers outils de méthodologie priorisés. Ceci se comprend certainement car consulter la population suppose de bien maîtriser tous les aspects des problèmes liés au recul des falaises meubles, voire d'avoir déjà des solutions. Or, il apparaît que l'insuffisance de connaissances et de formations sur tous les aspects du risque ne permettent pas aux gestionnaires de maîtriser tous ces aspects. Néanmoins, l'écart-type associé aux supports de

sensibilisation et aux enquêtes publiques, qui est respectivement de 1,29 et de 1,16, montre que tous les répondants ne partagent pas le même avis sur l'importance accordée à l'information et à la consultation des citoyens dans la prise de décision (Annexe 25).

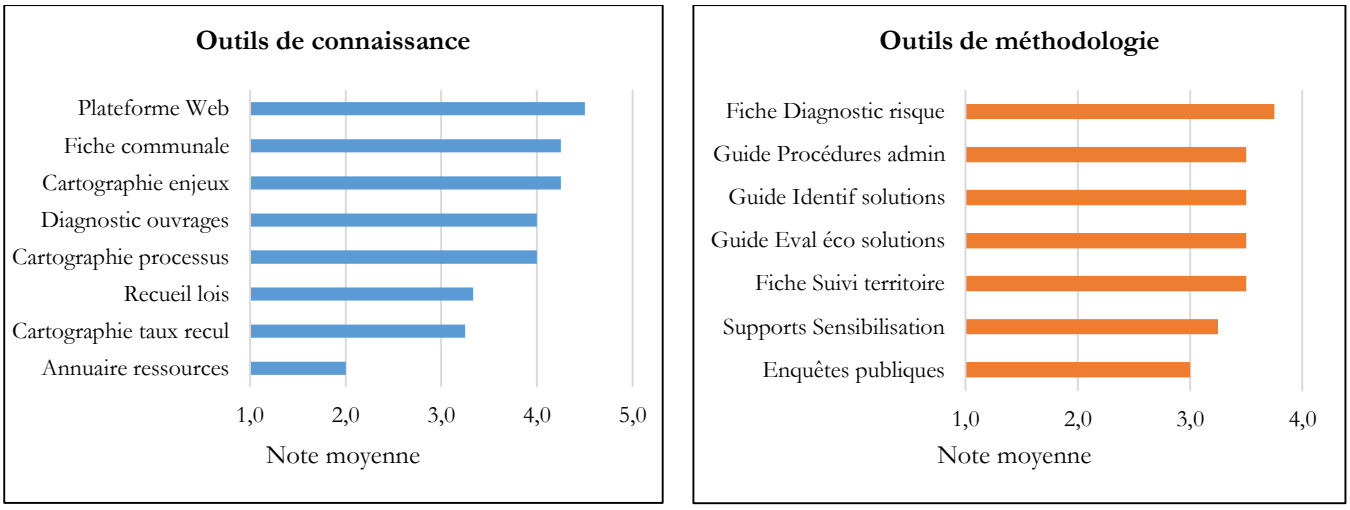
Fig. 267 : Priorisation des outils de gestion des risques par les DDTM (9 répondants).



- **Les préfectures**

La **plateforme web** est fortement priorisée par les préfectures (Fig. 268) et est l'outil associé au plus faible écart-type (0,50) (Annexe 25). Viennent ensuite la **cartographie des enjeux** et les **fiches communales**. En termes d'outils de méthodologie, les **fiches de diagnostic de risque** sont exprimées en priorité. Le classement de ces outils est cohérent avec les besoins exprimés (Fig. 262) et le rôle des préfectures d'assurer la sécurité de la population et de concevoir les plans de prévention des risques. Les outils moins priorisés tels que la cartographie des taux de recul ou le recueil des lois pourraient s'expliquer par la formation reçue des personnels de ces administrations.

Fig. 268 : Priorisation des outils de gestion des risques par les préfectures (4 répondants).



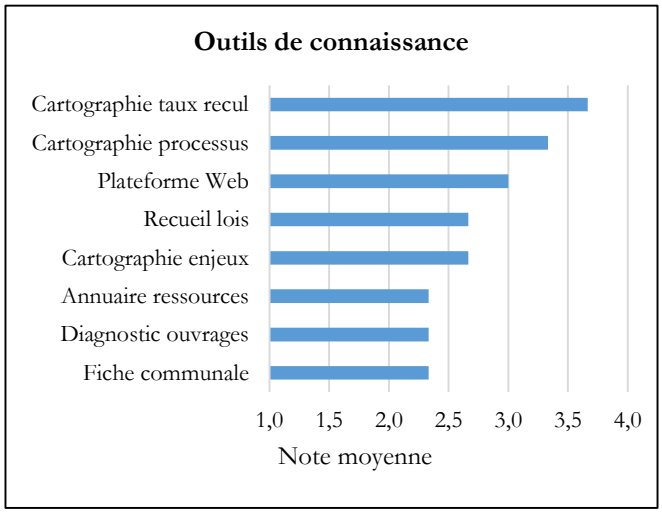
- **Les Conseils départementaux**

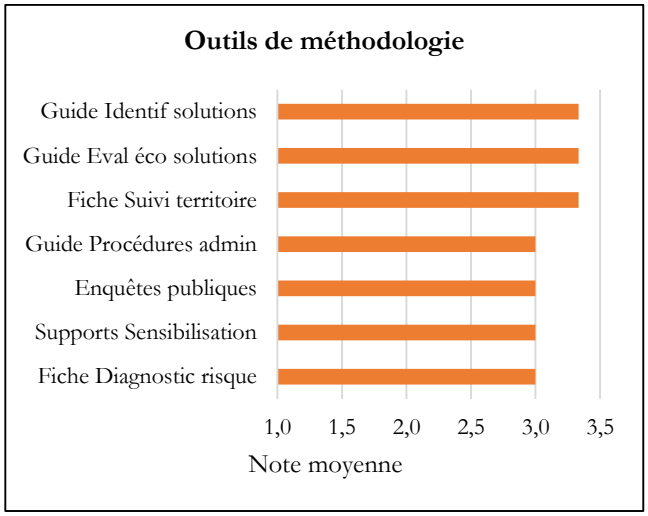
Les **cartographies des taux de recul** et des **processus physiques** sont les premiers outils priorisés par les Conseils départementaux (Fig. 269). Néanmoins, ces deux outils sont associés à un fort écart-type (respectivement 1,89 et 1,70) indiquant une forte dispersion des réponses liée notamment au faible

nombre de répondants. Face aux demandes de soutien technique émanant des collectivités territoriales, les Conseils départementaux accordent également une importance à une **plateforme web** permettant l'accès aux données actualisées sur les zones côtières. Derrière cet intérêt se cache certainement aussi le besoin des Conseils départements de prioriser les actions à entreprendre et à financer car les budgets disponibles sont limités et ne peuvent couvrir toutes les demandes de subvention faites par les communes et les EPCI (Laignel et Guéné, 2016).

En termes d'outils de méthodologie, les Conseils départementaux priorisent les **guides d'identification** et **d'évaluation économique de solutions** ainsi que les fiches de **suivi du territoire**. Cette classification est cohérente avec les besoins de suivi de terrain et de définition de stratégies exprimés dans la première partie du questionnaire (Fig. 263).

Fig. 269 : Priorisation des outils de gestion des risques par les Conseils départementaux (3 répondants).

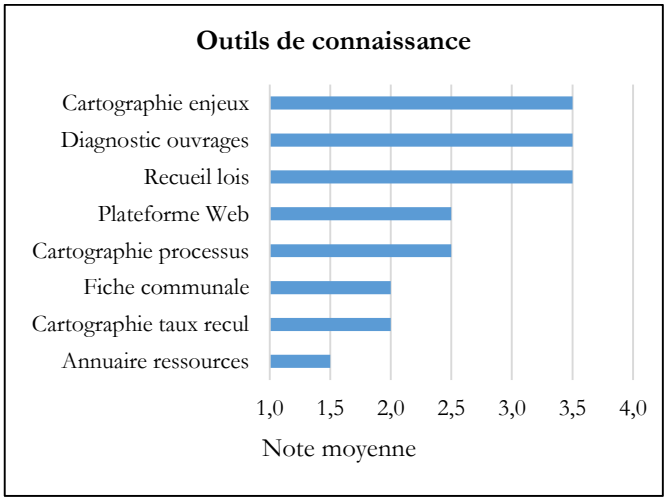


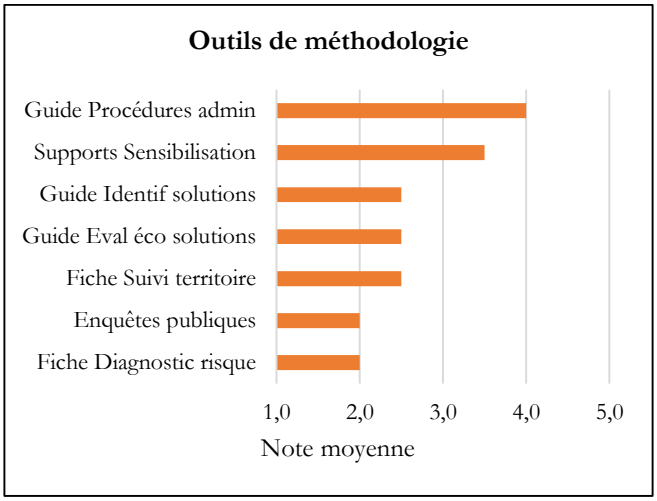


- **La DREAL**

La **cartographie des enjeux**, le **diagnostic des ouvrages** et le **recueil des lois** sont les outils de connaissance priorisés par la DREAL (Fig. 270). En termes de méthodologie, c'est d'abord les **guides de procédures administratives** et les **supports de sensibilisation** qui sont priorisés. Ainsi, à l'inverse des autres institutions, une plus grande importance semble être accordée à la sensibilisation citoyenne par la DREAL. Toutefois, cette priorisation ne peut être considérée comme significative du fait que l'institution n'est représentée que par deux répondants.

Fig. 270 : Priorisation des outils de gestion des risques par la DREAL (2 répondants).





12.2.5- Bilan

L'enquête réalisée auprès des gestionnaires bretons révèle des besoins prioritaires en termes de connaissances et d'outils pour la gestion du risque d'érosion des falaises meubles en Bretagne.

Globalement, les deux types de besoin les plus fortement priorisés par l'ensemble des institutions sont l'accès aux **connaissances** et les **suivis de terrain**. La **définition et la mise en application de stratégies** sont également un autre type de besoin qui a été fortement exprimé par l'ensemble des acteurs.

Néanmoins, l'enquête montre que chacune des institutions exprime d'autres besoins qui lui sont spécifiques. Ainsi, les communes souhaitent obtenir un meilleur **accompagnement** de la part des services de l'État pour le choix et la mise en place de mesures d'adaptation. Les EPCI ont exprimé leur besoin de **formation** aux suivis et aux mesures de terrain. Afin de mettre en place des mesures de prévention et de protection, les communes et les EPCI expriment un fort besoin de **financement**. Les EPCI ainsi que les DDTM ont également exprimé leur besoin d'**échanges avec les scientifiques.** L'enquête montre aussi le besoin des DDTM dans la **définition des responsabilités** car l'incertitude des acteurs locaux quant à leurs responsabilités est source d'inaction. Les **systèmes de vigilance** sont priorisés par les maires et les préfets du fait de leur devoir de responsabilité civile. Enfin, dans les Conseils départementaux, les **ressources humaines** qualifiées sont un des besoins les plus fortement exprimés.

Parmi les huit outils de connaissance proposés sur les risques d'érosion des falaises meubles, ce sont les **cartographies des enjeux exposés** et des **processus côtiers actifs** qui sont les plus plébiscités par l'ensemble des institutions. Ces cartographies représentent des outils leur permettant de faire des choix éclairés pour la gestion de leur territoire côtier. Les **diagnostics territoriaux** (fiches d'informations communales et diagnostic des ouvrages) sont également des outils fortement priorisés car ils permettent de connaitre les caractéristiques géomorphologiques du territoire (type de côte, changements historiques et récents…) ainsi que l'état et l'efficacité des ouvrages de défense contre la mer.

Parmi les sept outils de méthodologie proposés, les **guides d'identification de solution**, les **guides des procédures administratives** et les **fiches de diagnostic du risque** sont les outils priorisés par l'ensemble des institutions. Les collectivités territoriales ne disposant généralement pas d'un expert dans les risques littoraux, les gestionnaires ont besoin de méthodes pour les aider à identifier les terrains qui sont susceptibles d'être affectés par l'érosion des falaises meubles. L'enquête révèle également que d'autres outils ne sont priorisés que par certaines institutions en raison des missions spécifiques qui leurs sont attribuées. C'est le cas des **guides d'évaluation économique de solutions** pour les Conseils départementaux. La priorisation des outils est donc cohérente par rapport aux besoins exprimés.

Enfin, l'enquête révèle une faible importance accordée à la **sensibilisation citoyenne** de la part de l'ensemble des acteurs. Les enquêtes auprès de la population et les supports de sensibilisation sont les outils de méthodologie **les moins priorisés** par les communes et les EPCI alors que c'est à l'échelle locale que leur utilisation parait la plus pertinente pour informer et sensibiliser les citoyens. Ceci est d'autant plus préoccupant que la culture du risque est très peu développée au sein des communes littorales bretonnes (Mineo-Kleiner, 2017).

12.2.6- Discussion

Marges d'erreur liées au taux de réponse

Au total, 94 gestionnaires ont répondu à l'enquête (Fig. 254). Le nombre de répondants peut paraitre faible au regard de l'ensemble des personnes contactées (taux de réponse global de 34 %, Fig. 254). Lors

d'une enquête auprès d'un ensemble d'individus, il est nécessaire d'obtenir les meilleurs taux de réponse afin de minimiser le biais lié à l'insuffisance de réponses et augmenter la variance (Boulbry, 2006 ; Santin, 2015). Toutefois, ce point de vue classique a été remis en question par plusieurs auteurs et notamment par Groves et Peytcheva (2008). Augmenter, à tout prix, le taux de réponse d'une enquête peut effectivement être contre-productif si on amène, à la suite de nombreuses sollicitations, des personnes peu intéressées à répondre à l'enquête. Ces personnes sont plus susceptibles de donner des réponses imprécises, voire erronées, les personnes les moins motivées répondant avec moins d'attention (Nummela et al., 2011). Par ailleurs, cinq participants n'ont pas répondu entièrement au questionnaire en s'arrêtant à la partie 2 ou au début de la partie 3. L'absence de remplissage de la troisième partie du questionnaire peut signifier que le sondage est apparu trop long pour quelques répondants bien que le temps maximum n'ait été que de 15 minutes. Le questionnaire est donc perfectible. Une version plus courte aurait probablement permis d'obtenir un remplissage complet par tous les participants mais alors moins précis. Les taux de réponse plus faibles à certains items (ex : « Adaptation de la réglementation » ou « Enquête auprès de la population ») suggèrent, de plus, que certaines propositions n'étaient pas suffisamment claires et précises pour certains répondants.

En termes de représentativité des institutions, les taux de réponse sont compris entre 18 et 43 % pour les collectivités territoriales (communes, EPCI et Conseils départementaux) et les services déconcentrés de l'État (DDTM, préfectures, DREAL) (Fig. 254). Toutefois, le faible nombre de répondants au sein de la DREAL, des préfectures et des Conseils départementaux ne permet pas de généraliser sur les réponses pour ces trois institutions comme en attestent les valeurs élevées des écarts-types associés aux réponses (Fig. 258). De plus, les services régionaux sont peu représentés dans l'enquête en raison de l'absence de répondant travaillant au Conseil régional. Cependant les services régionaux possèdent peu de compétences sur la gestion des risques côtiers au regard des institutions locales et leurs besoins sont donc moins représentatifs des actions menées pour réduire les risques. Par ailleurs, c'est généralement une très petite équipe, de deux voire trois personnes, qui s'occupe de la gestion des risques naturels. Le risque d'érosion côtière peut donc être mis au second plan au regard d'autres aléas telle l'inondation fluviatile où les enjeux menacés sont certainement plus importants (Gérin, 2011 ; Perherin, 2017).

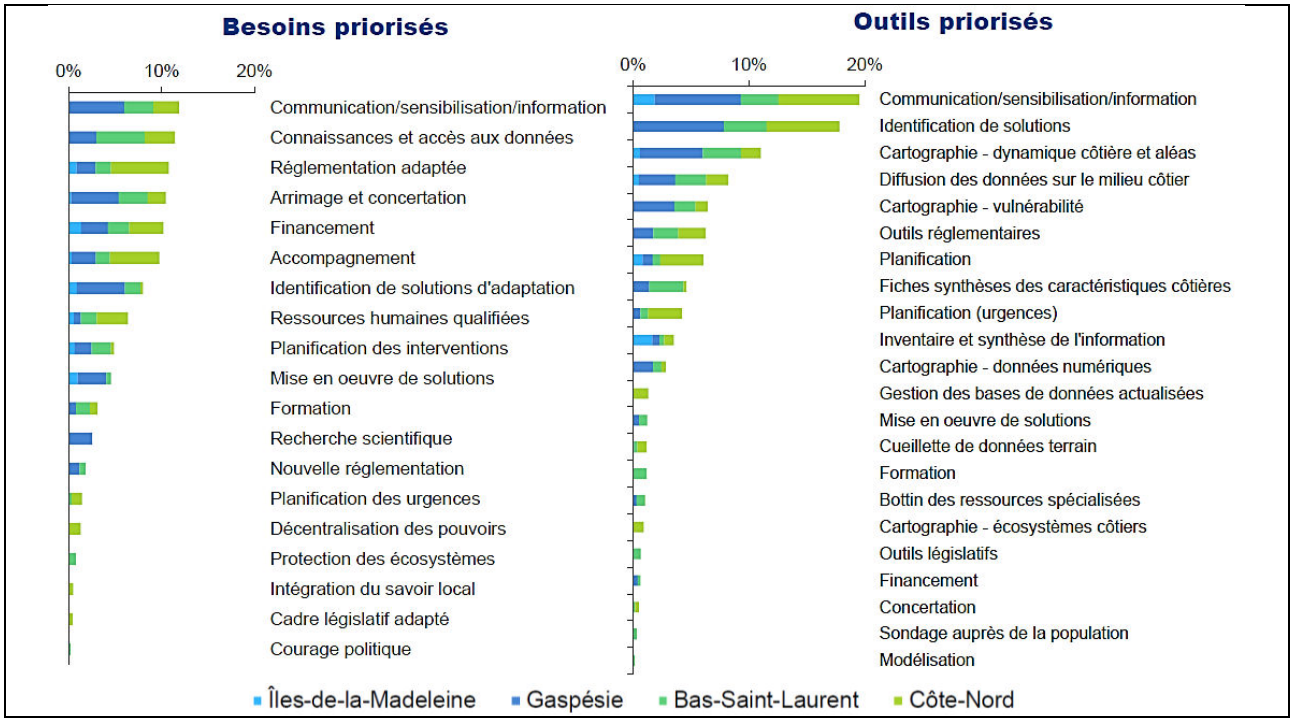
Comparaison des résultats de l'enquête avec les besoins exprimés par les gestionnaires au Québec

En 2017, le laboratoire LDGIZC de l'UQAR a organisé, dans le cadre du projet *Résilience côtière* (Marie et al., 2017), des ateliers dans l'Est du Québec pour permettre aux acteurs locaux et régionaux d'exprimer leurs besoins concernant la gestion des risques côtiers. Ces ateliers ont impliqué 88 municipalités québécoises dans la Côte-Nord, le Bas-Saint-Laurent, la Gaspésie et les Iles-de-la-Madeleine. Au total, 214 participants sur 350 personnes contactées se sont exprimés lors de ces ateliers, soit un taux de réponse de 61 %. La synthèse de l'analyse représente 19 catégories de besoin et 22 catégories d'outil (Fig. 271). Dans l'enquête menée en Bretagne, le nombre de catégories de besoin et d'outil est plus faible car le nombre de propositions du questionnaire a été volontairement réduit afin de simplifier le remplissage. Le questionnaire en ligne doit effectivement être relativement rapide à remplir (ne doit excéder les 20 minutes) afin de ne pas lasser le sondé qui ne répondra pas alors correctement aux questions posées (Fenneteau, 2015). De plus, quelques besoins diffèrent, telle la « *décentralisation des pouvoirs* » car cet aspect est spécifique du cadre normatif et de l'organisation institutionnelle du pays.

La comparaison des besoins des gestionnaires bretons (présentés dans ce chapitre) avec ceux des gestionnaires québécois (issus des travaux du LDGIZC) montre des similitudes mais aussi des différences en termes de priorisation des outils de gestion. En effet, ce qui apparait le plus surprenant est que les besoins et les outils de communication et de sensibilisation sont les premiers éléments priorisés par les gestionnaires au Québec (Fig. 271) tandis que ces éléments sont classés en dernier par les acteurs bretons.

Ceci montre une meilleure prise de conscience des gestionnaires québécois de l'importance d'actions de sensibilisation qui permettent notamment de favoriser l'acceptabilité sociale des mesures de prévention.

Fig. 271 : Résultats de la priorisation des besoins et outils en matière de gestion des risques littoraux exprimés par les gestionnaires québécois (Marie et al., 2017).

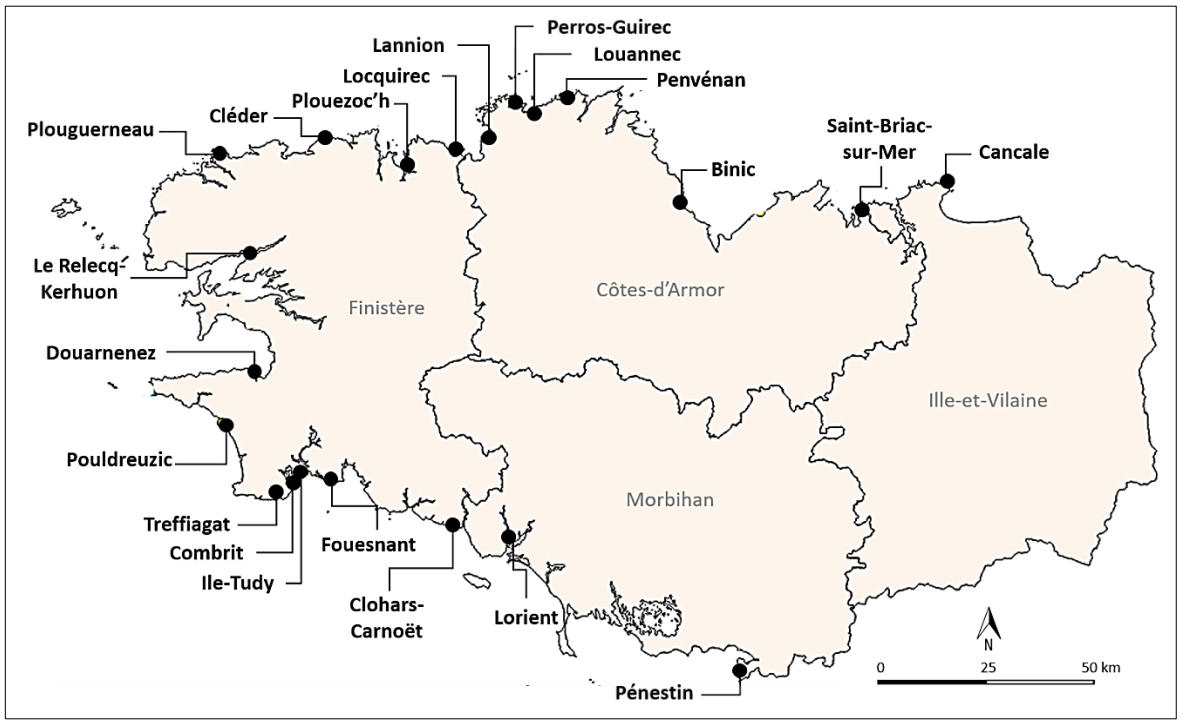


À l'inverse, les besoins de connaissances, de financement, de cartographies et d'outils d'identification de solution sont tout aussi importants pour les gestionnaires québécois que pour les gestionnaires bretons (Fig. 271 et Annexes 24 et 25). De même, les outils de concertation et de sondage auprès de la population figurent parmi les derniers éléments priorisés. Tout comme les gestionnaires québécois, les acteurs bretons préfèrent également ne pas multiplier le nombre de personnes consultées dans la prise de décision car cela permet d'agir rapidement, d'éviter la confrontation d'intérêts et donc de faciliter l'atteinte d'un accord. Mais, en contrepartie, les attentes et les besoins de l'ensemble des personnes impliquées ne sont pas pris en compte et ceci ne permet pas de trouver un compromis entre les différents intérêts (Choblet, 2005). Enfin, le besoin d'avoir accès aux données et de disposer de cartes détaillées montre l'importance accordée au savoir par les gestionnaires bretons et québécois car une bonne connaissance oriente vers une gestion efficace (Quillet, 2017).

12.3- Des besoins expliquant les difficultés rencontrées à l'échelle régionale et locale

Cette partie présente des réflexions cherchant à mettre en lumière l'origine des difficultés de la gestion du risque d'érosion des falaises meubles qui ont été observées précédemment, à partir de l'enquête régionale ainsi qu'à partir de l'analyse de la gestion à l'échelle locale des sites d'étude (cf. chapitre 11). Ces réflexions sont illustrées de propos tirés d'articles de presse et de discussions informelles. La carte suivante (Fig. 272) permet de localiser les communes mentionnées dans cette partie et qui ont été prises en exemple pour illustrer la discussion.

Fig. 272 : Localisation des communes mentionnées (Bretagne).



12.3.1- Des connaissances insuffisantes

D'après l'enquête régionale, les connaissances et l'accès aux données figurent parmi les premiers besoins exprimés par l'ensemble des gestionnaires bretons. Les collectivités ainsi que les services de l'État ont besoin de connaitre les zones à risque afin de planifier l'aménagement du territoire et de définir les stratégies de gestion (Le Morvan, 2010). La connaissance de l'aléa et des enjeux menacés sur un territoire est effectivement le premier pilier pour mener une réflexion sur les stratégies de gestion du risque. C'est pourquoi les cartographies des taux de recul et des enjeux, ainsi que les fiches de diagnostic communal sont des outils fortement priorisés.

L'**absence de stratégies locales** peut donc venir d'un **manque de connaissances** des gestionnaires sur les enjeux menacés et sur les dynamiques littorales. Ce manque d'informations vient de la **difficulté d'appropriation,** par les gestionnaires, des connaissances sur les aléas littoraux. Les études portant sur les processus hydro-sédimentaires côtiers sont effectivement souvent basées sur des analyses complexes requérant une appropriation du vocabulaire scientifique (ex : paramètres physiques de la houle, propriétés géotechniques des sols…) (Perherin, 2017).

En plus d'une faible diffusion et vulgarisation des travaux de recherche sur les aléas littoraux, le manque de connaissances vient du fait que **peu d'études ont jusqu'alors été entreprises en Bretagne** sur l'érosion des falaises meubles. Perherin (2017) montre de plus que, parmi les aléas côtiers (recul du trait de côte, submersion et migration dunaire), l'aléa « recul du trait de côte » est celui sur lequel les connaissances sont considérées comme les plus incertaines, d'après les services de l'État. Ceci expliquerait, en partie, les retards dans l'élaboration des cartographies d'aléas littoraux et le **manque de documents réglementaires** observé sur les sites d'étude (PPR, DICRIM…).

Pour la majorité des gestionnaires, compte tenu des **incertitudes** qui subsistent (ampleur de l'impact du changement climatique sur le littoral, rythmes et modalités de recul des falaises meubles), il est difficile de définir une stratégie sur le long terme (Deboudt, 2010). Ces incertitudes scientifiques représentent un prétexte pour les gestionnaires pour ne pas développer des réflexions stratégiques et alors agir dans l'urgence. Cette politique de gestion peut être qualifiée de « passive » (Costa, 1998) car elle consiste à

réaliser des travaux de confortement au coup par coup selon les besoins et sans une logique de gestion établie à moyen ou long terme. De plus, ces mesures de protection ou de réparation post-événement seraient à l'origine des financements les plus élevés (Mineo-Kleiner, 2017).

Outre le manque de connaissances des collectivités sur l'aléa érosion et les enjeux exposés, c'est le **manque de connaissances sur les solutions d'adaptation** qui constitue aussi un frein à la définition des stratégies. Les guides d'identification de solutions figurent effectivement parmi les premiers outils priorisés par les collectivités (cf. sous-chapitre 12.2). Les élus se sentent parfois « dépassés » par les situations inédites, telle l'érosion brutale d'un pan de falaise menaçant des habitations et ils doivent alors faire face à un risque dont ils ne connaissent pas l'ensemble des possibilités techniques pour le gérer (Meur-Ferec et al., 2013).

La consolidation de la falaise par l'installation de murs ou d'enrochements reste la technique la plus répandue et la plus connue, malgré ses effets néfastes (Bonnot-Courtois et Lançon, 2004). Elle continue à être utilisée aussi bien par les particuliers que par les communes lorsque le problème met en cause des biens publics. Cette stratégie qui consiste à fixer le trait de côte s'est largement répandue à partir de la fin du 19e siècle, lors du développement du tourisme littoral et grâce aux possibilités offertes par les progrès techniques (Albinet, 1995 ; Deboudt, 2010 ; Drobenko, 2015). Ce mode de gestion a perduré pendant plusieurs décennies de sorte qu'on peut observer aujourd'hui en Bretagne, en avant de nombreuses falaises meubles, des murs et des enrochements de toute dimension, variés tant en hauteur qu'en longueur (Fig. 273). Ainsi à Pouldreuzic (Finistère) (Fig. 272), les enrochements sont construits de manière discontinue à chaque point de faiblesse (poches d'altérites micaschisteuses) du linéaire de falaises meubles, là où l'érosion menace le sentier côtier ou l'a déjà atteint. Ils sont interrompus lorsque la roche moins altérée ou saine affleure. À Plouguerneau (Finistère), ils constituent par contre une succession ininterrompue le long des anses occupées par des formations meubles (Fig. 273).

Fig. 273 : Diversité de la disposition et des dimensions des enrochements installés en avant de falaises meubles.

Plage Rue du Port à Pouldreuzic (29)

Plage de Kerlédut à Plouguerneau (29)

Dans certaines communes, telles Pouldreuzic et Plouguerneau, le linéaire côtier enroché est désormais supérieur à celui laissé à l'état naturel. Les enrochements sont installés le long de falaises meubles, hautes de 3 à 4 mètres sur près de 700 m de long à Pouldreuzic et sur plus de 3 400 m de long à Plouguerneau.

Toutefois, depuis quelques années, la prise de conscience de l'impact négatif des enrochements a conduit certains acteurs à opter pour des solutions de gestion alternatives, plus respectueuses de l'environnement et avec une perturbation moindre du système côtier (ex : rechargement de sable à Treffiagat (Finistère), reprofilage des falaises et restauration du couvert végétal à Lorient (Morbihan), Fig. 275). La tendance aujourd'hui est donc davantage à la combinaison des différents modes de gestion des risques d'érosion en fonction des particularités et des enjeux du territoire concerné. Ces solutions alternatives sont peu connues des élus (Rocle, 2017) et face à la complexité des modalités de recul des falaises meubles et au manque de conseils sur les aménagements possibles, les communes se sentent désemparées : *« Quel matériel utiliser à près de 20 m de haut, où l'accès est très limité ? » (Le Télégramme, 4 février 2015).* Parfois, la seule mesure envisageable est de laisser la falaise meuble reculer naturellement comme ce fut le cas à Binic (Côtes-d'Armor) en 2015 : *« La stabilisation est impossible car c'est une poche d'argile et non de la roche à cet endroit » (Le Télégramme, 4 février 2015).* De plus, dans un contexte de réduction notable des dépenses publiques, il n'est plus possible de continuer comme auparavant à financer systématiquement les ouvrages de défense contre la mer. Ainsi, la question se pose du « *faire avec* » plutôt que du « *faire contre* » (CESER de l'Atlantique, 2015). Ceci implique une nécessaire évolution de l'approche culturelle du risque, notamment pour les générations de gestionnaires et de riverains habituées à se défendre contre la mer depuis plusieurs décennies. Choisir de ne pas protéger les falaises meubles nécessite d'accepter leur recul inexorable. Toutefois, la stratégie du « laisser faire » est parfois une mesure difficile à prendre sur des communes littorales très touristiques comme ce fut le cas à Plouezoc'h (Finistère), en 2010, ou encore à Clohars-Carnoët (Finistère), en 2002, où le maire a été dans l'obligation de fermer le sentier côtier devenu dangereux et *« regrette de devoir en arriver là » (Le Télégramme, 16 février 2002).*

Fig. 274 : Restauration du couvert végétal et gestion de la fréquentation en sommet de falaise meuble à Lorient (Le Cornec, 2015).

12.3.2- Manque de clarté dans la répartition des responsabilités juridiques

Le trait de côte, dans son sens juridique, est une limite mobile supposée du domaine public maritime. Cette limite est définie à partir de l'intersection de la surface topographique avec le niveau des plus hautes mers astronomiques, intégrant les lais et relais de mer (cordons de galets…) (Allain, 2012). Cette limite entre le domaine public maritime et le domaine privé est importante dans la définition des responsabilités et la gestion d'éventuels projets. D'une manière générale, la propriété du littoral se répartit entre le Conservatoire du littoral, les Conseils départementaux, les communes et les propriétés privés (Gallet et al., 2011). Cette interface que représente le trait de côte implique donc de **nombreux acteurs**. Ceci complexifie l'identification des acteurs responsables de la gestion selon les secteurs de côte. Le manque de clarté dans la définition des responsabilités se traduit par un **manque d'entretien des ouvrages de défense des propriétés privées ou publiques et de sécurisation du sentier côtier**.

Néanmoins, l'absence de gestion de certains secteurs côtiers est parfois due à la **déresponsabilisation** des acteurs concernés qui ne veulent pas assumer les frais d'entretien, plutôt qu'à une incertitude sur leur responsabilité (CESER, 2015). Ainsi, en 2004, le maire de Cancale (Ille-et-Vilaine) refuse d'intervenir pour prévenir des risques d'éboulement de falaise car il juge que ce n'est pas à la mairie d'*« assumer les coûts des travaux »* mais aux propriétaires (*Ouest-France, 24 mars 2004*). Mais, sous la décision du tribunal administratif de Rennes, le maire est contraint de mettre en place les mesures de protection nécessaires, au titre de son obligation d'exécution de la sécurité civile en cas de danger grave ou imminent (ici, des éboulements). Le tribunal accorde quinze jours au maire pour mettre en place ces mesures. Passé ce délai, une sanction de 500 € par jour de retard est imposée à la commune. De même, en 2013, à Plonévez-Porzay (Finistère) où un éboulement de falaise meuble s'est produit, le sentier côtier a également dû rester fermé plusieurs mois, en attente d'être pris en charge par les services administratifs qui *« se renvoient la balle » (Le Télégramme, 28 mars 2013).*

Il est également parfois compliqué de trancher sur les acteurs responsables notamment lorsque la limite du domaine public maritime n'est pas bien cernée (sachant que cette limite est très rarement cartographiée) ou que des **ouvrages sont « orphelins »** si les terrains d'assiette de la structure de défense n'ont pas de propriétaire connu. Ce fut le cas en 2008, à Louannec (Côtes-d'Armor), lorsqu'un riverain a acheté un terrain sur lequel se trouvait un enrochement qui n'avait pas d'existence légale. Les incertitudes sur l'attribution de la responsabilité de l'ouvrage à la commune ou au nouveau résident ont été source de conflits *(Ouest-France, 7 mars 2008).* Pour autant, d'après les articles 539 et 713 du Code civil, la charge financière de la protection revient au propriétaire riverain qui a acheté le terrain sur lequel l'ancien propriétaire avait fait construire l'enrochement. Mais, dans de rares cas de figure, la responsabilité de l'ouvrage peut aussi revenir à la commune lorsqu'aucun propriétaire n'a été identifié (CEPRI, 2017).

12.3.3- Difficultés de mise en place de mesures de gestion dans un contexte de raréfaction des dépenses publiques

Une grande majorité des gestionnaires bretons, principalement les communes et les EPCI, exprime un fort besoin de financement (cf. sous-chapitre 12.2). Le manque de moyens financiers expliquerait en partie les **difficultés de mise en application de stratégies et de mitigation** (Veyret, 2016). Le soutien financier insuffisant de la part de l'État représente, effectivement, un obstacle pour les collectivités à la mise en place de mesures de gestion et est souvent source d'inaction. Ainsi, en 2012, la mairie de Douarnenez (Finistère) choisit d'attendre pour consolider les falaises meubles : « *quand on aura les sous* » *(Le Télégramme, 29 novembre 2012).* Le manque de moyens financiers se traduit également par un **manque d'entretien des ouvrages** de défense ou de protection du sentier côtier. À Penvenan (Côtes-d'Armor), le coût que représente le déplacement fréquent du sentier côtier dû au recul des falaises meubles conduit à la fermeture du sentier : *« l'argent manque… nous allons interdire la fréquentation du sentier » (Le Télégramme, 19 août 2016).* De même, en 2014, à Lannion (Côtes-d'Armor), le Conseil municipal choisit de ne plus remettre en état le sentier côtier en raison du coût élevé de son entretien et du caractère précaire de cet état : *« La municipalité ne peut pas se permettre de dépenser plus de 200 000 € pour une remise en état aléatoire dans le temps » (Ouest-France, 23 juin 2014).* Pourtant, le sentier littoral est un important attrait touristique dans les régions côtières (Colas et al., 2015) et sa fermeture pourrait avoir des conséquences en termes de retombées économiques, notamment pour la commune.

Les moyens financiers insuffisants sont notamment reprochés par les élus à l'État qui transfère une partie de sa responsabilité et ses compétences. De plus, les dotations de l'État continuant de baisser (Cour des Comptes, 2018), les possibilités de financement des collectivités locales en termes de prévention des risques sont davantage réduites.

12.3.4- Une faible interaction entre gestionnaires et scientifiques

La prise de conscience de la nécessité d'adosser les décisions publiques aux connaissances pousse les gestionnaires à échanger de plus en plus avec les scientifiques (Lafon et Treyer, 2009). D'après le rapport du CESER (2015), les scientifiques sont encore insuffisamment consultés dans la gestion des risques littoraux. Ces faibles interactions entre gestionnaires et monde scientifique seraient dues aux **difficultés de vulgariser** ou de **diffuser les résultats** issus de la recherche. La vulgarisation insuffisante des informations peut effectivement représenter une contrainte à la discussion et à l'ouverture de débat pour les non-spécialistes. À la suite d'un état des lieux sur l'activité de vulgarisation des chercheurs, Jensen et Croissant (2007) ont montré que plus de la moitié des chercheurs ne vulgarisaient pas leurs travaux. Ainsi, la faible implication des scientifiques pourrait expliquer, en partie, le manque de connaissances des gestionnaires sur les aléas littoraux. Mais, parfois, les maires considèrent aussi qu'ils connaissent mieux leur territoire que les chercheurs et ne voient pas l'intérêt d'interagir ou de faire appel à des scientifiques (Zaccai et al., 2012).

12.3.5- Une insuffisance de moyens humains et de compétences

Même si le besoin de ressources humaines n'a pas été fortement exprimé par rapport aux autres besoins dans l'enquête auprès des gestionnaires bretons (cf. sous-chapitre 12.2), la priorisation des cartographies précisant les zones à risque indique que, parmi les acteurs municipaux, peu d'entre eux ont les compétences pour évaluer le risque d'érosion sur leur territoire. Ce **manque de personnes qualifiées** expliquerait les difficultés rencontrées dans la **définition des stratégies de gestion** et dans **l'élaboration des documents réglementaires**. Perherin (2017) montre effectivement que le retard dans l'élaboration des PPRL est lié à un manque de personnel.

Le **besoin de formations professionnelles** exprimé dans l'enquête régionale rejoint le manque de compétences et de ressources humaines qualifiées. Beaucoup d'élus n'ont pas la formation scientifique nécessaire pour bien appréhender la complexité de la dynamique littorale et utiliser les résultats fournis par les experts (Navarre, 2014 ; Veyret, 2016). Il faut, en effet, disposer de connaissances en géomorphologie littorale pour identifier les zones d'aléa associées aux formations meubles ou de compétences en économie pour évaluer la valeur des enjeux menacés et effectuer des analyses coût-bénéfices. Néanmoins, dans les plus grandes communes qui disposent de techniciens ou d'ingénieurs traitant de la question des risques côtiers, ce besoin se fait moins ressentir.

Le **nombre limité de personnes** dans chaque institution, de plus en plus amoindri, dans un contexte de raréfaction de l'argent public, ne permet pas non plus aux différents services d'assurer pleinement leurs missions. Ainsi, la poursuite de la délivrance des permis de construire notamment pour enrocher des portions de côte serait due non seulement à la déresponsabilisation des maires dans la gestion des risques mais aussi à un contrôle insuffisant de l'artificialisation de la côte de la part des services de l'État qui ne disposent pas assez d'employés pour effectuer ces surveillances (CESER de l'Atlantique, 2015).

12.3.6- Une mise en place de mesures de gestion longue face à la multiplicité des procédures réglementaires

La France dispose de **nombreux outils législatifs et de règlements** en termes de gestion des risques (Bordereaux et Braud, 2009 ; Mineo-Kleiner, 2017) et les gestionnaires ont le devoir de les respecter. Face à la complexité et la multitude des lois et règlements, les gestionnaires souhaitent disposer de recueils des lois et de guides des procédures administratives afin d'être mieux orientés dans les démarches (cf. sous-chapitre 12.2). Les gestionnaires qui sont chargés de la maîtrise d'ouvrages reprochent parfois ces nombreuses procédures réglementaires (ex : évaluation environnementale, études géotechniques,

autorisation pour occupation du Domaine Public Maritime…) (Fig. 275). Les évaluations, notamment celles portant sur l'impact environnemental des ouvrages, sont souvent longues et lourdes à mener (DATAR, 2004). Depuis octobre 1977, tous les travaux de protection contre la mer sont effectivement soumis à une étude d'impact si leur emprise est supérieure à 2000 m^2 (MEDDTL, 2010). Cette étude doit analyser les effets directs et indirects du projet sur l'environnement et en particulier sur la faune, la flore et les paysages (article R. 122-1s du code de l'environnement). Parfois, la difficulté d'obtenir l'accord de l'ensemble des gestionnaires bloque les procédures. Ainsi, le dossier de réhabilitation de la falaise meuble de Pors-Even, à Ploubazlanec (Côtes-d'Armor) a mis six ans avant d'aboutir en raison de l'attente des autorisations *(Ouest-France, 16 juin 2014)*. De même, le projet de consolidation de la falaise du Moulin de la Rive, à Locquirec, lancé en début d'année 2017 est toujours en attente d'autorisation avant le lancement des travaux alors que ceux-ci devaient démarrer au début de l'année 2019 (Fig. 275).

Fig. 275 : Exemple de planning prévionnel pour le projet de confortement des falaises meubles au Moulin de la Rive à Locquirec (Le Barillec, 2017).

	2017			**2018**				**2019**		
	2e trim	**3e trim**	**4e trim**	**1er trim**	**2e trim**	**3e trim**	**4e trim**	**1er trim**	**2e trim**	**3e trim**
Demande de cas par cas à la DREAL (évaluation environnementale)										
Études d'hydraulique côtière										
Études de projet géotechnique										
Déclaration loi sur l'eau										
Autorisation pour occupation du Domaine Public Maritime										
Passation de marché de travaux										
Travaux										
Procédure de déclassement de route départementale et de classement en voie communale										

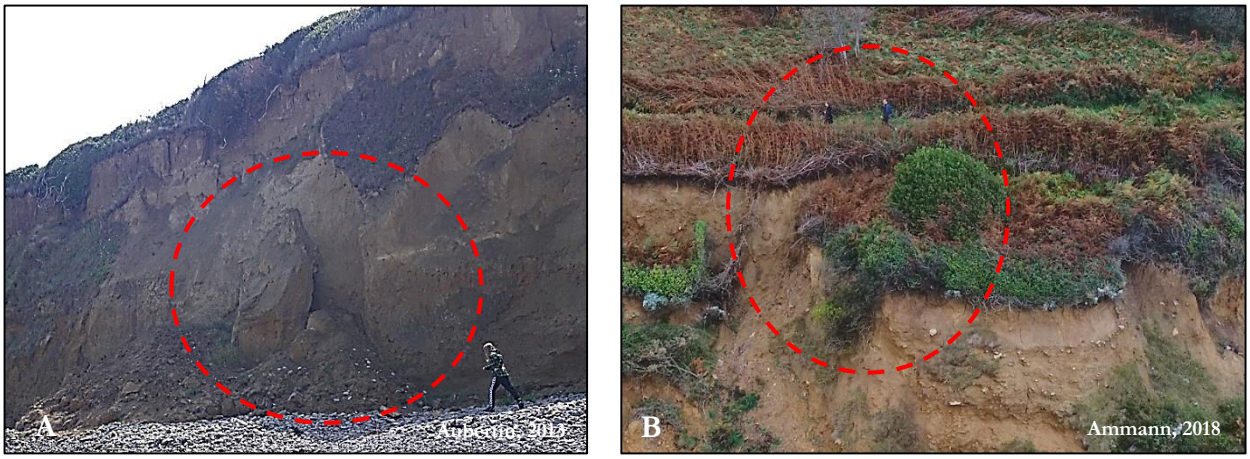
N.B : Sur ce site, compte-tenu des délais plus longs nécessaires à la délivrance des autorisations pour le lancement des travaux, le planning prévisionnel devrait être réajusté.

12.3.7- Une sensibilisation citoyenne et une culture du risque insuffisantes

L'enquête régionale (cf. sous-chapitre 12.2) a révélé une faible prise de conscience des gestionnaires bretons de l'importance de sensibiliser les citoyens et de développer une culture du risque.

La faible sensibilisation des citoyens est à l'origine d'une **méconnaissance du danger**. Ainsi, bien que des mesures d'interdiction de passage sur des sentiers côtiers devenus dangereux sont prises par les maires, les citoyens s'aventurent près de secteurs littoraux instables, au sommet des falaises meubles ou même au pied (Fig. 276) et sont parfois victimes de chute. C'est ce qui s'est produit en mai 2018, à Pénestin (Morbihan), où un enfant a été blessé par l'éboulement d'une falaise. Le maire était surpris par la survenue d'un tel événement à cette période de l'année : *« Nous ne sommes pas habitués à voir ce genre d'éboulement au mois de mai mais plutôt en plein milieu de l'hiver » (Ouest-France, 3 mai 2018)*. Ceci souligne l'importance de sensibiliser l'ensemble des citoyens au risque d'érosion, qu'ils soient résidents permanents ou saisonniers. De plus, le pied des falaises représente souvent, en été, un lieu privilégié par les personnes âgées ou les enfants pour s'abriter du soleil car il constitue parfois la seule zone d'ombre de la plage.

Fig. 276 : Mise en danger des citoyens à proximité de portions de falaises meubles instables à Pléneuf-Val-André.



A : Photographie de la falaise de la plage des Vallées montrant un enfant jouant à proximité d'une zone instable. B : Promeneurs empruntant un sentier côtier surmontant une portion de falaise meuble instable.

La population n'est pas non plus toujours consciente de **la fragilité des falaises meubles** et de la faible résistance des matériaux les constituant. Ainsi, au Relecq-Kerhuon (Finistère), en 2004, bien qu'un arrêté municipal ait été pris pour interdire aux véhicules lourds de transiter par une rue localisée en sommet d'une falaise fragilisée, l'arrêté municipal n'est pas respecté. De même, à Plozévet, le sentier côtier est régulièrement fragilisé par « *les quads et 4x4 qui ont tendance à prendre le sentier comme piste d'exercices* » *(Ouest-France, 17 mars 2007)*. Des associations locales œuvrent parfois pour mettre en place des campagnes de sensibilisation au respect de la nature et de l'environnement ainsi qu'à la sensibilité de ces falaises.

Le défaut de sensibilisation citoyenne concerne également l'**impact négatif des ouvrages** (Plante et al., 2011). En France, la loi de 1807 constitue le texte de référence en matière de défense contre la mer. Elle donne la possibilité aux riverains de se protéger et à l'État d'intervenir financièrement s'il estime « utile et juste », en cas d'intérêt public. Cette loi qui confère à chacun la responsabilité de sa propre protection pousse à la **multiplication d'ouvrages individuels** comme on a pu le constater sur les sites de Locquirec ou de Plougrescant (cf. chapitre 11). Du fait de la méconnaissance des effets néfastes des ouvrages en dur et de la « confiance surdimensionnée » dans ces ouvrages (Mineo-Kleiner, 2013), les riverains continuent à vouloir utiliser ces techniques pour protéger leurs résidences et/ou leur terrain. Ils font parfois même « **pression** » sur les élus locaux pour qu'ils se sentent obligés d'engager des travaux de protection. Bonnot-Courtois (2004) souligne l'importance d'informer les communes et les propriétaires sur l'**inefficacité** de certains ouvrages de défense contre la mer, installés au pied de ces falaises meubles. Les propriétaires ne sont pas conscients des préjudices que peuvent entrainer les ouvrages sur les terrains des propriétaires adjacents et ne comprennent pas le refus des services de l'État d'octroyer des permis d'enrocher : *« Nous n'avons visiblement plus le droit de lutter contre l'érosion naturelle » (Le Télégramme, 9 mars 2016).* Toutefois, certains propriétaires, conscients de l'impact des ouvrages en dur, souhaitent connaitre d'autres solutions mais, là encore, aucune communication n'est faite. Face au manque d'informations par les collectivités et les services de l'État sur les mesures d'adaptation, les propriétaires riverains se sentent *« complètement abandonnés » (Le Télégramme, 8 mai 2014 à Locquirec).*

Enfin, la faible sensibilisation des citoyens est aussi à l'origine d'une **méconnaissance de leurs responsabilités** (Meur-Ferec, 2006). Chaque citoyen est potentiellement concerné par le risque d'érosion qu'il soit propriétaire privé, futur acquéreur d'une maison située en bord de mer, locataire, touriste ou résident occasionnel. L'absence de sensibilisation conduit à une déresponsabilisation des citoyens et une incompréhension lorsqu'il leur revient d'assumer les coûts des travaux de réparation. Ce fut par exemple le cas dans de nombreuses communes bretonnes, suite aux demandes rejetées par arrêté ministériel, de l'état de catastrophe naturelle pour les tempêtes de février 2014. Pour les riverains à Cléder (Finistère), *« c'est la douche froide »* tandis qu'à Locquirec, les riverains, qui étaient déjà constitués en association,

choisissent d'attaquer cette décision en justice et de dénoncer *« l'inaction des services de l'État » (Ouest-France, 30 avril 2014)*. Bien que la loi du 16 septembre 1807 pose le principe de non obligation de l'État à réaliser ou à financer les travaux de défense contre la mer (Clus-Auby, 2003), nombreux sont ceux qui considèrent que c'est aux pouvoirs publics d'agir pour éviter ou limiter les éventuels dommages liés à l'érosion des falaises meubles.

12.3.8- Une faible consultation des citoyens

Les **enquêtes auprès de la population** figurent parmi les outils de gestion les moins priorisés par les gestionnaires bretons (cf. sous-chapitre 12.2). D'après le rapport du CESER (2015), les citoyens sont effectivement peu consultés dans la gestion des risques littoraux. Cette **faible implication des citoyens** s'explique par plusieurs raisons : les services de l'État souhaitent agir rapidement, les élus craignent d'inquiéter les habitants et les études scientifiques et techniques sur lesquelles sont basés les choix sont parfois complexes à exposer. La limitation du nombre d'acteurs impliqués dans la décision facilite l'atteinte d'un accord, d'où des comités de pilotage souvent restreints. Pour autant, l'implication de l'ensemble des acteurs garantit un meilleur degré d'acceptabilité et de mise en pratique des mesures car, bien qu'elle passe par une confrontation d'intérêts, souvent divergents, elle permet d'ouvrir les discussions dans la recherche d'un intérêt général (Denis et Henoque, 2001). La consultation des citoyens permet de connaitre leurs attentes et leurs besoins dans la prévention des risques et de rechercher un compromis. À l'inverse, la faible implication des citoyens est à l'origine d'une **faible acceptabilité** et d'un **non-respect des mesures de gestion** (Pigeon, 2007; Bernié-Boissard, 2012), comme l'interdiction d'accès au sentier côtier ou la modification de la servitude de passage sur le littoral. C'est par exemple le cas à Clohars-Carnoët (Finistère), où, malgré l'interdiction de passage des vélos et des chevaux sur le sentier côtier, susceptibles de fragiliser la falaise, l'interdiction n'est pas respectée et le maire a plusieurs fois été dans l'obligation de faire intervenir les gendarmes *(Le Télégramme, 16 février 2002)*. Toutefois, certaines collectivités ont conscience de la nécessité d'une concertation avec les citoyens en organisant des réunions pour expliquer les mesures de gestion adoptées. C'est le cas, déjà exposé plus haut, de la mairie de Lannion (Côtes-d'Armor), en 2014, qui souhaite fermer une partie du sentier côtier dont l'entretien est devenu trop onéreux : *« La mairie est entrée en contact avec les riverains et une majorité a compris la démarche de la commune » (Ouest-France, 23 juin 2014)*.

12.3.9- Une nécessaire sensibilisation des gestionnaires locaux

La sensibilisation aux risques littoraux doit également concerner les élus et les gestionnaires locaux (Bersani et al., 2010). Il existe ainsi un **certain déni** de la réalité des risques, parfois pour des **motifs touristiques, économiques et fonciers**. Titulaire de nombreuses responsabilités, le maire est tenu d'arbitrer entre l'ambition d'assurer le développement économique et urbanistique de la commune et la nécessaire prise en compte des risques (Meur-Ferec, 2006). Sur des territoires littoraux où les enjeux financiers sont importants, c'est bien souvent la dimension économique qui l'emporte au détriment de la sécurité. Mineo-Kleiner (2013) suggère un « **manque de volonté** » des élus quant à la définition de stratégies. Le risque d'érosion peut effectivement être mis au second plan au regard d'autres problématiques telles que l'emploi ou la sécurité routière. La lenteur relative du recul des falaises meubles et, éventuellement, le caractère dispersé dans le temps des processus d'érosion, jouent également en faveur des élus dont le temps de mandat (6 ans) peut être, dans certains cas, bien plus court que la probabilité d'occurrence de l'aléa. De plus, l'application des mesures de prévention est parfois perçue comme un obstacle au développement de la commune plutôt qu'un effet profitable (Arnaud, 2015). Ainsi, la volonté des maires d'assurer le développement urbain sur leur commune et, parfois, la pression exercée par les riverains qui désirent habiter en bord de mer, les conduit à la **délivrance de permis de construire**

dans des zones évaluées à risque. Le site de la Mine d'Or, à Pénestin (Morbihan), est un exemple démonstratif. En 1987, le maire donne l'autorisation de construction d'un lotissement sur ce site classé puis, en 2004, l'autorisation d'un parking et de nouvelles résidences. Fort heureusement, les projets sont stoppés à chaque fois, à la suite d'une plainte déposée par une association environnementale. Les contentieux liés au refus des permis de construire et à l'interdiction d'aménager les zones côtières sont fréquemment observés (Perherin, 2017) et sont souvent source de conflits entre, d'une part, les associations de propriétaires riverains et la commune et, d'autre part, les associations environnementales : *« une fois de plus, le littoral breton fait l'objet d'une guérilla entre défenseurs et aménageurs » (Le Monde, 25 juillet 1987).*

De plus, le déplacement et la redéfinition du tracé du sentier côtier, à la suite du recul fréquent des falaises meubles est source de difficultés pour les élus municipaux (Biville, 2004). Selon la loi du 31 décembre 1976, une servitude de passage réservée aux piétons doit être présente le long du littoral sur une bande de trois mètres (Becet, 2002). Cette loi s'applique à toutes les propriétés privées situées en bordure du littoral et construites après 1976. Pour autant, à de nombreux endroits, la **servitude de passage n'est pas respectée**, les propriétaires riverains faisant obstacle à cette loi. C'est le cas, par exemple, sur la commune de Fouesnant (Finistère) : *« cela fait 30 ans qu'on essaye de lancer une étude. Il y a d'importants propriétaires privés qui font obstacle » (Le Télégramme, 30 novembre 2007).* De même, à Saint-Briac-sur-Mer (Ille-et-Vilaine), de riches propriétaires refusent de céder leur accès à la mer et le sentier côtier est alors coupé par les terrains de plusieurs villas *(Ouest-France, 22 juillet 2019).* Les habitants de la commune dénoncent alors l'inaccessibilité du sentier côtier aux promeneurs malgré la loi de 1976. Ainsi, les études sur les servitudes de passage s'éternisent dans de nombreuses communes qui peinent à trouver des solutions. De plus, en l'absence de connaissances du taux de recul, la relocalisation du sentier côtier peut être largement contestée ou mal adaptée. Toutefois, il existe aussi des **accords amiables** avec des propriétaires qui choisissent de céder gratuitement une bande de terrain afin d'élargir le sentier côtier. Ce fut le cas, par exemple, à Combrit (Finistère) en 2017 et à Plonévez-Porzay (Finistère), en 2014 : *« cette négociation à l'amiable permet de rétablir la desserte et l'on ménage aussi la tranquillité des tiers » (Ouest-France, 17 mars 2014).*

Face à ces difficultés de gestion, des préconisations sont ensuite émises, tant sur l'aspect opérationnel que stratégique, afin d'améliorer la gestion des risques côtiers d'érosion des falaises meubles.

12.4- Discussion et préconisations

L'analyse de la gestion des risques d'érosion des falaises meubles à l'échelle régionale et locale a mis en évidence des mesures et des outils absents, faisant augmenter la vulnérabilité des territoires. Pour chacun de ces aspects, des préconisations de gestion sont émises et sont synthétisées dans le tableau ci-après (Tab. 41).

Tab. 41 : Préconisations pour la gestion du risque d'érosion des falaises meubles.

	Aspects de la gestion ou mesures insuffisantes	Préconisations	Échelles d'action
Démarches locales	- **Connaissances sur l'aléa d'érosion des falaises meubles** (rythmes et vitesses de recul, impacts du changement climatique…). - **Connaissances sur le risque et les enjeux menacés**. - **Connaissances sur l'état et l'efficacité des ouvrages** de défense contre la mer présents sur le territoire.	- **Archivage des phénomènes d'érosion** par un personnel désigné dans chaque commune. - Développement d'un **observatoire régional**. - **Identification des financements** permettant d'assurer la pérennité des observations sur plusieurs dizaines d'années. - Réalisation par des chercheurs ou par des chargés de mission de **cartographies**, à l'**échelle locale**, sur les **processus actifs**, l'**évolution** du trait de côte et sur les **enjeux exposés**.	Commune Intercommunalité Région
	- **Échanges entre gestionnaires et scientifiques**. - **Vulgarisation** des travaux de recherche.	- **Ateliers** et **conférences** organisés annuellement dans chaque département. - **Publications** et diffusion des résultats issus des travaux de recherche (ex : encarts dans les bulletins municipaux). - Mise en place d'une **plateforme web** donnant accès aux données actualisées sur les zones côtières.	Département Région
	- **Savoir-faire des gestionnaires sur le suivi** et sur **l'analyse de l'évolution** du trait de côte.	- **Formations** des élus locaux ou des personnes désignées dans les communes et les EPCI. - Réalisation par les chercheurs ou les services de l'État des **fiches protocoles de diagnostic du risque et de suivi du territoire**.	Commune Intercommunalité
	- **Concertation entre gestionnaires**. - **Mutualisation** des connaissances.	- **Ateliers** d'échanges annuels. - Mise en place de **PAPI**. - Saisie par les gestionnaires des **données relatives au risque d'érosion sur leur territoire**, **dans un serveur** accessible aux collectivités, aux services de l'État et aux groupes de recherche.	Commune Intercommunalité Département
	- **Stratégies locales**.	- Concertation de tous les acteurs concernés : **constitution d'un comité de pilotage** intégrant élus, services déconcentrés de l'État (DDTM, préfecture), associations et citoyens. - Concertation et **consultation des habitants par des enquêtes publiques** dans la prise de décision. - Définition de **stratégies locales sur le court, moyen et long termes** (incluant l'option de relocalisation).	Commune Intercommunalité Département
Gestion du trait de côte	- **Mise en application** de stratégies.	- **Regroupement à l'échelle intercommunale** (ex : EPCI) permettant de mutualiser les moyens et les compétences. - **Développement d'un observatoire inter-régional** permettant de rassembler les structures travaillant sur la thématique des risques littoraux. - Rédaction de **fiches opérationnelles** afin d'accompagner les gestionnaires dans la mise en œuvre de stratégies : - **guide de procédures administratives** (autorisations, étapes…) ; - **guide d'identification de solutions** (ouvrages à favoriser ou à éviter) tenant compte des contraintes juridiques, économiques et environnementales ; - **guide d'évaluation économique** de solutions (analyse multicritère, analyse coûts-bénéfices).	Commune Intercommunalité Département État

		- Définition des solutions d'aménagement à l'échelle de **l'unité hydro-sédimentaire** en prenant en compte les modalités de recul des falaises meubles. - Accompagnement (financier et technique) des collectivités par les services de l'État dans la mise en place des stratégies et des aménagements.	
	- **Mesures de mitigation** de l'érosion.	- Système **d'assainissement collectif** pour les secteurs étant dépourvus. - Mise en place de m**éthodes « douces »**, plus soucieuses de l'environnement (ex : géotextiles, drainage des formations meubles, restauration des végétations des hauts de falaise, talutage du front de falaise, réensablement des plages…).	Commune Intercommunalité
Actions d'information et de sensibilisation	- **Sensibilisation citoyenne**. - **Culture et mémoire du risque**.	- **Réunions d'informations publiques** organisées annuellement par le maire, sur les risques présents sur la commune, sur les effets néfastes des protections en dur et sur les responsabilités de chacun. - Réalisation des **documents dédiés à l'information** sur les risques (DICRIM, PCS) devant être pédagogiques et interactifs, dans la mesure du possible. Mise à disposition de ces documents d'informations en mairie et sur internet. - **Panneaux** installés à l'entrée des plages, avertissant du danger et incluant une carte des zones à risque. - Événements annuels de sensibilisation (**expositions**) adressés à la population permanente et saisonnière.	Commune Intercommunalité
	- **Éducation** sur les risques.	- Intégration de la thématique des risques côtiers dans les **programmes scolaires**. - **Sorties pédagogiques**.	Commune Intercommunalité
Prévention	- Prise en compte du **risque dans l'aménagement**.	- Réalisation de **PPRL**. - Renforcement du **contrôle de légalité** (permis de construire) par les services de l'État. - Développement d'une politique qui favorise une **dévalorisation des résidences dans les zones à risque** (ex : attribution d'une taxe foncière plus élevée) et qui encourage de nouveaux aménagements en dehors des zones d'aléa.	Commune Intercommunalité Département
Gestion de crise	- **Organisation de l'alerte**.	- Réalisation des **documents et des procédures de gestion de crise (PCS)**. Diffusion de ces documents et information de ces procédures à la population (réunions, affichages).	Commune Département

Cette synthèse permet de se rendre compte des moyens mobilisables pour améliorer la gestion actuelle. De plus, ces préconisations peuvent être illustrées d'exemples de bonnes pratiques et d'enseignements tirés d'expériences passées sur la côte bretonne ou sur la côte métropolitaine. Ainsi, concernant le manque de connaissances sur l'aléa érosion, la création d'un **observatoire régional**, à l'instar du Réseau d'Observation du Littoral de Normandie et des Hauts-de-France (ROLNP), permettrait de mutualiser l'observation et l'expertise (DATAR, 2004).

La concertation des acteurs peut se faire par le biais d'**ateliers** et d'**animations locales**, à l'exemple des ateliers organisés par le projet de la DREAL Bretagne (IDEA Recherche, 2017a) qui ont permis aux participants d'amorcer les réflexions sur la définition de stratégies locales (cf. chapitre 11). Le projet OSIRISC est un autre exemple de dispositif qui a permis de lancer une réflexion concertée autour de la vulnérabilité de territoires littoraux bretons et d'instaurer une synergie entre les différents acteurs (http://www.risques-cotiers.fr/fr/projets/osirisc ; Quillet, 2017). Des **expositions** peuvent également

être organisées par les communes en collaboration avec des associations ou des équipes de recherche afin de sensibiliser les citoyens. C'est le cas, par exemple, de l'exposition réalisée par le Conservatoire du Littoral en collaboration avec l'association *Men-ha-houarn,* à Perros-Guirec (Côtes-d'Armor) en 2013, ou bien l'exposition réalisée par la commune de Plozévet durant l'été 2018. Le festival « *Si la mer monte* » organisé, chaque année, par la commune de l'Ile-Tudy (sud du Finistère) est un autre bon exemple d'événement de sensibilisation aux risques littoraux. Des **sorties pédagogiques**, à l'instar de celles organisées sur le thème des risques d'inondations pourront également être proposées dans les communes littorales bretonnes afin d'éduquer les plus jeunes aux risques côtiers.

Cette synthèse met également en évidence le besoin de développer des outils adaptés à la gestion du risque d'érosion des falaises meubles pour aider les gestionnaires dans les décisions.

Concernant les outils de méthodologie, les **fiches diagnostics du risque** doivent permettre d'évaluer l'état actuel du risque. Elles doivent donc tenir compte de la sévérité de l'aléa (taux de recul moyen) et de l'exposition des enjeux déterminée à partir de l'étendue des formations meubles en arrière du trait de côte (cf. chapitre 8). Une **méthode de cartographie et de zonage simple** du risque d'érosion des falaises meubles doit être recherchée afin d'être réutilisable par les gestionnaires non-spécialistes de la géomorphologie littorale.

Les **guides d'évaluation économique** doivent proposer des méthodes permettant d'estimer les coûts associés aux stratégies de gestion en se basant sur des travaux existants tels ceux présentés dans le guide sur le coût des protections contre les aléas littoraux (Igigabel, 2018). Ces guides permettront de comparer les différentes solutions, de les confronter avec la valeur des enjeux menacés et d'identifier les stratégies les plus appropriées. Les guides devront également indiquer les avantages et les inconvénients de chaque dispositif de protection (Annexe 26). Ces réflexions doivent être accompagnées d'une **analyse coûts-bénéfices (ACB)** car la valeur des enjeux menacés ne justifie pas toujours la mise en place d'ouvrage de défense (Secrétariat général de la mer, 2007). Il est parfois plus judicieux de déplacer les enjeux lorsque cela est possible. De plus, l'érosion naturelle des falaises peut avoir des effets positifs sur l'équilibre morpho-sédimentaire en constituant une source de sédiments pour les plages qui ont tendance à s'appauvrir du fait du contexte de pénurie sédimentaire (Ruz, 1987).

Les préconisations les plus récentes suggèrent le recours à la méthodologie de l'**analyse multicritères (AMC)** qui est une analyse plus complète, englobant l'analyse économique de type ACB et une analyse qualitative non-monétaire, par le biais d'indicateurs, qui permet de prendre en compte les bénéfices non facilement monétisables (ex : impacts sur l'environnement, enjeux patrimoniaux…)(CGDD et al., 2012). Ces analyses faciliteront le choix du scénario par les acteurs qui se fera selon le meilleur compromis réalisation/coût. L'identification de solutions devra être précédée d'une phase d'observation et de suivi suffisamment longue pour réaliser le diagnostic du secteur littoral (Veyret, 2016).

Enfin, le financement de **postes de chargés de mission** dans les collectivités permettra d'élaborer une **stratégie de gestion** adaptée aux enjeux locaux. Avec la mise en œuvre de la compétence GEMAPI, le nombre de ces chargés de mission a d'ailleurs déjà augmenté au cours des dernières années. Pour les communes ne pouvant recruter une personne chargée d'élaborer une stratégie locale, des **formations** pourront être proposées pour que les élus intègrent les outils et méthodes nécessaires.

Conclusion intermédiaire

La gestion du risque d'érosion des falaises meubles, en Bretagne, implique de nombreux acteurs intervenant à différents niveaux territoriaux (commune, communauté de communes, département, région…) et se référant à des domaines variés (prévention, aménagement, sécurité civile…) (Gérin, 2011). Cela se traduit par des besoins différents selon les échelles, les institutions et les acteurs. Une enquête auprès des gestionnaires a été réalisée afin de cerner et de prioriser les besoins en termes de connaissances et d'outils de méthodologie pour la gestion du risque d'érosion des falaises meubles en Bretagne.

Globalement, les besoins les plus fortement priorisés par l'ensemble des institutions sont les connaissances et les suivis de terrain, donc principalement la caractérisation de l'aléa, ainsi que la définition et la mise en application de stratégies. En termes d'outils de connaissance, ce sont les cartographies des enjeux et des processus côtiers qui sont les plus plébiscités par les gestionnaires. Enfin, en termes d'outils de méthodologie, ce sont les guides d'identification de solution, les guides des procédures administratives et les fiches de diagnostic du risque qui sont les outils les plus fortement demandés. Bien que ces outils soient priorisés par l'ensemble des acteurs, l'enquête révèle aussi des besoins spécifiques à chacune des institutions. Il est donc nécessaire de développer des outils de gestion adaptés à l'échelle territoriale d'action des gestionnaires, à leur connaissance sur la thématique ainsi qu'à leurs capacités techniques afin de faciliter leur appropriation.

L'enquête révèle aussi une faible importance accordée à la sensibilisation citoyenne par l'ensemble des acteurs alors que la culture du risque est insuffisamment développée au sein des communes littorales bretonnes. Ce constat renforce la nécessité de la prise en compte des représentations sociales (ici, celles des gestionnaires praticiens et élus) dans la connaissance et la gestion du risque.

Les observations réalisées à partir de témoignages, d'articles de presse et des résultats de l'enquête permettent d'expliquer les difficultés de la gestion du risque observées à l'échelle régionale et locale. L'absence de stratégies locales semblerait provenir d'un manque de données et de savoir-faire des gestionnaires quant à l'évaluation du risque d'érosion des falaises meubles ainsi qu'une concertation insuffisante entre tous les acteurs, entrainant alors des désaccords sur les restrictions de développement urbain et économique. Les difficultés de mise en application des stratégies pourraient s'expliquer, quant à elles, par la complexité du cadre réglementaire applicable aux risques littoraux, le manque de financement et de ressources humaines qualifiées. D'après Costa (1998), elles s'expliqueraient aussi par l'inadéquation temporelle entre, d'un côté, la faible occurrence de l'aléa, la durée des études, de l'observation et la planification des travaux d'aménagements et, de l'autre, l'exigence d'une réduction immédiate des risques de la part des populations menacées mais aussi des élus en raison de la durée de leur mandat.

Face à ces difficultés de gestion, il est nécessaire de mettre en place des mesures, tant sur l'aspect opérationnel que stratégique, afin d'améliorer la gestion des risques d'érosion des falaises meubles.

Conclusion de la Quatrième Partie

Cette quatrième partie avait pour objectif d'analyser l'état actuel de la gestion du risque d'érosion des falaises meubles en Bretagne et d'identifier les outils et mesures manquants qui font augmenter la vulnérabilité sur ces territoires littoraux.

L'analyse a été menée, tout d'abord, à l'échelle locale des sites d'étude en utilisant des indicateurs de vulnérabilité développés dans le cadre du projet OSIRISC. L'identification des besoins des gestionnaires bretons en termes d'outils de connaissance et de méthodologie a ensuite été réalisée à l'échelle régionale, par le biais d'une enquête auprès d'acteurs institutionnels. Ce travail d'analyse sur la gestion du risque d'érosion effectué aux échelles locale et régionale permet de souligner :

- une quasi-absence de stratégies locales, surtout à l'échelle du long terme. L'absence d'anticipation au sein des communes est souvent à l'origine d'une gestion se faisant dans l'urgence et de la mise en place d'ouvrages non-adaptés ;

- un manque de documents réglementaires (DICRIM, PCS…) et une concertation insuffisante entre les différents acteurs ;

- une faible importance accordée à l'information et à la sensibilisation citoyennes par les gestionnaires alors que la mémoire et la culture du risque d'érosion côtière sont insuffisamment développées au sein des communes.

Ce manque d'outils et de mesures de gestion constituent autant d'éléments faisant augmenter la vulnérabilité sur les territoires littoraux bretons. La compréhension et l'évaluation de la vulnérabilité nécessitent d'analyser la gestion conjointement à l'aléa et aux enjeux. L'identification du ou des éléments la faisant augmenter permet de définir les actions à entreprendre afin d'atténuer les impacts liés au recul des falaises meubles.

Pour mettre en place ces actions, les gestionnaires ont besoin d'outils de connaissance et de méthodologie. L'enquête révèle que l'ensemble des gestionnaires accorde une forte importance à la connaissance et aux suivis de terrain ainsi qu'aux méthodes leur permettant de définir et d'appliquer des stratégies de gestion locales. Une majorité de gestionnaires exprime aussi un manque de moyens techniques et financiers. L'insuffisance de moyens et d'outils adaptés aux missions des différents acteurs explique en partie les difficultés de la gestion du risque observées à l'échelle régionale et locale.

Ces observations sur l'état actuel de la gestion du risque d'érosion montrent la nécessité de développer des outils répondant aux besoins des gestionnaires bretons et à leur échelle territoriale d'action.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Rappel du contexte de recherche

Depuis la dramatique tempête de Xynthia et les nombreux dommages causés sur le littoral par la succession de tempêtes de l'hiver 2013-2014, les démarches pour une meilleure connaissance de l'évolution du littoral se sont multipliées en France (Letortu, 2013 ; Blaise, 2017). Bien que les falaises meubles soient très répandues dans les hautes et moyennes latitudes ayant connu notamment l'alternance de climats froids et tempérés de la période Quaternaire (Davidson-Arnott, 2010), leur évolution a, jusqu'alors, fait l'objet d'une plus faible production scientifique en comparaison des côtes d'accumulation (Fournier et Regnauld, 1991). Malgré un regain d'intérêt pour ce type de côte depuis une dizaine d'années (Sunamura, 2015), les falaises meubles souffrent d'un déficit de connaissances à la fois sur l'aléa d'érosion et sur le risque ainsi que la vulnérabilité côtière associée.

Par l'intermédiaire d'une approche systémique et d'une analyse par emboitement d'échelles temporelles et spatiales, cette thèse cherche à quantifier la dynamique des falaises meubles, à identifier les forçages responsables ainsi qu'à évaluer le risque associé et l'état actuel de la gestion.

L'étude du risque et de la vulnérabilité des littoraux à falaises meubles nécessite la quantification du recul des falaises (composante Aléa), l'identification des éléments exposés (composante Enjeux) et l'analyse des mesures mises en place pour faire face au risque (composante Gestion).

Dans cette perspective, notre travail s'est focalisé sur le littoral breton. Ce dernier revêt un intérêt tout particulier pour l'analyse du risque d'érosion des falaises meubles car : (1) le linéaire de falaises meubles est étendu sur l'ensemble de la côte bretonne ; (2) les vitesses de recul sont relativement élevées en comparaison des falaises rocheuses régionales ; (3) la situation péninsulaire de la Bretagne lui confère une forte exposition aux agents marins et subaériens ; (4) la concentration de la population et des activités le long de la bande côtière font du littoral breton, un territoire à enjeux et à risques importants. De ce constat, il en ressort le besoin de recherche fondamentale et appliquée pour définir l'aléa « recul des falaises meubles » et son zonage.

Ce travail de thèse permet de participer :

- à la **quantification du recul** des falaises meubles et à la mise en évidence de leur inégale répartition spatiale et temporelle ;

- à l'**identification des principaux forçages impliqués**, d'origine naturelle et anthropique ;

- à l'**identification des enjeux menacés** et à l'évaluation du **risque** induit ;

- à la **caractérisation de l'état actuel de la gestion** ainsi qu'à l'identification des mesures et des outils absents et faisant augmenter la vulnérabilité.

Rythmes et modalités du recul des falaises meubles

- **Analyse des épisodes de recul à l'échelle régionale et séculaire (20^{e} et 21^{e} siècles) : répartition spatiale et temporelle des mouvements de terrain et conditions météo-marines morphogènes**

À partir d'une chronique d'aléas d'érosion de falaises meubles remontant jusqu'au début du 20^{e} siècle, la répartition spatiale et temporelle des phénomènes d'érosion a pu être étudiée à l'échelle régionale.

Les **côtes nord et ouest** de la Bretagne sont les plus impactées par les phénomènes d'érosion de falaises meubles. Ceci s'explique par le contexte géomorphologique régionale : ces secteurs correspondent aux principales localisations des formations meubles quaternaires qui possèdent une résistance à l'érosion plus faible en comparaison des falaises meubles formées d'altérites. De plus, les façades nord et ouest de la Bretagne sont les plus exposées aux flux atmosphériques perturbés (Stéphan, 2008). Ceci montre donc l'importance des configurations géographiques dans l'érosion des falaises meubles.

Les mouvements de terrain affectant les falaises meubles se produisent toute l'année mais **l'hiver** est la saison la plus favorable (avec 85 % des phénomènes d'érosion produits entre janvier et mars). L'été n'est pas une saison propice au recul des falaises mais des mouvements de terrain peuvent se produire, notamment lors de précipitations intenses liées à un orage estival. L'érosion des falaises meubles est favorisée lorsque des **facteurs météo-marins de forte intensité se combinent.** La grande majorité des aléas semble effectivement imputable à la conjonction d'une période pluvieuse, d'une grande marée et/ou d'une tempête (au moins 68 % des mouvements de terrain analysés). Cependant, tous les phénomènes d'érosion de falaises meubles ne sont pas attribués à des tempêtes hivernales exceptionnelles et peuvent être provoqués lors d'un seul événement pluvieux. Les précipitations conditionnent, à elles seules, 24 % des phénomènes d'érosion et peuvent suffire au déclenchement de l'aléa sans intervention des processus marins.

De plus, l'analyse des phénomènes d'érosion à l'échelle régionale montre que les falaises meubles **sans soubassement rocheux sont plus sensibles aux processus marins** et à l'action érosive des houles. À l'inverse, les falaises composites semblent être plus sensibles aux événements impliquant de fortes précipitations. La présence d'une plateforme d'érosion marine dégagée en pied de falaise atténuerait l'effet des actions marines et renforcerait ainsi la contribution relative des précipitations.

- **Quantification du recul à l'échelle des sites et à moyen terme (période historique récente 1950-2015) : évolution du recul et forçages naturels et anthropiques impliqués**

À partir de la **comparaison diachronique de photographies aériennes verticales** (années 1950-2015), le recul pluri-décennal a été quantifié sur les sites d'étude.

Les résultats mettent en évidence des évolutions de tendance au cours des soixante dernières années. De plus, les sites d'étude présentent des dynamiques régressives différenciées, en lien avec les caractéristiques géomorphologiques :

1) Les sites de Trédrez-Locquémeau, de Locquirec, de Telgruc-sur-Mer et de Plozévet se caractérisent par des **taux de recul à moyen terme faibles** (0,07 à 0,09 m/an). Ces falaises sont taillées dans des altérites micaschisteuses (cas de Plozévet, typologie RAV) ou des formations quaternaires relativement grossières (cas des autres sites, de typologie V2 ou s'en rapprochant pour les falaises de Telgruc-sur-Mer) ;

2) Les sites de Pléneuf-Val-André et de Plougrescant présentent des **vitesses de recul à moyen terme plus importantes** (0,16 à 0,41 m/an). Ces falaises sont taillées dans des formations quaternaires fines (typologie V1).

L'**érosion privilégie les falaises de type V2 et RAV** car elles sont formées de sédiments grossiers qui peuvent s'accumuler à la base et former une protection, du moins temporaire, au pied des falaises. À l'inverse, les sédiments fins constituant les falaises de type V1 auront tendance à être rapidement déblayés et dispersés par les agents marins et subaériens.

À l'échelle pluriannuelle, le recul des falaises meubles s'accélère avec l'augmentation de la fréquence des tempêtes, des précipitations et des années riches en forts coefficients de marée. À l'inverse, le recul ralentit généralement lorsque les conditions météo-marines sont peu favorables à l'érosion du littoral. Ceci rejoint les conclusions de l'analyse historique régionale. Toutefois, cette évolution naturelle des falaises meubles est parfois **perturbée par l'intervention de facteurs anthropiques** due, par exemple, à des rejets d'eaux usées, l'imperméabilisation du sommet de falaise ou encore l'artificialisation du trait de côte. Ces aménagements créent un déséquilibre dans le système côtier et renforcent l'action érosive des forçages naturels. Leur impact se fait alors sentir à l'échelle de plusieurs années.

- **Quantification du recul à l'échelle des sites et à haute résolution : modalités de recul et facteurs de prédisposition**

Le suivi des fronts de falaises à haute résolution sur les sites d'étude (30 missions de terrain entre mars 2017 et avril 2019) et les traitements photogrammétriques ont permis de suivre la répartition spatiale et temporelle de l'érosion le long des abrupts, de quantifier les volumes de débris, les taux d'ablation et d'identifier les modalités de recul.

Le comportement des falaises et les principaux forçages impliqués diffèrent entre les sites : pour les falaises de Nantois (Pléneuf-Val-André), de Plougrescant et le secteur nord du site de Plozévet, ce sont les **actions marines qui prédominent**. La mer ne constitue donc pas qu'un simple agent de transport en évacuant les débris en pied de falaise. Il s'agit également d'un agent d'érosion non négligeable. L'évolution des falaises de Telgruc-sur-Mer et du secteur sud de Plozévet est contrôlée davantage par des **processus subaériens.** Ceci prouve que la mer n'est pas la seule responsable du recul des falaises meubles. Enfin, pour les falaises de la plage des Vallées (Pléneuf-Val-André), de Trédrez-Locquémeau et de Locquirec, le recul se fait sous l'**effet conjugué de processus marins et subaériens.** Ces modalités de recul semblent être conditionnées par **la morphologie** du système côtier. Ainsi l'**altitude du pied de falaise** par rapport au niveau marin et la **présence d'une berme** conditionnent la fréquence et la force auxquelles la falaise est soumise aux vagues.

S'agissant des **taux d'ablation**, les falaises des Vallées à Pléneuf-Val-André et de Pors-Hir à Plougrescant **reculent plus vite** que les autres sites. Les taux d'ablation sont 4 à 8 fois plus fort (0,16-0,35 m/an contre 0,02-0,04 m/an sur les deux années de suivi). Ceci rejoint les observations réalisées par l'analyse du recul à l'échelle du moyen terme et montre à nouveau que la **typologie des falaises et donc leur morpho-structure conditionnent** fortement les vitesses de retrait car les falaises de type V1 sont généralement caractérisées par une plus forte cinématique régressive. Les sédiments fins dont elles sont constituées leur confèrent une plus faible résistance à l'érosion marine. Le taux de recul plus faible des falaises de Telgruc-sur-Mer, appartenant au type V1, s'explique par une granulométrie plus grossière des formations ainsi que par une faible exposition aux actions marines.

Au-delà de la typologie des falaises meubles, il existe plusieurs autres facteurs aggravants telles les **conditions morphologiques des plages**. L'abaissement du profil de plage peut effectivement favoriser l'érosion du pied de falaise car l'énergie des houles arrivant à la côte est moins atténuée. Ainsi, il apparait nécessaire de prendre en considération les effets cumulés des tempêtes et des conditions météo-marines agitées qui vont contribuer au démaigrissement progressif de la plage et favoriser l'attaque du pied de falaise par la mer.

L'approche géomorphologique et semi-quantitative adoptée dans la thèse confirme l'évolution non-linéaire des falaises meubles, les combinaisons et les relais des processus, dans le temps et dans l'espace, autant de facteurs que la modélisation ne peut encore pas totalement intégrer.

Niveaux de risque et enjeux menacés par l'érosion des falaises meubles

Par le biais d'une cartographie géomorphologique des formations meubles, l'étendue des zones à risque et les **principaux enjeux menacés** ont été identifiés sur les sites d'étude.

La nature des principaux enjeux diffère selon les sites : tandis que le site de Pléneuf-Val-André présente des enjeux économiques (présence d'un golf) mais peu d'enjeux humains et structurels, les sites de Locquirec et de Trédrez-Locquémeau possèdent de forts enjeux humains en raison de l'importante urbanisation des sommets de falaise. Le site de Plozévet est marqué par d'importants enjeux économiques dus à la présence de grandes surfaces agricoles. Enfin, les sites de Telgruc-sur-Mer et de Plougrescant sont caractérisés par des enjeux structurels forts en raison de leur situation « rurale » qui implique une plus grande distance aux centres de secours les plus proches. Bien que les terrains résidentiels et les routes représentent les enjeux les plus fréquemment protégés sur les sites d'étude, il ne semble pas exister de lien direct entre la nature ou la proportion des différents enjeux et les principales stratégies de gestion adoptées (« laisser-faire » ou protection).

L'utilisation d'indicateurs d'aléa et d'enjeux a également permis d'analyser la **variabilité spatiale des niveaux de risque** sur les sites d'étude.

Il en ressort **qu'aucun secteur n'est à l'abri** du risque d'érosion et que les sites d'étude se répartissent principalement selon trois **niveaux de risque** : un niveau de risque faible pour les sites de Trédrez-Locquémeau, de Telgruc-sur-Mer et de Plozévet, un niveau de risque moyen pour les sites de Pléneuf-Val-André et de Locquirec et un niveau de risque fort pour le site de Plougrescant.

Sur le site de Plougrescant, le niveau élevé du risque s'explique par la sévérité de l'aléa d'érosion qui s'exprime par un recul chronique depuis plusieurs dizaines d'années. Sur le site de Pléneuf-Val-André, le niveau de risque moyen est lié à un aléa érosion relativement fort mais aussi à la présence du golf et du sentier côtier dans la partie Est du site. En revanche, pour le site de Locquirec, le niveau moyen du risque est lié à la forte urbanisation du sommet de falaise. Sur les sites de Trédrez-Locquémeau, de Telgruc-sur-Mer et de Plozévet, le risque est globalement faible en raison notamment de faibles taux de recul. Toutefois, même pour ces sites à faible recul des zones à risque modéré peuvent exister, là où se concentrent des habitations.

Ce travail de thèse sur l'analyse du risque d'érosion des falaises meubles et des enjeux menacés permet ainsi de connaitre la (ou les) composante(s) (aléa et/ou enjeux) faisant augmenter le niveau de risque et donc de savoir sur quel élément agir afin de le réduire. De plus, la connaissance de la variabilité spatiale du risque sur les sites permet de prioriser les actions et de réfléchir à des mesures de prévention et de protection adaptées.

En comparaison de la méthode habituellement préconisée dans les PPRL pour cartographier le risque d'érosion côtière (MEDDE, 2014), la méthode proposée qui est basée sur le croisement de la localisation des formations meubles avec les enjeux exposés, apparait plus adaptée à la cinématique de recul des falaises meubles. Elle permet de s'affranchir des incertitudes sur les vitesses de recul et de délimiter l'ensemble des zones qui sont assujetties au risque d'érosion côtière et où il semblerait prudent d'interdire toute nouvelle construction. Ainsi, la méthode proposée dans cette thèse souligne l'intérêt de la démarche géomorphologique pour identifier l'étendue des « zones à risque ». De plus, elle s'inscrit dans une approche de gestion intégrée des zones côtières sur le long terme.

Gestion et vulnérabilité des territoires bretons

L'utilisation d'indicateurs, développés dans le cadre du projet OSIRISC, a également permis d'analyser l'état actuel de la gestion du risque d'érosion des falaises meubles ainsi que d'avoir un aperçu des niveaux de vulnérabilité sur les sites d'étude. Ainsi, les **mesures et outils de gestion absents** ont été identifiés.

Sur les sites d'étude, il a été constaté un manque de documents réglementaires (PPRL, DICRIM, PCS…) et une quasi-inexistence de stratégies locales, notamment sur le long terme. Du fait de l'absence de stratégie et d'anticipation au sein des communes, la gestion se fait souvent dans l'urgence. Elle est à l'origine de la mise en place d'ouvrages côtiers parfois inadaptés, aggravant l'érosion des secteurs adjacents et impliquant des mesures de gestion coûteuses. L'analyse de la gestion à partir d'indicateurs montre également une concertation insuffisante entre les différents acteurs. Les scientifiques sont effectivement rarement impliqués dans la gestion des risques et les citoyens sont peu sollicités dans la prise de décision. Il en résulte une faible acceptabilité sociale des mesures de prévention. Enfin, la mémoire et la culture du risque sont insuffisantes en raison de l'absence d'actions de sensibilisation citoyenne.

L'état de la gestion sur les sites d'étude met donc en évidence de nombreux outils et mesures absentes. Toutefois, cette apparente **vulnérabilité est à nuancer** au regard de l'aléa et des enjeux. Sur les sites de Trédrez-Locquémeau et de Telgruc-sur-Mer, bien que les mesures de gestion soient peu développées, la vulnérabilité est faible au regard du recul relativement modéré des falaises. Néanmoins, il ne faut pas oublier que ces falaises peuvent être affectées par des reculs soudains, plurimétriques. Sur les sites de Pléneuf-Val-André et de Plozévet, la vulnérabilité est également faible grâce à une politique de gestion développée. Toutefois, la situation de Locquirec est plus préoccupante car, à l'importance de l'aléa et des enjeux exposés sont associées des mesures de gestion trop ponctuelles et une assez faible communication entre les élus et les riverains. Enfin, sur le site de Plougrescant, bien que les mesures de gestion soient plus développées, la vulnérabilité est également forte au regard de la sévérité de l'aléa.

Par l'intermédiaire d'une **enquête** réalisée auprès des différentes institutions concernées par la gestion du risque d'érosion en Bretagne, les besoins en termes de connaissances et d'outils de gestion ont été identifiés.

Globalement les **besoins les plus fortement priorisés** par l'ensemble des institutions sont les connaissances et les suivis de terrain ainsi que la définition et la mise en application de stratégies. Face à ces besoins, les gestionnaires souhaitent disposer de cartographies d'aléa et d'enjeux leur permettant de faire des choix éclairés pour la gestion de leur territoire. Afin de faciliter la mise en place de stratégie, les gestionnaires privilégient les guides d'identification de solution et les guides des procédures administratives. Bien que ces outils soient priorisés par l'ensemble des acteurs, l'enquête révèle aussi des besoins spécifiques à chacune des institutions. Il est donc nécessaire de développer des outils de gestion adaptés à l'échelle d'action des gestionnaires, à leur connaissance sur la thématique ainsi qu'à leurs capacités techniques afin de faciliter leur appropriation. Enfin, l'enquête révèle une faible importance accordée à la sensibilisation citoyenne par l'ensemble des acteurs alors que la culture du risque est très peu développée au sein de la population permanente et saisonnière.

Ce travail sur l'identification des besoins permet aussi de comprendre **l'origine des difficultés posées par la gestion du risque** d'érosion des falaises meubles. L'absence de définition de stratégies locales semblerait provenir d'une concertation insuffisante entre tous les acteurs impliqués et de la difficulté d'évaluation du risque d'érosion des falaises meubles liée à un manque de savoir-faire et de données. Les difficultés de mise en application des stratégies pourraient s'expliquer, quant à elles, par la complexité du cadre réglementaire applicable aux risques littoraux, le manque de financement et de ressources humaines qualifiées ainsi que par la multiplicité des outils de gestion qui ne sont pas adaptés aux besoins spécifiques des acteurs.

Face à ces difficultés de gestion, des mesures doivent être engagées, tant sur l'aspect opérationnel que stratégique, afin d'améliorer la gestion des risques côtiers d'érosion des falaises meubles. Le renforcement du rôle des intercommunalités (EPCI) en matière de gestion des risques littoraux et qui s'opère depuis quelques années est un bon exemple de mesure permettant de mutualiser les compétences et de faire face au manque de moyens humains, financiers et techniques dans le contexte territorial et politique actuel.

Perspectives

- **Rythmes de recul des falaises et facteurs responsables**

Le **recensement des mouvements de terrain** affectant les falaises meubles **doit être poursuivi** et venir compléter la base de données créée par l'analyse historique. Cela permettra d'obtenir une plus grande représentativité des aléas et d'avoir une meilleure estimation de la fréquence de leur survenue. La poursuite du recensement permettra aussi d'améliorer la caractérisation des facteurs et des processus responsables du déclenchement des mouvements de terrain. Il sera nécessaire de prendre en compte les **mouvements gravitaires de toutes dimensions**, même ceux produits par éboulisation, afin d'avoir une meilleure représentativité des phénomènes d'érosion. L'imagerie satellitaire, devenant de plus en plus performante représente une technique prometteuse pour repérer ces mouvements de terrain, les dater et avoir un ordre d'idée de leur volume. Ainsi des images de type « Pléiades » pourront être utilisées (Bosc et al., 2014 ; Poncet, 2016).

Par ailleurs, les premiers résultats sur les volumes produits et les taux d'ablation sur les sites d'étude, mesurés par photogrammétrie, ouvrent de nouvelles pistes de recherche. Il s'agirait de **prolonger les levés** pour augmenter leur représentativité temporelle et diminuer, dans la mesure du possible, l'intervalle de temps entre chaque mission. Cette réduction est nécessaire pour mieux déterminer et discriminer les facteurs et processus responsables du recul des falaises. Toutefois, la pérennisation du suivi et l'augmentation de la fréquence des missions dépendront de la disponibilité de personnels dédiés au suivi saisonnier des falaises meubles et des moyens financiers attribués.

Dans le cadre du suivi topographique des sites et des conditions météo-marines, il apparait nécessaire de vérifier la cohérence des seuils de coefficient de marée, de vitesse de vent et de cumul de précipitations capables de déclencher des mouvements de terrain sur les falaises meubles. Parallèlement, le suivi doit continuer d'intégrer l'**évolution des profils de plage** car l'altitude de la plage peut expliquer la forte disparité des réponses aux forçages météo-marins entre les sites côtiers.

S'agissant des facteurs responsables du recul des falaises meubles, des inconnues demeurent quant au degré d'implication des **variations des niveaux de nappe**. Il serait alors intéressant de mettre en place des **piézomètres** sur les sites d'étude afin de suivre le comportement du toit de la nappe qui, pour de nombreux auteurs, participe activement au déclenchement des mouvements de terrain (Higgins et Coates, 1990 ; Hobbs et al., 2002 ; Collins et Sitar, 2008). De même, pour les processus marins, il serait intéressant de quantifier la **part du « wave setup »** sur les plages ainsi que l'évolution du budget sédimentaire sur chacun des sites. Ces deux facteurs conditionnent fortement la capacité des vagues à atteindre et éroder la falaise (Everts, 1991 ; Bernatchez, Fraser, Friesinger, et al., 2008 ; Limber et Murray, 2011 ; Carpenter et al., 2015).

Au-delà des forçages météo-marins, il apparait nécessaire de s'intéresser aux facteurs internes des falaises meubles, à savoir la **porosité et la perméabilité** des formations constituant les falaises meubles. Ces paramètres géotechniques déterminent le comportement des matériaux en présence d'eau et la capacité des formations à laisser circuler l'eau au sein du versant. Ils peuvent être déterminés au laboratoire ou sur le terrain, notamment par des essais de pompage réalisés à partir de piézomètres (Géraud, 2000).

- **Niveaux de risque et enjeux**

La méthode de cartographie du risque présentée dans ce mémoire et basée sur l'étendue des formations meubles qui définit les « zones à risque » se montre adaptée à la cinématique des falaises meubles. Toutefois, cette approche géomorphologique nécessite des améliorations telle la prise en compte de l'épaisseur des matériaux meubles constitutifs des versants à falaises. Ceci permettrait :

- de mieux appréhender la géomorphologie du prisme côtier continental de ces dépôts reliques pour définir l'efficacité de la dernière transgression à éroder ces formations (volet recherche fondamentale) ;
- de délimiter plus précisément les secteurs littoraux à risque (volet appliqué de la recherche).

Ce travail complèterait ainsi l'étude du fonctionnement des côtes à dénudation menée dans le cadre de la thèse et alimenterait les réflexions sur les éventuelles disparités constatées dans ces configurations en termes de bilans sédimentaires. L'approche pourra se faire sur les six mêmes sites d'étude par les méthodes et techniques de la télédétection aéroportée (photographie aérienne par drone), de la topographie (LIDAR, photogrammétrie et topographie laser) et de la géophysique (géo-radar en particulier) (Fressard, 2014). La connaissance de l'épaisseur des formations héritées est déterminante dans l'appréciation du risque d'érosion des zones littorales à falaise meubles. Elle apportera conjointement une meilleure appréciation du positionnement des niveaux marins antérieurs ainsi que des effets de ces hauts niveaux marins sur ce type de littoral.

- **Gestion et vulnérabilité**

Les indices et indicateurs présentés dans ce mémoire sont utilisés pour une analyse rétrospective de la vulnérabilité côtière sur les sites d'étude. Toutefois, la méthodologie pourra être exploitée à l'identique sur d'autres sites à falaises meubles ou prendre un caractère prospectif, sur les mêmes sites, afin de suivre, dans le temps, l'évolution de la vulnérabilité et de dégager des courbes d'évolution et de tendance, c'est-à-dire des « trajectoires de vulnérabilité » (Magnan et al., 2012). Les indicateurs utilisés, notamment ceux de la composante gestion, devront s'adapter à l'évolution, dans le temps, des dispositifs de gestion (création de nouveaux outils ou de compétences, par exemple).

Par ailleurs, à l'instar des composantes Aléa, Enjeux et Gestion, la composante Représentations pourra être évaluée par le biais d'indicateurs afin de déterminer la vulnérabilité systémique sur les sites d'étude. L'analyse des représentations sociales ne fait effectivement pas l'objet de ce travail de thèse car ce type d'approche relève de méthodes et techniques spécifiques qui peuvent être développées en sciences humaines et sociales mais nécessitent généralement l'appropriation préalable de compétences propres à la sociologie et à la psychologie environnementale. Il n'en reste pas moins que cette composante peut représenter un facteur atténuateur ou exagérateur de la vulnérabilité et les perspectives dans ce champ de recherche sont nombreuses (Michel-Guillou et Meur-Ferec, 2014; Krien, 2014). L'identification de la connaissance et du point de vue des populations sur le risque d'érosion des falaises meubles est nécessaire afin d'optimiser les mesures de prévention et de réduire la vulnérabilité des territoires. Dans un premier temps, la position et le degré de conscience des risques des résidents et leur réaction potentielle en cas de la survenue d'un aléa pourront être identifiés par le biais d'entretiens, de questionnaires et/ou de cartes mentales (Vinet, 2007; Hellequin et al., 2013; Krien, 2014). Ces outils permettraient également de connaitre les facteurs sociaux et environnementaux (ex : âge, vécu, situation géographique…) susceptibles d'impacter les représentations du risque. Dans un second temps, il serait intéressant d'étudier l'impact immédiat que peut avoir la survenue d'un aléa sur les résidents situés à proximité. Ceci donnerait l'occasion d'étudier d'éventuels changements dans les représentations sociales au cours du temps.

Enfin, les résultats de l'enquête régionale (faible importance accordée à la sensibilisation citoyenne par les acteurs institutionnels) renforcent la nécessité de la prise en compte des représentations sociales des

gestionnaires. Ces représentations impliquent la compréhension globale de la vulnérabilité côtière intégrant aussi bien l'aléa érosion, les enjeux menacés, les mesures d'adaptation que les représentations sociales de la population.

Ce travail doctoral, comme les perspectives évoquées, prône la poursuite du suivi sur les sites d'étude, mis en place dans le cadre de la thèse. Par ailleurs, des sites complémentaires viendront contribuer à une meilleure connaissance du fonctionnement des falaises meubles. Au-delà de la définition d'indicateurs et de protocoles de mesure communs, ces sites complémentaires devront être choisis de manière à être représentatifs de la situation régionale, à l'instar des sites retenus dans cette thèse.

Toutes les méthodes mises en place dans le cadre de cette thèse, visent à être reproductibles sur d'autres côtes à falaises meubles. Ces méthodes, destinées aussi bien aux scientifiques qu'aux élus, ont pour objectif d'approfondir la connaissance du risque et de la vulnérabilité côtière liée au recul des falaises meubles. Elles peuvent être utilisées comme outil d'aide à la décision et à la priorisation de mesures de prévention.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abuodha P.A., Woodroffe C.D. (2006). « Assessing vulnerability of coasts to climate change : a review of approaches and their application to the Australian coast », *University of Wollongong*, p. 458.

Acerra M., Sauzeau T. (2012). « Zones construites, zones désertes sur le littoral atlantique. Les leçons du passé », *Norois. Environnement, aménagement, société*, n° 222.

Adams J., Chandler J. (2002). « Evaluation of LIDAR and medium scale photogrammetry for detecting soft-cliff coastal change », *The Photogrammetric Record*, *17*, n° 99, p. 405–418.

ADEME (2013). « Indicateurs de vulnérabilité d'un territoire au changement climatique : recueil de littérature internationale », 7406.

ADU-Montbéliard (Agence de Développement et d'Urbanisme) (2014). « Les implications de la loi ALUR sur les POS et PLU : l'essentiel ».

Ahsan M.N., Warner J. (2014). « The socioeconomic vulnerability index : A pragmatic approach for assessing climate change led risks–A case study in the south-western coastal Bangladesh », *International Journal of Disaster Risk Reduction*, *8*, p. 32–49.

Albinet V. (1995). « La gestion défensive des falaises en France : pratiques et carences d'une tradition persistante », *Hommes et terres du Nord*, *1*, n° 1, p. 65–72.

Albinet V. (2001). « Recul des falaises et alimentation de l'estran en sédiments : essai d'évaluation volumétrique pour la côte de la Bernerie et des Moutiers-en-Retz (Loire Atlantique) », *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, *7*, n° 1, p. 41–46.

Allain M. (2012). « La gestion du trait de côte », *Observatoire National de la Mer et du Littoral*.

Almeida L.P., Vousdoukas M.V., Ferreira Ó., Rodrigues B.A., Matias A. (2012). « Thresholds for storm impacts on an exposed sandy coastal area in southern Portugal », *Geomorphology*, *143*, p. 3–12.

Amin S.M., Davidson-Arnott R.G. (1995). « Toe erosion of glacial till bluffs: Lake Erie south shore », *Canadian Journal of Earth Sciences*, *32*, n° 7, p. 829–837.

ANCORIM (2012). « Panorama des solutions douces de protection des côtes ».

André C. (2013). *Analyse des dommages liés aux submersions marines et évaluation des coûts induits aux habitations à partir de données d'assurance : perspectives apportées par les tempêtes Johanna (2008) et Xynthia (2010)*, Thèse de doctorat, Université de Bretagne occidentale-Brest.

Anthony E.J. (2013). « Storms, shoreface morphodynamics, sand supply, and the accretion and erosion of coastal dune barriers in the southern North Sea », *Geomorphology*, *199*, p. 8–21.

Aragon Y., Bertrand S., Cabanel M., Le Grand H. (2000). « Méthode d'enquêtes par Internet : leçons de quelques expériences », *Décisions Marketing*, p. 29–37.

Arnaud A. (2015). « Les limites de la cartographie des risques littoraux : des perspectives pour la compréhension de tous », *VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement*, n° Hors-série 21.

Arzel P. (1998). *Les laminaires sur les côtes bretonnes : évolution de l'exploitation et de la flottille de pêche, état actuel et perspectives*, Editions Quae.

Augris C., Hamon D. (1996). « Atlas thématique de l'environnement marin en baie de Saint-Brieuc (Côtes-d'Armor) », IFREMER.

Babillot P. (2000). « La pression de la construction ne se relâche pas sur le littoral français », *Les données de l'environnement*, Institut Français de l'Environnement.

Bahain J.-J., Falguères C., Laurent M., Shao Q., Dolo J.-M., Garcia T., Douville E., Frank N., Monnier J.-L., Hallégouët B. (2012). « ESR and ESR/U-series dating study of several middle Palaeolithic sites of Pléneuf-Val-André (Brittany, France) : Piégu, Les Vallées and Nantois », *Quaternary Geochronology*, *10*, p. 424-429.

Balland P., Checcaglini P., Lavoux T., Devos P. (2008). « La conservation des terres agricoles littorales », 005794-01, CGEDD, CGAAER.

Ballèvre M., Bosse V., Dabard M.-P., Ducassou C., Fourcade S., Paquette J.-L., Peucat J.-J., Pitra P. (2013). « Histoire géologique du Massif armoricain : actualité de la recherche », *Bull. Soc. Géol. Min. Bretagne*, p. 92.

Baptista P., Bastos L., Bernardes C., Cunha T., Dias J. (2008). « Monitoring sandy shores morphologies by DGPS—a practical tool to generate digital elevation models », *Journal of Coastal Research*, p. 1516–1528.

Barkwith A., Thomas C.W., Limber P.W., Ellis M.A., Murray A.B. (2014). « Coastal vulnerability of a pinned, soft-cliff coastline – Part I : Assessing the natural sensitivity to wave climate », *Earth Surface Dynamics*, *2*, n° 1, p. 295–308.

Barroca B., Bernardara P., Mouchel J.-M., Hubert G. (2006). « Indicators for identification of urban flooding vulnerability », *Natural hazards and earth system science*, *6*, n° 4, p. 553–561.

Barrois C. (1896). « Légende de la feuille de Saint-Brieuc (no. 59 de la Carte géologique de France au 1 : 80 000) », *Annales de la Société Géologique du Nord*, *23*, p. 66-87.

Barton M.E. (1973). « The degradation of the Barton Clay cliffs of Hampshire », *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, *6*, n° 3-4, p. 423–440.

Basara N. (2015). « Caractérisation géologique et géomorphologique du milieu et dynamique des falaises du site-atelier du Grand-Dellec », Mémoire de maitrise, Université de Bretagne Occidentale-Brest.

Becerra (2012). « Vulnérabilité, risques et environnement : l'itinéraire chaotique d'un paradigme sociologique contemporain », *VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement*, 2012, p. 12.

Becet J.M. (2002). *Le droit de l'urbanisme littoral*, Les Presses Universitaires Rennes.

Becet J.-M. (1987). *L'aménagement du littoral*, (Que sais-je ? PUF).

Bégué M., Franck J.-F., Gestin M., Thulliez P., Leboulleux V., Rasseneur X. (2017). « Stratégie départementale mer et littoral 2017-2021-État des lieux, diagnostic et plan d'action », Conseil départemental du Finistère.

Belin P. (2005). « Plan Communal de Sauvegarde-Guide pratique d'élaboration », IRMa, MIATT, DDSC.

Belleguic K., Conseil C., Eveno T., Lorge S., Baraer F. (2012). « Le changement climatique en Bretagne », Météo-France.

Belliard E. (2005). « Des normes juridiques diverses et trop complexes », *Constructif*.

Belova N.G., Shabanova N.N., Ogorodov S.A., Kamalov A.M., Kuznetsov D.E., Baranskaya A.V., Novikova A.V. (2017). « Erosion of permafrost coasts of Kara Sea near Kharasavey Cape, Western Yamal », *Earth's Cryosphere*, *21*, n° 6, p. 73–83.

Benoit M., Lafon F. (2005). « A nearshore wave atlas along the coasts of France based on the numerical modeling of wave climate over 25 years », dans *Coastal Engineering 2004: (In 4 Volumes)*, World Scientific, p. 714–726.

Benoit M., Lafon F., Goasguen G. (2008). « Constitution et exploitation d'une base de données d'états de mer le long des côtes françaises par simulation numérique sur 23 ans : Base ANEMOC en Atlantique-Manche-mer du Nord », *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, *12*, n° 1-2, p. 35–50.

Benumof B.T., Griggs G.B. (1999). « The dependence of seacliff erosion rates on cliff material properties and physical processes: San Diego County, California », *Shore and beach*, *67*, n° 4, p. 29–41.

Benumof B.T., Storlazzi C.D., Seymour R.J., Griggs G.B. (2000). « The relationship between incident wave energy and seacliff erosion rates : San Diego County, California », *Journal of Coastal Research*, p. 1162–1178.

Berland J.-M. (2004). « Réhabilitation des réseaux d'assainissement en zone rurale », *Document technique FNDAE*, *32*, p. 115.

Bernatchez P., Drejza S., Dugas S. (2012). « Marges de sécurité en érosion côtière : évolution historique et future du littoral des îles de la Madeleine », Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, Laboratoire LDGIZC, Université du Québec à Rimouski.

Bernatchez P., Boucher-Brossard G., Corriveau M., Jolivet Y. (2014). « Impacts des changements climatiques sur l'érosion des falaises de l'estuaire maritime et du golfe du Saint-Laurent », Rapport de recherche remis au ministère de la sécurité publique du Québec et au consortium Ouranos, Laboratoire LDGIZC, Université du Québec à Rimouski.

Bernatchez P., Dubois J.-M. (2004). « Bilan des connaissances de la dynamique de l'érosion des côtes du Québec maritime laurentien », *Géographie physique et Quaternaire*, *58*, n° 1, p. 45-71.

Bernatchez P., Dubois J.-M.M. (2008). « Seasonal quantification of coastal processes and cliff erosion on fine sediment shorelines in a cold temperate climate, north shore of the St. Lawrence maritime estuary, Québec », *Journal of Coastal Research*, *24*, n° sp1, p. 169-180.

Bernatchez P., Dugas S., Fraser C., Da Silva L. (2015). « Évaluation économique des impacts potentiels de l'érosion des côtes du Québec maritime dans un contexte de changements climatiques », Rapport remis à Ouranos, Laboratoire LDGIZC, Université du Québec à Rimouski.

Bernatchez P., Fraser C. (2011). « Evolution of coastal defence structures and consequences for beach width trends, Québec, Canada », *Journal of coastal research*, *28*, n° 6, p. 1550–1566.

Bernatchez P., Fraser C., Friesinger S., Jolivet Y., Dugas S., Drejza S., Morissette A. (2008). « Sensibilité des côtes et vulnérabilité des communautés du golfe du Saint-Laurent aux impacts des changements climatiques », Rapport de recherche remis au Consortium OURANOS et au FACC, Laboratoire LDGIZC, Université du Québec à Rimouski.

Bernatchez P., Fraser C., Lefaivre D. (2008). « Effets des structures rigides de protection sur la dynamique des risques naturels côtiers : érosion et submersion », *Proceedings of the 4th Canadian Conference on Geohazard : From Causes to Managment, Universite Laval, Quebec City, QC, Canada*, p. 20–24.

Bernatchez P., Jolivet Y., Corriveau M. (2011). « Development of an automated method for continuous detection and quantification of cliff erosion events », *Earth Surface Processes and Landforms*, *36*, n° 3, p. 347–362.

Bernié-Boissard C. (2012). *L'aménagement du territoire à l'épreuve des risques*, Presses Universitaires d'Aix-Marseille.

Bernon N., Mallet C., Belon R. (2016). « Caractérisation de l'aléa recul du trait de côte sur le littoral de la côte aquitaine aux horizons 2025 et 2050 », RP-66277-FR, BRGM.

Bersani C., Dumas P., Rouzeau M., Gérard F., Gondran O., Hélias A., Martin X., Puech P., Fleury B., Greff M. (2010). « Tempête Xynthia, retour d'expérience, évaluation et propositions d'action », *La documentation française*.

Bezerra M.M., Moura D., Ferreira Ó., Taborda R. (2011). « Influence of wave action and lithology on sea cliff mass movements in Central Algarve Coast, Portugal », *Journal of Coastal Research*, *27*, n° 6A, p. 162–171.

Bigot B., Monnier J.-L. (1987). « Stratigraphie et sédimentologie des loess récents du nord de la Bretagne. Données nouvelles d'après l'étude des coupes de Sables-d'Or-les-Pins et de Port-Lazo (Côtes-du-Nord, France) », *Bulletin de l'Association française pour l'étude du quaternaire*, *24*, n° 1, p. 27-36.

Billé R. (2006). « Gestion intégrée des zones côtières : quatre illusions bien ancrées », *VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement*, *7*, n° 3.

Bioret F. (1985). « Erosion et protection des falaises de Bretagne méridionale », *Penn ar Bed*, *15*, n° 119, p. 157–163.

Bioret F. (1989). *Contribution à l'étude de la flore et de la végétation de quelques îles et archipels ouest et sud armoricains*, Thèse de doctorat, Université de Nantes.

Bird E.C. (1994). « Cliff hazards and coastal management », *Journal of Coastal Research*, p. 299–309.

Bird E.C. (2011). *Coastal geomorphology : an introduction*, John Wiley & Sons.

Birkemeier W.A. (1999). « Storms, storm groups and nearshore morphologic change », *Proc. Coastal Sed. 99*, p. 1109–1122.

Birkmann J. (2006). « Measuring vulnerability to natural hazard », *Teri-Press*, 2006.

Birkmann J. (2007). « Risk and vulnerability indicators at different scales: Applicability, usefulness and policy implications », *Environmental hazards*, *7*, n° 1, p. 20–31.

Bitelli G., Dubbini M., Zanutta A. (2004). « Terrestrial laser scanning and digital photogrammetry techniques to monitor landslide bodies », *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *35*, n° B5, p. 246-251.

Biville M. (2004). « Les falaises meubles des Côtes Nord Bretonnes, Dynamique morphogénique et risques induits », Rapport non publié, Université de Bretagne occidentale-Brest.

Biville M., Van Waerbeke D. (2003). « Les risques induits par le recul des falaises meubles sur les côtes nord-bretonnes : difficultés croissantes de la gestion du sentier côtier », *Hommes et Terres du Nord*, *1*, n° 1, p. 55–63.

Blaise E. (2017). *Étude des dynamiques du trait de côte de la région Bretagne à différentes échelles spatio-temporelles*, Thèse de doctorat, Université de Bretagne occidentale-Brest.

Boggett A.D., Mapplebeck N.J., Cullen R.J. (2000). « South Shore Cliffs, Whitehaven—Geomorphological survey and emergency cliff stabilization works », *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, *33*, n° 3, p. 213–226.

Bohle H.G., Downing T.E., Watts M.J. (1994). « Climate change and social vulnerability : toward a sociology and geography of food insecurity », *Global environmental change*, *4*, n° 1, p. 37–48.

Bolduc C. (2017). « La conservation des archives numériques », *Cap-aux-Diamants: La revue d'histoire du Québec*, n° 131, p. 21–23.

Bolin R., Stanford L. (1991). « Shelter, housing and recovery : A comparison of US disasters », *Disasters*, *15*, n° 1, p. 24–34.

Bonnot-Courtois C. (2009). « Le littoral des Côtes-d'Armor entre érosion marine et continentale », *Impacts du changement climatique sur les risques côtiers*, p. 175.

Bonnot-Courtois C., Feiss-Jehel C., De Saint Léger E. (2008). « Vulnérabilité des rivages en Côtes d'Armor (Bretagne Nord, France) : aléas et enjeux », *Xème Journées Nationales Génie Côtier-Génie*, *155*, p. 10.

Bonnot-Courtois C., Lafond L.-R. (1995). « Schéma de Mise en Valeur de la Mer de la Baie de Saint-Brieuc : Étude sur l'évolution des rivages de la baie de Saint-Brieuc entre Tréveneuc et Plurien », Rapport UMR 8586 PRODIG CNRS remis à la DDE 22.

Bonnot-Courtois C., Lançon G. (2004). « « Érosion littorale. Évaluation du risque. Phase 2 : Caractérisation de l'aléa érosion sur le littoral des Côtes-d'Armor ». Rapport UMR 8586 PRODIG CNRS remis à la DDE 22.

Bordereaux L., Braud X. (2009). *Droit du littoral*, Gualino Paris.

Boruff B.J., Emrich C., Cutter S.L. (2005). « Erosion hazard vulnerability of US coastal counties », *Journal of Coastal Research*, p. 932–942.

Bosc C., Raviola M., Laine P. (2014). « État de l'art de l'utilisation des technologies satellitaires pour la cartographie du trait de côte et de la bathymétrie », C18-07, Cerema.

Bossis M.-L. (2016). « Plan de Prévention des Risques Naturels Littoraux "Ouest-Odet"- Phase 1 : Analyse préalable du site », Rapport Egis eau remis à la Préfecture du Finistère, Egis eau.

Boucher-Brossard G. (2012). « Rythme et modes de recul des falaises à sommet tourbeux de la Côte-Nord de l'estuaire maritime et du golfe du Saint-Laurent », Rapport de stage de fin d'études, Laboratoire LDGIZC, Université du Québec à Rimouski.

Boucher-Brossard G., Bernatchez P., Corriveau M., Jolivet Y. (2017). « Calculating Lateral Frost Front Penetration in a Rapidly Retreating Cliff of Fine Sediments », *Permafrost and Periglacial Processes*, *28*, n° 1, p. 32–41.

Bouland S. (2018). « Indices systémiques de vulnérabilité côtière et implémentation dans une interface Web », Rapport de stage de fin d'études, ENSG, Université de Bretagne Occidentale-Brest.

Boulbry G. (2006). « Enquêtes verbales et biais méthodologiques », *La Revue des Sciences de Gestion*, n° 6, p. 69–78.

Bouligand R., Pirazzoli P.A. (1999). « Les surcotes et les décotes marines à Brest, étude statistique et évolution », *Oceanologica acta*, *22*, n° 2, p. 153–166.

Bournérias M., Pomerol C., Turquier Y. (1985). *La Bretagne : du Mont-Saint-Michel à la Pointe du Raz*, Delachaux et Niestlé.

Bousquet B. (1990). « Définition et identification du littoral contemporain », *Revue juridique de l'environnement*, *15*, n° 4, p. 451–468.

Bousquet-Bressolier C., Bonnot-Courtois C. (1998a). « Reconstitution historique de l'évolution d'un littoral depuis la fin du XVIIe siècle : la baie de Saint-Brieuc », *Norois*, *177*, n° 1, p. 33–49.

Bousquet-Bressolier C., Bonnot-Courtois C. (1998b). « Géomorphologie et vulnérabilité des rivages de la baie de Saint-Brieuc », *Norois*, *179*, n° 1, p. 495–506.

Brault N. (2002). *Ressources du sous-sol et environnement en Bretagne. Genèse, géométrie et propriétés de différents types d'aquifères*, Thèse de doctorat, Université Rennes 1.

Bray M.J. (1993). « Hengistbury Head Coast Protection Works : Impacts and Implications », *Department of Geography, University of Portsmouth. Report to the Borough Council of Bournemouth. 42p.*

Bray M.J., Hooke J.M. (1997). « Prediction of soft-cliff retreat with accelerating sea-level rise », *Journal of Coastal Research*, p. 453-467.

Breitung C., Haas F., Heckmann T., Becht M. (2011). « Detecting Erosion-Rates on Soft Rock Cliffs of the German Baltic Sea Using Ground-Based LIDAR », *AGU Fall Meeting Abstracts*.

Bremond P. (2011). *Caractérisation et évaluation économique de la vulnérabilité des exploitations agricoles aux inondations*, Thèse de doctorat, Université Montpellier 1, 428 p.

Brodu N., Lague D. (2012). « 3D terrestrial lidar data classification of complex natural scenes using a multi-scale dimensionality criterion : Applications in geomorphology », *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *68*, p. 121–134.

Bromhead E. (2006). *The stability of slopes*, CRC Press.

Brooks S.M., Spencer T. (2014). « Importance of decadal scale variability in shoreline response: examples from soft rock cliffs, East Anglian coast, UK », *Journal of coastal conservation*, *18*, n° 5, p. 581–593.

Brooks S.M., Spencer T., McIvor A., Möller I. (2016). « Reconstructing and understanding the impacts of storms and surges, southern North Sea », *Earth Surface Processes and Landforms*, *41*, n° 6, p. 855–864.

Brooks S.M., Spencer T., Boreham S. (2012). « Deriving mechanisms and thresholds for cliff retreat in soft-rock cliffs under changing climates : Rapidly retreating cliffs of the Suffolk coast, UK », *Geomorphology*, *153*, p. 48-60.

Brown S. (2008). *Soft cliff retreat adjacent to coastal defences, with particular reference to Holderness and Christchurch Bay, UK*, Thèse de doctorat, University of Southampton.

Bruley O., Coat S. (2014). « Inauguration de la réserve naturelle régionale de la presqu'île de Crozon, labellisée Espace Remarquable de Bretagne », Région Bretagne.

Brunsden D., Lee E.M. (2004). *Behaviour of Coastal Landslide Systems : an-Inter-disciplinary View.*

Cabantou A., Lespagnol A., Péron F. (2005). *Les Français la terre et la mer XIIIe-XXe siècle*, Fayard, Paris.

Caine N. (1980). « The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows », *Geografiska annaler: series A, physical geography*, *62*, n° 1-2, p. 23–27.

Calil J., Reguero B.G., Zamora A.R., Losada I.J., Méndez F.J. (2017). « Comparative coastal risk index (CCRI) : A multidisciplinary risk index for Latin America and the Caribbean », *PloS one*, *12*, n° 11, p. e0187011.

Cambers G. (1976). « Temporal scales in coastal erosion systems », *Transactions of the Institute of British Geographers*, p. 246–256.

Cappa F., Guglielmi Y., Soukatchoff V.M., Mudry J., Bertrand C., Charmoille A. (2004). « Hydromechanical modeling of a large moving rock slope inferred from slope levelling coupled to spring long-term hydrochemical monitoring: example of the La Clapiere landslide (Southern Alps, France) », *Journal of Hydrology*, *291*, n° 1, p. 67-90.

Cariolet J.-M. (2011). *Inondation des côtes basses et risques associés en Bretagne : vers une redéfinition des processus hydrodynamiques liés aux conditions météo-océaniques et des paramètres morpho-sédimentaires*, Thèse de doctorat, Université de Bretagne occidentale-Brest, 348 p.

Carnus F., Gabellini A.-S. (2014). « Étude de solutions contre les phénomènes d'érosion ou de submersion sur tois sites en Côtes-d'Armor », BRL Ingénierie.

Carpenter N.E., Dickson M.E., Walkden M., Nicholls R.J., Powrie W. (2015). « Lithological controls on soft cliff planshape evolution under high and low sediment availability », *Earth Surface Processes and Landforms*, *40*, n° 6, p. 840–852.

Carpenter N.E., Stuiver C., Nicholls R., Powrie W., Walkden M. (2012). « Investigating the recession process of complex soft cliff coasts : an Isle of Wight case study », *Coastal Engineering Proceedings*, *1*, n° 33, p. 123.

Carter C.H., Guy Jr D.E. (1988). « Coastal erosion : processes, timing and magnitudes at the bluff toe », *Marine geology*, *84*, n° 1-2, p. 1–17.

Carter R.W.G. (1988). *Coastal environments : an introduction to the physical, ecological, and cultural systems of coastlines*, London : Acadmic Press.

Casson B., Delacourt C., Allemand P. (2005). « Contribution of multi-temporal remote sensing images to characterize landslide slip surface–Application to the La Clapière landslide (France) », *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *5*, n° 3, p. 425–437.

Castella J.-C. (1998). « Typologie à dire d'expert des systèmes de production agricole du district de Cho Don, province de Bac Kan »,.

Castelle B., Dodet G., Masselink G., Scott T. (2017). « A new climate index controlling winter wave activity along the Atlantic coast of Europe : The West Europe Pressure Anomaly », *Geophysical Research Letters*, *44*, n° 3, p. 1384–1392.

CCI Bretagne (2016). « Chiffres Clés Bretagne 2016 ».

CEPRI (2011). « L'ACB (analyse coût/bénéfice) : une aide à la décision au service de la gestion des inondations. Guide à l'usage des maîtres d'ouvrage et de leurs partenaires », *Les guides du CEPRI*.

CEPRI (2016). « Les collectivités territoriales face aux risques littoraux-Élaborer et mettre en oeuvre une stratégie de réduction du risque de submersion marine », *Les guides du CEPRI*.

CEPRI (2017). « Les ouvrages de protection contre les inondations - S'organiser pour exercer la compétence GEMAPI et répondre aux exigences de la réglementation issue du décret du 12 mai 2015 », *Les guides du CEPRI*.

CESER de l'Atlantique (2015). « Submersion marine et érosion côtière. Connaître, prévenir et gérer les risques naturels littoraux sur la façade atlantique », Rapport CESER de l'Atlantique.

CGDD (2011). « Hiérarchisation et territorialisation des enjeux-Fiche exemples ».

CGDD, SOE, SEEIDD (2012). « Analyse multicritères : application aux mesures de prévention des inondations ».

Chaaban F., Darwishe H., Battiau-Queney Y., Louche B., Masson E., Khattabi J.E., Carlier E. (2012). « Using ArcGIS modelbuilder and aerial photographs to measure coastline retreat and advance : North of France », *Journal of Coastal Research*, *28*, n° 6, p. 1567–1579.

Chamseddine L., Dupont J. (2013). « Le littoral breton de 1975 à 2000 : quelle interaction entre les évolutions des espaces urbanisés et les dynamiques de la population ? », *Espace populations sociétés. Space populations societies*, n° 2013/1-2, p. 41–57.

Chantraine J., Houlgatte E., Chauris L., Le Goff E., Coussement C., Garreau J., Carn A. (1999). « Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), feuille Lannion (203) », Orléans, BRGM.

Chapman N. (2014). *Modelling the dynamic interaction between hydrology, slope stability and wave run-up processes in the soft-sea cliffs at Covehithe, Suffolk, UK*, Thèse de doctorat, Birkbeck, University of London.

Chauris L., Plusquellec Y. (1975). « Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), feuille de Douarnenez (309) », Orléans, BRGM.

Chauris L. (2011). « Pour une géo-archéologie du Patrimoine : pierres, carrières et constructions en Bretagne. Troisième partie : Roches métamorphiques », *Revue archéologique de l'Ouest*, n° 28, p. 219–245.

Chaverot S., Héquette A., Cohen O. (2008). « Changes in storminess and shoreline evolution along the northern coast of France during the second half of the 20 century », *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementary Issues*, *52*, n° 3, p. 1–20.

Chelli A., Pappalardo M., Llopis I.A., Federici P.R. (2010). « The relative influence of lithology and weathering in shaping shore platforms along the coastline of the Gulf of La Spezia (NW Italy) as revealed by rock strength », *Geomorphology*, *118*, n° 1-2, p. 93–104.

Chiron T. (2007). *Quelle gestion durable des ressources en eau et du risque de pénurie sur les petites îles ? Application aux îles de Bretagne (France)*, Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale-Brest, 413 p.

Choblet C. (2005). *Espace littoral et décisions d'aménagement. Limites et potentialités des études d'impact et des enquêtes publiques. Exemple du littoral atlantique français*, Thèse de doctorat, Université de Nantes.

Ciavola P., Jiménez J.A. (2013). « The record of marine storminess along European coastlines », *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *13*, p. 1999–2002.

Clairay P., Vincent J. (2008). « Le développement balnéaire breton : une histoire originale », *Annales de Bretagne et des Pays de l'Ouest. Anjou. Maine. Poitou-Charente. Touraine*, n° 115-4, p. 201–233.

Clément A., Celle G., Chesneau E., Giannoccaro F., Fournel M., Paduano L. (2011). « Élaboration d'un Document d'information communal sur les risques majeurs (DICRIM) intéractif - Guide de recommandations », Institut des Risques Majeurs.

Clément V., Jaurand E. (2005). *Risques "naturels" et territoires en France*, Géoconfluences.

Clus-Auby C. (2003). *La gestion de l'érosion des côtes : l'exemple aquitain*, Presses Univ de Bordeaux.

Cogswell A., Greenan B.J., Greyson P. (2018). « Evaluation of two common vulnerability index calculation methods », *Ocean & Coastal Management*, *160*, p. 46–51.

Colas S., Sauvé M., Vigné P. (2015). « Le sentier du littoral : un parcours privilégié pour découvrir le bord de mer et ses enjeux », *Commissariat général au développement durable*.

Collins B.D., Sitar N. (2008). « Processes of coastal bluff erosion in weakly lithified sands, Pacifica, California, USA », *Geomorphology*, *97*, n° 3, p. 483-501.

Colmar A., Walter C., Le Bissonnais Y., Daroussin J. (2010). « Démarche de validation régionale par avis d'experts du modèle MESALES d'estimation de l'aléa érosif. », *Étude et gestion des sols*, *17*, n° 1, p. 19–32.

Connan T., Le Montagner A., Rouault S., Viel R. (2010). « La Bretagne a doublé ses surfaces artificialisées en 20 ans », CAD22, ADEUPA.

Conseil de l'Europe (1999). *Modèle de loi sur la gestion durable des zones côtières et Code de conduite européen des zones côtières*.

Conseil Régional de Bretagne (2014). *Schéma Régional du Tourisme : Le document Cadre*.

Coombes M.A., Naylor L.A., Thompson R.C., Roast S.D., Gómez-Pujol L., Fairhurst R.J. (2011). « Colonization and weathering of engineering materials by marine microorganisms : an SEM study », *Earth Surface Processes and Landforms*, *36*, n° 5, p. 582–593.

Cooper J.A.G., McLaughlin S. (1998). « Contemporary multidisciplinary approaches to coastal classification and environmental risk analysis », *Journal of Coastal Research*, p. 512–524.

Corbin A. (1988). *Le territoire du vide : l'Occident et le désir du rivage*, Flammarion.

Corominas J., Moya J. (1999). « Reconstructing recent landslide activity in relation to rainfall in the Llobregat River basin, Eastern Pyrenees, Spain », *Geomorphology*, *30*, n° 1-2, p. 79–93.

Costa S., Delahaye D., Freiré-Diaz S., Di Nocera L., Davidson R., Plessis E. (2004). « Quantification of the Normandy and Picardy chalk cliff retreat by photogrammetric analysis », *Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications*, *20*, n° 1, p. 139–148.

Costa S. (1998). « Elévation du niveau marin et stratégies de réponse : le cas du littoral normano-picard », *Annales de géographie*, p. 179–200.

Costa S. (2004). « Le suivi des éboulements/écroulements des falaises crayeuses du Pays de Caux (Le Tréport/Veules-les-Roses) entre 2002 et 2004 », Rapport remis au Conseil Général de la Seine-Maritime.

Costa S., Lageat Y., Hénaff A., Delahaye D., Plessis E. (2003). « Origine de la variabilité spatiale du recul des falaises crayeuses du nord-ouest du Bassin de Paris. L'exemple du littoral haut-normand (France) », *Hommes et Terres du Nord*, *1*, n° 1, p. 22–31.

Cour des Comptes (2008). « L'État face à la gestion des risques naturels : feux de forêt et inondations », Rapport interne.

Cour des Comptes (2018). « Les Finances publiques locales-Rapport sur la situation financière et la gestion des collectivités territoriales et de leurs établissements publics », Chambres régionales et territoriales des comptes.

Créach A. (2015). *Cartographie et analyse économique de la vulnérabilité du littoral atlantique français face au risque de submersion marine*, Thèse de doctorat, Université de Nantes.

Crosta G.B. (1989). « A study of slope movements caused by heavy rainfall in Valtellina (Italy–July 1987) », *Proc. 6th Int. Conf. and Field Workshop on Landslides ALPS*, *90*, p. 247–258.

Crowell M., Leikin H., Buckley M.K. (1999). « Evaluation of coastal erosion hazards study : an overview », *Journal of Coastal Research*, p. 2–9.

Cruslock E.M., Naylor L.A., Foote Y.L., Swantesson J.O. (2010). « Geomorphologic equifinality : A comparison between shore platforms in Höga Kusten and F\a arö, Sweden and the Vale of Glamorgan, South Wales, UK », *Geomorphology*, *114*, n° 1-2, p. 78–88.

Cutter S.L., Boruff B.J., Lynn Shirley W. (2003). « Social vulnerability to environmental hazards », *Social Science Quaterly*, 2003, p. 242-261.

Cutter S.L., Mitchell J.T., Scott M.S. (2000). « Revealing the vulnerability of people and places : a case study of Georgetown County, South Carolina », *Annals of the association of American Geographers*, *90*, n° 4, p. 713–737.

Daeden J. (2015). *Analyse des pressions anthropiques sur l'environnement littoral européen et français*, Thèse de doctorat, Université de la Rochelle.

Daigneault M. (2001). *Processus d'altération/érosion à l'interface océan/continent/atmosphère : aspects quantitatifs et semi-quantitatifs : exemple des falaises de l'Est du Canada (Gaspésie)*, Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne.

Daire M.-Y., Gonzalez M.M., Lopez-Romero E. (2014). « Littoral breton, prospection Alert ».

Danguy des Déserts D., De La Broise P., Soulères G. (1988). « Les dégâts de l'ouragan des 15-16 octobre 1987 en Bretagne », *Rev. Forest. Fr.*, p. 89-98.

Danukalova G., Hallégouët B., Lefort J.-P., Monnier J.-L., Osipova E. (2015). « Reconstruction of the Middle-Late Pleistocene and Holocene palaeoenvironments of the Piégu Palaeolithic site (Brittany, France) based on biostratigraphical data », *ArchéoSciences*, n° 1, p. 7–30.

DATAR (2004). *Construire ensemble un développement équilibré du littoral*, La Documentation Française.

Daubord C. (2014). « Caractérisation de 7 évènements de tempête de l'automne-hiver 2013-2014 à partir des données disponibles au SHOM », *Rapport d'étude SHOM*, n° 001.

Davidson-Arnott R. (2010). *Introduction to coastal processes and geomorphology*, Cambridge University Press.

Deboudt P. (2010). « Vers la mise en oeuvre d'une action collective pour gérer les risques naturels littoraux en France métropolitaine », *Cybergeo: European Journal of Geography*.

DEFRA (2002). « Soft cliffs-prediction of recession rates and erosion control techniques », Londres, UK, DEFRA.

Dehouck A. (2006). *Morphodynamique des plages sableuses de la mer d'Iroise (Finistère)*, Thèse de doctorat, Université de Bretagne occidentale-Brest.

Dejean J., Bourassin V., Mortreux K. (1998). « Culture de l'évaluation et fascination pour les indicateurs », *Politiques et management public*, *16*, n° 2, p. 161–174.

Dekker A.G., Brando V.E., Anstee J.M., Pinnel N., Kutser T., Hoogenboom E.J., Peters S., Pasterkamp R., Vos R., Olbert C. (2001). *Imaging spectrometry of water. In Imaging Spectrometry : Basic Principles and Prospective Applications*, Dordrecht.

Del Río L., Gracia F.J. (2009). « Erosion risk assessment of active coastal cliffs in temperate environments », *Geomorphology*, *112*, n° 1-2, p. 82–95.

Del Río L., Gracia F.J., Benavente J. (2013). « Shoreline change patterns in sandy coasts. A case study in SW Spain », *Geomorphology*, *196*, p. 252–266.

de Lange W.P., Moon V.G. (2005). « Estimating long-term cliff recession rates from shore platform widths », *Engineering Geology*, *80*, n° 3-4, p. 292–301.

Delevoie C., Dutailly B., Mora P., Vergnieux R. (2012). « Un point sur la photogrammétrie », *Archéopages. Archéologie et société*, n° 34, p. 86-89.

Delmonaco G., Margottini C. (2004). « Meteorological factors influencing slope stability », dans *Natural Disasters and Sustainable Development*.

Denis J., Henoque Y. (2001). « Des hommes et des outils pour une gestion plus intégrée des zones côtières-guide méthodologique », *Manuel et guides de la Commission Océanographique Intergouvernementale*, n° 42, p. 64.

Denner K., Phillips M.R., Jenkins R.E., Thomas T. (2015). « A coastal vulnerability and environmental risk assessment of Loughor Estuary, South Wales », *Ocean and Coastal Management*, *116*, p. 478–490.

D'Ercole R., Metzger P. (2009). « La vulnérabilité territoriale : une nouvelle approche des risques en milieu urbain », *Cybergeo : European Journal of Geography*.

D'Ercole R., Pigeon P. (1999). « L'expertise internationale des risques dits naturels : intérêt géographique », *Annales de géographie*, *108*, p. 339–357.

Dernier H. (2010). « Enquête sur l'aménagement du Site de Pors-Hir », Rapport remis au Tribunal administratif de Rennes, E10000142/35.

Derruau M. (2010). *Les formes du relief terrestre : notions de géomorphologie*, Armand Colin.

Desmare S., Nicolle A. (2012). *Hydrodynamique côtière : modélisation des courants de marée au SHOM*, Paralia.

Desparmet A. (2008). « Falaise de l'Anse du Pisso (Pléneuf-Val-andré (22))-Diagnostic visuel de l'Etat du site », Arcadis.

Dewez T.J., Rohmer J., Regard V., Cnudde C. (2013). « Probabilistic coastal cliff collapse hazard from repeated terrestrial laser surveys : case study from Mesnil Val (Normandy, northern France) », *Journal of Coastal Research*, *65*, n° sp1, p. 702–707.

DHI (2016). « Plan de prévention des risques littoraux et d'inondation par débordement de cours d'eau de la Baie de Saint-Brieuc », Rapport remis à la Préfecture des Côtes-d'Armor.

Dionne J.C., Brodeur D. (1988). *Frost weathering and ice action in shore platform development with particular reference to Québec, Canada*, Gebrüder Borntraeger.

DIREN (2006). « Profil environnemental régional de Bretagne ».

Dodet G., Bertin X., Taborda R. (2010). « Wave climate variability in the North-East Atlantic Ocean over the last six decades », *Ocean modelling*, *31*, n° 3-4, p. 120–131.

Dolan R., Hayden B.P., May P., May S. (1980). « The reliability of shoreline change measurements from aerial photographs », *Shore and beach*, *48*, n° 4, p. 22–29.

Domínguez L., Anfuso G., Gracia F.J. (2005). « Vulnerability assessment of a retreating coast in SW Spain », *Environmental Geology*, *47*, n° 8, p. 1037–1044.

Dornbusch U. (2010). « Ground survey methods for mixed sand and gravel beaches in intertidal environments : a comparison », *Journal of Coastal Research*, p. 451–464.

Dornbusch U., Robinson D.A., Moses C.A., Williams R.B. (2008). « Temporal and spatial variations of chalk cliff retreat in East Sussex, 1873 to 2001 », *Marine Geology*, *249*, n° 3-4, p. 271–282.

Douglas B.C., Crowell M. (2000). « Long-term shoreline position prediction and error propagation », *Journal of Coastal Research*, p. 145–152.

Doukakis E. (2005). « Identifying Coastal Vulnerability Due to Climate Changes. », *Journal of Marine Environmental Engineering*, *8*, n° 2.

Douvinet J., Vinet F. (2012). « La carte des arrêtés « CatNat » pour les inondations : limites et améliorations possibles », *Mappemonde*, *107*, p. 17–30.

DREAL Bretagne (2013). « Les Bretons face à l'évolution du trait de côte - Une approche prospective pour une gestion durable »,.

Drejza S. (2010). « Impacts et efficacité des zonages des risques côtiers dans un contexte de changements climatiques : exemple de Percé, Québec », Rapport de stage de fin d'études, Laboratoire LDGIZC, Université du Québec à Rimouski.

Drejza S., Friesinger S., Bernatchez P. (2015). « Vulnérabilité des infrastructures routières de l'Est du Québec à l'érosion et à la submersion côtière dans un contexte de changements climatiques : Volume 3 », Rapport remis au Ministère des Transports du Québec, Laboratoire LDGIZC, Université du Québec à Rimouski.

Drobenko B. (2015). « Risques littoraux : entre stratégie et droit », *VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement*, n° Hors-série 21.

Drones Imaging (2013). « Conseils utiles pour la capture d'images aériennes et la photogrammétrie ».

Dubois J.M.M. (1999). « Dynamique de l'érosion littorale sur la Côte-Nord du Saint-Laurent », p. 33.

Dulon C., Morin A.C., Perrel C., Pfister C. (2009). « La population légale des communes », INSEE.

Dumortier J. (2017). « Dossier d'enquête publique sur la commune de Plougrescant : Modification et suspension de la servitude de passage des piétons le long du littoral », DDTM22.

Edil T.B., Vallejo L.E. (1980). « Mechanics of coastal landslides and the influence of slope parameters », *Engineering Geology*, *16*, n° 1-2, p. 83–96.

Egal E., Le Goff E., Guennoc P., Lebret P., Thiéblemont D., Hallégouët B., Houlgatte E., Callier L., Carn A. (1995). « Notice explicative de la carte géologique de la France au 1: 50000, feuille Pontrieux-Etablessur-Mer (204) », *BRGM, Orléans, 194p.*

Elliott M., Cutts N.D., Trono A. (2014). « A typology of marine and estuarine hazards and risks as vectors of change : a review for vulnerable coasts and their management », *Ocean and Coastal Management*, *93*, p. 88–99.

Emery K.O., Kuhn G.G. (1982). « Sea cliffs : their processes, profiles, and classification », *Geological Society of America Bulletin*, *93*, n° 7, p. 644-654.

EUROSION (2004). « Vivre avec l'érosion côtière en Europe. Espaces et sédiments pour un développement durable. », Luxembourg, Commission Européenne (CE).

Everts C.H. (1991). « Seacliff retreat and coarse sediment yields in southern California », *Coastal sediments*, p. 1586–1698.

Fairbank H., Jakeways J. (2006). « Mapping coastal evolution and risks in a changing climate - a training pack », *Centre for the Coastal Environment, Ventnor*.

Fattal P., Robin M., Pottier P. (2007). « Évaluation de la vulnérabilité côtière face aux pollutions par hydrocarbures : application à l'île de Noirmoutier », *Territory in movement -Journal of geography and planning*, n° 1, p. 54–69.

Fauconier K. (2013). « Enquête publique sur la commune de Plozévet-Révision du plan local d'urbanisme », Rapport remis à la mairie de Plozévet.

Faure E., Le Roux de Bretagne F., Ragueneau C., Tanquerey-Cado A. (2013). « Penser l'aménagement du littoral autrement : de la défense contre la mer vers la gestion du trait de côte », AgroParisTech.

Faye I. (2010). *Dynamique du trait de côte sur les littoraux sableux de la Mauritanie à la Guinée-Bissau (Afrique de l'Ouest) : Approches régionale et locale par photo-interprétation, traitement d'images et analyse de cartes anciennes*, Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale-Brest.

Faye I., Hénaff A., Hallégouet B. (2007). « Evolution récente de la ligne de rivage en baie d'Audierne : de Penhors à la pointe de la Torche », *Penn ar bed*, n° 199/200, p. pp–50.

Feagin R.A., Sherman D.J., Grant W.E. (2005). « Coastal erosion, global sea-level rise, and the loss of sand dune plant habitats », *Frontiers in Ecology and the Environment*, *3*, n° 7, p. 359–364.

Fenneteau H. (2015). *Enquête : entretien et questionnaire*, Dunod.

Fenster M.S., Dolan R., Elder J.F. (1993). « A new method for predicting shoreline positions from historical data », *Journal of Coastal Research*, p. 147–171.

Ferreira M.P.P.R. (2017). « Coastal risk assessment associated with cliff evolution and management proposals between Galé and Albufeira », Université d'Algarve.

Ferreira Ó. (2005). « Storm groups versus extreme single storms : predicted erosion and management consequences », *Journal of Coastal Research*, p. 221–227.

Feuillet T., Chauveau É., Pourinet L. (2012). « Xynthia est-elle exceptionnelle ? Réflexions sur l'évolution et les temps de retour des tempêtes, des marées de tempête, et des risques de surcotes associés sur la façade atlantique française », *Norois. Environnement, aménagement, société*, n° 222, p. 27–44.

Figlus J., Sigren J., Webster R., Linton T. (2015). « Innovative technology seaweed prototype dunes demonstration project », Texas A&M University.

Finkl C.W. (2004). « Coastal classification : systematic approaches to consider in the development of a comprehensive scheme », *Journal of Coastal Research*, p. 166–213.

Fondation de France (2011). « Quels littoraux pour demain? -Projets financés 2011-2016 ».

Fontaine M.M., Steinemann A.C. (2009). « Assessing vulnerability to natural hazards : impact-based method and application to drought in Washington State », *Natural Hazards Review*, *10*, n° 1, p. 11–18.

Foote Y., Plessis E., Robinson D.A., Hanaff A., Costa S. (2006). « Rates and patterns of downwearing of chalk shore platforms of the Channel Coasts : comparisons between France and England », *Zeitschrift fur Geomorphologie Supplementband*, *144*, p. 93–115.

Forbes D.L., Parkes G.S., Manson G.K., Ketch L.A. (2004). « Storms and shoreline retreat in the southern Gulf of St. Lawrence », *Marine Geology*, *210*, n° 1, p. 169–204.

Forsyth P.J. (2009). *Planning on a retreating coastline : Oamaru, North Otago, New Zealand*, GNS Science.

Foucault A., Raoult J.-F. (1995). *Dictionnaire de géologie*, Masson, quatrième édition.

Fournier J., Regnauld H. (1991). « Les falaises de Bretagne : enjeux scientifiques, enjeux sociaux. Un état des lieux », *Norois*, *152*, n° 1, p. 439–448.

Fradet T. (2015). « Confortement de la falaise - Locquirec- Étude géotechnique de conception phase projet », Ginger-CEBTP.

Fraser C., Bernatchez P., Dugas S. (2017). « Development of a GIS coastal land-use planning tool for coastal erosion adaptation based on the exposure of buildings and infrastructure to coastal erosion, Québec, Canada », *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, *8*, n° 2, p. 1103–1125.

Fressard M. (2014). *Les glissements de terrain du Pays d'Auge continental (Normandie, France) Caractérisation, cartographie, analyse spatiale et modélisation.*, Thèse de doctorat, Université de Caen.

Furiga J. (2015). « Analyse géomorphologique de l'anse de Trez-Bellec et propositions d'aménagements du site », Rapport de stage de fin d'études, Université de Brest.

Gaillot S., Chaverot S. (2001). « Méthode d'étude des littoraux à faible évolution. Cas du delta du Golo (Corse) et du littoral du Touquet (Pas-de-Calais) en France », *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, *7*, n° 1, p. 47-54.

Gaki-Papanastassiou K., Karymbalis E., Poulos S., Seni A., Zouva C. (2010). « Coastal vulnerability assessment to sea-level rise based on geomorphological and oceanographical parameters : the case of Argolikos Gulf, Peloponnese, Greece », *Hellenic Journal of Geosciences*, *45*, p. 109–121.

Gallet S., Bioret F., Sawtschuk J. (2011). « La restauration des végétations des hauts de falaises du littoral atlantique, vers une évaluation globale », *Sciences Eaux Territoires*, n° 2, p. 12–19.

Gallet-Blanchard L. (1995). « Le CD-ROM : du support papier à la recherche multicritères de l'homo interactivus », *XVII-XVIII. Revue de la Société d'études anglo-américaines des XVIIe et XVIIIe siècles*, *40*, n° 1, p. 89–96.

Ganassali S., Moscarola J. (2004). « Protocoles d'enquête et efficacité des sondages par Internet », *Décisions marketing*, p. 63–75.

Garnier E., Boucard J., Surville F. (2010). « La crise Xynthia à l'aune de l'histoire. Enseignements et enjeux contemporains d'une histoire des submersions », dans *Rapport pour le Parlement*.

Garreau J. (1979). « Géographie physique de la Bretagne, fondements structuraux », *Norois*, *104*, n° 1, p. 479–497.

Gélard P. (2004). « L'application de la loi littoral : pour une mutualisation de l'aménagement », Rapport du Sénat n°421, 421, Groupe de travail sur l'application de la loi littoral de la Commission des affaires économiques et de la Commission des lois. Sénat.

Genna A. (2004). « Étude géologique simplifiée de la Côte Basque », RP-53258-FR, BRGM.

GEOLITT (2016). « Plan Local d'Urbanisme de la Commune de Pléneuf-Val-André », Rapport remis à la mairie de Pléneuf-Val-André.

George P., Verger F. (2001). *Dictionnaire de la Géographie*, PUF, Paris.

Géraud Y. (2000). « Perméabilité des roches et loi de Darcy », Université de Strasbourg, Centre de Géochimie de la Surface.

Gérin S. (2011). *Une démarche évaluative des Plans de Prévention des Risques dans le contexte de l'assurance des catastrophes naturelles : Contribution au changement de l'action publique de prévention*, Thèse de doctorat, Université Paris-Diderot-Paris VII.

Gervais M., Balouin Y., Belon R. (2012). « Morphological response and coastal dynamics associated with major storm events along the Gulf of Lions Coastline, France », *Geomorphology*, *143*, p. 69–80.

Ghesquiere G., Mechrouch A., Bossis L. (2016). « Plan de Prévention des Risques Naturels Littoraux-Département du Finistère- », Egis eau.

Giannecchini R., Galanti Y., D'Amato Avanzi G. (2012). « Critical rainfall thresholds for triggering shallow landslides in the Serchio River Valley (Tuscany, Italy) », *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *12*, n° 3, p. 829–842.

Gibeaut J.C., Gutierrez R., Hepner T.L. (2002). « Threshold conditions for episodic beach erosion along the southeast Texas Coast », *Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions*, n° 52, p. 323-335.

GIEC (2014). « Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse. », Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Sous la direction de R.K. Pachauri et L.A. Meyer], Genève, Suisse.

Gilbert P. (1973). « Remarques sur la diffusion des mots scientifiques et techniques dans le lexique commun », *Langue française*, n° 17, p. 31–43.

Giot P.R., Monnier J.-L. (1972). « Quelques sites du Quaternaire littoral de la Bretagne septentrionale », *Bulletin de l'Association française pour l'étude du quaternaire*, *9*, n° 2, p. 83-100.

Giot P.-R., Deunff J., Briard J., L'Helgouach J. (1958). « L'habitat protohistorique du Moulin de la Rive en Locquirec (Finistère) », *Annales de Bretagne et des pays de l'Ouest*, *65*, p. 27–32.

Giuliano J. (2015). *Érosion des falaises de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur : évolution et origine de la morphologie côtière en Méditerranée : télédétection, géochronologie, géomorphologie*, Thèse de doctorat, Université Nice Sophia Antipolis.

Gomes F.V., Pinto F.T. (2004). « Vale do Lobo (Portugal) », *EUROSION, Case Study,(last time modified, Wednesday, 10 Mar 2004)*.

Gómez-Pujol L., Fornós J.J., Swantesson J.O. (2006). « Rock surface millimetre-scale roughness and weathering of supratidal Mallorcan carbonate coasts (Balearic Islands) », *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, *31*, n° 14, p. 1792–1801.

Gornitz V. (1990). « Vulnerability of the East Coast, USA to future sea level rise », *Journal of Coastal research*, *9*, p. 201–237.

Grainger P., Kalaugher P.G. (1987). « Intermittent surging movements of a coastal landslide », *Earth Surface Processes and Landforms*, *12*, n° 6, p. 597–603.

Grasso F. (2009). *Modélisation physique de la dynamique hydro-sédimentaire des plages*, Thèse de doctorat, Université Joseph-Fourier-Grenoble I.

Gratiot N., Anthony E.J., Gardel A., Gaucherel C., Proisy C., Wells J.T. (2008). « Significant contribution of the 18.6 year tidal cycle to regional coastal changes », *Nature Geoscience*, *1*, n° 3, p. 169.

Gray J.M. (1988). « Coastal cliff retreat at the Naze, Essex since 1874: patterns, rates and processes », *Proceedings of the Geologists' Association*, *99*, n° 4, p. 335–338.

Greenwood R.O., Orford J.D. (2008). « Temporal patterns and processes of retreat of drumlin coastal cliffs-Strangford Lough, Northern Ireland », *Geomorphology*, *94*, n° 1-2, p. 153–169.

GRESARC (2004). « Érosion littorale sur le département des Côtes-d'Armor. Expertise et évaluation du risque », Rapport GRESARC/DDE 22.

Griggs G.B., Trenhaile A.S., Carter R.W.G., Woodroffe C.D. (1994). *Coastal cliffs and platforms*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Griggs G.B. (1994). « California's coastal hazards », *Journal of Coastal Research*, p. 1–15.

Griggs G.B., Fulton-Bennett K.W. (1987). « Failure of Coastal Protection at Seacliff State Beach, Santa Cruz County, California, USA », *Environmental Management*, *11*, n° 2, p. 175–182.

Griggs G.B., Patsch K., Savoy L.E. (2005). *Living with the changing California coast*, University of California Press.

Griot C. (2007). « Des territoires vulnérables face à un risque majeur : le transport de matières dangereuses. Proposition d'un outil d'aide à la gestion de crise », *Géocarrefour*, 2007.

Grosvalet P. (2014). « Les Départements face au défi littoral-Agir, animer, accompagner », Département de Loire-Atlantique.

Groves R.M., Peytcheva E. (2008). « The impact of nonresponse rates on nonresponse bias: a meta-analysis », *Public opinion quarterly*, *72*, n° 2, p. 167–189.

Guérémy P., Marre A. (1996). « Une nouvelle méthode de cartographie géomorphologique applicable aux aléas naturels », *Travaux de l'Institut de Géographie de Reims*, *24*, n° 93, p. 5–40.

Guerrin J., Bouleau G. (2014). « Remparts ou menaces ? Trajectoires politiques de l'endiguement en France, aux Pays-Bas et aux Etats-Unis », *Revue internationale de politique comparée*, *21*, n° 1, p. 89–109.

Guichard T. (2003). « Géomorphologie et aménagement des plages de la baie de Douarnenez, de l'Île de l'Aber à la plage du Ris », Mémoire de maitrise, Université de Bretagne Occidentale-Brest.

Guichard-Claudic Y. (2001). « Le choix résidentiel de communes rurales bretonnes au moment de la retraite. Des enjeux identitaires diversifiés », *Espace populations sociétés*, *19*, n° 1, p. 139–150.

Guidicini G., Iwasa O.Y. (1977). « Tentative correlation between rainfall and landslides in a humid tropical environment », *Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, *16*, n° 1, p. 13–20.

Guilcher A. (1948). *Le relief de la Bretagne méridionale*, Thèse de doctorat, Université de Paris.

Guilcher A. (1954). *Morphologie littorale et sous-marine*, Presses universitaires de France.

Guilcher A. (1958). *Coastal and submarine morphology*, Methuen, Londres.

Guzzetti F., Peruccacci S., Rossi M., Stark C.P. (2007). « Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe- », *Meteorology and atmospheric physics*, *98*, n° 3-4, p. 239–267.

Haimes Y.Y. (2015). *Risk modeling, assessment, and management*, John Wiley & Sons.

Hallégouët B. (1971). *Le Bas-Léon (Finistère-France) : étude géomorphologique*, Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale-Brest.

Hallégouet B., Hénaff A. (1993). « Évolution du littoral septentrional du pays bigouden entre Penhors et Pors Poulhan », *Cap Caval*, n° 17, p. 273–280.

Hallégouët B., Van Vliet-Lanoë B. (1986). « Les oscillations climatiques entre 125 000 ans et le maximum glaciaire, d'après l'étude des formations marines, dunaires et périglaciaires de la côte des Abers (Finistère) », *Bulletin de l'Association française pour l'étude du Quaternaire*, *23*, n° 1, p. 127-138.

Hapke C.J., Kratzmann M.G., Himmelstoss E.A. (2013). « Geomorphic and human influence on large-scale coastal change », *Geomorphology*, *199*, p. 160–170.

Hapke C.J., Reid D., Richmond B.M., Ruggiero P., List J. (2006). « National assessment of shoreline change Part 3 : Historical shoreline change and associated coastal land loss along sandy shorelines of the California Coast », *US Geological Survey Open File Report*, *1219*, p. 79.

Harper J.R. (1978). « Coastal erosion rates along the Chukchi Sea coast near Barrow, Alaska », *Arctic*, p. 428–433.

Haziza E. (2007). *Contribution au développement de stratégies préventives face au risque de crues éclairs*, Thèse de doctorat, École des Mines de Paris.

Hédou F., Roche A., Trmal C., Deniaud Y. (2015). « Méthodologie d'élaboration de l'indicateur national d'érosion côtière », *Proceedings of Colloque MerIGéo 2015*, p. 69–72.

Hellequin A.-P., Flanquart H., Meur-Ferec C., Rulleau B. (2013). « Perceptions du risque de submersion marine par la population du littoral languedocien : contribution à l'analyse de la vulnérabilité côtière », *Natures Sciences Sociétés*, *21*, n° 4, p. 385–399.

Hénaff A. (2012). « L'approvisionnement sédimentaire dans les systèmes littoraux tempérés : sources, évolutions et gestion », Rapport d'HDR, Université de Bretagne Occidentale-Brest.

Hénaff A. (2004). « Les aménagements des littoraux de la Région Bretagne en vue de leur défense contre l'érosion depuis 1949 (Protection of the shoreline from coastal erosion since 1949 in Britanny) », *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, *81*, n° 3, p. 346–359.

Hénaff A. (2008). « Recherche d'indicateurs géomorphologiques de variation de l'orientation des houles sur les côtes françaises de l'Atlantique et de la Manche au cours des 25 dernières années, analyse des données et comparaison avec les données de l'atlas numérique de houle EDF-LNHE », *La Houille Blanche*, n° 1, p. 61–71.

Hénaff A. (2016). « Osirisc : vers un observatoire intégré des risques côtiers d'érosion submersion », https://www-iuem.univ-brest.fr/pops/projects/osirisc-vers-un-observatoire-integre-des-risques-cotiers-d-erosion-submersion. Plateforme collaborative de gestion de projets scientifiques.

Hénaff A., Lageat Y., Costa S. (2007). « Geomorphology and shaping processes of chalk shore platforms of the English Channel coasts. », *Annales de Géomorphologie*, 2007, p. 61-91.

Hénaff A., Lageat Y., Costa S., Plessis E. (2002). « Le recul des falaises crayeuses du Pays de Caux : détermination des processus d'érosion et quantification des rythmes d'évolution », *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, *8*, n° 2, p. 107-118.

Hénaff A., Lageat Y., Hallégouet B., Jabbar M., Delliou N., Diard M. (2015). « Évolutions des accumulations littorales et relations avec les dynamiques d'avant-plage dans l'archipel des Glénan (Sud-Finistère, France) », *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, *21*, n° 4, p. 359–384.

Hénaff A., Le Berre I. (2003). « Fonctionnement hydro-sédimentaire et artificialisation du littoral. Le cas de la côte occidentale du Finistère. », *Les Cahiers Nantais*, n° 59, p. 75–88.

Hénaff A., Le Cornec E., Jabbar M., Pétré A., Corfou J., Le Drezen Y., Vliët-Lanoë B. van (2018). « Caractérisation des aléas littoraux d'érosion et de submersion en Bretagne par l'approche historique », *Cybergeo : European Journal of Geography*.

Hénaff A., Meur-Ferec C., Lageat Y. (2013). « Changement climatique et dynamique géomorphologique des côtes bretonnes. Leçons pour une gestion responsable de l'imbrication des échelles spatio-temporelles », *Cybergeo : European Journal of Geography*.

Hénaff A., Philippe M. (2014). « Gestion des risques d'érosion et de submersion marines : Guide méthodologique », Projet Cocorisco.

Hequette A., Barnes P.W. (1990). « Coastal retreat and shoreface profile variations in the Canadian Beaufort Sea », *Marine Geology*, *91*, n° 1-2, p. 113–132.

Higgins C.G., Coates D.R. (1990). *Groundwater geomorphology : The role of subsurface water in Earth-surface processes and landforms*, Geological Society of America.

Himmelstoss E.A., FitzGerald D.M., Rosen P.S., Allen J.R. (2006). « Bluff evolution along coastal drumlins : Boston Harbor islands, Massachusetts », *Journal of Coastal Research*, p. 1230–1240.

Hinguant S. (1997). « Inventaire des sites paléolithiques du Morbihan », Rennes, Service régional de l'archéologie.

Hinguant S. (1998). « Inventaire des sites paléolithiques du Finistère », Rennes, Service régional de l'archéologie.

Hobbs P.R.N., Gibson A., Jones L., Pennington C., Jenkins G., Pearson S., Freeborough K. (2010). « Monitoring coastal change using terrestrial LiDAR », *Geological Society, London, Special Publications*, *345*, n° 1, p. 117–127.

Hobbs P.R.N., Humphreys B., Rees J.G., Tragheim D.G., Jones L.D., Gibson A., Rowlands K., Hunter G., Airey R. (2002). « Monitoring the role of landslides in 'soft cliff'coastal recession », *Instability–Planning and Management*, p. 589–600.

Houser C., Hapke C., Hamilton S. (2008). « Controls on coastal dune morphology, shoreline erosion and barrier island response to extreme storms », *Geomorphology*, *100*, n° 3, p. 223–240.

Hubert G., Reliant C. (2003). « Cartographie réglementaire du risque d'inondation : Décision autoritaire ou négociée ? », *Annales des ponts et chaussées*, p. 24–31.

Huet B. (2010). « Le site paléolithique moyen des Vallées (Pléneuf-Val-André, Côtes-d'Armor) », Service régional de l'archéologie de Bretagne.

IDEA Recherche (2017a). « Guide méthodologique-Approche prospective pour une gestion durable du trait de côte en Bretagne », DREAL Bretagne.

IDEA Recherche (2017b). « Étude de prospective territoriale pour une gestion durable du trait de côte en Bretagne-Livret d'alerte-Côte de Penthièvre », DREAL Bretagne.

Igigabel M. (2018). « Coût des protections contre les aléas littoraux », Cerema-Direction territoriale Ouest.

Jaboyedoff M., Aye Z.C., Derron M.H., Nicolet P., Olyazadeh R. (2014). « Using the consequence-frequency matrix to reduce the risk : examples and teaching », *Proceedings of the International Conference on Analysis and Management of Changing Risks for Natural Hazards, Padua, Italy*, p. 18–19.

Jacquier-Laforge E. (2017). « Rapport sur la proposition de loi relative à l'exercice des compétences des collectivités territoriales dans le domaine de la gestion des milieux aquatiques et de la prévention des inondations », 389, Assemblée nationale.

Jamagne M., Lautridou J.P., Sommé J. (1981). « Préliminaire à une synthèse sur les variations sédimentologiques des loess de la France du Nord-Ouest dans leur cadre stratigraphique et paléogéographique », *Bulletin de la Société géologique de France*, *7*, n° 2, p. 143-147.

Jaud M. (2011). *Techniques d'observation et de mesure haute résolution des transferts sédimentaires dans la frange littorale*, Thèse de doctorat, Université de Bretagne occidentale-Brest.

Jaud M., Passot S., Allemand P., Le Dantec N., Grandjean P., Delacourt C. (2019). « Suggestions to Limit Geometric Distortions in the Reconstruction of Linear Coastal Landforms by SfM Photogrammetry with PhotoScan® and MicMac® for UAV Surveys with Restricted GCPs Pattern », *Drones*, *3*, n° 1, p. 2.

Jego R. (2003). « Évolution du Trait de côte : du suivi des érosions côtières à la gestion intégrée du littoral- Synthèse bibliographique », Observatoire Départemental de l'Environnement du Morbihan.

Jensen P., Croissant Y. (2007). « Activité de vulgarisation des chercheurs CNRS : un état des lieux », *JCOM*, *6*, p. 3.

Johnstone E., Raymond J., Olsen M.J., Driscoll N. (2016). « Morphological expressions of coastal cliff erosion processes in San Diego County », *Journal of Coastal Research*, *76*, n° sp1, p. 174–184.

Joly F. (1962). « Principes pour une méthode de cartographie géomorphologique », *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, *39*, n° 309, p. 270–278.

Joly F. (1997). *Glossaire de géomorphologie*, Armand Colin, Paris.

Jones B.M., Arp C.D., Beck R.A., Grosse G., Webster J.M., Urban F.E. (2009). « Erosional history of Cape Halkett and contemporary monitoring of bluff retreat, Beaufort Sea coast, Alaska », *Polar Geography*, *32*, n° 3-4, p. 129–142.

Jones D.K., Lee E.M. (1994). *Landsliding in Great Britain*, Stationery Office Books (TSO).

Joyal G. (2015). « Quantification intra-annuelle au LiDAR du rôle de la morpho-stratigraphie sur l'évolution de la falaise côtière de Pointe-au-Bouleau, Charlevoix-Estuaire moyen du Saint-Laurent, Est du Canada », Mémoire de maitrise, Université de Laval, Québec, Canada.

Joyal G., Lajeunesse P., Morissette A., Bernatchez P. (2016). « Influence of lithostratigraphy on the retreat of an unconsolidated sedimentary coastal cliff (St. Lawrence estuary, eastern Canada) », *Earth Surface Processes and Landforms*, *41*, n° 8, p. 1055–1072.

Kamphuis J.W. (1987). « Recession rate of glacial till bluffs », *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, *113*, n° 1, p. 60–73.

Kanungo D.P., Sharma S. (2014). « Rainfall thresholds for prediction of shallow landslides around Chamoli-Joshimath region, Garhwal Himalayas, India », *Landslides*, *11*, n° 4, p. 629–638.

Karl T.R., Melillo J.M., Peterson T.C., Hassol S.J. (2009). *Global climate change impacts in the United States*, Cambridge University Press.

Kienberger S., Lang S., Zeil P. (2009). « Spatial vulnerability units–expert-based spatial modelling of socio-economic vulnerability in the Salzach catchment, Austria », *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *9*, n° 3, p. 767–778.

Kim S.K. (1991). « Prediction of rainfall triggered landslides in Korea », *Landslides*, *2*, p. 989–994.

Klein R.J., Nicholls R.J., Mimura N. (1999). « Coastal adaptation to climate change : can the IPCC Technical Guidelines be applied ? », *Mitigation and adaptation strategies for global change*, *4*, n° 3-4, p. 239–252.

Klugman J., Rodríguez F., Choi H.-J. (2011). « The HDI 2010 : new controversies, old critiques », *The Journal of Economic Inequality*, *9*, n° 2, p. 249–288.

Koks E.E., Jongman B., Husby T.G., Botzen W.J. (2015). « Combining hazard, exposure and social vulnerability to provide lessons for flood risk management », *Environmental Science and Policy*, *47*, p. 42–52.

Komar P.D. (1998). *Beach processes and sedimentation*, Seconde éd., (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ).

Komar P.D., Shih S.-M. (1993). « Cliff erosion along the Oregon coast : A tectonic-sea level imprint plus local controls by beach processes », *Journal of Coastal Research*, p. 747–765.

Krien N. (2014). *Place des risques côtiers dans la représentation du cadre de vie d'individus possédant des enjeux sur des communes « à risque »*, Thèse de doctorat, Université de Bretagne occidentale-Brest.

Krueger C.P., Gonçalves R.M., Heck B. (2009). « Surveys at the coast of Paraná, Brazil, to determinate the temporal coastal changes », *Journal of Coastal Research*, *1*, p. 632–635.

Kych A. (1986). « L'arrivée des retraités dans les stations du littoral français », *Espace Populations Sociétés*, *4*, n° 2, p. 139–147.

Lafon X., Treyer S. (2009). *Agir ensemble pour le littoral. Mobilisations scientifiques pour le renouvellement des politiques publiques*, La Documentation française, Ministère de l'écologie (L'environnement en débat).

Laforge M., Huet B. (2013). « Variations eustatiques pléistocènes sur la côte de Penthièvre (Côtes-d'Armor, France) au cours des trois derniers cycles interglaciaire/glaciaire et occupations paléolithiques associées », *British Archaeological Reports*.

Lageat Y. (2004). « Géomorphologie et gestion des littoraux », *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, 2004, p. 360-370.

Lahousse P., Piédanna V. (2000). « La discrétisation : un outil cartographique objectif ? », *Espace Populations Sociétés*, *18*, n° 1, p. 115–125.

Laignel A., Guéné C. (2016). « Les finances des collectivités locales en 2016 : État des lieux », Observatoire des finances locales.

Lambert J., Garcin M. (2013). « Submersions marines historiques », RP-62644-FR, BRGM.

Landreau B. (2018). « Stratégie de trait de côte dans le Morbihan - Phase 1 : Sensibilité des territoires littoraux à l'érosion », Cerema-Direction territoriale Ouest.

Lang M., Coeur D., Bard A., Bacq B., Becker T., Bignon E., Blanchard R., Bruckmann L., Delserieys M., Edelblutte C. (2013). « Les inondations remarquables en France : premiers éléments issus de l'enquête EPRI 2011 », *La Houille Blanche*, n° 5, p. 37–47.

Lang M., Coeur D., Lallement C., Naulet R. (1998). « Valorisation de l'information historique pour la prédétermination du risque d'inondation : application au bassin du Guiers », *Ingénieries-EAT*, n° 16, p. p–3.

Lardeux H., Audren C. (1996). *Bretagne : Guide géologique*, Masson.

Larson M., Kraus N.C. (1995). « Prediction of cross-shore sediment transport at different spatial and temporal scales », *Marine geology*, *126*, n° 1-4, p. 111-127.

Lascoumes P. (2018). *Action publique et environnement : « Que sais-je ? »*, Presses universitaires de France.

Lautridou J.-P. (1985). *Le cycle périglaciaire pléistocène en Europe du Nord-Ouest et plus particulièrement en Normandie*, Thèse de doctorat, Université de Caen.

Le Barillec E. (2017). « Confortement de la falaise du Moulin de la Rive à Locquirec - RD64A », DDTM-Morlaix.

Le Berre I., Bailly D., Philippe M., Kato Y. (2014). « Analyse économique des enjeux exposés aux risques côtiers : application au bâti résidentiel de Bretagne », *Connaissance et compréhension des risques côtiers : Aléas, Enjeux, Représentations, Gestion*, p. 204–213.

Le Borgne P. (2014). « Plougrescant Pors Hir-Recherche du toit rocheux-Diagnostic géotechnique », 40201336OM14, Cerema-Direction territoriale Ouest.

Le Cornec E., Fiere M., Grunnet N., Peeters P. (2008). « Etude de connaissance des phénomènes d'érosion sur le littoral vendéen », *Rapport de la Danish Hydraulics Institute France pour la DDE85*.

Le Cornec E. (2015). « La mise en oeuvre d'aménagements durables du trait de côte Les facteurs d'érosion et les solutions envisageables. », Geos-AEL.

Le Morvan D. (2010). « Quelle stratégie de gestion des risques côtiers pour l'union européenne ? », *[VertigO] La revue électronique en sciences de l'environnement*, n° 8.

Le Quellec K. (2015). « Réaménagement du littoral de Pors hir ».

Le Rhun M., Le Rhun P. (1967). « Le relief et les sols de Plozévet (Finistère) », *Revue de géographie de Lyon*, *42*, n° 2.

Le Strat F., Auzet L. (2015). « Le vieillissement de la population s'accélère près des villes et du littoral », Insee.

Leclerc A. (2016). « Analyse multiéchelles à haute résolution de la topographie restituée par photogrammétrie spatiale, aérienne et mesures au sol », CNAM.

Leclerc Y., Milon Y. (1925). « Découverte d'un gisement fossilifère dans la terrasse fluvio-marine de la plage des Vallées, Pléneuf (Côtes-du-Nord) », *Bulletin de la Société géologique et minéralogique de Bretagne*, *6*, p. 245–248.

Lee E.M. (2008). « Coastal cliff behaviour : Observations on the relationship between beach levels and recession rates », *Geomorphology*, *101*, n° 4, p. 558–571.

Lee E.M., Clark A.R. (2002). *Investigation and management of soft rock cliffs.*, Thomas Telford, Londres.

Lee G., Nicholls R.J., Birkemeier W.A. (1998). « Storm-driven variability of the beach-nearshore profile at Duck, North Carolina, USA, 1981–1991 », *Marine geology*, *148*, n° 3-4, p. 163–177.

Leica Geosystems (2015). « Apports et bénéfices SmartWorx Viva V5.51 ».

Lemagny J.-C., Rouillé A., Marbot B., Didi-Huberman G., Hassner R., Mélon M., Nesbit M., Sartorti R., Schwarz A., Eskildsen U. (1986). *Histoire de la photographie*, Bordas.

Lemarc F. (2019). « La carte d'identité des maires en 2018 »,.

Lemasson L., Regnaud H. (1997). « Évolution trentenaire des vents littoraux sur le Grand Ouest français », *Norois*, *175*, n° 1, p. 417–431.

Lendre S. (2016). « Vers des indicateurs de suivi de la vulnérabilité côtière aux risques d'érosion et de submersion », Rapport de stage de fin d'études, Université de Bretagne Occidentale-Brest.

Leneveu J., Mary Laville M. (2012). « La perception et l'évaluation des risques d'un point de vue psychologique : Note de recherche », *[VertigO] La revue électronique en sciences de l'environnement*, *12*, n° 1.

Leone F. (1996). *Concept de vulnérabilité appliqué à l'évaluation des risques générés par les phénomènes de mouvements de terrain*, Thèse de doctorat, Université de Grenoble 1.

Leone F. (2007). *Caractérisation des vulnérabilités aux catastrophes naturelles : contribution à une évaluation géographique multirisque (mouvements de terrain, séismes, tsunamis, éruptions volcaniques, cyclones)*, Thèse de doctorat, Université Paul Valéry-Montpellier III.

Leone F. (2009). « Système d'Information Géographique et Indicateurs de risques naturels en Méditerranée : le projet SIG RINAMED », *Revue Tunisienne de Géographie*, *40*, p. 87–120.

Leone F., Vinet F. (2006). « La vulnérabilité, un concept fondamental au coeur des méthodes d'évaluation des risques naturels », *La vulnérabilité des sociétés et territoires face aux menaces naturelles.*

Lestréhan C. (2016). « Étude de l'érosion du trait de côte suite aux tempêtes de l'hiver 2013/2014 dans le Finistère-Préconisations de suivi et de gestion du site du Moulin de la Rive », Rapport remis à la DDTM29, Cerema-Direction territoriale Ouest.

Letortu P. (2013). *Le recul des falaises crayeuses haut-normandes et les inondations par la mer en Manche centrale et orientale : de la quantification de l'aléa à la caractérisation des risques induits*, Thèse de doctorat, Université de Caen.

Letortu P., Costa S., Bensaid A., Cador J.-M., Quénol H. (2014). « Vitesses et modalités de recul des falaises crayeuses de Haute-Normandie (France): méthodologie et variabilité du recul », *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, *20*, n° 2, p. 133–144.

Letortu P., Jaud M., Grandjean P., Ammann J., Costa S., Maquaire O., Davidson R., Le Dantec N., Delacourt C. (2018). « Examining high-resolution survey methods for monitoring cliff erosion at an operational scale », *GIScience & remote sensing*, *55*, n° 4, p. 457–476.

Levoy F., Monfort O. (2009). « Détermination des aléas littoraux : outils et méthodes pour la délimitation des zonages », *La Houille Blanche*, n° 1, p. 24–31.

Lim M., Petley D.N., Rosser N.J., Allison R.J., Long A.J., Pybus D. (2005). « Combined digital photogrammetry and time-of-flight laser scanning for monitoring cliff evolution », *The Photogrammetric Record*, *20*, n° 110, p. 109–129.

Lim M., Rosser N.J., Petley D.N., Keen M. (2011). « Quantifying the controls and influence of tide and wave impacts on coastal rock cliff erosion », *Journal of Coastal Research*, *27*, n° 1, p. 46–56.

Limber P.W., Murray A.B. (2011). « Beach and sea-cliff dynamics as a driver of long-term rocky coastline evolution and stability », *Geology*, *39*, n° 12, p. 1147–1150.

Lissak C., Maquaire O., Malet J.-P. (2009). « Role of hydrological process in landslide occurrence: Villerville-Cricqueboeuf landslides (Normandy coast, France) », *Proceedings of the International Conference on Landslide Processes : from geomorphologic mapping to dynamic modelling, Strasbourg, CERG Éditions*, p. 175-180.

Lissak C. (2012). *Les glissements de terrain des versants côtiers du Pays d'Auge (Calvados) : Morphologie, fonctionnement et gestion du risque.*, Thèse de doctorat, Université de Caen.

Long N., Millescamps B., Guillot B., Pouget F., Bertin X. (2016). « Monitoring the topography of a dynamic tidal inlet using UAV imagery », *Remote Sensing*, *8*, n° 5, p. 387.

Lopez-Saez J., Corona C., Morel P., Rovéra G., Dewez T.J., Stoffel M., Berger F. (2018). « Quantification of cliff retreat in coastal Quaternary sediments using anatomical changes in exposed tree roots », *Earth Surface Processes and Landforms*, *43*, n° 15, p. 2983–2997.

Loyer S., Van Vliet-Lanoe B., Monnier J.-L., Hallegouët B., Mercier N. (1995). « La coupe de Nantois (Baie de Saint-Brieuc, France) : Datations par thermoluminescence (TL) et données paléoenvironnementales nouvelles pour le Pléistocène de Bretagne », *Quaternaire*, *6*, n° 1, p. 21-33.

Lummen N.S., Yamada F. (2014). « Implementation of an integrated vulnerability and risk assessment model », *Natural hazards*, *73*, n° 2, p. 1085–1117.

Magnan A., Duvat V., Garnier E. (2012). « Reconstituer les « trajectoires de vulnérabilité » pour penser différemment l'adaptation au changement climatique », *Natures Sciences Sociétés*, *20*, n° 1, p. 82–91.

Maisondieu C., Accensi M., Le roux J.-F., Boudière E. (2017). « Manuel de l'utilisateur de la base de données HOMERE », IFREMER.

Maiti S., Bhattacharya A.K. (2009). « Shoreline change analysis and its application to prediction: A remote sensing and statistics based approach », *Marine Geology*, *257*, n° 1-4, p. 11–23.

Malet J.-P., Maquaire O., Calais E. (2002). « Le GPS en géomorphologie dynamique. Application à la surveillance de mouvements de terrain (Super-Sauze, Alpes du Sud, France)/GPS in geomorphological studies. Application to the survey of landslides (Super-Sauze, South France) », *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, *8*, n° 2, p. 165–179.

Mani Murali R., Ankita M., Amrita S., Vethamony P. (2013). « Coastal vulnerability assessment of Puducherry coast, India, using the analytical hierarchical process », *Natural Hazards and Earth System Science*, n° 13, p. 3291-3331.

Marcel O., Le Berre I., Rouan M., Philippe M., Hénaff A. (2018). « Une application WEB-SIG de suivi de la vulnérabilité systémique des littoraux (projet OSIRISC) », Rapport de stage de fin d'études, Université de Bretagne Occidentale-Brest.

Marie G., Bernatchez P., Dugas S., Fraser C., Drejza S. (2014). « Marges de sécurité en érosion côtière : évolution historique et future du littoral des MRC de La Mitis et de La Matanie et des municipalités de Cap-Chat et Sainte-Anne-des-Monts », *Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec. Chaire de recherche en géoscience côtière, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski, Rimouski*.

Marie G., Bernatchez P., Fraser C., Touchette M., Arsenault E., Friesinger S., Sauvé P., Lapointe-St-Pierre M. (2017). « L'adaptation aux aléas côtiers dans un contexte de changements climatiques : portrait des besoins exprimés et des outils proposés à l'échelle des MRC de l'Est du Québec. », UQAR.

Marques F. (2006). « Rates, patterns, timing and magnitude-frequency of cliff retreat phenomena. A case study on the west coast of Portugal », *Zeitschrift für Geomorphologie, New Folge, Supplement Volume*, *144*, p. 231–257.

Marre A. (2007). « Cartographie géomorphologique et cartographie des risques », *Bulletin de l'Association de géographes français*, *84*, n° 1, p. 3–21.

Martin B., Ansel R., Guerrouah O. (2010). « Territorialisation ou déterritorialisation du risque ? Analyse comparative et critique de la procédure de réalisation des PPRNP », *Riseo : risques études et observations*, n° 1.

Martínez C., Quezada M., Rubio P. (2011). « Historical changes in the shoreline and littoral processes on a headland bay beach in central Chile », *Geomorphology*, *135*, n° 1-2, p. 80–96.

Masselink G., Austin M., Scott T., Poate T., Russell P. (2014). « Role of wave forcing, storms and NAO in outer bar dynamics on a high-energy, macro-tidal beach », *Geomorphology*, *226*, p. 76–93.

Masselink G., Scott T., Poate T., Russell P., Davidson M., Conley D. (2016). « The extreme 2013/2014 winter storms : hydrodynamic forcing and coastal response along the southwest coast of England », *Earth Surface Processes and Landforms*, *41*, n° 3, p. 378–391.

Maurizot P., Lafoy Y. (2001). « Cartographie des formations superficielles et des aléas mouvements de terrain en Nouvelle–Calédonie – Zone de Touho », RP-50846-FR, BRGM.

McLaughlin S., Cooper J.A.G. (2010). « A multi-scale coastal vulnerability index : A tool for coastal managers ? », *Environmental Hazards*, *9*, n° 3, p. 233–248.

McLaughlin S., McKenna J., Cooper J.A.G. (2002). « Socio-economic data in coastal vulnerability indices : constraints and opportunities », *Journal of Coastal Research*, *36*, n° sp1, p. 487–497.

MEDDE (2012). « Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte-Vers la relocalisation des activités et des biens », Direction Générale de la Prévention des Risques.

MEDDE (2014). « Plan de prévention des risques littoraux (PPRL)-Guide méthodologique », Direction Générale de la Prévention des Risques.

MEDDE (2016). « Développer la connaissance et l'observation du trait de côte - Contribution nationale pour une gestion intégrée », Direction générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature.

MEDDTL (2010). *La gestion du trait de côte*, Ed. Quae, (Savoir faire).

MEEM (2016). *Plans de prévention des risques naturels prévisibles (PPRN) : Guide général*, La Documentation Française.

Mercier A. (2006). « Logiques journalistiques et lecture événementielle des faits d'actualité », *Hermès, La Revue*, n° 3, p. 23–35.

Mercier D. (2012). « Après Xynthia : vers un repli stratégique et un État fort ? », *Norois. Environnement, aménagement, société*, n° 222, p. 7–9.

Mercier D. (2013). *Géomorphologie de la France*, Dunod.

Merodi T. (2015). « Érosion marine et effondrement à Telgruc-sur-Mer-Anse du Caon-Trez Bellec-Etude géotechnique préalable G1 », Arcadis.

Météo-France (2013). « Étude des tempêtes menaçant le littoral breton-Vimers 0 », Météo-France-Direction interregionale Ouest.

Meur-Ferec C. (2006). « De la dynamique naturelle à la gestion intégrée de l'espace littoral », Mémoire en vue de l'Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Nantes.

Meur-Ferec C., Deboudt P., Morel V. (2008). « Coastal risks in France : an integrated method for evaluating vulnerability », *Journal of Coastal Research*, *24*, n° sp2, p. 178–189.

Meur-Ferec C., Desse R.-P., Goasguen P. (1991). « Gestion environnementale et conflits d'utilisation de l'espace littoral : les golfs en Bretagne », *Norois*, *152*, n° 1, p. 363–376.

Meur-Ferec C., Lageat Y., Hénaff A. (2013). « La gestion des risques côtiers en France métropolitaine : évolution des doctrines, inertie des pratiques ? », *Géorisques*, *4*, p. 57–67.

Meur-Ferec C., Morel V. (2004). « L'érosion sur la frange côtière : un exemple de gestion des risques », *Natures Sciences Sociétés*, *12*, n° 3, p. 263–273.

Meur-Ferec C., Rabuteau Y. (2014). « Plonevez-les-Flots : un territoire fictif pour souligner les dilemmes des élus locaux face à la gestion des risques côtiers », *L'Espace géographique*, *43*, n° 1, p. 18–34.

Meyer P. (2013). « Contributions au processus d'Aide Multicritère à la Décision : Méthodes, Outils et Applications », Rapport d'HDR, Dauphine recherche en Management.

Meynier A. (1959). « Quelques formes de relief périglaciaire en Bretagne. Deuxième article : Bretagne littorale : la baie de Saint-Brieuc », *Norois*, *21*, n° 1, p. 5-18.

Michel-Guillou E., Meur-Ferec C. (2014). « Représentations des risques côtiers et stratégies d'adaptation : une manière d'appréhender la dimension humaine des risques côtiers. », *Actes du colloque international « Connaissance et compréhension des risques littoraux : aléas, enjeux, représentations et gestion »*, p. 339–352.

Mileti D. (1999). *Disasters by design: A reassessment of natural hazards in the United States*, Joseph Henry Press.

Miller L., Douglas B.C. (2004). « Mass and volume contributions to twentieth-century global sea level rise », *Nature*, *428*, n° 6981, p. 406.

Mineo-Kleiner L. (2013). « Comparaison des politiques de prévention des risques côtiers en France et au Québec », Mémoire de maitrise, Université de Bretagne Occidentale.

Mineo-Kleiner L. (2017). *L'option de la relocalisation des activités et des biens face aux risques côtiers : stratégies et enjeux territoriaux en France et au Québec*, Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale-Brest.

Mineo-Kleiner L., Meur-Ferec C. (2016). « Relocaliser les enjeux exposés aux risques côtiers en France : points de vue des acteurs institutionnels », *[VertigO] La revue électronique en sciences de l'environnement*, *16*, n° 2.

Miossec A. (1986). « Cassandre et Pénélope. A propos de quelques cas d'aménagement sur le littoral de la Bretagne et de la Vendée », *Norois*, *132*, n° 1, p. 505–515.

Miossec A. (1987). « Les conséquences de la pression touristique sur l'espace physique littoral », *Norois*, *133*, n° 1.

Mitchell J.K. (2000). *Forgetting about hazard*, Taylor & Francis.

Monnier J.L. (1973). *Contribution à l'étude des dépôts quaternaires de la région de Saint- Brieuc. Stratigraphie et sédimentologie des limons, des plages et des sols anciens*, Thèse de doctorat, Université de Rennes.

Monnier J.-L. (1979). « Le Pléistocène de la côte nord de la Bretagne. Essai de synthèse lithostratigraphique et chronostratigraphique », *Bulletin de l'Association française pour l'étude du quaternaire*, *16*, n° 3, p. 147-156.

Monnier J.-L., Huet B., Laforge M. (2011). « Application of sedimentological analysis to correlation of eroded layers under beaches with local and regional Pleistocene stratigraphy : A contribution to geological dating of Palaeolithic sites, northern coast of Brittany, France », *Quaternary international*, *231*, n° 1, p. 78-94.

Monnier J.-L., Lefort J.-P., Cliquet D., Hinguant S., Huet B., Pigeaud R., Ravon A.-L. (2016). « Des mammouths et des Hommes en Armorique- Occupations humaines et variations de l'environnement au Pléistocène dans l'Ouest de la France- », *Bull. Mus. Anthropol. préhist.*, n° 6, p. 93.

Monnier J.-L., Morzadec-Kerfourn M.-T. (1982). « Formations périglaciaires et formations marines, Stratigraphie des sols. Biostratigraphie et Industries du Pléistocène du littoral breton », *Bulletin de l'Association française pour l'étude du quaternaire*, *19*, n° 4, p. 185-194.

Montreuil A.-L., Bullard J.E. (2012). « A 150-year record of coastline dynamics within a sediment cell : Eastern England », *Geomorphology*, *179*, p. 168–185.

Moore L.J., Benumof B.T., Griggs G.B. (1999). « Coastal erosion hazards in Santa Cruz and San Diego Counties, California », *J. Coastal Res*, *28*, p. 121–139.

Moore L.J., Griggs G.B. (2002). « Long-term cliff retreat and erosion hotspots along the central shores of the Monterey Bay National Marine Sanctuary », *Marine Geology*, *181*, n° 1-3, p. 265–283.

Morisseau S. (2018). « Appréciation du recul des falaises meubles de Bretagne », Mémoire de maitrise, Université de Bretagne Occidentale-Brest.

Morrow B.H. (1999). « Identifying and mapping community vulnerability », *Disasters*, *23*, n° 1, p. 1–18.

Morton R.A. (2002). « Factors controlling storm impacts on coastal barriers and beaches: a preliminary basis for near real-time forecasting », *Journal of Coastal Research*, p. 486–501.

Morton R.A., Gibeaut J.C., Paine J.G. (1995). « Meso-scale transfer of sand during and after storms : implications for prediction of shoreline movement », *Marine geology*, *126*, n° 1-4, p. 161–179.

Morton R.A., Leach M.P., Paine J.G., Cardoza M.A. (1993). « Monitoring beach changes using GPS surveying techniques », *Journal of Coastal Research*, p. 702–720.

Morzadec-Kerfourn M.-T. (1974). *Variations de la ligne de rivage armoricaine au Quaternaire: analyses polliniques de dépôts organiques littoraux*, Université de Rennes, Institut de géologie.

Mougin B., Allier D., BLANCIN R., Carn A., Courtois N., Gateau C., Putot E. (2008). *SILURES Bretagne: Système d'Information pour la Localisation et l'Utilisation des Ressources en Eaux Souterraines*, Rapport du BRGM.

Moulinier H., Poupard G. (2017). « Produire et résider sur le littoral de la Bretagne », CESER de Bretagne.

Muralidhar M., Kumaran M., Jayanthi M., Muniyandi B., Ponniah A.G., Nagothu U.S., White P., Eknath A. (2012). « Case study on the impacts of climate change on shrimp farming and developing adaptation measures for small-scale shrimp farmers in Krishna District, Andhra Pradesh, India, Network of Aquaculture Centers in Asia-Pacific, 126 p », *The report is also available online*.

Muraz J., Durrieu S., Labbé S., Andréassian V., Tangara M. (1999). « Comment valoriser les photos aériennes dans les SIG ? », *Ingénieries-EAT*, n° 20, p. p–39.

Nardo M., Saisana M., Saltelli A., Tarantola S. (2005). « Tools for composite indicators building », *European Communities*.

Navarre M. (2014). « Les inégalités dans la formation des élus locaux », *Formation emploi. Revue française de sciences sociales*, n° 128, p. 65–79.

Naylor L.A., Stephenson W.J. (2010). « On the role of discontinuities in mediating shore platform erosion », *Geomorphology*, *114*, n° 1-2, p. 89–100.

Nicholls R.J., Cazenave A. (2010). « Sea-level rise and its impact on coastal zones », *Science*, *328*, n° 5985, p. 1517–1520.

Nicholls R.J., Klein R.J. (2005). « Climate change and coastal management on Europe's coast », dans *Managing European Coasts*, Springer, p. 199–226.

Nicholls R.J., Tol R.S. (2006). « Impacts and responses to sea-level rise : a global analysis of the SRES scenarios over the twenty-first century », *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, *364*, n° 1841, p. 1073–1095.

Nichols C.R., Wright L.D., Bainbridge S.J., Cosby A.G., Hénaff A., Loftis J.D., Cocquempot L.M., Katragadda S., Méndez G.R., Letortu P. (2019). « Collaborative Science to Enhance Coastal Resilience and Adaptation », *Frontiers in Marine Science*, *6*, p. 404.

Nordhaus W.D. (2006). « Geography and macroeconomics : New data and new findings », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *103*, n° 10, p. 3510–3517.

Nummela O., Sulander T., Helakorpi S., Haapola I., Uutela A., Heinonen H., Valve R., Fogelholm M. (2011). « Register-based data indicated nonparticipation bias in a health study among aging people », *Journal of clinical epidemiology*, *64*, n° 12, p. 1418–1425.

Obu J., Lantuit H., Grosse G., Günther F., Sachs T., Helm V., Fritz M. (2017). « Coastal erosion and mass wasting along the Canadian Beaufort Sea based on annual airborne LiDAR elevation data », *Geomorphology*, *293*, p. 331–346.

OCDE (2008). « Indicateurs clés de l'environnement », Paris, Direction de l'Environnement de l'OCDE.

O'Connor M.C., Cooper J.A.G., Jackson D.W. (2011). « Decadal behavior of tidal inlet–associated beach systems, northwest Ireland, in relation to climate forcing », *Journal of Sedimentary Research*, *81*, n° 1, p. 38–51.

Oniga V.E., Chirilă C. (2013). « Hausdorff distance for the differences calculation between 3D surfaces », *RevCAD*, *15*, p. 193–202.

Oppikofer T., Jaboyedoff M., Blikra L., Derron M.-H., Metzger R. (2009). « Characterization and monitoring of the Aknes rockslide using terrestrial laser scanning », *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *9*, n° 3, p. 1003–1019.

Pánek T., Šilhán K., Tábořík P., Hradecký J., Smolková V., Lenart J., Brázdil R., Kašičková L., Pazdur A. (2011). « Catastrophic slope failure and its origins : Case of the May 2010 Girová Mountain long-runout rockslide (Czech Republic) », *Geomorphology*, *130*, n° 3, p. 352-364.

Paskoff R. (1985). *Les littoraux : impact des aménagements sur leur évolution*, Elsevier Masson, Paris (Pratiques de la Géographie).

Paskoff R. (2001). *L'élévation du niveau de la mer et les espaces côtiers : le mythe et la réalité*, Institut océanographique.

Peduzzi P., Dao H., Herold C., Mouton F. (2009). « Assessing global exposure and vulnerability towards natural hazards : the Disaster Risk Index », *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *9*, n° 4, p. 1149–1159.

Perherin C. (2017). *La concertation lors de la cartographie des aléas littoraux dans les Plans de Prévention des Risques : enjeu majeur de prévention*, Thèse de doctorat, Université de Bretagne occidentale-Brest.

Perherin C., Christin N., Deniaud Y., Rouchon D. (2015). « Étude des aléas littoraux dans le cadre d'une analyses coûts-bénéfices (ACB) », Cerema-Direction territoriale Ouest.

Perherin C., Roche A. (2010). « Évolution des méthodes de caractérisation des aléas littoraux », *XIèmes Journées Nationales Génie Côtier–Génie Civil*, *3*, p. 609–616.

Pesci A., Baldi P., Bedin A., Casula G., Cenni N., Fabris M., Loddo F., Mora P., Bacchetti M. (2004). « Digital elevation models for landslide evolution monitoring : application on two areas located in the Reno River Valley (Italy) », *Annals of Geophysics*, *47*, n° 4.

Peter-Borie M., Riss J., Karnay G., Lucassou F., Aubié S. (2010). « Modèle géologique des formations superficielles du Pays Basque français (64) », RP-56064-FR, BRGM.

Pethick J., Anderson M.G., Brooks S.M. (1996). « Coastal slope development : temporal and spatial periodicity in the Holderness cliff recession », *Advances in hillslope processes*, *2*, p. 897–917.

Philpott K.L. (1984). « Comparison of cohesive coasts and beach coasts », *Proc. Coastal Eng. Canada*, p. 309–338.

Pian S. (2010). *Analyse multiscalaire et multifactorielle de l'évolution et du comportement géomorphologique des systèmes côtiers sud bretons*, Thèse de doctorat, Université Rennes 2.

Pierre G., Lahousse P. (2003). « Methods of quantification of the cliffs retreat : the example of the cape Blanc-Nez (Pas-de-Calais, France) », *Hommes et Terres du Nord*, n° 1, p. 32-43.

Pierre G., Lahousse P. (2006). « The role of groundwater in cliff instability : an example at Cape Blanc-Nez (Pas-de-Calais, France) », *Earth Surface Processes and Landforms*, *31*, n° 1, p. 31-45.

Pigeon P. (2007). « Les Plans de Prévention des Risques (PPR) : essai d'interprétation géographique », *Géocarrefour*, *82*, n° 1-2, p. 27–34.

Pineau-Guillou L. (2012). « Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France », SHOM.

Pinot J.P. (1993). « L'évolution du littoral autour de la baie de Lannion et sur la côte de Granit Rose », *SMVM–DDE*, *22*, p. 120.

Pinot J.-P. (1997). « Rapport sur les risques liés à l'évolution du littoral entre Penvénan et Plouha », *SMVM–DDE*, *22*, p. 123.

Pinot J.-P. (1998). *La gestion du littoral. Tome 1 : Littoraux tempérés, côtes rocheuses et sableuses*, Paris: Institut océanographique.

Pirazzoli P.A. (1993). *Les littoraux*, Nathan, Paris.

Pirazzoli P.A. (2000). « Surges, atmospheric pressure and wind change and flooding probability on the Atlantic coast of France », *Oceanologica Acta*, *23*, n° 6, p. 643–661.

Pirazzoli P.A., Regnauld H., Lemasson L. (2004). « Changes in storminess and surges in western France during the last century », *Marine Geology*, *210*, n° 1-4, p. 307–323.

Piriou J.Y. (1985). « Les marées vertes sur le littoral breton », Brest, Direction de l'environnement et des recherches océaniques. IFREMER.

Plante S., Chouinard O., Martin G. (2011). « Gouvernance participative par l'engagement citoyen à l'heure des changements climatiques. Études de cas à Le Goulet, Pointe-du-Chêne et Bayshore Drive (Nouveau-Brunswick) », *Territoire en mouvement. Revue de géographie et aménagement*, n° 11, p. 33–49.

Pollet N. (2004). *Large high-speed gravity rock slope movements : Contributions of field observations in order to understand propagation and deposition processes. Application to three alpine cases: La Madeleine (Savoie, France), Flims (Graubunden, Switzerland) and Köfels (Tyrol, Austria)*, Thèse de doctorat, Ecole des Ponts ParisTech.

Poncet M. (2016). « Observation des glissements de terrain-Nouvelles technologies d'instrumentation à distance », C14TE0086-05, Cerema Centre-Est.

Porter N.J., Trenhaile A.S., Prestanski K., Kanyaya J.I. (2010). « Patterns of surface downwearing on shore platforms in eastern Canada », *Earth Surface Processes and Landforms*, *35*, n° 15, p. 1793–1810.

Pottier N., Relaint C., Hubert G., Veyret Y. (2003). « Les plans de prévention des risques naturels à l'épreuve du temps : Prouesses et déboires d'une procédure réglementaire », *Annales des ponts et chaussées*, p. 40–48.

Pramanik M.K., Biswas S.S., Mondal B., Pal R. (2016). « Coastal vulnerability assessment of the predicted sea level rise in the coastal zone of Krishna–Godavari delta region, Andhra Pradesh, east coast of India », *Environment, development and sustainability*, *18*, n° 6, p. 1635–1655.

Préfontaine L., Drouin N., Mansour J.B. (2009). « Les sept jalons d'une gestion du savoir efficace », *Revue française de gestion*, n° 7, p. 15–33.

Prémaillon M., Regard V., Dewez T., Auda Y. (2017). « How to explain variations in sea cliff erosion rates ? Insights from a literature synthesis. », *Earth Surface Dynamics*, *19*, p. 8012.

Prigent L. (2001). *Valeur d'usage et valeur d'existence d'un patrimoine. Une application de la méthode d'évaluation contingente au Mont-Saint-Michel.*, Thèse de doctorat, Université de Bretagne occidentale-Brest.

Prior D.B. (1977). « Coastal mudslide morphology and processes on Eocene clays in Denmark », *Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography*, *76*, n° 1, p. 14–33.

Prokop A., Panholzer H. (2009). « Assessing the applicability of terrestrial laser scanning for spatial snow depth measurements », *Cold Regions Science and Technology*, *54*, n° 3, p. 155-163.

Przyluski V., Hallegatte S. (2013). *Gestion des risques naturels : Leçons de la tempête Xynthia*, Editions Quae.

Pye K., Blott S.J. (2008). « Decadal-scale variation in dune erosion and accretion rates : an investigation of the significance of changing storm tide frequency and magnitude on the Sefton coast, UK », *Geomorphology*, *102*, n° 3-4, p. 652–666.

Quigley R.M., Gelinas P.J., Bou W.T., Packer R.W. (1977). « Cyclic erosion–instability relationships : Lake Erie north shore bluffs », *Canadian Geotechnical Journal*, *14*, n° 3, p. 310–323.

Quillet E. (2017). « Élaborer un suivi de la gestion des risques côtiers d'érosion - submersion à partir d'indicateurs », Rapport de stage de fin d'études, Université de Nantes.

Quinn J.D., Philip L.K., Murphy W. (2009). « Understanding the recession of the Holderness Coast, east Yorkshire, UK : a new presentation of temporal and spatial patterns », *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, *42*, n° 2, p. 165–178.

Quintric A. (2017). « Enquête publique sur la commune de Plozévet-Servitude de passage des piétons le long du littoral », DDTM29.

Ramonet M. (2010). « La démographie bretonne depuis deux siècles », Insee.

Rangel-Buitrago N., Anfuso G. (2011). « Coastal storm characterization and morphological impacts on sandy coasts », *Earth Surface Processes and Landforms*, *36*, n° 15, p. 1997–2010.

Regard V., Dewez T., Bourles D.L., Anderson R.S., Duperret A., Costa S., Leanni L., Lasseur E., Pedoja K., Maillet G.M. (2012). « Late Holocene seacliff retreat recorded by 10Be profiles across a coastal platform : Theory and example from the English Channel », *Quaternary Geochronology*, *11*, p. 87–97.

Renard F., Chapon P.-M. (2010). « Une méthode d'évaluation de la vulnérabilité urbaine appliquée à l'agglomération lyonnaise », *L'Espace geographique*, *39*, n° 1, p. 35–50.

Renard F., Soto D. (2015). « Une représentation du risque à l'intersection de l'aléa et de la vulnérabilité : cartographies des inondations lyonnaises », *Geographica Helvetica*, *70*, n° 4, p. 333.

Robert S., Melin H. (2015). *Habiter le littoral. Entre enjeux de société et enjeux de connaissances*, Presses Universitaires d'Aix-Marseille.

Robertson I. (1990). *Erosion and stability of the till cliffs on the Holderness coast*, Thèse de doctorat, University of Newcastle Upon Tyne.

Robinson L.A. (1977). « Marine erosive processes at the cliff foot », *Marine Geology*, *23*, n° 3, p. 257-271.

Roche A., Baraer F., Le Cam H., Madec T., Gautier S., Gwénaële J.A.N., GOUTX D. (2014). « Projet VIMERS : une typologie des tempêtes bretonnes pour prévoir l'impact des tempêtes à venir et mieux s'y préparer », *Actes du colloque des XIIIe Journées Nationales Génie Côtier–Génie Civil, Dunkerque*, p. 2–4.

Rocle N. (2017). *L'adaptation des littoraux au changement climatique : une gouvernance performative par expérimentations et stratégies d'action publique*, Thèse de doctorat, Université de Bordeaux.

Rodet J. (2013). « Karst et évolution géomorphologique de la côte crayeuse à falaises de la Manche. L'exemple du Massif d'Aval (Etretat, Normandie, France) », *Quaternaire. Revue de l'Association française pour l'étude du Quaternaire*, *24*, n° 3, p. 303–314.

Rosser N., Lim M., Petley D., Dunning S., Allison R. (2007). « Patterns of precursory rockfall prior to slope failure », *Journal of geophysical research: earth surface*, *112*, n° F4.

Roulland T., Maquaire O., Costa S., Compain V., Davidson R., Medjkane M. (2019). « Dynamique des falaises des Vaches Noires : analyse diachronique historique et récente à l'aide de documents multi-sources (Normandie, France) », *Géomorphologie : relief, processus, environnement*.

Roy S. (2015). « Seuils pluviométriques pour le déclenchement de glissements de terrain dans la municipalité d'Angra dos Reis, Rio de Janeiro, Brésil »,.

Ruë O. (1988). *Sédimentologie et morphogenèse des rivages et des fonds de la baie de Saint-Brieuc*, Thèse de doctorat, Paris 11.

Ruin I., Lutoff C. (2004). « Vulnérabilité face aux crues rapides et mobilités des populations en temps de crise », *La Houille Blanche*, n° 6, p. 114–119.

Rulleau B., Rey-Valette H., Flanquart H., Hellequin A.-P., Meur-Ferec C. (2015). « Perception des risques de submersion marine et capacité d'adaptation des populations littorales », *VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement*, n° Hors-série 21.

Runfola D.M., Ratick S., Blue J., Machado E.A., Hiremath N., Giner N., White K., Arnold J. (2017). « A multi-criteria geographic information systems approach for the measurement of vulnerability to climate change », *Mitigation and adaptation strategies for global change*, *22*, n° 3, p. 349–368.

Ruz M.-H. (1987). « Impacts des aménagements sur l'évolution du littoral de Wexford, sud-est de l'Irlande », *Norois*, *133*, n° 1, p. 261–273.

Ruz M.-H. (1989). « Recent evolution of the southeast barrier coast of Ireland », *Journal of coastal research*, p. 523–539.

Ruz M.-H., Héquette A., Marin D., Sipka V., Crapoulet A., Cartier A. (2017). « Development of an incipient foredune field along a prograding macrotidal shoreline, northern France », *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, *23*, n° 1, p. 37–50.

Sabater N. (2009). *Fiabilité et précision en stéréoscopie : application à l'imagerie aérienne et satellitaire à haute résolution*, Thèse de doctorat, École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan.

Santin G. (2015). *Non-réponse totale dans les enquêtes de surveillance épidémiologique*, Thèse de doctorat, Université Paris Sud-Paris XI.

Savelli E. (2016). « Les inondations en Bretagne », Bretagne-Environnement.

Savelli E., Baraer F., Briot V., Siorat F., Perherin C. (2015). « Le changement climatique en Bretagne », *GIP Bretagne environnement*, mai 2015, p. 22.

Schroëtter J.-M. (2016). « Glissement de terrain sur le littoral, le 23 mars 2016 à Saint-Quay-Portrieux », RP-658226-FR, BRGM.

Schroëtter J.-M., Blaise E. (2015). « Atlas des aléas littoraux (Érosion et Submersion marine) des départements d'Ille-et-Vilaine, des Côtes-d'Armor et du Finistère : Phase 1 », RP-65212-FR, BRGM.

Schroëtter J.-M., Rouainai D., Nombo S.-J., Grumel J. (2017). « Évaluation des ressources minéales en Bretagne », RP-67165-FR, BRGM.

Sciberras A.M. (2002). « Integrated Coastal Zone Management – A challenge for the EU in the 21st Century », *EIPASCOPE*, *2002*, n° 1, p. 1–5.

Secrétariat général de la mer (2007). « Bilan de la loi Littoral et des mesures en faveur du littoral », Rapport du Gouvernement remis au Parlement.

Senechal N., Coco G., Castelle B., Marieu V. (2015). « Storm impact on the seasonal shoreline dynamics of a meso- to macrotidal open sandy beach (Biscarrosse, France) », *Geomorphology*, *228*, p. 448–461.

Shaw J., Taylor R.B., Forbes D.L., Ruz M.H., Solomon S. (1998). *Sensitivity of the coasts of Canada to sea-level rise*, Geological Survey of Canada Ottawa.

Slaymaker O. (1999). « Natural hazards in British Columbia : an interdisciplinary and inter-institutional challenge », *International Journal of Earth Sciences*, *88*, n° 2, p. 317–324.

Small C., Nicholls R.J. (2003). « A global analysis of human settlement in coastal zones », *Journal of coastal research*, p. 584–599.

Snell C.B., Lajoie K.R., Medley E.W. (2000). « Sea-cliff erosion at Pacifica, California caused by 1997/98 El Nino storms », *Sessions of Geo-Denver 2000-Slope Stability 2000, GSP 101*, *289*, p. 294–308.

Steers J.A. (1951). « Notes on erosion along the coast of Suffolk », *Geological Magazine*, *88*, n° 6, p. 435–439.

Stéphan P. (2008). *Les flèches de galets de Bretagne : morphodynamiques passée, présente et prévisible*, Thèse de doctorat, Université de Bretagne occidentale-Brest.

Stéphan P., Dodet G., Tardieu I., Suanez S., David L. (2018). « Dynamique pluri-décennale du trait de côte en lien avec les variations des forçages météo-océaniques au nord de la Bretagne (baie de Goulven, France) », *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, *24*, n° 1, p. 79–102.

Stephenson W.J., Kirk R.M. (1998). « Rates and patterns of erosion on inter-tidal shore platforms, Kaikoura Peninsula, South Island, New Zealand », *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Group*, *23*, n° 12, p. 1071–1085.

Stuiver C. (2013). *Coastal evolution of soft cliff coasts : headland formation and evolution on the Southwest Isle of Wight*, Thèse de doctorat, Université de Southampton, 277 p.

Sunamura T. (1992). *Geomorphology of rocky coasts*, Wiley Chichester, UK.

Sunamura T. (2015). « Rocky coast processes : with special reference to the recession of soft rock cliffs », *Proceedings of the Japan Academy, Series B*, *91*, n° 9, p. 481–500.

Swenson M.J., Wu C.H., Edil T.B., Mickelson D.M. (2006). « Bluff recession rates and wave impact along the Wisconsin coast of Lake Superior », *Journal of Great Lakes Research*, *32*, n° 3, p. 512–530.

Szlafsztein C., Sterr H. (2007). « A GIS-based vulnerability assessment of coastal natural hazards, state of Pará, Brazil », *Journal of Coastal Conservation*, *11*, n° 1, p. 53–66.

Tabeaud M., Bardou M. (1996). « Les risques liés au climat. Cinquante ans de tempêtes... vues par Ouest-France », *Publications de l'Université de Bourgogne*, n° 87, p. 141–149.

Tabeaud M., Lysaniuk B., Schoenenwald N., Buridant J. (2009). « Le risque « coup de vent » en France depuis le XVIe siècle », *Annales de géographie*, p. 318–331.

Tanguy M. (2018). « Servitude de passage des piétons le long du littoral - Commune de Plozévet - de Poulhan à Gourinet. Procédure de modification ou de suspension », DDTM29.

Teixeira S.B. (2006). « Slope mass movements on rocky sea-cliffs : A power-law distributed natural hazard on the Barlavento Coast, Algarve, Portugal », *Continental Shelf Research*, *26*, n° 9, p. 1077–1091.

Thieler E.R., Hammar-Klose E.S. (2000). « National assessment of coastal vulnerability to sea-level rise; preliminary results for the US Pacific Coast ».

Thom B.G., Hall W. (1991). « Behaviour of beach profiles during accretion and erosion dominated periods », *Earth surface processes and landforms*, *16*, n° 2, p. 113–127.

Thomas I., Bleau N., Soto Abasolo P., Desjardins-Dutil G., Fuamba M., Kadi S. (2012). « Analyser la vulnérabilité sociétale et territoriale aux inondations en milieu urbain dans le contexte des changements climatiques, en prenant comme cas d'étude la ville de Montréal », *Rapport final pour Ouranos*, *137*.

Tragaki A., Gallousi C., Karymbalis E. (2018). « Coastal Hazard Vulnerability Assessment Based on Geomorphic, Oceanographic and Demographic Parameters : The Case of the Peloponnese (Southern Greece) », *Land*, *7*, n° 2, p. 56.

Trenhaile A.S. (1974). « The geometry of shore platforms in England and Wales », *Transactions of the Institute of British Geographers*, p. 129–142.

Trenhaile A.S. (1987). *The geomorphology of rock coasts*, Oxford University Press, USA.

Trenhaile A.S. (2002). « Rock coasts, with particular emphasis on shore platforms », *Geomorphology*, *48*, n° 1-3, p. 7–22.

Trzpit J.-P. (1977). « Les tempêtes nord-atlantiques : Essai d'analyse géographique (1ere partie) », *Norois*, *93*, n° 1, p. 33–52.

Turner R.K., Subak S., Adger W.N. (1996). « Pressures, trends, and impacts in coastal zones : interactions between socioeconomic and natural systems », *Environmental management*, *20*, n° 2, p. 159–173.

Veyret Y. (2016). « Les littoraux : quelques obstacles à leur gestion », *Bulletin de l'association de géographes français. Géographies*, *93*, n° 93-4, p. 342–349.

Veyret Y., Laganier R. (2013). *Atlas des risques en France. Prévenir les catastrophes naturelles et technologiques*, Autrement.

Veyret Y., Reghezza M. (2005). « Aléas et risques dans l'analyse géographique », *Annales des mines*, *40*, p. 61–69.

Vinet F. (2002). *Crues et inondations dans la France méditerranéenne. Les crues torrentielles des 12 et 13 novembre 1999 (Aude, Tarn, Pyrénées-Orientales et Hérault)*, Éditions du temps, Nantes.

Vinet F. (2007). *Approche institutionnelle et contraintes locales de la gestion du risque. Recherches sur le risque inondation en Languedoc-Roussillon*, Thèse de doctorat, Université Paul Valéry-Montpellier III.

Vinet F., Defossez S., Rey T., Boissier L. (2012). « Le processus de production du risque « submersion marine » en zone littorale : l'exemple des territoires « Xynthia » », *Norois. Environnement, aménagement, société*, n° 222.

Vriend H.J. de, Capobianco M., Chesher T., De Swart H. de, Latteux B., Stive M.J.F. (1993). « Approaches to long-term modelling of coastal morphology : a review », *Coastal engineering*, *21*, n° 1-3, p. 225–269.

Walkden M.J.A., Hall J.W. (2005). « A predictive mesoscale model of the erosion and profile development of soft rock shores », *Coastal Engineering*, *52*, n° 6, p. 535-563.

Walkden M., Dickson M. (2008). « Equilibrium erosion of soft rock shores with a shallow or absent beach under increased sea level rise », *Marine Geology*, *251*, n° 1-2, p. 75–84.

Wang S., McGrath R., Hanafin J., Lynch P., Semmler T., Nolan P. (2008). « The impact of climate change on storm surges over Irish waters », *Ocean Modelling*, *25*, n° 1-2, p. 83–94.

Warrick J.A., Ritchie A.C., Adelman G., Adelman K., Limber P.W. (2016). « New techniques to measure cliff change from historical oblique aerial photographs and structure-from-motion photogrammetry », *Journal of Coastal Research*, *33*, n° 1, p. 39–55.

Weill P., Tessier B., Mouazé D., Bonnot-Courtois C., Norgeot C. (2012). « Shelly cheniers on a modern macrotidal flat (Mont-Saint-Michel bay, France)—Internal architecture revealed by ground-penetrating radar », *Sedimentary Geology*, *279*, p. 173–186.

Weiss M. (2018). « Approche transdisciplinaire de la vulnérabilité systémique aux risques côtiers : expérimentation avec des collectivités territoriales en Bretagne », Rapport de stage de fin d'études, Université de Bretagne occidentale-Brest.

Weissenberger S., Noblet M., Plante S., Chouinard O., Guillemot J., Aubé M., Meur-Ferec C., Michel-Guillou E., Gaye N., Kane A. (2016). « Changements climatiques, changements du littoral et évolution de la vulnérabilité côtière au fil du temps : comparaison de territoires français, canadien et sénégalais », *VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement*, *16*, n° 3.

Welle T., Birkmann J. (2015). « The World Risk Index–An approach to assess risk and vulnerability on a global scale », *Journal of Extreme Events*, *2*, n° 01, p. 1550003.

Wentworth C.K. (1922). « A scale of grade and class terms for clastic sediments », *The journal of geology*, *30*, n° 5, p. 377–392.

Westen C. van, Kappes M.S., Luna B.Q., Frigerio S., Glade T., Malet J.-P. (2014). « Medium-scale multi-hazard risk assessment of gravitational processes », dans *Mountain risks: From prediction to management and governance*, Springer, p. 201–231.

Westoby M.J., Brasington J., Glasser N.F., Hambrey M.J., Reynolds J.M. (2012). « 'Structure-from-Motion' photogrammetry : A low-cost, effective tool for geoscience applications », *Geomorphology*, *179*, p. 300–314.

Westoby M.J., Lim M., Hogg M., Pound M.J., Dunlop L., Woodward J. (2018). « Cost-effective erosion monitoring of coastal cliffs », *Coastal Engineering*, *138*, p. 152–164.

Whitford D.J., Thornton E.B. (1993). « Comparison of wind and wave forcing of longshore currents », *Continental Shelf Research*, *13*, n° 11, p. 1205–1218.

Wilcock P.R., Miller D.S., Shea R.H., Kerkin R.T. (1998). « Frequency of effective wave activity and the recession of coastal bluffs : Calvert Cliffs, Maryland », *Journal of Coastal Research*, p. 256–268.

Wilson R.C. (1997). « Normalizing rainfall/debris-flow thresholds along the US Pacific coast for long-term variations in precipitation climate », *Proceedings of the 1997 1st International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*, p. 32–43.

Winter M.G., Macgregor F., Shackman L. (2005). « Scottish road network landslides study », Scottish Executive.

Woodroffe C.D. (2002). *Coasts : form, process and evolution*, Cambridge University Press.

Wu S.-Y., Yarnal B., Fisher A. (2002). « Vulnerability of coastal communities to sea-level rise : a case study of Cape May County, New Jersey, USA », *Climate Research*, *22*, n° 3, p. 255–270.

Young A.P., Ashford S.A. (2006). « Application of airborne LIDAR for seacliff volumetric change and beach-sediment budget contributions », *Journal of Coastal Research*, p. 307-318.

Young A.P., Flick R.E., Gutierrez R., Guza R.T. (2009). « Comparison of short-term seacliff retreat measurement methods in Del Mar, California », *Geomorphology*, *112*, n° 3, p. 318-323.

Young A.P., Guza R.T., Flick R.E., O'Reilly W.C., Gutierrez R. (2009). « Rain, waves, and short-term evolution of composite seacliffs in southern California », *Marine Geology*, *267*, n° 1, p. 1-7.

Young A.P., Guza R.T., O'reilly W.C., Burvingt O., Flick R.E. (2016). « Observations of coastal cliff base waves, sand levels, and cliff top shaking », *Earth Surface Processes and Landforms*, *41*, n° 11, p. 1564–1573.

Young A.P., Olsen M.J., Driscoll N., Flick R.E., Gutierrez R., Guza R.T., Johnstone E., Kuester F. (2010). « Comparison of airborne and terrestrial lidar estimates of seacliff erosion in southern California », *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, *76*, n° 4, p. 421–427.

Zaccai E., Gemenne F., Decroly J.-M. (2012). *Controverses climatiques, sciences et politique*, Les Presses de Sciences Po.

Zaninetti J.-M. (2006). « L'urbanisation du littoral en France », *Population Avenir*, n° 2, p. 4–8.

Zhang K., Douglas B.C., Leatherman S.P. (2004). « Global warming and coastal erosion », *Climatic Change*, *64*, n° 1-2, p. 41.

LISTE DES FIGURES

Fig. 1 : Aléa, enjeux et risque d'érosion selon la définition classique 14
Fig. 2 : Unités tidales du littoral 15
Fig. 3 : Falaises meubles dites « mortes » et « vives » à Pléneuf-Val-André (22) 16
Fig. 4 : Recul d'une falaise et développement corrélatif d'une plateforme marine basale 17
Fig. 5 : Vue de profil des différentes géomorphologies de falaises meubles selon le degré de nettoyage de la couverture meuble héritée. 19
Fig. 6 : Évolution et recul d'une falaise meuble par le nettoyage des formations de versant 19
Fig. 7 : Exemples de falaises meubles dans le monde. 20
Fig. 8 : Enjeux menacés par le recul des falaises meubles dans le monde. 22
Fig. 9 : Blockhaus présent en sommet de falaise à Pléneuf-Val-André et basculé en avant des falaises meubles à Pouldreuzic 23
Fig. 10 : Photographies anciennes montrant la présence de masses glissées au pied de falaises meubles. 24
Fig. 11 : Gisement Paléolithique retrouvé sur l'estran et en avant des falaises meubles de la plage des Vallées, à Pléneuf-Val-André 24
Fig. 12 : Densification de l'urbanisation du sommet des falaises meubles de Trestrignel, à Perros-Guirec (22), entre le début et la moitié du 20e siècle 25
Fig. 13 : L'émergence des risques littoraux : dynamiques convergentes du trait de côte et de l'occupation du rivage 26
Fig. 14 : Rapprochement du sommet de falaise de la plage de la Mine d'Or, à Pénestin, avec les zones urbanisées, entre 1962 et 2016. 27
Fig. 15 : Enrochement mis en place au pied des falaises meubles de la Mine d'Or à Pénestin, dans les années 1970. 27
Fig. 16 : Localisation de la Bretagne et de ses départements. 28
Fig. 17 : Carte géologique simplifiée de la Bretagne 29
Fig. 18 : Reconstitution des variations du niveau marin en Atlantique Nord et pour l'est du Pacifique 30
Fig. 19 : Plages anciennes et dépôts périglaciaires fossilisés dans des falaises meubles en Bretagne. 30
Fig. 20 : Modèle simplifié de la formation d'une falaise meuble au cours d'un cycle glaciaire-interglaciaire 31
Fig. 21 : Typologie des falaises meubles bretonnes (Biville, 2004) et répartition sur le linéaire côtier breton. 32
Fig. 22 : Formations quaternaires constituant les falaises meubles bretonnes. 34
Fig. 23 : Origine et localisation du loess en Bretagne. 35
Fig. 24 : Formations meubles non-quaternaires composant les falaises bretonnes. 35
Fig. 25 : Normale des températures en Bretagne sur la période 1971-2000 36
Fig. 26 : Normale du cumul pluviométrique annuel en Bretagne sur la période 1971-2000 37
Fig. 27 : Direction et intensité moyennes des vents sur le littoral breton entre 2003 et 2013. 37
Fig. 28 : Rose des houles annuelles obtenues au large de la Bretagne pour la période 1979-2002 39
Fig. 29 : Amplitude du marnage en Bretagne, lors d'un coefficient de marée de 120 40
Fig. 30 : Déroulement du travail de recensement des falaises meubles et de sélection des sites d'étude. 42
Fig. 31 : Localisation des sites à falaises meubles identifiés en Bretagne lors de la première étape de repérage. 43
Fig. 32 : Sites non retenus car présentant une géomorphologie particulière non représentative des falaises meubles régionales. 44
Fig. 33 : Falaises de type RAV, V1 et V2 observées lors de la reconnaissance de terrain. 45
Fig. 34 : Localisation des sites retenus en Bretagne. 48
Fig. 35 : Vues horizontales et aériennes des six sites retenus. 49
Fig. 36 : Formes d'érosion observées lors de la reconnaissance de terrain. 51
Fig. 37 : Photographies illustrant la diversité de la nature et de la géomorphologie des falaises meubles bretonnes. 52
Fig. 38 : Diversité des enjeux menacés par l'érosion des falaises meubles en Bretagne. 54
Fig. 39 : Techniques de durcification du front de falaise utilisées en Bretagne. 55
Fig. 40 : Techniques de durcification de la base des falaises meubles. 56
Fig. 41 : Système d'évacuation des eaux continentales. 56
Fig. 42 : Gestion du versant entier combinant le traitement de l'érosion marine et subaérienne. 57
Fig. 43 : Sécurisation du sommet et du pied de falaise sans implantation d'ouvrages. 57
Fig. 44 : Localisation du site de Pléneuf-Val-André. 61
Fig. 45 : Vue aérienne de la plage des Vallées et, en arrière, de la grève de Nantois 61
Fig. 46 : Carte géomorphologique du site de Pléneuf-Val-André. 62
Fig. 47 : Coupes stratigraphiques et corrélation entre les séquences pédo-sédimentaires des falaises meubles de la grève de Nantois et de la plage des Vallées 63
Fig. 48 : Substratum affleurant sur le site de Pléneuf-Val-André. 64
Fig. 49 : Caractéristiques des vents et des houles au large de Pléneuf-Val-André. 65
Fig. 50 : Localisation du site de Plougrescant. 65
Fig. 51 : Anse de Pors-Hir vue depuis le Nord 66
Fig. 52 : Carte géomorphologique du site de Plougrescant. 66
Fig. 53 : Paysage à « tors » visible depuis l'anse de Pors-Hir. 67
Fig. 54 : Coupe géologique de la falaise de Pors-Hir 67
Fig. 55 : Caractéristiques des vents et des houles au large de Plougrescant. 68
Fig. 56 : Flux sédimentaires orientés vers le sud au large de l'anse de Pors-Hir. 69

Fig. 57 : Localisation du site de Trédrez-Locquémeau....69
Fig. 58 : Vue aérienne de la plage de Notigou....70
Fig. 59 : Carte géomorphologique du site de Trédrez-Locquémeau....70
Fig. 60 : Coupe géologique de la falaise de Notigou....71
Fig. 61 : Série volcano-sédimentaire (Formation de Lannion) constituant le substratum de la plage de Notigou....71
Fig. 62 : Formation du tombolo au sud-ouest de la plage de Notigou....72
Fig. 63 : Caractéristiques des vents et des houles au large de Trédrez-Locquémeau....72
Fig. 64 : Localisation du site de Locquirec....73
Fig. 65 : Vue aérienne de l'anse du Moulin de la Rive....74
Fig. 66 : Carte géomorphologique du site de Locquirec....74
Fig. 67 : Coupe géologique de la falaise du Moulin de la Rive....75
Fig. 68 : Caractéristiques des vents et des houles au large de Locquirec....76
Fig. 69 : Direction principale des houles, directions des houles réfléchies et de la dérive littorale résultante....76
Fig. 70 : Localisation du site de Telgruc-sur-Mer....77
Fig. 71 : Anse du Caon vue depuis l'Ouest....77
Fig. 72 : Carte géomorphologique du site de Telgruc-sur-Mer....78
Fig. 73 : Coupe géologique de la falaise de l'anse du Caon....78
Fig. 74 : Caractéristiques des vents et des houles au large de Telgruc-sur-Mer....79
Fig. 75 : Localisation du site de Plozévet....80
Fig. 76 : Grève de Poulbréhen vue depuis l'Ouest....80
Fig. 77 : Carte géomorphologique du site de Plozévet....81
Fig. 78 : Coupe géologique de la falaise de Poulbréhen....82
Fig. 79 : Caractéristiques des vents et des houles au large de Plozévet....83
Fig. 80 : Localisation du site de Plougrescant, du piézomètre ADES le plus proche et des limites des bassins versants....85
Fig. 81 : Précision temporelle des aléas d'érosion recensés....92
Fig. 82 : Précision spatiale des aléas d'érosion recensés....93
Fig. 83 : Répartition des aléas d'érosion de falaises meubles en Bretagne, par département....93
Fig. 84 : Nombre de phénomènes d'érosion de falaises meubles par unité morpho-sédimentaire depuis le début du 20e siècle....94
Fig. 85 : Nombre de phénomènes d'érosion de falaises meubles par commune, depuis le début du 20e siècle....95
Fig. 86 : Nombre de phénomènes d'érosion en fonction de la longueur de falaises meubles dans la commune....95
Fig. 87 : Répartition annuelle des phénomènes d'érosion de falaises meubles sur la période 1900-2018....96
Fig. 88 : Effectifs cumulés de 1960 à 2018 du nombre d'aléas d'érosion de falaises meubles recensés en Bretagne....97
Fig. 89 : Répartition annuelle des phénomènes d'érosion sur la période 1960-2018 et identification des événements morphogènes.97
Fig. 90 : Répartition mensuelle des phénomènes d'érosion recensés depuis le début du 20e siècle et mise en relation avec le cumul mensuel des précipitations....98
Fig. 91 : Fréquences cumulées des phénomènes d'érosion de falaises meubles en fonction des coefficients de marée et de la typologie des falaises meubles....100
Fig. 92 : Fréquences cumulées des phénomènes d'érosion de falaises meubles en fonction des vitesses de vent....101
Fig. 93 : Fréquences cumulées des phénomènes d'érosion de falaises meubles en fonction du cumul de précipitations sur deux jours.102
Fig. 94 : Facteurs à l'origine des phénomènes d'érosion de falaises meubles....103
Fig. 95 : Facteurs à l'origine des phénomènes d'érosion des falaises meubles selon leur typologie....104
Fig. 96 : Mouvements de terrain s'étant produits sur des falaises mortes à la suite de fortes précipitations....104
Fig. 97 : Photographie aérienne de 1951 de l'anse du Moulin de la Rive, à Locquirec, illustrant la difficulté d'identifier le pied de falaise en raison du masquage par son ombre portée....112
Fig. 98 : Principe de calcul des taux de recul basé sur la surface perdue....113
Fig. 99 : Exemple de problème de distorsion créé par l'angle de prise de vue des photographies....114
Fig. 100 : Nombre annuel de coefficients de marée supérieurs ou égaux à 100 entre 1950 et 2015....116
Fig. 101 : Écarts du cumul annuel des précipitations à la moyenne 1950-2015 à la station Météo-France de Lanvéoc....117
Fig. 102 : Nombre annuel de tempêtes entre 1950 et 2015 en Bretagne....118
Fig. 103 : Photographies de la falaise de la plage des Vallées prises dans les années 1930 et les années 1960 montrant la présence de masses glissées et de zones de glissement devant le camping....119
Fig. 104 : Évolution du sommet de falaise de la plage des Vallées et de la grève de Nantois entre 1948 et 2015....120
Fig. 105 : Taux de recul moyen des falaises de Pléneuf-Val-André et chroniques des conditions météo-marines entre 1950 et 2015121
Fig. 106 : Évolution des taux de recul des falaises de la plage des Vallées et de la grève de Nantois mise en relation avec la chronique des aménagements entre 1950 et 2015....122
Fig. 107 : Différence de largeur du cordon de galets entre la plage des Vallées et la grève de Nantois....122
Fig. 108 : Évolution de l'aménagement en sommet de falaise de la plage des Vallées....123
Fig. 109 : Photographies prises le 28/12/2013 et le 11/04/2017 montrant une progression vers l'arrière de la niche d'arrachement de la zone de glissement initiée à l'ouest de la pointe rocheuse de Nantois....124
Fig. 110 : Évolution du sommet de falaise de l'anse de Pors-Hir et taux de recul entre 1952 et 2015....124
Fig. 111 : Taux de recul moyen des falaises de Pors-Hir et chroniques des conditions météo-marines entre 1950 et 2015....125
Fig. 112 : Photographie ancienne datant d'avant la construction de la grande cale et témoignant de la présence d'un épais cordon de galets sur l'ensemble du linéaire de la plage de Pors-Hir....126
Fig. 113 : Disparition des galets de l'anse de Pors-Hir....126
Fig. 114 : Évolution des taux de recul des falaises de l'anse de Pors-Hir mise en relation avec la chronique des aménagements..127
Fig. 115 : Ouvrages bétonnés présents dans l'anse de Pors-Hir....128

Fig. 116 : Destruction du mur de soutènement à Pors-Hir (29/07/2003). 128
Fig. 117 : Démantèlement du mur de soutènement à Pors-Hir en 2007. 129
Fig. 118 : Évolution morphologique de l'anse de Pors-Hir 129
Fig. 119 : Coulées boueuses observées le long de la falaise de Notigou 130
Fig. 120 : Évolution du sommet de falaise de la plage de Notigou et taux de recul entre 1951 et 2015. 130
Fig. 121 : Taux de recul moyen des falaises de Notigou et chroniques des conditions météo-marines entre 1950 et 2015 131
Fig. 122 : Urbanisation du sommet de falaise à Notigou entre 1951 et 2011. 132
Fig. 123 : Évolution de la vitesse de recul des falaises et de l'artificialisation du versant drainant la falaise de Notigou entre 1951 et 2015. 132
Fig. 124 : Évolution du sommet de falaise de l'anse du Moulin de la Rive de 1951 à 2015. 133
Fig. 125 : Taux de recul moyen des falaises du Moulin de la Rive et chroniques des conditions météo-marines entre 1950 et 2015134
Fig. 126 : Évolution des taux de recul des secteurs de falaise du Moulin de la Rive mise en relation avec la chronique des aménagements. 135
Fig. 127 : Urbanisation du sommet de falaise du Moulin de la Rive entre 1951 et 2012. 135
Fig. 128 : Succession d'ouvrages de protection mis en place pour stopper le recul des falaises du Moulin de la Rive. 136
Fig. 129 : Évolution du sommet de falaise de l'anse du Caon et taux de recul entre 1951 et 2015. 136
Fig. 130 : Taux de recul moyen des falaises de l'anse du Caon et chroniques des conditions météo-marines entre 1950 et 2015 . 137
Fig. 131 : Glissement le 2 février 2014 entrainant un recul de 4 m du sommet de falaise et affectant le sentier côtier. 137
Fig. 132 : Aménagement du versant sur le site de Telgruc-sur-Mer entre 1951 et 2012. 138
Fig. 133 : Évolution du sommet de falaise de la grève de Poulbréhen et taux de recul entre 1977 et 2015. 138
Fig. 134 : Taux de recul moyen des falaises de Poulbréhen et chroniques des conditions météo-marines entre 1975 et 2015 139
Fig. 135 : Effondrement de falaise recoupant le sentier côtier à Poulbréhen suite aux tempêtes de février 2014. 140
Fig. 136 : Photographie aérienne de 2015 de la plage de Notigou, à Trédrez-Locquémeau, illustrant la difficulté d'identifier le sommet de falaise en raison du masquage par la végétation. 140
Fig. 137 : Schéma de principe de la photogrammétrie 148
Fig. 138 : Chronologie des levés réalisés sur les sites d'étude entre mars 2017 et avril 2019. 149
Fig. 139 : Organigramme du protocole d'acquisition. 150
Fig. 140 : Configuration des levés topographiques au tachéomètre sur le site de Plougrescant. 151
Fig. 141 : Configuration des levés photographiques et topographiques supplémentaires sur le site de Plozévet. 152
Fig. 142 : Outils utilisés pour les levés photogrammétriques. 152
Fig. 143 : Organigramme de la chaine de traitement des données. 154
Fig. 144 : Exploitation des photographies sous le logiciel PhotoScan : création de masque et pointage d'un repère 155
Fig. 145 : Classification et filtrage des nuages de points sous CloudCompare (exemple des falaises de Plougrescant). 156
Fig. 146 : Fenêtre de l'outil Volume du logiciel CloudCompare, généré pour la comparaison des falaises meubles de Nantois pour les levés acquis le 20/10/2017 et le 28/05/2018. 157
Fig. 147 : Zones d'accumulation et d'ablation d'une portion de falaise de la plage des Vallées apparaissant entre les levés du 20/10/2017 et 28/05/2018. 158
Fig. 148 : Représentation schématique du setup et du runup 159
Fig. 149 : Sonde piézométrique installée en sommet de falaise sur le site de Locquirec 160
Fig. 150 : Volumes cumulés de matériaux érodés sur les sites d'étude entre mars 2017 et avril 2019. 165
Fig. 151 : Volume de matériaux libérés par l'érosion et taux d'ablation des falaises de la plage des Vallées et de la grève de Nantois entre 2017 et 2019. 166
Fig. 152 : Évolution du profil de la plage des Vallées entre 2017 et 2019. 166
Fig. 153 : Volume de matériaux libérés par l'érosion et taux d'ablation des falaises de la plage de Pors-Hir entre 2017 et 2019. .. 167
Fig. 154 : Évolution des profils de plage situés au nord et au sud de la plage de Pors-Hir entre 2017 et 2019. 167
Fig. 155 : Démaigrissement du haut de plage à Pors-Hir, à l'automne 2017, visible par le déchaussement des ouvrages. 168
Fig. 156 : Volume de matériaux libérés par l'érosion et taux d'ablation des falaises de Notigou entre 2017 et 2019. 169
Fig. 157 : Évolution des profils de plage situés au droit de la zone de glissement, à Notigou, entre 2017 et 2019. 169
Fig. 158 : Volume de matériaux libérés par l'érosion et taux d'ablation des falaises du Moulin de la Rive entre 2017 et 2019. 170
Fig. 159 : Évolution des profils de plage de l'anse du Moulin de la Rive entre 2017 et 2019. 170
Fig. 160 : Volume de matériaux libérés par l'érosion et taux d'ablation des falaises de l'anse du Caon entre 2017 et 2019. 171
Fig. 161 : Évolution du profil de plage de l'anse du Caon entre 2017 et 2019. 171
Fig. 162 : Volume de matériaux libérés par l'érosion et taux d'ablation des falaises de la grève de Poulbréhen entre 2017 et 2019.172
Fig. 163 : Évolution des profils de plage et de la berme à Poulbréhen entre 2017 et 2018. 173
Fig. 164 : Schéma conceptuel du comportement d'une plage en période estivale et en période hivernale 174
Fig. 165 : Répartition saisonnière des volumes de débris produits sur les sites d'étude entre 2017 et 2019. 175
Fig. 166 : Schéma conceptuel des différents processus d'altération et d'érosion affectant les falaises meubles soumises aux forçages subaériens et marins 176
Fig. 167 : Évolution du front de falaise de la plage des Vallées durant l'hiver 2017-2018. 176
Fig. 168 : Mouvements de masse observés en avril 2018 au niveau des falaises de la plage des Vallées. 177
Fig. 169 : Formes d'érosion témoignant de l'intervention d'actions subaériennes. 178
Fig. 170 : Précipitations journalières et coefficients de marée en mars et avril 2018. 179
Fig. 171 : Évolution du front de falaise au niveau de la grève de Nantois durant l'hiver 2017-2018. 180
Fig. 172 : Processus subaériens conduisant à l'ablation du front de falaise sur le site de Nantois. 180
Fig. 173 : Érosion du tablier d'éboulis au niveau de la falaise meuble de Nantois issu d'un écroulement produit en juillet 2015 .. 181
Fig. 174 : Taux d'ablation sur le site de Pors-Hir et présence d'un platier rocheux au sud du site. 181

Fig. 175 : Évolution du front de falaise de l'anse de Pors-Hir durant l'hiver 2017-2018. 182
Fig. 176 : Effondrement de falaise favorisé par la présence d'un sous-cavage et d'entonnoirs de suffosion. 182
Fig. 177 : Érosion du tablier d'éboulis à Pors-Hir durant l'été 2018 et notamment lors des grandes marées de septembre 2018.. 183
Fig. 178 : Incision d'un pan de falaise due au déversement d'eau venant d'une canalisation située en sommet 183
Fig. 179 : Précipitations journalières et coefficients de marée en janvier 2018. 184
Fig. 180 : Chute d'un arbre à Pors-Hir provoquant l'ablation du sommet de falaise en janvier 2018. 184
Fig. 181 : Évolution du front de falaise à Notigou durant l'hiver 2017-2018. 185
Fig. 182 : Glissement réactivé suite à l'érosion basale de la falaise de Notigou durant l'hiver 2017-2018. 186
Fig. 183 : Résurgence d'eau et ruissellement visibles dans la partie inférieure de la falaise. 186
Fig. 184 : Évolution du front de falaise de l'anse du Moulin de la Rive durant l'hiver 2017-2018. 187
Fig. 185 : Géomorphologie des falaises du site de Locquirec. 187
Fig. 186 : Chroniques des précipitations et de la hauteur relative de la nappe phréatique entre le 28/10/2018 et le 01/11/2018. 188
Fig. 187 : Glissements affectant les falaises situées à l'ouest du site et recouvertes par du remblai. 188
Fig. 188 : Évolution du front de falaise de l'anse du Caon durant l'hiver 2017-2018. 189
Fig. 189 : Formes linéaires créées par ruissellement sur les formations meubles moins perméables. 189
Fig. 190 : Ablation du milieu de falaise, produite entre le 26 octobre 2018 et le 12 avril 2019, sur le site de Telgruc-sur-Mer. 190
Fig. 191 : Amaigrissement du haut de plage durant l'hiver 2017-2018 dans le secteur nord du site de Plozévet. 191
Fig. 192 : Évolution du front de falaise à Poulbréhen durant l'hiver 2017-2018. 191
Fig. 193 : Glissements banc sur banc produits entre le 20 novembre 2017 et le 2 mai 2018 à Plozévet. 192
Fig. 194 : Glissement des dépôts quaternaires sur les micaschistes et conditions environnementales en mars 2018. 192
Fig. 195 : Évolution des falaises meubles par la dominance des actions marines 194
Fig. 196 : Évolution des falaises meubles par l'action conjuguée des forçages marins et subaériens 194
Fig. 197 : Évolution des falaises meubles par la dominance des actions subaériennes 194
Fig. 198 : Précipitations annuelles enregistrées à la station Météo-France de Ploumanac'h. 197
Fig. 199 : Schéma conceptuel du mode d'évolution d'une falaise meuble 200
Fig. 200 : Déroulement du travail de cartographie de l'aléa et d'identification des enjeux. 207
Fig. 201 : Observations géologiques réalisées sur les sites d'étude. 209
Fig. 202 : Identification de l'étendue des formations meubles sur les sites d'étude. 209
Fig. 203 : Identification des caractéristiques des processus physiques d'origine marine. 210
Fig. 204 : Écoulements préférentiels des eaux continentales à la plage des Vallées (Pléneuf-Val-André) 210
Fig. 205 : Extrait de la cartographie des formes d'érosion visibles sur la paroi des falaises à Plougrescant. 211
Fig. 206 : Zones à risque d'érosion de falaises meubles sur la plage des Vallées-Nantois (Pléneuf-Val-André). 213
Fig. 207 : Enjeux menacés par l'érosion des formations meubles à Pléneuf-Val-André. 213
Fig. 208 : Zone à risque d'érosion de falaises meubles à Pors-Hir (Plougrescant). 214
Fig. 209 : Enjeux menacés à Pors-Hir. 214
Fig. 210 : Zone à risque d'érosion de falaises meubles du Moulin de la Rive (Locquirec). 215
Fig. 211 : Enjeux menacés au Moulin de la Rive. 215
Fig. 212 : Zone à risque d'érosion de falaises meubles de la plage de Notigou. 216
Fig. 213 : Routes et résidences menacées à Notigou 216
Fig. 214 : Zone à risque d'érosion de falaises meubles de l'anse du Caon. 217
Fig. 215 : Enjeux menacés à l'anse du Caon. 217
Fig. 216 : Zone à risque d'érosion de falaises meubles à Poulbréhen. 218
Fig. 217 : Érosion du sentier côtier de Poulbréhen à Plozévet. 218
Fig. 218 : Répartition individuelle des enjeux menacés sur chaque site d'étude et répartition globale sur les six sites. 219
Fig. 219 : Impact des aménagements sur l'érosion des falaises. 221
Fig. 220 : Ruissellement, formes d'érosion et canalisations non raccordées observés sur le site de Trédrez-Locquémeau. 222
Fig. 221 : Étapes d'analyse du risque à partir d'indicateurs. 229
Fig. 222 : Carroyage recouvrant l'étendue des formations meubles sur le site de Notigou, à Trédrez-Locquémeau. 230
Fig. 223 : Intégration des surfaces perdues contenues dans le même carreau pour calculer un taux de recul moyen par maille. 231
Fig. 224 : Effets des méthodes d'agrégation sur la représentation cartographique des indices sur le site de Notigou 235
Fig. 225 : Matrice d'évaluation du risque selon les valeurs des indices d'Aléa et d'Enjeux. 237
Fig. 226 : Variabilité spatiale des indices d'enjeux, d'aléa et du risque d'érosion sur le site des Vallées-Nantois 238
Fig. 227 : Variabilité spatiale des indices d'enjeux, d'aléa et du risque d'érosion sur le site de Plougrescant. 239
Fig. 228 : Variabilité spatiale des indices d'enjeux, d'aléa et du risque d'érosion sur le site de Notigou. 239
Fig. 229 : Variabilité spatiale des indices d'enjeux, d'aléa et du risque d'érosion sur le site du Moulin de la Rive, à Locquirec. 240
Fig. 230 : Variabilité spatiale des indices d'enjeux, d'aléa et du risque d'érosion sur le site de l'anse du Caon, à Telgruc-sur-Mer. 241
Fig. 231 : Variabilité spatiale des indices d'enjeux, d'aléa et du risque d'érosion sur le site de Poulbréhen, à Plozévet. 242
Fig. 232 : Profils « radars » des enjeux pour les six sites d'étude. 243
Fig. 233 : Niveaux de risque des sites d'étude identifiés dans la matrice Aléa vs Enjeux. 244
Fig. 234 : Les principaux instruments de gestion des risques côtiers 253
Fig. 235 : Les quatre grandes modalités de gestion 254
Fig. 236 : Représentation de la vulnérabilité systémique 256
Fig. 237 : Enrochement d'urgence réalisé à Pors-Hir, à la veille des grandes marées du 2 février 2014. 262
Fig. 238 : Succession d'ouvrages de défense contre la mer installés au Moulin de la Rive, à Locquirec. 262
Fig. 239 : Travaux successifs d'ouvrages côtiers réalisés sur le site du Moulin de la Rive, à Locquirec, entre 1950 et 2018. 263
Fig. 240 : Travaux de restauration des végétations des hauts de falaises par le Conservatoire du littoral 264

Fig. 241 : Enrochements détruits à la suite des tempêtes de février 2014 et érosion des terrains en arrière, sur le site de Pors-Hir, à Plougrescant et au Moulin de la Rive, à Locquirec 268
Fig. 242 : Ouvrages de défense contre la mer endommagés suite au recul en arrière des falaises meubles par les eaux de ruissellement et d'infiltration. 268
Fig. 243 : Érosion exacerbée à l'extrémité du mur de protection ("effet de bout") au Moulin de la Rive, à Locquirec. 268
Fig. 244 : Dispositifs de confortement de falaises meubles. 270
Fig. 245 : Buse d'évacuation des eaux, visible sur le site de Pors-Hir et incisant la falaise par le déversement des eaux. 271
Fig. 246 : Extraits des cartes de zonage des PLU de la commune de Plozévet et de la commune de Trédrez-Locquémeau 273
Fig. 247 : Extrait du DICRIM de Pléneuf-Val-André sur les consignes de sécurité en cas de mouvements de terrain. 274
Fig. 248 : Panneaux signalétiques installés pour prévenir du risque d'instabilité de falaise 275
Fig. 249 : Balisage des zones devenues dangereuses pour les promeneurs à Plozévet et à Telgruc-sur-Mer 277
Fig. 250 : Tracé de l'indice de vulnérabilité dans un diagramme triangulaire. 279
Fig. 251 : Représentation des niveaux de vulnérabilité des sites d'étude dans le diagramme triangulaire. 280
Fig. 252 : Évolution du nombre de répondants au questionnaire durant les jours ouvrés entre le 29 janvier et le 20 mars 2019. . 287
Fig. 253 : Proportion de répondants par département comparée à la proportion de linéaire côtier à falaises meubles. 288
Fig. 254 : Proportion et taux de réponse des répondants par institution. 288
Fig. 255 : Proportion des répondants par fonction. 289
Fig. 256 : Proportion des répondants par catégorie d'âge. 289
Fig. 257 : Proportion des répondants selon le nombre d'années dans le poste. 290
Fig. 258 : Écarts-types de la notation des besoins et des outils de connaissance et de méthodologie pour chaque institution. 291
Fig. 259 : Priorisation des besoins exprimés par les communes (53 répondants). 292
Fig. 260 : Priorisation des besoins exprimés par les EPCI (23 répondants). 293
Fig. 261 : Priorisation des besoins exprimés par les DDTM (9 répondants) 294
Fig. 262 : Priorisation des besoins exprimés par les préfectures (4 répondants). 294
Fig. 263 : Priorisation des besoins exprimés par les Conseils départementaux (3 répondants). 295
Fig. 264 : Priorisation des besoins exprimés par la DREAL (2 répondants). 296
Fig. 265 : Priorisation des outils de gestion des risques par les communes (53 répondants). 297
Fig. 266 : Priorisation des outils de gestion des risques par les EPCI (23 répondants). 298
Fig. 267 : Priorisation des outils de gestion des risques par les DDTM (9 répondants). 299
Fig. 268 : Priorisation des outils de gestion des risques par les préfectures (4 répondants). 299
Fig. 269 : Priorisation des outils de gestion des risques par les Conseils départementaux (3 répondants). 300
Fig. 270 : Priorisation des outils de gestion des risques par la DREAL (2 répondants) 300
Fig. 271 : Résultats de la priorisation des besoins et outils en matière de gestion des risques littoraux exprimés par les gestionnaires québécois 303
Fig. 272 : Localisation des communes mentionnées (Bretagne). 304
Fig. 273 : Diversité de la disposition et des dimensions des enrochements installés en avant de falaises meubles. 305
Fig. 274 : Restauration du couvert végétal et gestion de la fréquentation en sommet de falaise meuble à Lorient 306
Fig. 275 : Exemple de planning prévionnel pour le projet de confortement des falaises meubles au Moulin de la Rive à Locquirec309
Fig. 276 : Mise en danger des citoyens à proximité de portions de falaises meubles instables à Pléneuf-Val-André. 310
Fig. 277 : Types de disposition de la couverture meuble par rapport au substratum sur les falaises « simples » 368
Fig. 278 : Types de dispositfigon de la couverture meuble par rapport au substratum sur les falaises meubles « composites » 369

LISTE DES TABLEAUX

Tab. 1 - Tableau de sélection des sites 47
Tab. 2 - Caractéristiques physiques et géographiques des sites retenus. 48
Tab. 3 : Caractéristiques climatiques des sites d'étude. 83
Tab. 4 : Caractéristiques hydrodynamiques des sites d'étude. 84
Tab. 5 : Caractéristiques des piézomètres du réseau ADES, situés les plus proches des sites d'étude. 84
Tab. 6 : Échelle de vitesse pour les mouvements gravitaires 92
Tab. 7 : Proportion régionale des falaises simples et composites mise en relation avec les pourcentages d'aléas recensés. 96
Tab. 8 : Récapitulatif des conditions environnementales des trois événements de forçage les plus morphogènes depuis le début du 20e siècle. 99
Tab. 9 : Qualité des photographies aériennes utilisées pour chacun des sites d'étude et marges d'erreur sur les sommets de falaise numérisés. 115
Tab. 10 : Taux de recul entre 1975 et 2015 des falaises du site de Pléneuf-Val-André. 119
Tab. 11 : Taux de recul des falaises de l'anse du Moulin de la Rive entre 1951 et 2015. 133
Tab. 12 : Récapitulatif des taux de recul à moyen terme obtenus sur chaque site d'étude. 142
Tab. 13 : Exemples de taux de recul historiques de falaises meubles situées dans des zones froides à tempérées. 145
Tab. 14 : Nombre de points de calage installés sur chaque site. 149
Tab. 15 : Stations de base les plus proches des sites d'étude utilisées pour le post-traitement des données acquises au GPS portable. 153
Tab. 16 : Pourcentage de végétation recouvrant les fronts de falaise sur les sites d'étude. 156
Tab. 17 : Niveaux d'eau associés à chaque site d'étude 159
Tab. 18 : Caractéristiques des stations météorologiques installées sur les sites d'étude. 160
Tab. 19 : Erreur moyenne de positionnement liée à la mesure au tachéomètre Leica et au GPS Trimble. 161
Tab. 20 : Zones « fixes » utilisées sur chaque site d'étude pour calculer la marge d'erreur relative. 162
Tab. 21 : Noms des différentiels, volumes de débris et taux d'ablation sur les sites d'étude, entre 2017 et 2019. 164
Tab. 22 : Répartition de l'érosion entre les périodes estivales et hivernales sur les sites d'étude entre 2017 et 2019. 175
Tab. 23 : Comparaison des taux annuels de recul des falaises sur les sites d'étude obtenus par comparaison de cartes anciennes (Morisseau, 2018), par comparaison de photographies aériennes verticales et par photogrammétrie 198
Tab. 24 : Caractéristiques physiques et géographiques des sites d'étude. 208
Tab. 25 : Proportions comparées des enjeux menacés par le recul des falaises meubles en Bretagne au travers de deux approches de quantification. 224
Tab. 26 : Liste des indicateurs d'enjeux utilisés pour évaluer le risque d'érosion des falaises meubles sur les sites d'étude. 232
Tab. 27 : Étendue des valeurs obtenues pour chaque méthode d'agrégation testée sur l'ensemble des mailles des six sites d'étude. 234
Tab. 28 : Valeur moyenne des indices d'enjeux, d'aléa et de risque sur les six sites d'étude. 243
Tab. 29 : Indicateurs utilisés pour décrire les cinq domaines de la gestion du risque d'érosion et sources des données. 258
Tab. 30 : Valeurs de l'indice de Gestion global obtenues pour chaque méthode d'agrégation sur les six sites d'étude. 259
Tab. 31 : Valeurs des indices, sous-indices et indicateurs de gestion sur les six communes. 261
Tab. 32 : Études de diagnostic réalisées sur les falaises meubles du Moulin de la Rive, à Locquirec, entre 2008 et 2015. 265
Tab. 33 : Structure porteuse de la compétence GEMAPI pour les six communes. 267
Tab. 34 : Exemples de solutions préconisées par des bureaux d'études et coûts associés sur les sites à falaises meubles de Nantois, du Moulin de la Rive et de l'anse du Caon. 270
Tab. 35 : Points forts et points faibles de la gestion du risque d'érosion des falaises meubles, mis en évidence sur les sites d'étude à partir des indicateurs. 278
Tab. 36 : Récapitulatif de l'état des instruments de gestion des risques côtiers sur les six communes. 279
Tab. 37 : Récapitulatif des indices d'Aléa, d'Enjeux et de Gestion obtenus sur les six sites d'étude. 280
Tab. 38 : Questions et liste des propositions dans la partie 1 du questionnaire « Informations sur le répondant ». 285
Tab. 39 : Question et liste des besoins à noter dans la partie 2 du questionnaire « Besoins liés au risque d'érosion des falaises meubles ». 286
Tab. 40 : Questions et listes des outils à noter dans la partie 3 du questionnaire « Outils d'adaptation au risque d'érosion des falaises meubles ». 286
Tab. 41 : Préconisations pour la gestion du risque d'érosion des falaises meubles. 313

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS 6

INTRODUCTION GÉNÉRALE 8

CONTEXTE SCIENTIFIQUE ET CHOIX DE LA ZONE D'ETUDE 8
DEFINITION DES GRANDES PROBLEMATIQUES 9
APPROCHES METHODOLOGIQUES 10
COLLABORATIONS SCIENTIFIQUES ET SOUTIENS FINANCIERS ET TECHNIQUES 11
STRUCTURATION DE LA THESE 11

PARTIE 1 – CONTEXTE SCIENTIFIQUE ET PRÉSENTATION DU CADRE RÉGIONAL ET DES SITES D'ÉTUDE 13

CHAPITRE 1 : État de l'art sur le risque d'érosion des falaises meubles 14

1.1- NOTIONS DE RISQUE ET DE VULNERABILITE 14
1.2- LES LITTORAUX A FALAISE ET CARACTERISTIQUES DES FALAISES MEUBLES 15
1.2.1- Le littoral 15
1.2.2- Les côtes à falaises 16
1.2.2.1- Les falaises rocheuses 17
1.2.2.2- Les spécificités des falaises meubles 17
1.3- LA PROBLEMATIQUE DU RISQUE D'EROSION DES FALAISES MEUBLES EN BRETAGNE 23
1.3.1- Les témoins du recul des falaises meubles en Bretagne 23
1.3.2- Augmentation des enjeux 25
1.3.3- L'émergence du risque 26

CHAPITRE 2 : Présentation du cadre régional de la Bretagne 28

2.1- CONTEXTE GEOGRAPHIQUE 28
2.2- HISTOIRE GEOLOGIQUE 29
2.3- CONTEXTE GEOMORPHOLOGIQUE 32
2.4- CONTEXTE METEOROLOGIQUE ET CLIMATIQUE 36
2.5- CONTEXTE HYDRODYNAMIQUE 38
2.5.1- Caractéristiques des houles sur le linéaire breton 38
2.5.2- Conditions marégraphiques 39
CONCLUSION INTERMEDIAIRE 40

CHAPITRE 3 : Bilan régional préliminaire et sélection des sites d'étude 41

3.1- METHODOLOGIE DE SELECTION DES SITES 41
3.1.1- Les grandes étapes de la méthodologie de sélection 41
3.1.2- Inventaire des falaises meubles en Bretagne 42
3.1.3- Sélection des sites à prospecter 43
3.1.4- Reconnaissance de terrain : vers la définition d'une typologie des falaises meubles 44
3.1.4.1- Méthodologie adoptée sur le terrain 44
3.1.4.2- Typologie de falaises meubles 45
3.1.5- Sélection des sites expérimentaux 46
3.2- RESULTATS DU BILAN REGIONAL 48
3.2.1- Sites retenus 48
3.2.2- Création d'une base de données spatialisées et inventaire des formes d'érosion 50
3.2.3- Mise en évidence de la diversité des falaises meubles, des enjeux menacés et de la gestion 51
3.3- DISCUSSION 58
CONCLUSION INTERMEDIAIRE 59

CHAPITRE 4 : Cadre morphologique et météo-marin des sites d'étude 60

4.1- LA PLAGE DES VALLEES ET LA GREVE DE NANTOIS A PLENEUF-VAL-ANDRE 60
4.2- L'ANSE DE PORS-HIR A PLOUGRESCANT 65
4.3- LA PLAGE DE NOTIGOU A TREDREZ-LOCQUEMEAU 69
4.4- L'ANSE DU MOULIN DE LA RIVE A LOCQUIREC 73
4.5- L'ANSE DU CAON A TELGRUC-SUR-MER 76

4.6- LA GREVE DE POULBREHEN A PLOZEVET 79
4.7- SYNTHESE ET DISCUSSION 83
CONCLUSION INTERMEDIAIRE 85

Conclusion de la Première Partie 86

PARTIE 2 – QUANTIFICATION DU RECUL DES FALAISES MEUBLES SUR DES ÉCHELLES SPATIO-TEMPORELLES IMBRIQUÉES : VERS UNE DÉTERMINATION DES FACTEURS D'ÉROSION .. 87

CHAPITRE 5 : Analyse des épisodes de recul en Bretagne aux 20ème et 21ème siècles 88

5.1- RECENSEMENT DES PHENOMENES D'EROSION 89
5.1.1- Recueil de données existantes et d'aléas passés non répertoriés 89
5.1.2- Tri et contrôle des données existantes 89
5.1.3- Données environnementales : les agents de forçage 90
5.1.4- Définition des seuils déclenchants 91
5.2- ANALYSE DE LA LOCALISATION SPATIALE ET TEMPORELLE DE L'EROSION DES FALAISES MEUBLES DEPUIS LE DEBUT DU 20E SIECLE 92
5.2.1- Précision temporelle et spatiale des données 92
5.2.2- Répartition spatiale des aléas 93
5.2.3- Répartition temporelle des aléas 96
5.3- ANALYSE DIACHRONIQUE DES PHENOMENES D'EROSION RECENSES DEPUIS LA SECONDE MOITIE DU 20E SIECLE ET DES CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES 99
5.3.1- Détermination des seuils de déclenchement de l'aléa 100
5.3.1.1- Coefficient de marée 100
5.3.1.2-Vitesse de vent 100
5.3.1.3- Précipitations 101
5.3.2- Identification des facteurs déclenchants dans l'érosion des falaises meubles 102
5.4- DISCUSSION 104
CONCLUSION INTERMEDIAIRE 109

CHAPITRE 6 : Quantification des taux de recul à l'échelle historique récente (1950-2015) 110

6.1- METHODOLOGIE 111
6.1.1- Méthode de quantification du recul pluri-décennal 111
6.1.1.1- Le processus de géoréférencement 112
6.1.1.2- La numérisation du trait de côte 112
6.1.1.3- Calcul des surfaces perdues et des taux de recul 112
6.1.1.4- Quantification de la marge d'erreur 113
6.1.2- Méthode d'identification des forçages naturels et anthropiques 116
6.2- ANALYSE DES TAUX DE RECUL PLURI-DECENNAUX SUR LES SITES D'ETUDE 119
6.2.1- Pléneuf-Val-André 119
6.2.2- Plougrescant 124
6.2.3- Trédrez-Locquémeau 130
6.2.4- Locquirec 132
6.2.5- Telgruc-sur-Mer 136
6.2.6- Plozévet 138
6.3- DISCUSSION 140
CONCLUSION INTERMEDIAIRE 146

CHAPITRE 7 : Analyse du recul à court terme par suivi photogrammétrique 147

7.1- METHODOLOGIE 147
7.1.1- Principe de la photogrammétrie 148
7.1.2- Levé photogrammétrique 149
7.1.2.1- Instrumentation des sites 149
7.1.2.2- Protocole d'acquisition 150
7.1.2.3- Optimisation du protocole d'acquisition 151
7.1.2.4- Matériel utilisé 152
7.1.3- Traitement des données 153
7.1.3.1- Correction des données topographiques 154
7.1.3.2- La création du nuage de points et son géoréférencement 154
7.1.3.3- Le nettoyage et la classification du nuage de points 155
7.1.3.4- Alignement des nuages et calcul des volumes érodés 156
7.1.4- Identification des facteurs impliqués dans l'érosion 158

7.2- RESULTATS 161
7.2.1- Estimation de la marge d'erreur *161*
7.2.1.1- L'erreur de positionnement 161
7.2.1.2- L'erreur de recalage 162
7.2.1.3- L'erreur sur les différentiels 162
7.2.2- Volumes produits et répartition temporelle de l'érosion *163*
7.2.2.1- Pléneuf-Val-André 165
7.2.2.2- Plougrescant 167
7.2.2.3- Trédrez-Locquémeau 168
7.2.2.4- Locquirec 170
7.2.2.5- Telgruc-sur-Mer 171
7.2.2.6- Plozévet 172
7.2.2.7- Bilan de la répartition temporelle de l'érosion 173
7.2.3- Répartition spatiale de l'érosion sur les sites d'étude *175*
7.2.3.1- Les Vallées (Pléneuf-Val-André) 176
7.2.3.2- Nantois (Pléneuf-Val-André) 179
7.2.3.3- Plougrescant 181
7.2.3.4- Trédrez-Locquémeau 185
7.2.3.5- Locquirec 186
7.2.3.6- Telgruc-sur-Mer 189
7.2.3.7- Plozévet 190
7.2.3.8- Bilan sur la répartition spatiale de l'érosion 193
7.3- COMPARAISON DES TAUX D'ABLATION AVEC LES VITESSES DE RECUL DU HAUT DE FALAISE 195
7.4- DISCUSSION 199
CONCLUSION INTERMEDIAIRE 201

Conclusion de la Deuxième Partie 202

PARTIE 3 – ANALYSE DES ENJEUX MENACÉS : VERS LA CARTOGRAPHIE DU RISQUE 203

CHAPITRE 8 : Apport de la cartographie géomorphologique dans l'identification des zones à risque et des enjeux menacés par l'érosion des falaises meubles 204

8.1- LES METHODES EXISTANTES POUR LA CARACTERISATION DU RISQUE D'EROSION 204
8.1.1- Cartographie de l'aléa érosion selon la méthode classique *204*
8.1.2- L'identification des enjeux *205*
8.1.3- Zonage et évaluation du risque *206*
8.2- UNE NOUVELLE CARACTERISATION ADAPTEE AUX LITTORAUX A FALAISES MEUBLES 206
8.2.1- Les grandes étapes de la cartographie du risque *207*
8.2.2- Définition du périmètre d'étude et observations de terrain *207*
8.2.3- Cartographie géomorphologique *208*
8.2.4- Cartographie des enjeux *211*
8.2.5- Identification des zones à risque et des enjeux menacés *212*
8.3- RESULTATS 212
8.3.1- Identification des enjeux menacés sur les sites d'étude *212*
8.3.1.1-Le site des Vallées-Nantois à Pléneuf-Val-André 213
8.3.1.2- L'anse de Pors-Hir à Plougrescant 214
8.3.1.3- L'anse du Moulin de la Rive à Locquirec 215
8.3.1.4- Notigou à Trédrez-Locquémeau 216
8.3.1.5- L'anse du Caon à Telgruc-sur-Mer 217
8.3.1.6- Le site de Poulbréhen à Plozévet 218
8.3.2- Diversité des enjeux menacés par l'érosion des falaises meubles *218*
8.3.3- Analyse des stratégies de gestion au regard des enjeux menacés *220*
8.3.4- Apport de la cartographie géomorphologique dans l'évaluation de la sensibilité des sites à l'érosion *221*
8.3.4.1- Identification des facteurs impliqués dans l'érosion des falaises 221
8.3.4.2- Détermination de la sensibilité des sites à l'érosion 221
8.4- DISCUSSION 222
CONCLUSION INTERMEDIAIRE 226

CHAPITRE 9 : Analyse des enjeux et du risque à partir d'indicateurs 227

9.1- NOTIONS ET CONCEPT DES INDICATEURS ET INDICES 227
9.2- METHODOLOGIE 228
9.2.1- Les grandes étapes *228*
9.2.2- Choix de l'échelle spatiale *229*

9.2.3- Identification des indicateurs pertinents *230*
9.2.3.1- L'indice Aléa érosion 230
9.2.3.2- L'indice Enjeux 231
9.2.4- Calibrage des indicateurs *232*
9.2.5- Agrégation en indice *233*
9.3- RESULTATS 237
9.3.1- Variabilité spatiale du risque sur chaque site *237*
9.3.1.1- Pléneuf-Val-André 237
9.3.1.2- Plougrescant 238
9.3.1.3- Trédrez-Locquémeau 239
9.3.1.4- Locquirec 240
9.3.1.5- Telgruc-sur-Mer 241
9.3.1.6- Plozévet 241
9.3.2- Comparaison des enjeux et des niveaux de risque inter-sites *242*
9.4- DISCUSSION 244
CONCLUSION INTERMEDIAIRE 247

Conclusion de la Troisième Partie 248

PARTIE 4 – LA GESTION DU RISQUE D'ÉROSION DES FALAISES MEUBLES ET APPROCHE DE LA VULNÉRABILITÉ COTIÈRE 249

CHAPITRE 10 : Quelques rappels sur l'organisation de la gestion des risques côtiers en France 250

10.1- DES COMPETENCES REPARTIES ENTRE DIFFERENTS ACTEURS ET DIFFERENTES ECHELLES D'ACTION 250
10.2- LES PRINCIPAUX OUTILS DE GESTION DES RISQUES LITTORAUX 251
10.2.1- Outils d'information et de sécurité civile *251*
10.2.2- Outils de prévention des risques *252*
10.2.3- Outils d'aménagement et d'urbanisme *252*
10.3- LES MODALITES DE GESTION DU TRAIT DE COTE 254

CHAPITRE 11 : Analyse de la gestion et de la vulnérabilité à l'échelle des sites d'étude 255

11.1- NOTION DE VULNERABILITE : L'INDISPENSABLE INTEGRATION DE LA GESTION AVEC LES ANALYSES DE RISQUE 255
11.2- METHODOLOGIE 256
11.2.1- Choix de l'échelle spatiale et des indicateurs retenus *256*
11.2.2- Calibrage des indicateurs et agrégation en indices *259*
11.3- RESULTATS 260
11.3.1- État général de la gestion sur les sites : l'indice de Gestion global *260*
11.3.2- Les démarches locales de gestion *262*
11.3.3- La gestion du trait de côte *266*
11.3.4- La prise en compte du risque dans l'aménagement *271*
11.3.5- Les actions d'information et de sensibilisation *273*
11.3.6- La gestion de crise *276*
11.3.7- Bilan *277*
11.4- ANALYSE DE LA VULNERABILITE DES SITES 279
11.5- LIMITES DE LA METHODE ET DISCUSSION 281
CONCLUSION INTERMEDIAIRE 283

CHAPITRE 12 : Caractérisation des besoins exprimés par les gestionnaires bretons sur le risque d'érosion des falaises meubles 284

12.1- METHODOLOGIE 285
12.1.1- Composition du questionnaire *285*
12.1.2- Collecte et traitement des données *286*
12.2- IDENTIFICATION DES BESOINS DES GESTIONNAIRES AUX DIFFERENTES ECHELLES TERRITORIALES 287
12.2.1- Profil des répondants *287*
12.2.2- Écarts-types et dispersion des réponses *290*
12.2.3- Les besoins relatifs à la gestion du risque d'érosion des falaises meubles *291*
12.2.4- Priorisation des outils en termes de connaissance et de méthodologie *296*
12.2.5- Bilan *301*
12.2.6- Discussion *301*
12.3- DES BESOINS EXPLIQUANT LES DIFFICULTES RENCONTREES A L'ECHELLE REGIONALE ET LOCALE 303

12.3.1- Des connaissances insuffisantes *304*
12.3.2- Manque de clarté dans la répartition des responsabilités juridiques *306*
12.3.3- Difficultés de mise en place de mesures de gestion dans un contexte de raréfaction des dépenses publiques *307*
12.3.4- Une faible interaction entre gestionnaires et scientifiques *308*
12.3.5- Une insuffisance de moyens humains et de compétences *308*
12.3.6- Une mise en place de mesures de gestion longue face à la multiplicité des procédures réglementaires *308*
12.3.7- Une sensibilisation citoyenne et une culture du risque insuffisantes *309*
12.3.8- Une faible consultation des citoyens *311*
12.3.9- Une nécessaire sensibilisation des gestionnaires locaux *311*
12.4- DISCUSSION ET PRECONISATIONS 312
CONCLUSION INTERMEDIAIRE 316

Conclusion de la Quatrième Partie 317

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES 318

RAPPEL DU CONTEXTE DE RECHERCHE 318
RYTHMES ET MODALITES DU RECUL DES FALAISES MEUBLES 318
NIVEAUX DE RISQUE ET ENJEUX MENACES PAR L'EROSION DES FALAISES MEUBLES 321
GESTION ET VULNERABILITE DES TERRITOIRES BRETONS 322
PERSPECTIVES 323

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 326

LISTE DES FIGURES 355

LISTE DES TABLEAUX 360

TABLE DES MATIÈRES 361

TABLE DES ANNEXES 366

TABLE DES ANNEXES

Annexe 1 : Fiche descriptive utilisée pour chaque site lors de la phase de reconnaissance de terrain..... 367

Annexe 2 : Diversité de la morpho-structure des falaises meubles..... 368

Annexe 3 : Localisation et caractéristiques des stations Météo-France utilisées pour analyser les conditions météorologiques sur les sites d'étude 370

Annexe 4 : Coordonnées et paramètres des points de sortie utilisés pour la modélisation des houles à 10 et 20 m de profondeur au large des sites d'étude..... 371

Annexe 5 : Archives utilisées pour l'inventaire des aléas d'érosion de falaises meubles en Bretagne 372

Annexe 6 : Localisation des stations Météo-France utilisées dans l'analyse historique 373

Annexe 7 : Recensement des phénomènes d'érosion de falaises meubles en Bretagne de 1900 à 2018... 374

Annexe 8 : Récapitulatif de la qualité des levés photogrammétriques et de leur géoréférencement 382

Annexe 9 : Erreur relative sur les volumes calculés à partir des différentiels..... 383

Annexe 10 : Évolution du front de falaise entre 2017 et 2019 sur les sites d'étude 384

Annexe 11 : Récapitulatif de la qualité des levés topographiques des profils transversaux à la plage sur les sites d'étude..... 392

Annexe 12 : Éléments composant les cartes géomorphologiques..... 393

Annexe 13 : Organisation des entités créés sous SIG et sources des données..... 394

Annexe 14 : Liste des indicateurs d'enjeux sélectionnés et non-retenus pour l'étude..... 395

Annexe 15 : Exemples de fiches méthodologiques d'indicateur produites dans le cadre du projet OSIRISC 396

Annexe 16 : Calibrage des indicateurs d'enjeux..... 398

Annexe 17 : Calibrage de l'indicateur d'aléa..... 399

Annexe 18 : Liste des indicateurs de gestion sélectionnés et non-retenus. 400

Annexe 19 : Exemple de fiche « repères » synthétisant des orientations stratégiques et des actions par type d'espace 401

Annexe 20 : Calibrage des indicateurs de gestion 402

Annexe 21 : Diagnostics et études sur des solutions d'aménagement réalisés par des bureaux d'études à la demande des communes et des départements sur les six sites d'étude 404

Annexe 22 : Valeurs des indices et des sous-indices d'aléa, d'enjeux et de gestion obtenues sur les sites d'étude 405

Annexe 23 : Questionnaire d'analyse des besoins pour la gestion du risque d'érosion des falaises meubles406

Annexe 24 : Notes moyennes attribuées par les institutions aux 12 types de besoin de gestion du risque d'érosion 409

Annexe 25 : Notes moyennes attribuées par les institutions aux outils de connaissance et de méthodologie. 410

Annexe 26 : Avantages et inconvénients de solutions « dures » et « douces » pouvant être employées pour ralentir ou stopper le recul des falaises meubles..... 411

Annexe 1 : Fiche descriptive utilisée pour chaque site lors de la phase de reconnaissance de terrain

FICHE TERRAIN FALAISES MEUBLES

Date :		Heure :	
Commune :		Nom du site :	
Coeff de marée :		Houle :	
Coordonnées X :		Coordonnées Y :	
Météo :		Vent :	

Versant de falaise :

Homogène/ Composite	Versant (abrupt, vertic, convexe, concave)	Hauteur (m)	Longueur linéaire falaise (m)	Venue d'eau	Exposition	Indentation côte / érosion différentielle	Commentaires

	Présence (O/N)	Géologie	Homogène/ Composite	Hauteur (m)	Inclinaison	Présence végétation	Altération de la roche (clou)	Fracturation (fissures, failles, orientations principales et pendages…)	Structure (pli, strati, schistosité
Base rocheuse									
Partie sup meuble									

Commentaires :

Système plage si présence :

Type de sédiment (sable, graviers, galets)	Largeur de plage (pied falaise jusqu'à la 1ere laisse de mer)	Pente de la plage (pied jusqu'à la 1ere laisse)	Présence de rochers	Commentaires

Enjeux :

Habitations	Route	Chemins	Terres agricoles	Industrie/ restaurants	Tourisme	Espace naturels protégés	Patrimoine protégé	Nb d'accès à la plage	Commentaires

Gestion :

Panneaux d'infos sur l'érosion	Présence ouvrages de défense et type (longitudinal, transversal, digue…)	Commentaires

Observations marques d'érosion / mouvements de terrain :

Présence de matériel éboulé/ glissé (lieu)	Sapement pied falaise	Loupes d'arrachement	Cicatrices ou autres observations en sommet	Autres observations

Observations techniques :

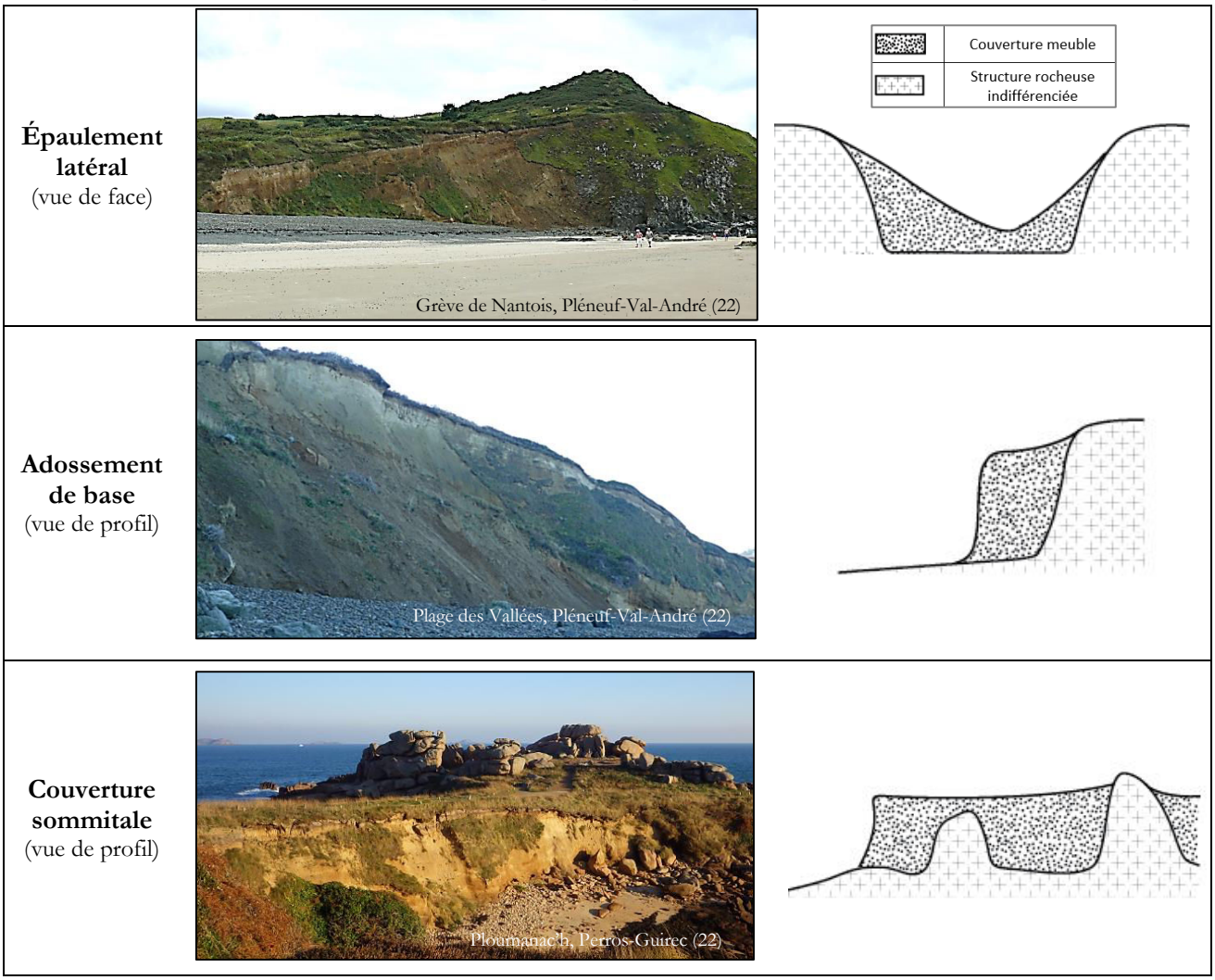
Temps de marche depuis le stationnement	Largeur chemin d'accès (m)	Relief à franchir	Accès au sommet falaise	Etudes antérieures	Commentaires

Annexe 2 : Diversité de la morpho-structure des falaises meubles

La disposition des formations meubles avec le substratum peut varier. Pour les falaises « simples », taillées entièrement dans des formations superficielles, trois types de disposition sont distingués (Ruë, 1988; Biville, 2004) (Fig. 277):

- **L'épaulement latéral** correspond à des falaises où les dépôts meubles s'épaulent sur le versant rocheux et présentent des dépôts avec une forte pente, qui ont comblé des vallées encaissées. Elles ont la forme de dépôts de pente qui ont été taillés transversalement.
- **L'adossement de base** correspond à des falaises en avant immédiat de versant rocheux souvent en forte pente. Ces falaises sont équivalentes par leur formation aux falaises d'épaulement latéral et leur différence de disposition provient de leur orientation par rapport au rivage où la mer a érodé les dépôts longitudinalement.
- La **couverture sommitale** correspond à des dépôts meubles nappant les bas plateaux littoraux ou les anciennes plates-formes d'érosion marine. De ce fait, l'altitude de ces falaises varie peu tant longitudinalement que transversalement, à l'exception de la proximité d'un tor perçant le manteau de formations meubles.

Fig. 277 : Types de disposition de la couverture meuble par rapport au substratum sur les falaises « simples » (schémas de M. Biville et photographies de N. Basara).



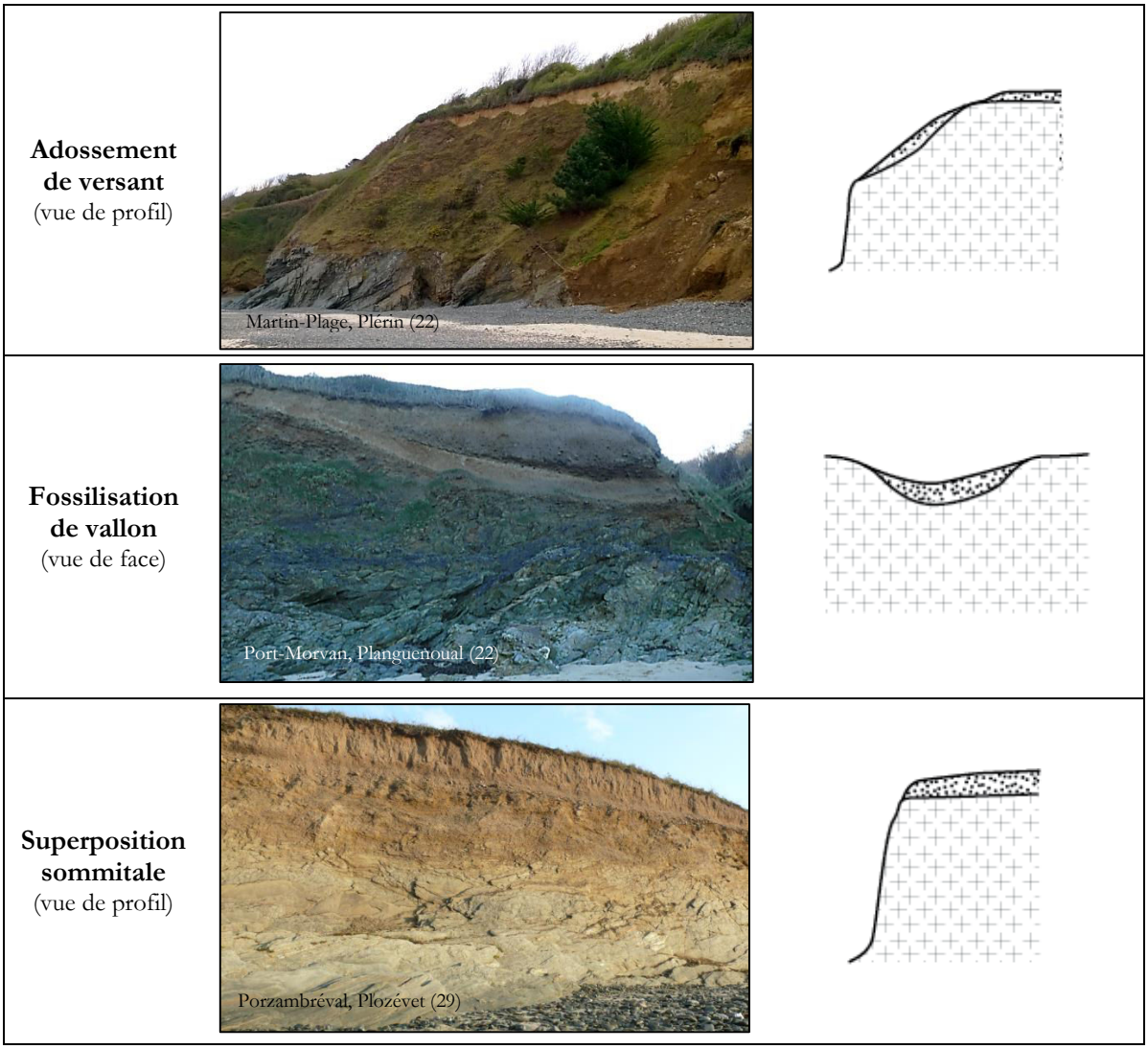
Pour les falaises meubles « composites », formées par une base rocheuse plus ou moins altérée, on distingue trois autres dispositions (Fig. 278) :

● L'**adossement de versant** qui correspondent à des falaises dont la couverture meuble en pied a été érodée et dont il ne reste qu'un mince manteau meuble quaternaire. L'érosion de ces matériaux est davantage contrôlée par les processus continentaux. Toutefois, l'érosion basale de la falaise par les actions marines peut également amener à leur déstabilisation.

● La **fossilisation de vallon** qui correspondent à des dépôts quaternaires remplissant des vallons suspendus sur des secteurs à hautes falaises. Il est intéressant de noter que le cours d'eau actuel ne suit pas toujours cet ancien talweg car son remplissage par des matériaux meubles aurait alors modifié la ligne d'écoulement.

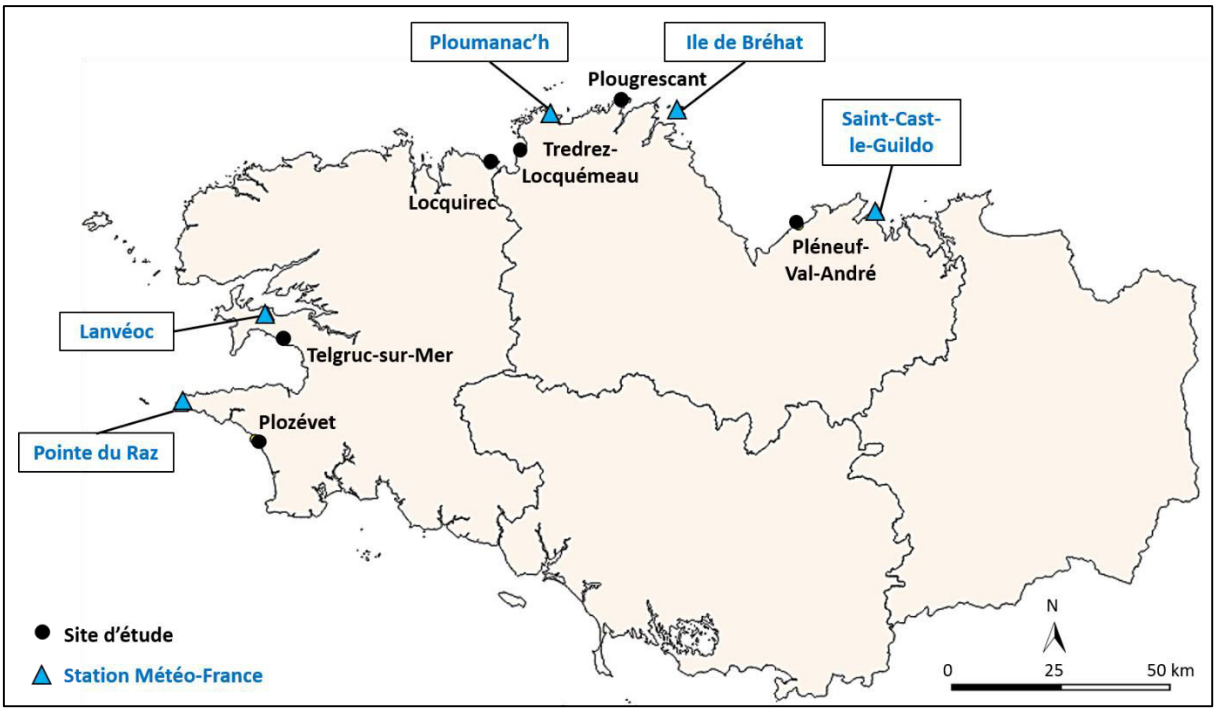
● La **superposition sommitale** qui correspond à une mince couche de matériaux meubles située sur des hautes falaises.

Fig. 278 : Types de disposition de la couverture meuble par rapport au substratum sur les falaises meubles « composites » (schémas de M. Biville et photographies de N. Basara).



L'analyse de ces différentes dispositions structurales permet d'avoir un aperçu du degré de dénudation des côtes à falaises meubles.

Annexe 3 : Localisation et caractéristiques des stations Météo-France utilisées pour analyser les conditions météorologiques sur les sites d'étude



Sites d'étude	Stations Météo-France utilisées	Distance de la station au site d'étude	Début des mesures	Altitude (m)
Pléneuf-Val-André	Saint-Cast-le-Guildo	25 km	1952	35
Plougrescant	Ile de Bréhat	16 km	1948	25
Trédrez-Locquémeau	Ploumanac'h	13 km	1947	55
Locquirec	Ploumanac'h	21 km		
Telgruc-sur-Mer	Lanvéoc	10 km	1948	81
Plozévet	Pointe du Raz	22 km	1951	67

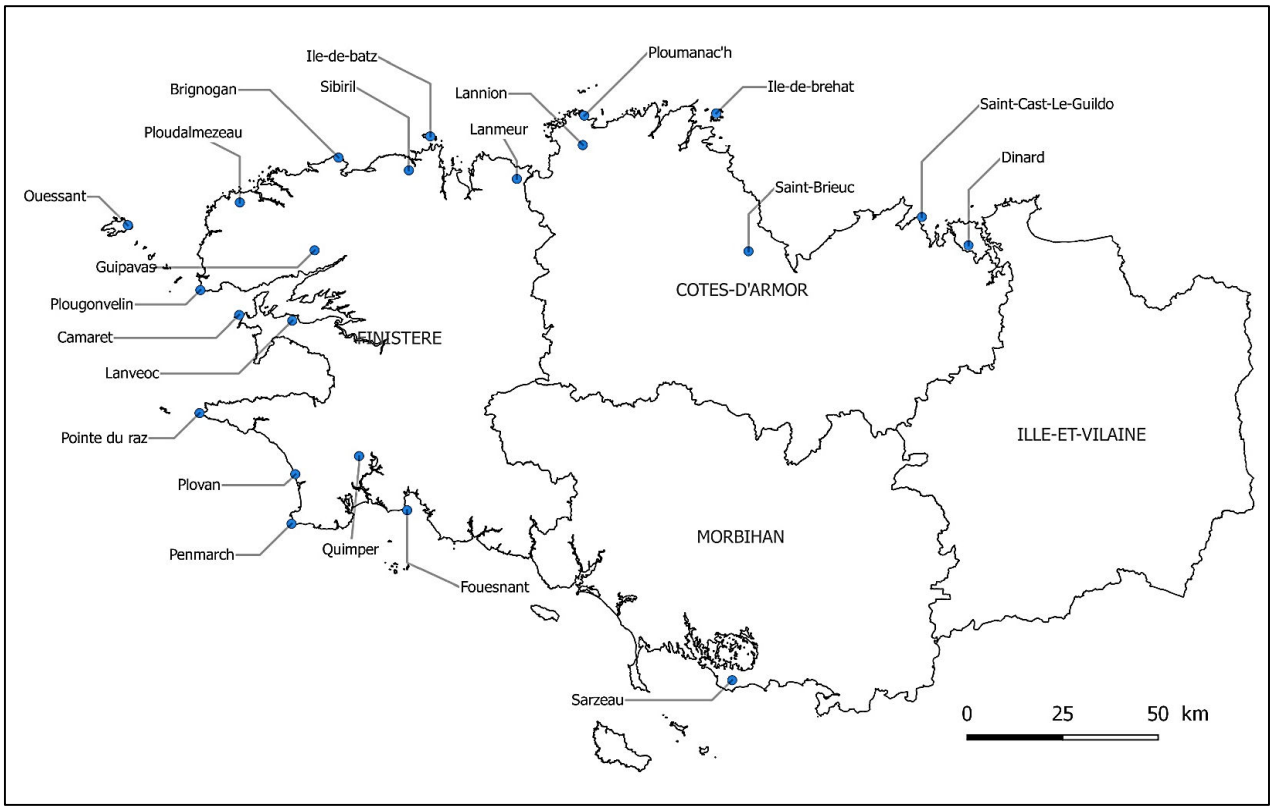
Annexe 4 : Coordonnées et paramètres des points de sortie utilisés pour la modélisation des houles à 10 et 20 m de profondeur au large des sites d'étude (base de données HOMERE)

	Points utilisés pour la modélisation			Caractéristiques des houles aux points de modélisation (période 1994-2016)		
Sites d'étude	**Profondeur**	**X**	**Y**	**Hauteur significative (m)**	**Période (s)**	**Direction moyenne**
Pléneuf-Val-André	10 m	290002,13	6854420,32	0,63	6,2	291
	20 m	289668,69	6859274,39	0,69	6,2	284
Plougrescant	10 m	244748,01	6881961,34	0,77	8,8	295
	20 m	244411,51	6883784,85	1,27	8,3	287
Trédrez-Locquémeau	10 m	216466,23	6868919,01	0,96	9,0	303
	20 m	213714,05	6869583,67	1,12	8,9	296
Locquirec	10 m	208598,63	6867039,96	0,95	8,5	307
	20 m	208598,63	6867039,96	0,95	8,5	308
Telgruc-sur-Mer	10 m	151260,31	6815840,18	0,51	8,8	223
	20 m	150196,36	6815103,04	0,55	8,6	227
Plozévet	10 m	144023,44	6788462,42	1,53	9,4	235
	20 m	143661,43	6788155,18	1,56	9,3	241

Annexe 5 : Archives utilisées pour l'inventaire des aléas d'érosion de falaises meubles en Bretagne

Types d'archive	Sources
Base de données (BD)	BRGM : BD « *Mouvements de terrain* »
	BRGM (Schroëtter et Blaise, 2015) : BD « *Atlas des aléas littoraux des départements d'Ille-et-Vilaine, des Côtes-d'Armor et du Finistère* »
	Université de Brest (Biville, 2004) : BD « *Érosion des falaises meubles sur les côtes nord bretonnes* »
Schémas de Mise en Valeur de la Mer (SMVM)	DDTM 22 (Bonnot-Courtois et Lafond, 1995; Pinot, 1997)
Plan de Prévention des Risques Littoraux (PPRL)	DDTM 22
	DDTM 29
Rapports de bureaux d'études	Géos-AEL (Le Cornec *et al.*, 2008)
	DHI (2016)
	Cerema (Le Borgne, 2014; Lestréhan, 2016)
	Arcadis (Desparmet, 2008; Merodi, 2015)
	Egis (Ghesquiere *et al.*, 2016)
	BRL Ingénierie (Carnus et Gabellini, 2014)
Articles scientifiques	Université de Rennes (Meynier, 1959; Giot & Monnier, 1972) EPHE (Bonnot-Courtois *et al.*, 2008)
Articles de presse	Ouest-France Le Télégramme
Mémoires de recherche	Université de Brest (Furiga, 2015) Polytech Tours (Le Quellec, 2015)

Annexe 6 : Localisation des stations Météo-France utilisées dans l'analyse historique



Annexe 7 : Recensement des phénomènes d'érosion de falaises meubles en Bretagne de 1900 à 2018

Acronymes : AD = absence de données ; IT = imprécision temporelle ; IS = imprécision spatiale ; T = présence de tempête ; N = absence de tempête

Départ em	Unité Morpho-sédiment	Commune	Lieu-dit	Type Falaise	Jour	Mois	Anné e	Cumul pluie J-2	Coeff marée	Tem pête	Type de mvt/ érosion	X93	Y93
35	11	CANCALE	AD	Complexe	28	10	1909	IT	113	T	Effondrements	342381.02	6854116.71
22	13	PLERIN	Plage de Saint-Laurent	Simple	AD	printemps	1941	IT	IT	IT	Éboulement	277993.28	6842211.79
22	13	PLERIN	Plage de Saint-Laurent	Simple	AD	printemps	1950	IT	IT	IT	Éboulements	277928.22	6842253.62
22	15	TREBEURDEN	Toënno	Simple	AD	AD	1959	IT	IT	IT	Effondrement	217368.97	6874462.93
22	13	PLERIN	Plage de Saint-Laurent et Tournemine	Simple	4	4	1962	23,6	117	N	Éboulements	277914.96	6842315.68
29	18	PORSPODER	Gougon	Complexe	AD	AD	1963	IT	IT	IT	Chute de blocs / Éboulement	127122.811	6851339.600
29	18	PORSPODER	Roc'h Vraz	Complexe	AD	AD	1963	IT	IT	IT	Glissement	127274.379	6851548.256
29	22	LANVEOC	La Cale	Simple	AD	AD	1970	IT	IT	IT	-	148223.73	6825151.27
22	13	PLERIN	Plage des Rosaires	Simple	4	7	1973	31	94	N	Côte affaissée	275748.42	6844777.74
29	27	FOUESNANT	Kerveltrec	Complexe	11	1	1978	23,1	108	T	-	178445.99	6775119
29	26	PLOZEVET	AD	Complexe	11	1	1978	23,9	108	T	-	145239.28	6790387.36
29	17	SIBIRIL	Porz Gwen	Simple	AD	AD	1978	IT	IT	IT	-	179579.7	6866657.86
22	13	BINIC	AD	Complexe	26	3	1979	27,2	114	N	Éboulement	271753.5	6850247.35
22	14	LEZARDRIEUX	AD	IS	AD	AD	1980	IT	IT	IT	Éboulement	253837	6875818
29	17	SIBIRIL	E de l'anse de Pors Névez	Complexe	30	1	1983	11,7	108	T	Chute de blocs / Éboulement	178550.744	6866656.392
29	22	HOPITAL-CAMFROUT	Traon	IS	AD	AD	1983	IT	IT	IT	Effondrement	161993	6825694.6
22	15	TRÉDREZ-LOCQUEMEAU	AD	Simple	22 au 24	11	1984	5,7	102	T	-	217326	6866841
29	15	LOCQUIREC	AD	Simple	15	10	1987	37,8	24	T	-	208668	6863772
22	13	PLOUEZEC	AD	IS	7	10	1987	20,3	106	T	-	263346	6867488
29	18	PLOUGONVELIN	AD	Complexe	7	10	1987	56,7	106	T	-	131882	6833806
22	13	ETABLES-SUR-MER	Le Vau Chaperon	Complexe	29	1	1990	6,8	96	T	-	271468	6851386
22	15	PLEUMEUR-BODOU	Bringuillier	Simple	26	2	1990	6,9	105	T	-	220378	6877633

29	15	LOCQUIREC	AD	Simple	26	2	1990	6,9	105	T	-	263346	6867488
29	17	SIBIRIL	Moguériec	Simple	26	2	1990	5,2	105	T	-	179676.3	6866639.8
29	18	LANILDUT	Kerzéven	Simple	26	2	1990	7	105	T	Glissement	126733.378	6848121.780
22	15	PLESTIN-LES-GREVES	Porz Mellec	Simple	25	10	1992	0	102	T	Effondrements	213053.3	6863107.7
29	18	PLOUARZEL	AD	Complexe	AD	2	1993	IT	IT	IT	-	129884.73	6842233.02
22	13	PLENEUF-VAL-ANDRE	Les Vallées	Simple	24	12	1993	19,1	43	T	Effondrements	292049.2	6847270.1
22	15	TRÉDREZ-LOCQUEMEAU	AD	IS	AD	AD	1993	IT	IT	IT	-	217327	6866842
29	22	HOPITAL-CAMFROUT	Tibidy	Complexe	AD	AD	1993	IT	IT	IT	Effondrement	163254.9	6824568
29	24	DOUARNENEZ	Rue des Plomarc'h	Complexe	AD	AD	1994	IT	IT	IT	Chute de blocs / Éboulement	155673.620	6802142.844
29	15	LOCQUIREC	AD	IS	AD	AD	1994	IT	IT	IT	-	263345	6867487
29	17	SIBIRIL	Théven	IS	AD	AD	1994	IT	IT	IT	-	179175.8	6866782.9
22	14	LANMODEZ	Voie communale de Nod Er Guern	Simple	17 au 28	1	1995	21,9	88 max	N	Glissement	252941.696	6876681.073
29	15	LOCQUIREC	Pors ar Viliec	Simple	17 au 28	1	1995	21,7	88 max	N	Glissement	210929.352	6864399.673
29	15	LOCQUIREC	Chemin de la falaise	Simple	17 au 28	1	1995	21,7	88 max	N	Glissement	210643.902	6863078.797
29	16	PLOUGASNOU	Pointe du Chevalier, Primel-Trégastel	Simple	17 au 28	1	1995	21,7	88 max	N	Chute de blocs / Éboulement	201266.388	6866015.383
22	13	PLENEUF-VAL-ANDRE	Nantois	Simple	17 au 28	1	1995	11	88 max	N	Coulée de débris	292459	684729.1
29	22	ROSNOEN	Pont du Térénez	Complexe	17 au 28	1	1995	22,2	88 max	N	Chute de blocs / Éboulement	161984.189	6821469.328
29	16	CARANTEC	Térenez	Complexe	17 au 28	1	1995	20,6	88 max	N	-	161984.189	6821469.328
29	23	CROZON	Sud de l'anse de Dinan	Complexe	17 au 28	1	1995	22,2	88 max	N	-	140544.78	6820070.55
29	23	CROZON	Sud de la plage de la Palud	Complexe	17 au 28	1	1995	22,2	88 max	N	-	139843.77	6814893.65
22	14	PLEUBIAN	Port-la-Chaine	Simple	17 au 28	1	1995	21,9	88 max	N	Effondrement	250606	6879722.7
22	13	HILLION	L'Hotellerie	Simple	17 au 28	1	1995	15,6	88 max	N	Fluages	281175	6838683
22	15	SAINT-MICHEL-EN-GREVE	AD	Simple	17 au 28	1	1995	21,7	88 max	N	Éboulement	217027	6863024
22	13	TREVENEUC	AD	Complexe	17 au 28	1	1995	15,6	88 max	N	-	268562	6857311
22	15	TREBEURDEN	AD	Simple	17 au 28	1	1995	21,7	88 max	N	-	218229	6870940
22	14	PERROS-GUIREC	De Trestraou à Trestrignel	Complexe	17 au 28	1	1995	21,7	88 max	N	Affaissement	227170	6876857

22	14	LOUANNEC	Nantouar	Simple	20 au 26	1	1995	8,1	88 max	N	Recul d'environ 1,50 m	229917	6874660
22	13	PORDIC	Le Petit Havre	Simple	1 au 7	4	1995	0	95 max	N	-	273498	6847144
29	23	CROZON	Nord de la plage de Lostmarc'h	Complexe	15	10	1995	1,2	48	N	-	139628.13	6817158.82
29	24	PLOEVEN	AD	Simple	AD	hiver	1995	IT	IT	IT	-	159917	6807996
29	22	DIRINON	AD	Complexe	AD	AD	1995	IT	IT	IT	-	161885	6830945
29	21	LE CONQUET	Plage de Porsliogan	Complexe	AD	AD	1995	IT	IT	IT	Chute de blocs / Éboulement	125244.444	6833475.199
29	17	PLOUGUERNEAU	Pointe de Meledam	Complexe	AD	AD	1995	IT	IT	IT	Érosion de berges	145331.626	6863784.217
22	13	PLERIN	Rue du phare	Simple	19	2	1996	15,4	111	T	4 crevasses	278245.63	6843098.57
29	16	ROSCOFF	Entre Kérézoun et Creac'h André	Simple	19	2	1996	8,4	111	T	-	187783	6868603
29	16	CARANTEC	Route Morlaix-Carantec	Simple	19	2	1996	8,4	111	T	-	192307	6861247
22	12	PENVENAN	La Saudraie	Complexe	19	2	1996	7,2	111	T	-	308979	6850542
29	24	PLONEVEZ-PORZAY	Plage de Kervel	Simple	AD	AD	1996	IT	111	IT	Chute de blocs / Éboulement	159010.196	6804744.357
29	17	PLOUGUERNEAU	Pointe de Saint-Michel	Complexe	19	2	1996	9,2	111	T	Érosion de berges	146760.683	6863528.952
29	17	PLOUGUERNEAU	Penn Gourven	Simple	19	2	1996	9,2	111	T	Érosion de berges	150480.369	6862282.990
29	17	PLOUGUERNEAU	Le Zorn	Simple	19	2	1996	9,2	111	T	Glissement	149519.120	6862050.826
22	15	TRÉDREZ-LOCQUEMEAU	Notigou	Simple	AD	12	1996	IT	IT	IT	Éboulement	217599	6867478
22	15	TRÉDREZ-LOCQUEMEAU	Notigou	Simple	AD	1	1997	IT	IT	IT	Éboulement	217561	6867431
22	12	SAINT-CAST-LE-GUILDO	AD	IS	13	2	1997	14	77	T	-	312521	6850944
22	13	PLOUHA	Anse de Bréhec	Simple	AD	AD	1997	IT	IT	IT	Éboulement	262980	6863350
22	13	PLOUEZEC	AD	IS	AD	AD	1997	IT	IT	IT	-	262433	6868025
35	11	CANCALE	rue des Parcs	Complexe	11	2	1998	0	88	N	Glissement	343026.831	6852316.261
29	16	CARANTEC	AD	IS	20	12	1998	20	82	N	-	191645	6863332
29	24	DOUARNENEZ	Les Plomarc'h	Complexe	2	1	1998	41,6	92	T	Éboulement	156411	6801905
29	24	DOUARNENEZ	Plage Saint-Jean	Complexe	2	1	1998	41,6	92	T	Éboulement	154116	6803262.01
22	15	TRÉDREZ-LOCQUEMEAU	AD	IS	2	1	1998	23,2	92	T	-	217329	6866844
29	15	LOCQUIREC	AD	IS	2	1	1998	23,2	92	T	-	208670	6863774
22	15	TREBEURDEN	AD	IS	2	1	1998	23,2	92	T	-	218380	6870848

29	17	SIBIRIL	Kerivoas	IS	AD	AD	1998	IT	IT	IT	-	179606	6866337
29	17	SIBIRIL	Mogueriec	Simple	3	1	1999	20,2	100	T	-	179658.2	6866652.9
29	17	LANDUNVEZ	AD	IS	3	1	1999	15	100	T	-	129603	6855297
29	22	PLOUZANE	Littoral du grand Dellec	Complexe	16	12	1999	33,6	44	N	Chute de blocs / Éboulement	140004.939	6832496.941
29	22	PLOUZANE	Fort du Dellec	Complexe	16	12	1999	33,6	44	N	Chute de blocs / Éboulement	140075.415	6832562.335
22	14	PLOUGRESCANT	AD	Simple	25	12	1999	31,8	102	T	-	244269	6880495
35	12	SAINT-LUNAIRE	AD	Complexe	25	12	1999	16,4	102	T	-	324777	6849204
29	16	PLOUGASNOU	Roche Chevalier	Simple	25	12	1999	31,2	102	T	Chute de blocs / Éboulement	200948.455	6866247.794
29	16	PLOUGASNOU	Primel-Trégastel	Simple	25	12	1999	31,2	102	T	Chute de blocs / Éboulement	200017.050	6867244.658
35	11	CANCALE	rue des Parcs	Complexe	25	12	1999	16,4	102	T	Chute de blocs / Éboulement	343026.831	6852316.261
22	13	PLOUEZEC	AD	IS	25	12	1999	31,8	102	T	-	261645	6867822
29	29	CLOHARS-CARNOET	Porsmoric Sud	Complexe	10	3	2000	0	91	N	-	211332.41	6762502.36
35	11	CANCALE	route de la corniche?	Complexe	21	11	2000	21,4	63	N	Glissement	342083.166	6851794.281
29	29	MOELAN-SUR-MER	Trénez	Complexe	12	12	2000	38	100	T	Glissement	198728.941	6764407.370
56	35	PENESTIN	Falaise de la Mine d'Or	Complexe	12	12	2000	45,8	100	T	Glissements	286598	6723174
29	24	CROZON	Pointe des Grottes	Complexe	AD	AD	2000	IT	IT	IT	Chute de blocs / Éboulement	144897.164	6819172.636
29	21	LE CONQUET	Grève bleue	Complexe	AD	AD	2000	IT	IT	IT	Chute de blocs / Éboulement	125091.363	6833076.683
29	17	PLOUGUERNEAU	Kerazan Vraz	Simple	AD	AD	2000	IT	IT	IT	Érosion de berges	143268.076	6861800.967
22	14	PLOUBAZLANEC	Falaise de Pors-Even	Simple	AD	12	2001	IT	IT	IT	Érosion de berges	258696.380	6872238.792
22	12	SAINT-CAST-LE-GUILDO	St-Eniquet	Complexe	4	5	2001	0	78	N	Glissement	315575.492	6843167.631
29	22	LOCMARIA-PLOUZANE	Plage de Portez	Complexe	17	7	2001	30	61	N	Chute de blocs / Éboulement	132353.465	6833561.381
29	22	LOCMARIA-PLOUZANE	Plage de Trégana	Complexe	17	7	2001	30	61	N	Chute de blocs / Éboulement	132969.202	6833328.615
29	22	LOCMARIA-PLOUZANE	Plage Porsmilin	Complexe	17	7	2001	30	61	N	Chute de blocs / Éboulement	132050.976	6833725.689
29	22	ROSCANVEL	AD	IS	AD	12	2001	IT	IT	IT	-	140313.52	6828905.51
29	22	ROSNOEN	AD	Complexe	AD	AD	2001	IT	IT	IT	Éboulements périodiques	162996	6822924.01
29	23	CROZON	Falaise de Kernavéno	Complexe	AD	AD	2001	IT	IT	IT	Glissement	140340.108	6820036.501

29	20	ILE-MOLENE	Sud-Est de l'île	Complexe	AD	AD	2001	IT	IT	IT	Érosion de berges	112004.014	6839856.628
29	16	LOCQUIREC	Poul Rodou falaises	Simple	AD	3	2002	IT	IT	IT	-	207672.49	6864259.06
56	35	PENESTIN	Plage du Lomer	Complexe	AD	AD	2002	IT	IT	IT	-	286168,1	6724037,3
29	22	DAOULAS	Pointe de Rosmélec	Complexe	17	10	2003	0	42	N	Glissement	160476.369	6830355.543
29	23	CAMARET-SUR-MER	Plage du Correjou	Simple	AD	AD	2003	IT	IT	IT	-	137024.26	6825094.31
29	15	GUIMAËC	Falaise argileuse plag	Simple	AD	AD	2003	IT	IT	IT	-	207167	6864376.01
29	22	LANVEOC	Reun Ar C'Hrank	Complexe	15	12	2003	0	52	N	-	144373.9	6824324.08
29	22	LANVEOC	La Villeneuve	Complexe	15	12	2003	0	52	N	-	145410.74	6824355.15
29	22	LANVEOC	Coat Trez	Complexe	25	1	2003	0,4	66	N	-	146875.82	6824775.04
29	22	LANVEOC	Kertanguy-Pen ar Vir	Complexe	11	1	2003	2	39	N	-	150007.39	6824821.63
29	22	LANVEOC	Lestang	Complexe	15	1	2003	3,2	55	N	-	151457.99	6822978.01
29	26	PLOGOFF	La baie des Trépassés	Complexe	15	10	2003	0,2	65	N	-	126607.64	6799581.75
29	26	PLOGOFF	Anse du Petit Loch	Complexe	AD	AD	2003	IT	IT	IT	-	131771.41	6797371.04
29	26	ESQUIBIEN	Falaise au sud du village ?	Complexe	10	3	2003	11,8	48	N	-	135475.91	6794283.14
29	22	ROSCANVEL	Falaise à l'entrée de la grève de Kervian	Complexe	AD	printemps	2005	IT	IT	IT	Éboulements	140792.7	6827355.7
29	24	CROZON	Pointe de Rulianec	Complexe	AD	AD	2005	IT	IT	IT	Glissement	144535.140	6819139.554
29	24	SAINT-NIC	Chemin côtier allant de Pentrez à l'anse de Caméros	Complexe	AD	3	2006	IT	IT	IT	Chute de blocs / Éboulement	157241.411	6814361.053
29	24	SAINT-NIC	Route de la Presqu'île du n°1 au n°16	Complexe	AD	6	2006	IT	IT	IT	Glissement	158174.660	6813596.091
29	15	LOCQUIREC	Moulin de la Rive	Simple	8	6	2006	IT	IT	IT	Glissement	208909.83	6863720.6
22	13	PORDIC	Petit-Havre	Simple	AD	hiver	2006	IT	IT	IT	Éboulement	273493	6847140
29	22	DAOULAS	Kerneïz	Complexe	AD	1	2007	IT	IT	IT	Glissement	161537.286	6830556.913
22	13	PLERIN	Martin-Plage	Simple	19-20	3	2007	6,8	116	T	-	277893.1	6843789.5
29	24	CAMARET-SUR-MER	Porz Naye à Morgat	Complexe	19-20	3	2007	10,8	116	T	Chute de blocs / Éboulement	136140	6824929
29	26	PLOZEVET	Entre Pratmeur et Poulbréhen	Complexe	AD	printemps	2007	IT	IT	IT	Effondrement	145530	6789714
29	17	CLEDER	Plage de Kervaliou	Complexe	13	1	2008	15,6	79	N	-	176934.78	6867313.55
22	15	PLESTIN-LES-GREVES	Route d'accès à la Grève des Curés	Simple	13	1	2008	6,8	79	N	Glissement	211962,7	6862876,2
22	32	ILE-AUX-MOINES	zone de l'exutoire bas, sur la route du phare	Complexe	9	3	2008	0	107	T	Érosion en pied de falaise	224681.42	6883842.9

22	14	PLEUBIAN	Pors Rand	Simple	9	3	2008	6,8	106	T	Érosion par la houle	252384.78	6880145.7
22	14	PLEUBIAN	Créac'h Maout	Simple	9	3	2008	6,8	106	T	Érosion par la houle	252023.35	6880318.56
22	14	PLOUGRESCANT	Pors Hir	Simple	9	3	2008	6,8	106	T	Éboulement sur 5 m	244408.77	6880233.23
22	14	PERROS-GUIREC	Pors-Kamor	Complexe	9	3	2008	10	107	T	-	224745.68	6879134.73
22	14	PERROS-GUIREC	Squéouel	Complexe	9	3	2008	10	107	T	Creusement en pied	225154.93	6879130.45
22	14	PERROS-GUIREC	Ranolien	Simple	9	3	2008	10	107	T	-	225309.27	6878231.39
22	15	TREBEURDEN	chemin des Douaniers entre Bihit et Beg Léguer	Simple	9	3	2008	10	106	T	Éboulements	218312.26	6870561.39
22	14	PERROS-GUIREC	la plage de lza Bastille (sentier douaniers)	Complexe	9	3	2008	10	107	T	Effondrement	224395.440	6878816.514
29	16	CARANTEC	Nord de l'île Callot	IS	10	3	2008	24,6	106	T	-	191035.38	6866602.88
29	16	CARANTEC	Pen al Lann	Simple	10	3	2008	24,6	106	T	-	192053.43	6863252.02
29	24	CLEDEN-CAP-SIZUN	Baie des Trépassés	Complexe	10	3	2008	18	106	T	-	126797.4	6799825.97
29	15	GUIMAËC	Plage de Poul Rodou	Simple	10	3	2008	24,6	106	T	-	207351.97	6864232.07
29	15	LOCQUIREC	Route de la Corniche	Simple	10	3	2008	23,2	106	T	-	208400.08	6864136.17
56	35	AMBON	Cromenac'h	Complexe	10	3	2008	20,2	106	T	-	284884	6728514
22	14	KERBORS	Luzuret	Simple	10	3	2008	19,8	106	T	Érosion de berges	246946.471	6878103.599
29	26	PLOZEVET	AD	Complexe	10	3	2008	18	106	T	-	145693	6789555
56	34	DAMGAN	Le Treutan	Complexe	10	3	2008	20,2	106	T	Recul de 2 m	276794	6726737
22	13	PLOUEZEC	Port Lazo	Simple	28	2	2010	34,3	108	T	Glissements	262523	6868094
29	16	PLOUEZOCH	Pointe de Barnenez	Simple	27	2	2010	20,8	100	T	Effondrements	195642	6863329
22	13	ETABLES-SUR-MER	AD	IS	28	2	2010	53,6	108	T	-	271244	6852883
22	13	PLOUEZEC	Port Lazo	Simple	26	3	2010	4,2	60	T	Chute de blocs / Éboulement	262595.817	6868193.037
29	16	CARANTEC	Toul-ar-Bily	Simple	2	3	2010	0,2	115	N	-	191202.76	6863778.85
22	13	PLERIN	Martin-Plage	Complexe	5	12	2010	10,6	88	N	Éboulement	277785.9	6843893.8
22	14	PERROS-GUIREC	Ker ar Mor	Complexe	AD	AD	2010	IT	IT	IT	Éboulement	226804.17	6876646.47
22	13	PLERIN	Plage de Saint-Laurent	Simple	17	2	2011	1,4	93	N	Chute de blocs / Éboulement	277775.428	6842557.201
29	24	PLOMODIERN	Porzh-ar-Vag	Simple	19	2	2011	24	114	N	Éboulement	158564.3	6810289.8
29	26	PLOGOFF	Petit Loch	Complexe	19	2	2011	24,2	114	N	Éboulement sur 50 m	131712	6797350
29	29	CLOHARS-CARNOET	AD	Complexe	19	4	2011	0	112	N	Effondrement	207193.89	6761542.09

22	13	MORIEUX	Hameau de Saint-Maurice	Complexe	19	4	2011	0,2	112	N	Chute de blocs / Éboulement	284476.458	6840534.922
29	24	PLONEVEZ-PORZAY	Plage de Kervel	Simple	26	12	2012	22,6	66	N	Éboulement	158925	6804501
22	13	LANMODEZ	Sentier qui conduit de Pommelin au Muriot	Simple	AD	2	2013	IT	IT	IT	Éboulement sur 30 m	252778	6876506
56	33	BANGOR	Entre la plage et le village de Penvaz	Complexe	AD	printemps	2013	IT	IT	IT	Effondrement	232101.88	6707212.22
22	12	SAINT-CAST-LE-GUILDO	Plage de la Mare	Simple	AD	fin mars-debut avril	2013	IT	IT	IT	Éboulements	313041.3	6851076.4
22	14	PLOUGRESCANT	Pors-Hir	Simple	4	11	2013	21,2	101	N	-	244257.61	6880620.86
56	34	SARZEAU	Chemin de Bécudo	Complexe	3	1	2014	7,1	108	T	-	273460	6726982
29	24	DOUARNENEZ	Falaise du Ris	Complexe	3	1	2014	18,6	108	T	Éboulements	156684	6801732
29	29	MOELAN-SUR-MER	Trénez	Complexe	3	1	2014	18,6	108	T	Éboulements	198773.21	6764389.18
29	26	POULDREUZIC	Café Penn ar Bed	Complexe	3	1	2014	28,5	108	T	-	14840759	6785444.17
29	26	POULDREUZIC	Pouldu	Complexe	3	1	2014	28,5	108	T	Effondrement sur 40m	137724.3	6794773.4
22	15	LANNION	Beg-Léguer	Complexe	1	2	2014	16,1	114	T	Érosion falaise	218822	6868361
29	15	LOCQUIREC	Moulin de la Rive	Simple	1	2	2014	16,1	114	T	-	208986.62	6863714.88
22	15	TRÉDREZ-LOCQUEMEAU	Notigou	Simple	1	2	2014	16,1	114	T	-	217511.65	6867376.05
22	13	HILLION	Plage de Lermot	Simple	2	2	2014	5,4	113	T	Ecroulement	282285.9	6840601.7
22	14	PLOUGRESCANT	Pors-Hir	Simple	2	2	2014	4	113	T	-	244257.89	6880619.46
29	24	TELGRUC	Anse du Caon	Simple	2	2	2014	9,4	113	T	Glissement	152862.6	6816497.96
29	26	PLOGOFF	Sentier cotier entre Le Loch et le Petit Loch	Complexe	2	2	2014	1	113	T	Éboulement	131820	6797368
29	24	PLONEVEZ-PORZAY	Partie Nord de la plage de Kervel	Simple	2	2	2014	3,6	113	T	Effondrement	158952	6804579
56	35	AMBON	Cromenac'h	Complexe	1 à 7	2	2014	20,9	113	T	-	284606.67	6728369.19
29	26	PLOZEVET	Poulbréhen	Complexe	1 à 2	2	2014	1	113	T	Effondrement	145657.17	6789696.93
29	23	CAMARET-SUR-MER	Route d'accès à la cale du Veryac'h	Complexe	8	2	2014	20,7	38	N	Effondrement	135658.7	6822926.5
29	16	PLOUGASNOU	Térénez	Simple	7	2	2014	26,2	48	T	Glissement	196469	6863498
29	27	FOUESNANT	Sentier côtier Beg-Meil	Complexe	5	2	2014	22,9	79	N	Éboulement	178795.19	6773775.83
29	22	LOGONNA-DAOULAS	Sentier entre MenGleuz et Pors-Beach	Complexe	AD	printemps	2014	IT	IT	IT	Glissements	160251	6829316
22	13	BINIC	La Banche	Simple	1	2	2015	6,2	68	N	Glissement	271299.4	6848372.9

35	11	CANCALE	Abri des flots	Complexe	27	2	2015	5,2	43	N	Éboulement	343473.6	6852802.5
29	21	PLOUMOGUER	Entre Kerhornou et la Pointe du Corsen	Complexe	11	2	2016	12,3	108	N	Glissement	125598	6839947
22	13	SAINT-QUAY-PORTRIEUX	Plage de la Comtesse	Complexe	23	3	2016	0	89	N	Glissement	271169.79	6855040.54
56	35	PENESTIN	Plage du Lomer	Complexe	début	3	2016	IT	IT	IT	-	286172,6	6723999,8
22	13	PLERIN	Martin-Plage	Simple	8	9	2016	0,2	82	N	Ecroulement	277887.51	6843771.47
22	12	SAINT-CAST-LE-GUILDO	Falaise de la Garde	Complexe	10	10	2017	1,4	87	N	Éboulement	126339.03	6850064.28
22	13	PLERIN	Martin-Plage	Simple	5	1	2018	9,2	101	N	Éboulement	277874.56	6843778.94
29	18	PORSPODER	Anse située entre Garchine et Mazou	Complexe	3	1	2018	21,1	107	T	-	126339.7	6850041.9
22	14	PLOUGRESCANT	Pors-Hir	Simple	3	1	2018	19,1	107	T	-	244272.87	6880579.16
29	26	PLOZEVET	Poulbréhen	Complexe	12 au 18	3	2018	4,9	90	N	-	145704.38	6789644.51
22	13	PLENEUF-VAL-ANDRE	Les Vallées	Simple	AD	3	2018	IT	IT	IT	Éboulement	292133.16	6847270.94
56	35	PENESTIN	Falaise de la Mine d'Or	Complexe	3	5	2018	8,7	82	N	Éboulement	286594	6723170

Annexe 8 : Récapitulatif de la qualité des levés photogrammétriques et de leur géoréférencement

(Levé en gris : nuage de points affecté par une forte marge d'erreur)

Sites d'étude	Date mission	Instrument utilisé pour le levé topo	Conditions d'acquisition	Nombre de repères utilisés	Qualité du nuage de points	RMS sur le géoréférencement (m)
Les Vallées (Pléneuf-Val-André)	11/04/2017	Tachéomètre	Bonne	11	Bonne	0,007
	20/10/2017	GPS Trimble	Moyenne (contre-jour pour le levé photo)	15	Bonne	0,040
	28/05/2018	Tachéomètre	Bonne	16	Bonne	0,013
	26/10/2018	Tachéomètre	Bonne	14	Bonne	0,012
	09/04/2019	Tachéomètre	Moyenne (contre-jour pour le levé topo)	16	Bonne	0,035
Nantois (Pléneuf-Val-André)	11/04/2017	Tachéomètre	Bonne	7	Bonne	0,007
	20/10/2017	GPS Trimble	Moyenne (contre-jour pour le levé photo)	7	Bonne	0,053
	28/05/2018	Tachéomètre	Bonne	7	Bonne	0,009
	26/10/2018	Tachéomètre	Moyenne (averse)	9	Bonne	0,027
	09/04/2019	Tachéomètre	Bonne	9	Bonne	0,008
Plougrescant	21/06/2017	GPS Trimble	Bonne	8	Bonne	0,051
	08/11/2017	GPS Trimble	Bonne	9	Bonne	0,049
	25/06/2018	Tachéomètre	Bonne	10	Bonne	0,008
	09/11/2018	Tachéomètre	Bonne	18	Bonne	0,019
	17/04/2019	Tachéomètre	Bonne	18	Bonne	0,009
Trédrez-Locquémeau	27/04/2017	Tachéomètre	Bonne	10	Mauvaise	0,006
	08/12/2017	GPS Trimble	Bonne	5	Mauvaise	0,045
	26/06/2018	GPS Trimble	Moyenne (contre-jour pour le levé photo)	16	Mauvaise	0,018
	10/11/2018	Tachéomètre	Bonne	14	Mauvaise	0,011
	18/04/2019	Tachéomètre	Bonne	9	Mauvaise	0,008
Locquirec	28/04/2017	Tachéomètre	Bonne	16	Moyenne	0,018
	19/10/2017	GPS Trimble	Bonne	13	Moyenne	0,048
	14/05/2018	Tachéomètre	Bonne	13	Bonne	0,008
	15/11/2018	Tachéomètre	Moyenne (contre-jour pour le levé photo)	14	Mauvaise	0,035
	18/04/2019	Tachéomètre	Moyenne (contre-jour pour le levé photo)	13	Moyenne	0,025
Telgruc-sur-Mer	17/03/2017	Tachéomètre	Bonne		Bonne	0,016
	06/10/2017	GPS Trimble	Bonne	5	Bonne	0,027
	18/05/2018	Tachéomètre	Bonne	13	Bonne	0,015
	26/10/2018	Tachéomètre	Bonne	14	Bonne	0,014
	12/04/2019	Tachéomètre	Bonne	14	Bonne	0,015
Plozévet	12/04/2017	GPS Trimble	Bonne	5	Bonne	0,041
	20/11/2017	GPS Trimble	Moyenne (contre-jour pour le levé photo)	10	Bonne	0,055
	02/05/2018	Tachéomètre	Bonne	13	Bonne	0,016
	31/10/2018	Tachéomètre	Bonne	15	Bonne	0,015
	10/04/2019	Tachéomètre	Bonne	15	Bonne	0,024

Annexe 9 : Erreur relative sur les volumes calculés à partir des différentiels

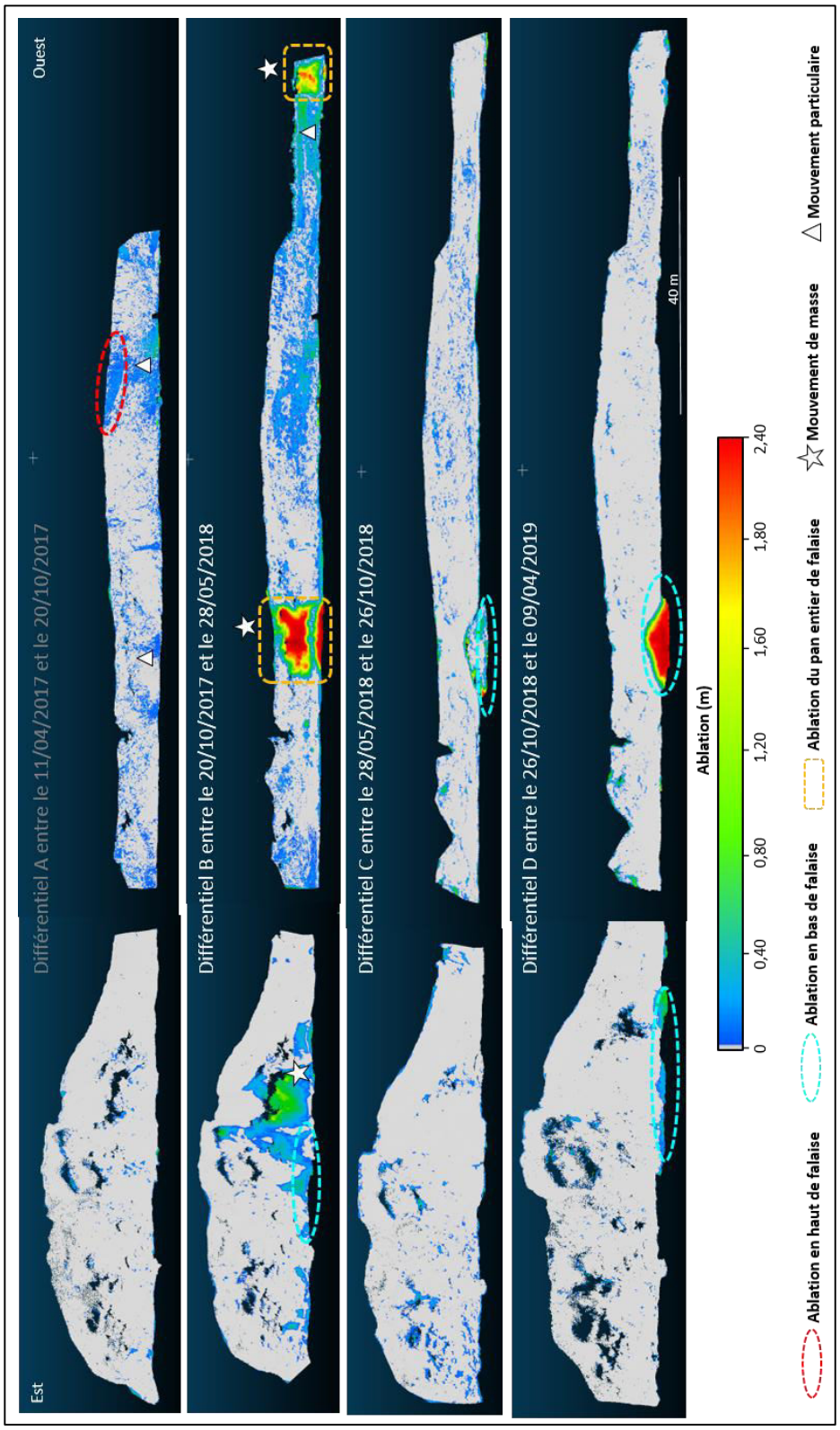
(Date en grise : levé réalisé avec le GPS Trimble)

Sites d'étude	Date nuage de points ancien	Date nuage de points récent	Nom du différentiel	Surface étudiée (m^2)	Erreur sur les volumes perdus (m^3)	Erreur sur l'ablation (m)	Erreur sur le taux d'ablation (m^3)
Les Vallées (Pléneuf)	11/04/2017	20/10/2017	A	1551	21	0,01	0,03
	20/10/2017	28/05/2018	B	1334	18	0,01	0,02
	28/05/2018	26/10/2018	C	1391	10	0,01	0,03
	26/10/2018	09/04/2019	D	1555	11	0,01	0,03
Nantois (Pléneuf)	11/04/2017	20/10/2017	A	1517	7	0,01	0,03
	20/10/2017	28/05/2018	B	1443	19	0,01	0,02
	28/05/2018	26/10/2018	C	1508	4	0,01	0,03
	26/10/2018	09/04/2019	D	1590	6	0,01	0,03
Plougrescant	21/06/2017	08/11/2017	A	703	9	0,02	0,04
	08/11/2017	25/06/2018	B	766	10	0,01	0,02
	25/06/2018	09/11/2018	C	698	5	0,02	0,04
	09/11/2018	17/04/2019	D	755	5	0,01	0,03
Trédrez-Locquémeau	27/04/2017	08/12/2017	A	868	12	0,01	0,03
	08/12/2017	26/06/2018	B	937	13	0,01	0,03
	26/06/2018	10/11/2018	C	958	10	0,02	0,04
	10/11/2018	18/04/2019	D	866	9	0,01	0,03
Locquirec	28/04/2017	19/10/2017	A	723	10	0,01	0,03
	19/10/2017	14/05/2018	B	684	9	0,01	0,02
	14/05/2018	15/11/2018	C	792	4	0,01	0,03
	15/11/2018	18/04/2019	D	723	5	0,01	0,03
Telgruc-sur-Mer	17/03/2017	06/10/2017	A	921	5	0,01	0,02
	06/10/2017	18/05/2018	B	953	7	0,01	0,02
	18/05/2018	26/10/2018	C	978	4	0,01	0,03
	26/10/2018	12/04/2019	D	922	14	0,01	0,03
Plozévet	12/04/2017	20/11/2017	A	827	6	0,01	0,02
	20/11/2017	02/05/2018	B	853	7	0,01	0,03
	02/05/2018	31/10/2018	C	819	6	0,01	0,03
	31/10/2018	10/04/2019	D	823	5	0,01	0,03

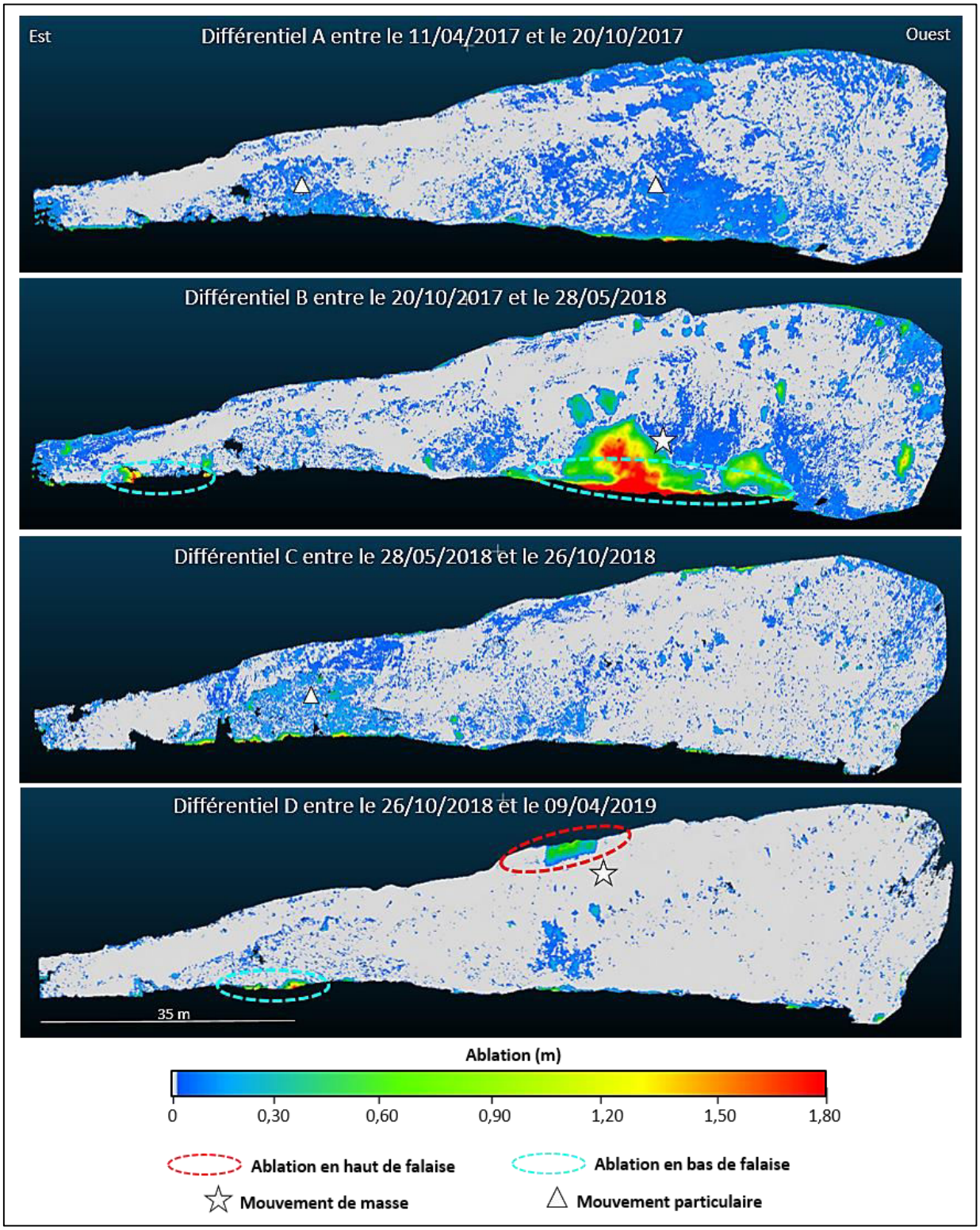
Annexe 10 : Évolution du front de falaise entre 2017 et 2019 sur les sites d'étude

Front de falaise des Vallées à Pléneuf-Val-André

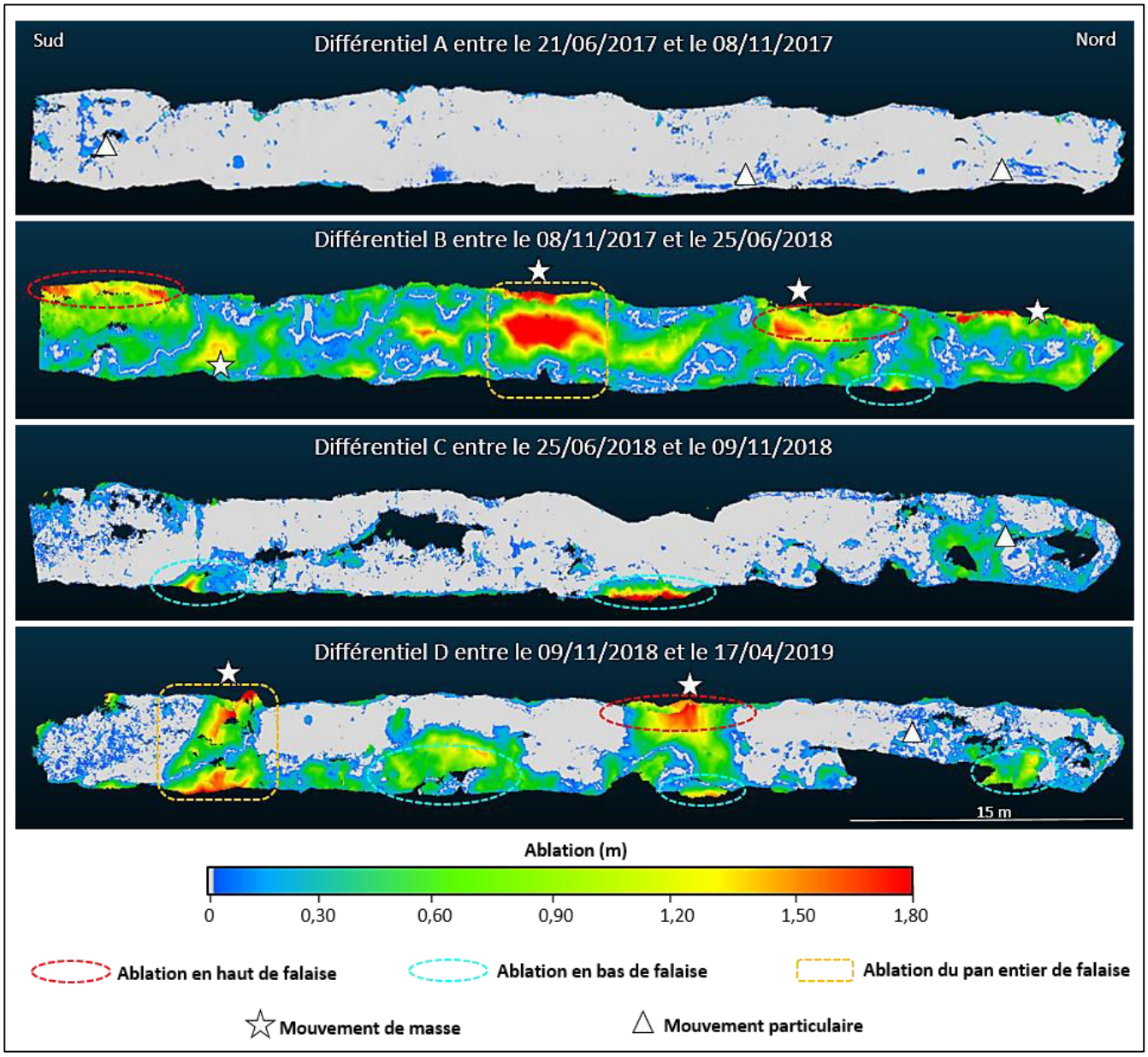
(Titre en gris : différentiel affecté par une forte marge d'erreur)



Front de falaise de Nantois à Pléneuf-Val-André

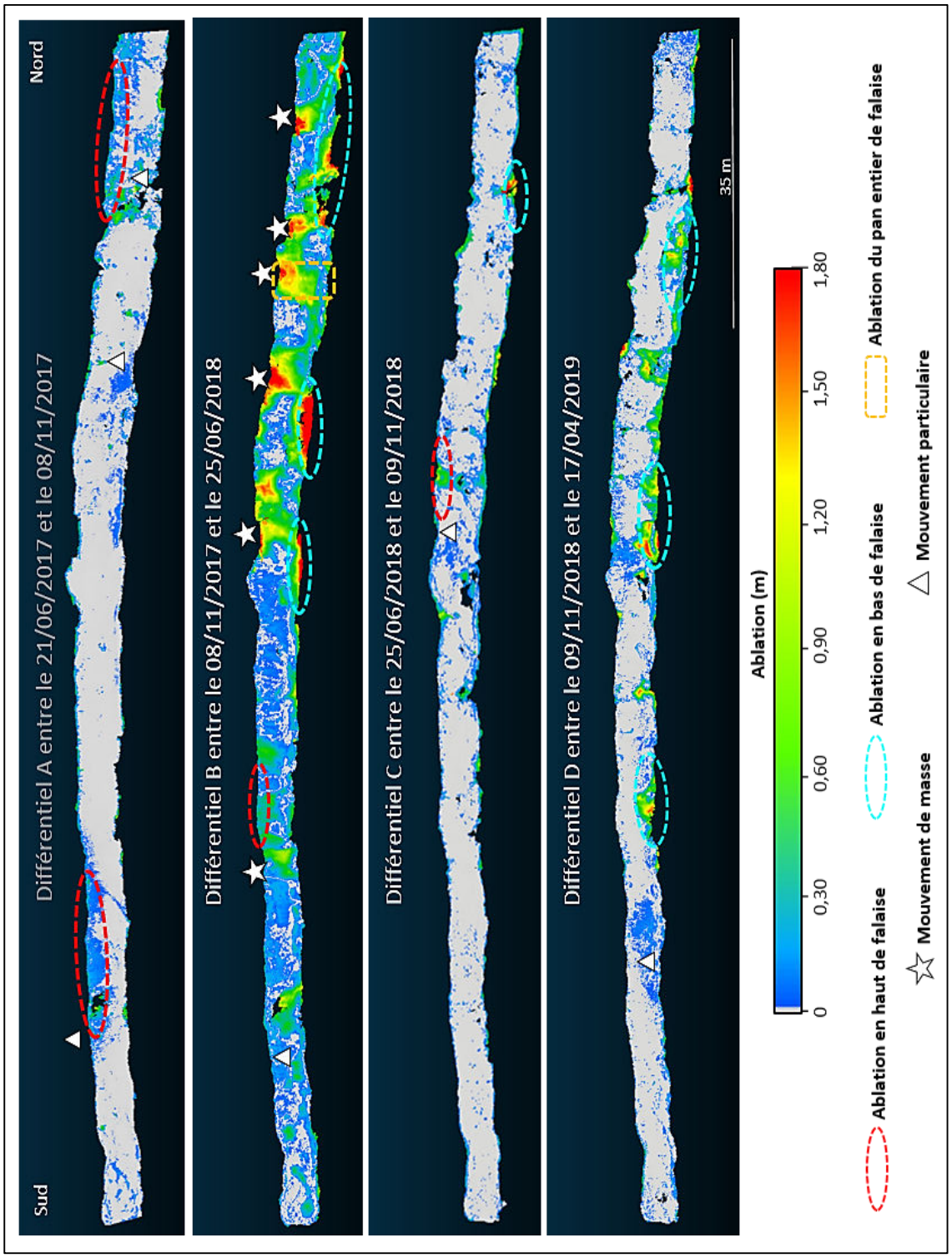


Front de falaise nord de l'anse de Pors-Hir à Plougrescant



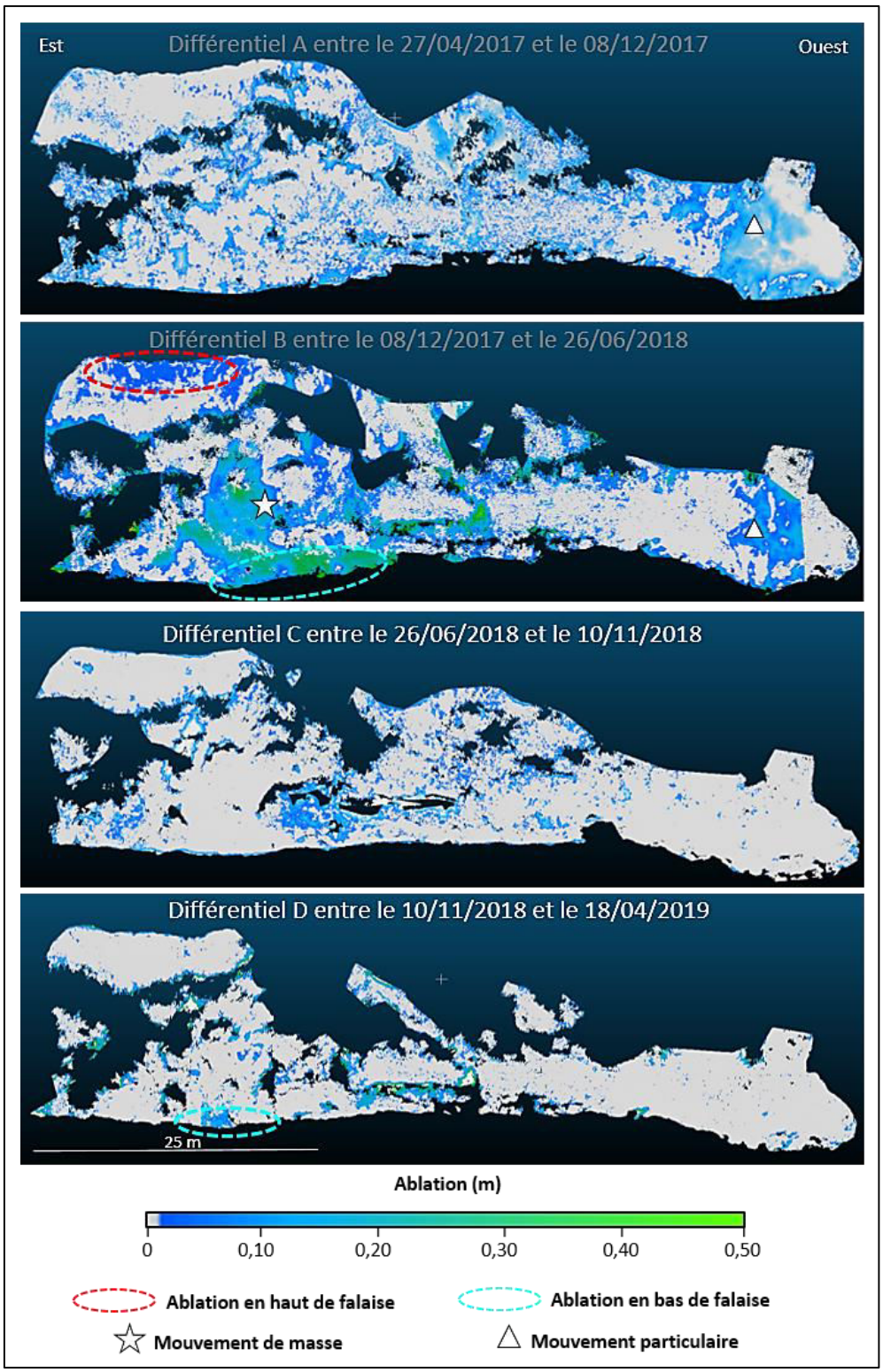
Front de falaise sud de l'anse de Pors-Hir à Plougrescant

(Titre en gris : différentiel affecté par une forte marge d'erreur)



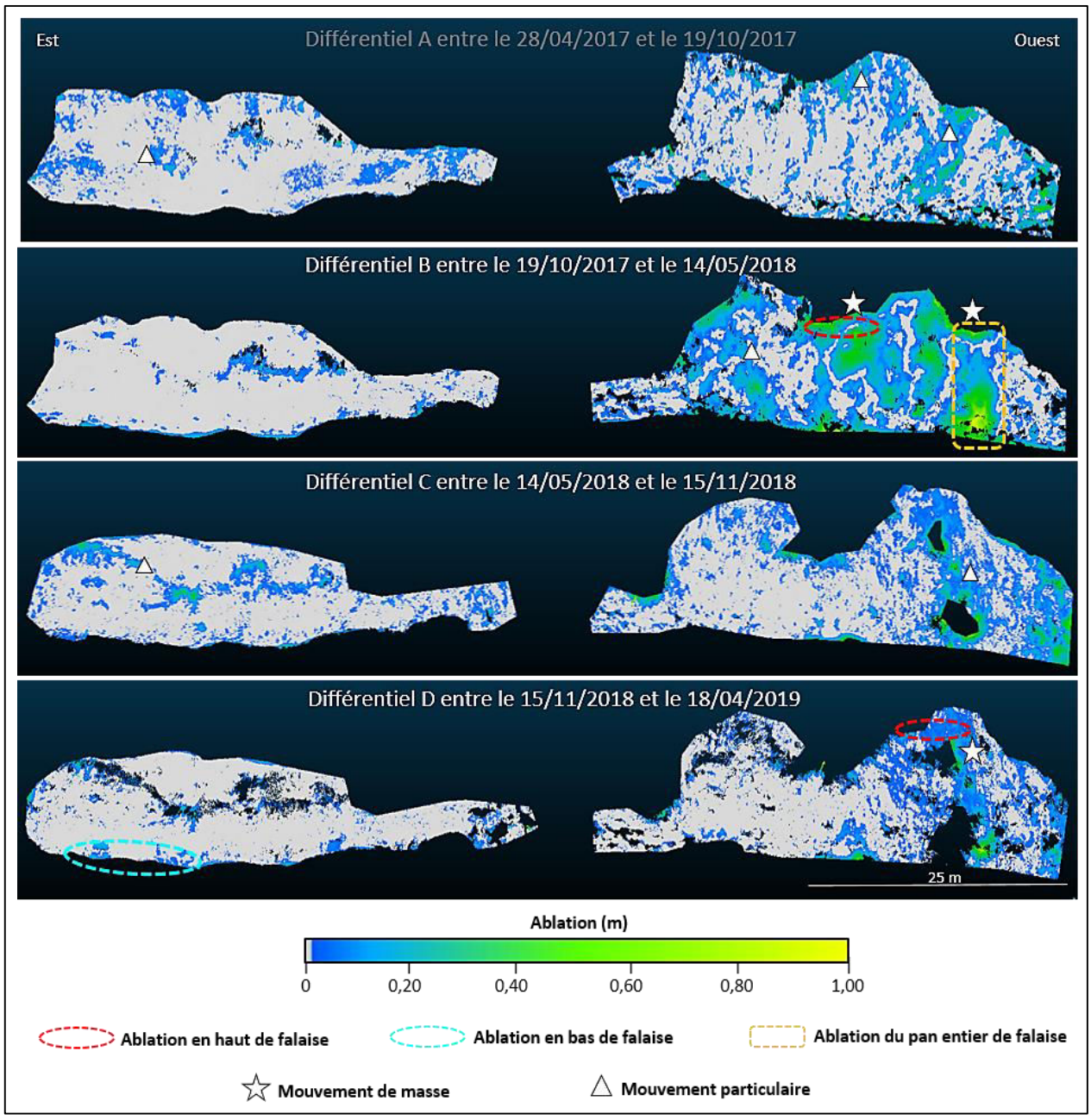
Front de falaise de Notigou à Trédrez-Locquémeau

(Titre en gris : différentiel affecté par une forte marge d'erreur)



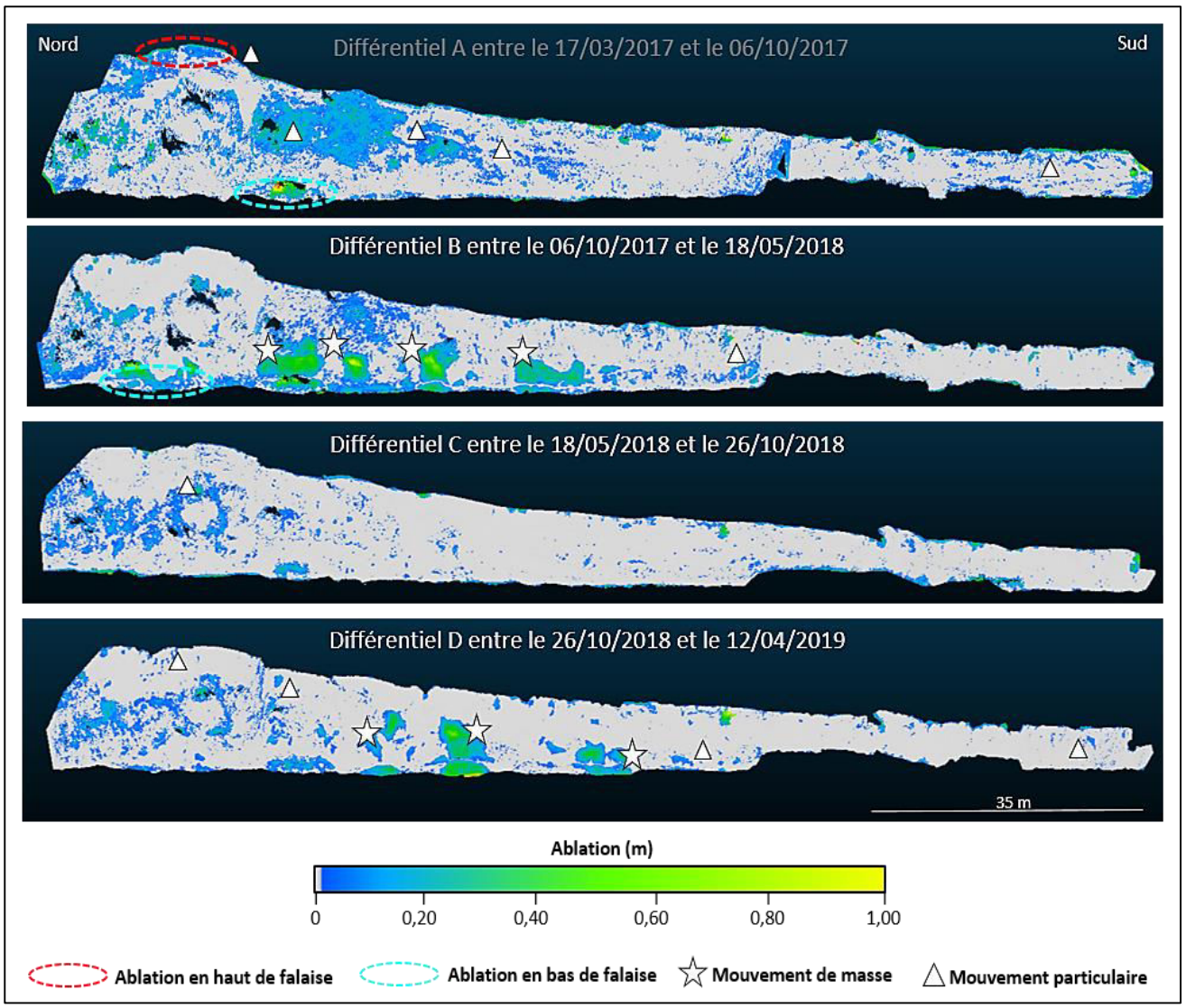
Front de falaise de l'anse du Moulin de la Rive à Locquirec

(Titre en gris : différentiel affecté par une forte marge d'erreur)

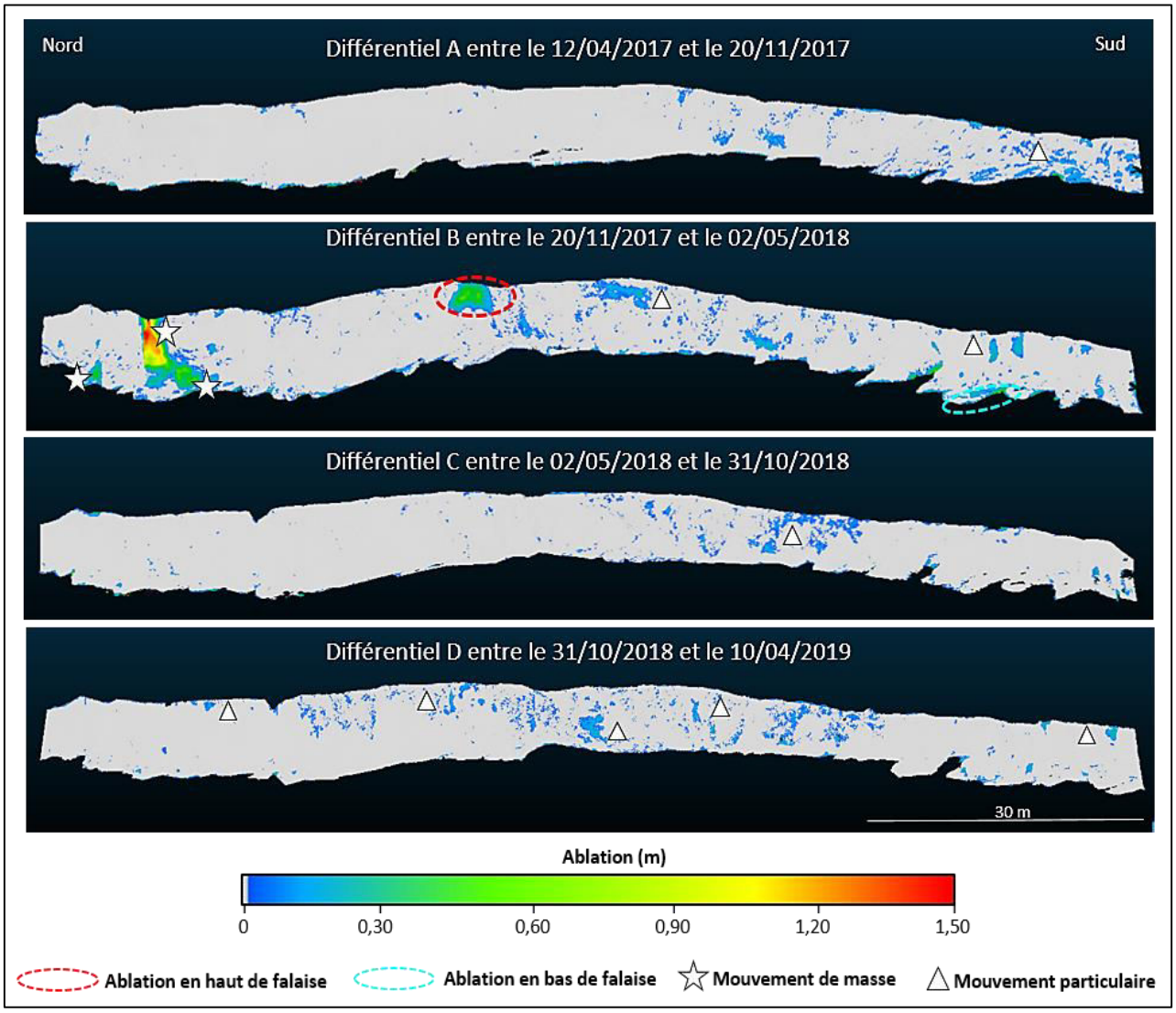


Front de falaise de l'anse du Caon à Telgruc-sur-Mer

(Titre en gris : différentiel affecté par une forte marge d'erreur)



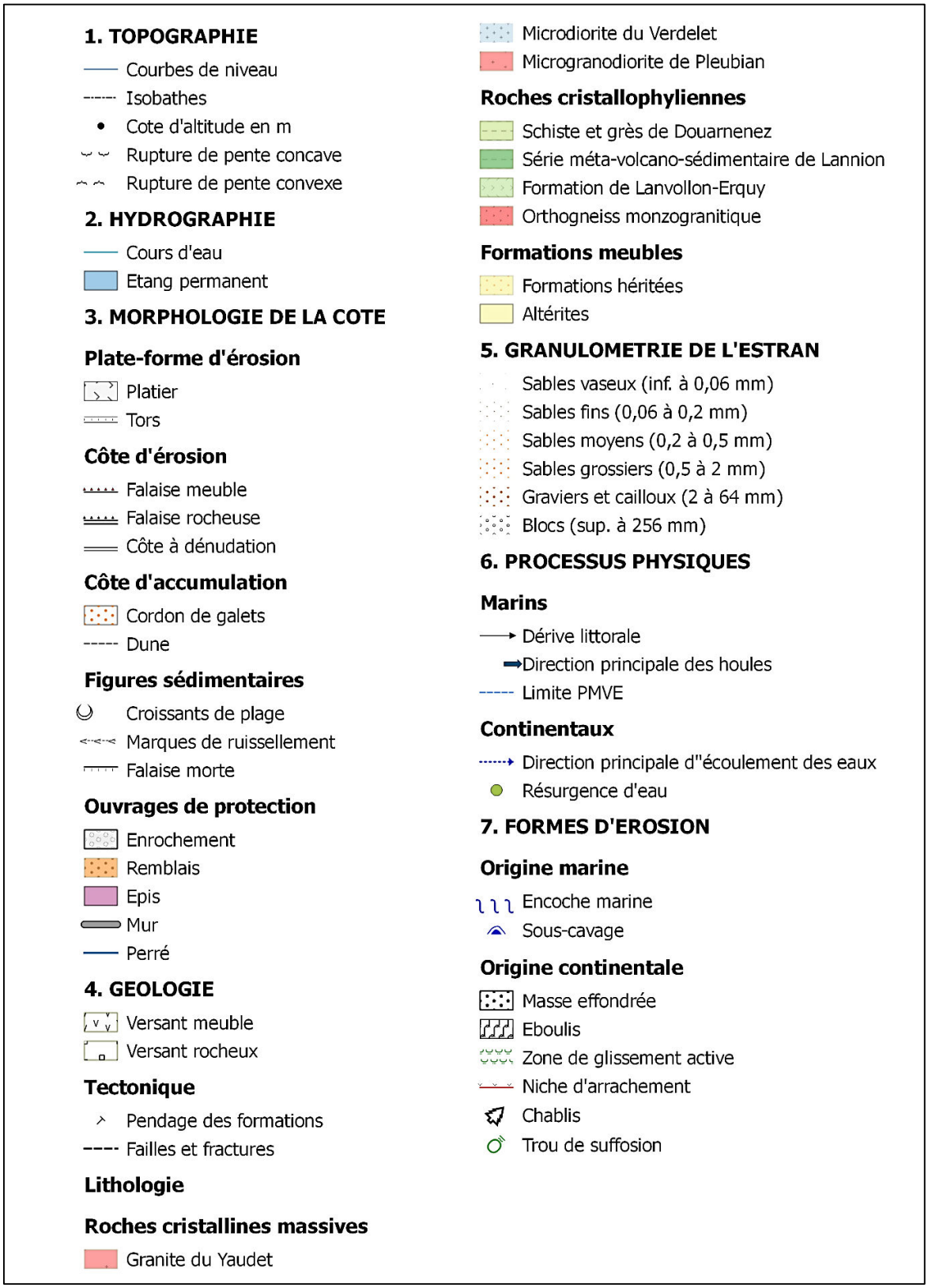
Front de falaise de l'anse de Poulbréhen à Plozévet



Annexe 11 : Récapitulatif de la qualité des levés topographiques des profils transversaux à la plage sur les sites d'étude

Sites d'étude	Date mission	Instrument utilisé pour le levé topo	Nombre de profils	Remarques	Marge d'erreur moyenne sur la composante Z
Pléneuf-Val-André (Les Vallées)	11/04/2017	GPS Trimble	1		0,076
	20/10/2017	GPS Trimble	1	Profil de plage non utilisé car décalé à l'ouest par rapport aux autres et non comparable	0,076
	28/05/2018	Tachéomètre	1		0,008
	26/10/2018	Tachéomètre	1		0,008
	09/04/2019	Tachéomètre	1		0,008
Plougrescant	21/06/2017	GPS Trimble	2		0,036
	08/11/2017	GPS Trimble	2		0,036
	25/06/2018	Tachéomètre	2		0,014
	09/11/2018	Tachéomètre	1	Absence de levé pour le profil nord	0,014
	17/04/2019	Tachéomètre	2		0,014
Trédrez-Locquémeau	27/04/2017	Tachéomètre	3		0,002
	08/12/2017	GPS Trimble	3		0,075
	26/06/2018	Tachéomètre	3		0,002
	10/11/2018	Tachéomètre	3		0,002
	18/04/2019	Tachéomètre	3		0,002
Locquirec	28/04/2017	-	0	Absence de levé du profil de plage due aux contraintes de marée	-
	19/10/2017	GPS Trimble	1		0,052
	14/05/2018	Tachéomètre	1		0,006
	15/11/2018	Tachéomètre	1		0,006
	18/04/2019	Tachéomètre	1		0,006
Telgruc-sur-Mer	17/03/2017	-	0	Absence de levé du profil de plage due aux contraintes de marée	-
	06/10/2017	Tachéomètre	2		0,005
	18/05/2018	Tachéomètre	2		0,005
	26/10/2018	Tachéomètre	2		0,005
	12/04/2019	Tachéomètre	2		0,005
Plozévet	12/04/2017	GPS Trimble	4		0,065
	20/11/2017	GPS Trimble	4		0,065
	02/05/2018	Tachéomètre	4		0,003
	31/10/2018	Tachéomètre	4		0,003
	10/04/2019	Tachéomètre	4	Profil de plage n°1 non utilisé car décalé à l'ouest par rapport aux autres et non comparable	0,003

Annexe 12 : Éléments composant les cartes géomorphologiques



Annexe 13 : Organisation des entités créés sous SIG et sources des données

Rubrique	Sous-rubrique	Entité	Attribut	Sources et bases de données
Topographie	**Continentale**	Courbes de niveau	Altitude (m)	BD Topo (IGN)
		Zéro NGF		
		Cote d'altitude	Altitude (m)	
		Rupture de pente	Morphologie (concave ou convexe)	Observations de terrain
	Marine	Isobathes		SCAN25 (IGN)
		Zéro Hydrographique		
Hydrographie		Cours d'eau		BD Topo, Photographies aériennes (IGN), Observations de terrain
		Étang permanent		
Morphologie de la côte	**Plate-forme d'érosion**	Tors		Observations de terrain, Photographies aériennes de 2015 (IGN)
		Platier		
	Côte d'érosion	Falaise meuble		
		Falaise rocheuse		
		Côte à dénudation		
	Côte d'accumulation	Cordon de galets		
		Dune		
	Ancienne côte d'érosion	Falaise morte		
	Figures sédimentaires	Croissants de plage		
		Marques de ruissellement		
	Côte artificialisée	Enrochement		
		Mur	Année de construction / de mise en place	
		Perré		
		Épis		
		Remblais		
Géologie	**Lithologie**	Roches cristallines massives	Nom et nature de la formation	Observations de terrain, cartes géologiques au 1 : 50000 (BRGM)
		Roches cristallophyliennes		
		Formations meubles	Formations héritées ou altérites	
	Tectonique	Failles	Orientation et pendage (degré)	
		Fractures		
Granulométrie de l'estran		Sédiments	Classe granulométrique (sables vaseux aux blocs)	Observations de terrain, BD Sextant (IFREMER)
Caractéristiques des processus physiques	**Marins**	Dérive littorale		Observations de terrain
		Limite des Pleines Mers de Vives eaux	Coefficient de marée	
		Houles	Direction principale, période, hauteur significative moyenne	BD ANEMOC (Cerema)
	Continentaux	Écoulements d'eau continentale	Direction principale	Observations de terrain, BD Topo (IGN)
		Résurgence d'eau		Observations de terrain
		Bouche d'évacuation d'eau		
Formes d'érosion	**Origine marine**	Encoche		Observations de terrain
		Grotte, cavité		
	Origine continentale	Masse effondrée		
		Éboulis		
		Zone de glissement active		
		Niche d'arrachement		
		Chablis		
		Trou de suffosion		
Enjeux	**Humains**	Bâti	Utilisation (résidentielle, de service, de stockage)	Photographies aériennes de 2015 (IGN), Observations de terrain
		Terrain privés		
		Sentier côtier		
	Économiques	Terrains agricoles		
		Activités touristiques et économiques		
		Voie d'accès à la mer	Escaliers, cale	
	Stratégiques	Routes	Classement (nationale, départem., communale)	
		Aire de stationnement (parking)	Constitution (béton, gravillons)	
	Environnementaux	Milieu semi-naturel		

Annexe 14 : Liste des indicateurs d'enjeux sélectionnés et non-retenus pour l'étude

Catégorie	Indicateurs	Justification
Humain	Nombre d'habitants par maille	
	Part de résidences secondaires par maille	
	Capacité d'accueil des ERP* par maille	Non pertinent pour étudier les enjeux des risques d'érosion de falaise
	Nombre de personnes <10 ou >65 ans par maille	Non pertinent pour étudier les enjeux des risques d'érosion de falaise
	Nombre de ménages à bas revenu par maille	Difficulté d'accès de la donnée
	Taux de fonction touristique par commune	
	Taux de bâtiments fermés n'ayant pas d'étage refuge par maille	Non pertinent pour étudier les enjeux des risques d'érosion de falaise
Économique	Nombre de bâtiments résidentiels par maille	
	Nombre de travailleurs dans l'(es) entreprise(s) affectée(s)	
	Valeur moyenne par m² des habitations	
	Pourcentage de terres agricoles par maille	
	Nombre de patrimoines par maille	Difficulté d'attribuer une valeur et de classifier
Structurel	Classement de la route	
	Nombre d'établissements à risque dans un rayon donné	Non pertinent pour étudier les enjeux des risques d'érosion de falaise
	Distance des établissements de secours	
	Part du linéaire côtier artificialisé par maille	Rôle ambivalent dans la vulnérabilité
	Accès à la plage	
	Contraintes du sentier côtier	

* *ERP : Établissement Recevant du Public*

Légende :

	Indicateur OSIRISC retenu
	Indicateur OSIRISC non-retenu
	Indicateur ajouté

Annexe 15 : Exemples de fiches méthodologiques d'indicateur produites dans le cadre du projet OSIRISC (Le Berre, 2018)

Fiche E202 – Valeur immobilière [EN-ECO-VIMMO]

Auteurs : Iwan Le Berre, Mathieu Weiss, Sébastien Bouland, Olivier Marcel (12/2018)

Vocation

Cet indicateur exprime le potentiel de perte de valeur immobilière.

=> *Plus la valeur immobilière est forte, plus l'enjeu économique est important*

Source

Utilisation de plusieurs sites d'estimation de valeur immobilière communale :

- OuestFrance.fr
- MeilleursAgents.fr
- NetVendeur.fr
- Efficity.fr

Une moyenne communale du prix de l'immobilier au m² est effectuée.

Qualité des données

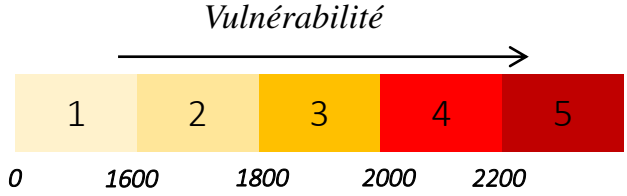
- Format de la donnée brute : données consultables en ligne
- Exhaustivité : donnée disponible à l'échelle nationale
- Précision : difficile à apprécier, les modalités de calcul des valeurs immobilières n'étant pas fournies par les sites explorés
- Pertinence : *proxy*
- Accessibilité : données en consultation seule
- Actualité : donnée de 2018
- Fréquence de mise à jour : les données sont recalculées quotidiennement = rend possible une mise à jour annuelle
- Compétences requises : faibles

Protocole

1. Recueil des différentes estimations par commune.
2. Moyenne de la valeur immobilière par m² habitable par commune
3. Affectation de cette valeur dans les mailles CARLITTO comportant du bâtiment résidentiel.

Calibrage

- Indicateur produit localement seulement
- Exemple de bornes adoptées : 1 : < 1600 € ; 2 : 1600-1800 € ; 3 : 1800-2000 € ; 4 : 2000-2200 € ; 5 : > 2200 €



Fiche E205 – Terres agricoles [EN-ECO-AGRI]

Auteurs : Iwan Le Berre, Mathieu Weiss, Sébastien Bouland, Olivier Marcel (12/2018)

Vocation

Dénombrer la part des terres agricoles dans chaque maille de 200 m, référencée par le RPG

=> Plus la surface de terres agricole est élevée, plus l'enjeu économique augmente.

Source

- RPG, 2018
- Téléchargement sur le site www.data.gouv.fr des données du Registre parcellaire graphique.
- Depuis 2000, les États membres de l'UE sont tenus de localiser et d'identifier les parcelles agricoles. Pour répondre à cette exigence, la France a mis en place le RPG qui permet l'identification des parcelles agricoles sur la base des déclarations des agriculteurs.

Qualité des données

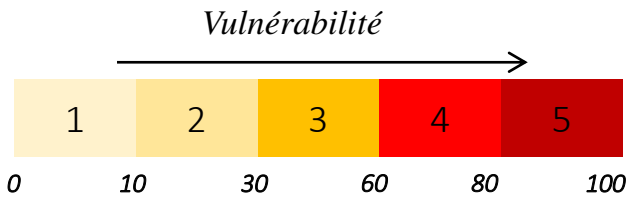
- Format de la donnée brute : base de données en ligne
- Exhaustivité : donnée disponible à l'échelle nationale
- Précision : la localisation des îlots se fait à l'échelle du 1 : 5 000 sur le fond photographique de la BD Ortho (IGN)
- Pertinence : très pertinent
- Accessibilité : données en libre accès sur internet
- Actualité : donnée de 2018
- Fréquence de mise à jour : mise à jour annuelle depuis 2010
- Compétences requises : élevées (traitements divers sous SIG)

Protocole

1. Correction topologique du RPG (polygones dupliqués sur la version 2010)
2. Union de la couche RPG avec les mailles de 200 m
3. Calcul de la géométrie (AREA) des entités produites
4. Sélection des parcelles agricoles
5. Calcul de la surface agricole par maille de 200 m (tableau croisé : extension *GroupSTAT de QGIS*)
6. Jointure attributaire du tableau croisé avec le maillage de 200 m
7. Calcul de la part de terres agricoles par maille de 200 m ("sum-area-Agri"/40000)*100

Calibrage

- Données exprimées en pourcentage
- Statistiques du jeu de données (littoral Bretagne) : Min = 0 ; Max = 100 ; Q1 = 30,7 ; Médiane = 63 ; Q3 = 86,8
- Bornes adoptées : 1 : < 10% ; 2 : 10-30 ; 3 : 30-60 ; 4 : 60-80 ; 5 : >80

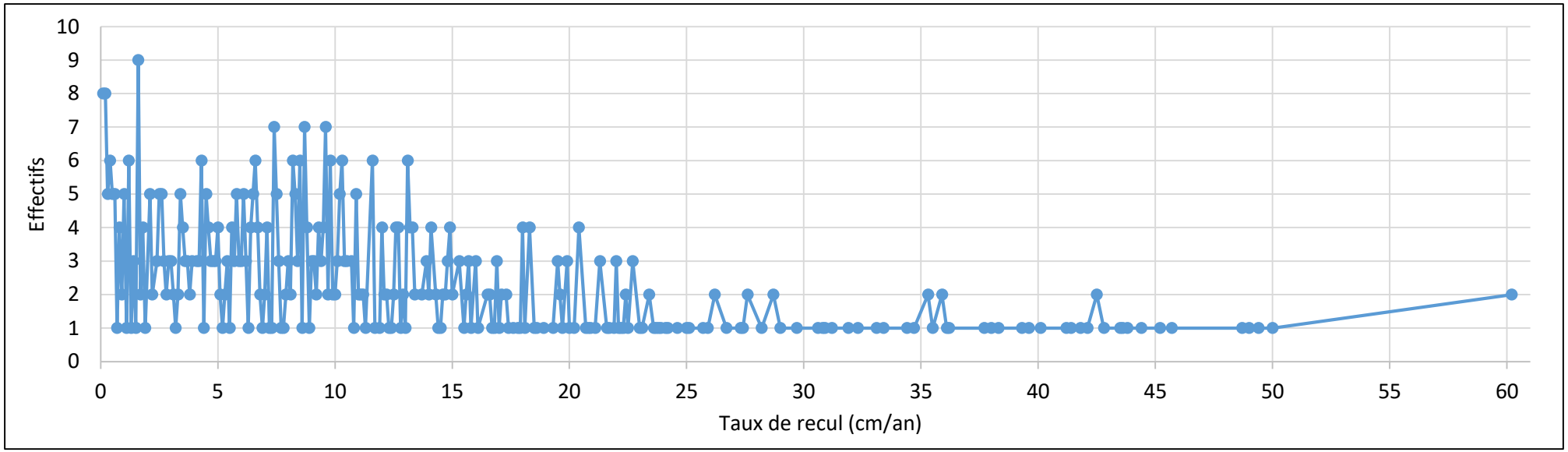


Annexe 16 : Calibrage des indicateurs d'enjeux

Type d'enjeux	Indicateur d'Enjeux	Discrétisation				
Humains	Nombre d'habitants par maille	Aucun habitant	1 habitant	2 à 3 habitants	4 à 6 habitants	Supérieur à 6 habitants
		1	2	3	4	5
	Part de résidences secondaires par maille	Aucune résidence	0,5 à 12 %	12 à 25 %	25 à 40 %	Supérieur à 40 %
		1	2	3	4	5
	Taux de fonction touristique par commune	1 à 2	3 à 10	11 à 23	24 à 57	Supérieur à 57
		1	2	3	4	5
Économiques	Nombre de bâtiments résidentiels par maille	Aucun logement	1 logement	2 logements	3 logements	Supérieur à 3 logements
		1	2	3	4	5
	Valeur moyenne par m^2 des habitations	Inférieur à 1 600 €	Entre 1 600 et 1800 €	Entre 1 800 et 2000 €	Entre 2 000 et 2 200 €	Supérieur à 2 200 €
		1	2	3	4	5
	Pourcentage de terres agricoles par maille	Inférieur à 10 %	Entre 10 et 30 %	Entre 30 et 60 %	Entre 60 et 80 %	Supérieur à 80 %
		1	2	3	4	5
	Nombre total de travailleurs dans l'(es) entreprise(s) affectée(s)	Aucune	1 personne	2 à 3 personnes	4 à 6 personnes	Supérieur à 6 personnes
		1	2	3	4	5
Structurels	Classement de la route	Aucune route	Route sans issue	Route communale	Route départementale	Route nationale
		1	2	3	4	5
	Accès à la plage	Aucun accès		Accès piéton		Accès piéton et voiture
		1		3		5
	Contraintes du sentier côtier	Aucun sentier		Sentier qui peut être déplacé facilement		Sentier qui peut être déplacé difficilement
		1	2	3	4	5
	Distance des établissements de secours	Inférieure à 5 min	Entre 5 et 10 min	Entre 10 et 15 min	Entre 15 et 20 min	Supérieure à 20 min
		1	2	3	4	5

Annexe 17 : Calibrage de l'indicateur d'aléa

- **Effectifs des falaises meubles en Bretagne en fonction des taux de recul moyen terme issus de l'INE (Cerema, 2015)**



- **Calibrage de l'indicateur d'aléa en fonction des « seuils naturels » identifiés à partir de la répartition des taux de recul moyen terme des falaises meubles**

Taux de recul moyen terme (cm/an)	Inférieur ou égal à 2	Entre 2 et 6	Entre 6 et 13,5	Entre 13,5 et 24	Supérieur à 24
	1	2	3	4	5

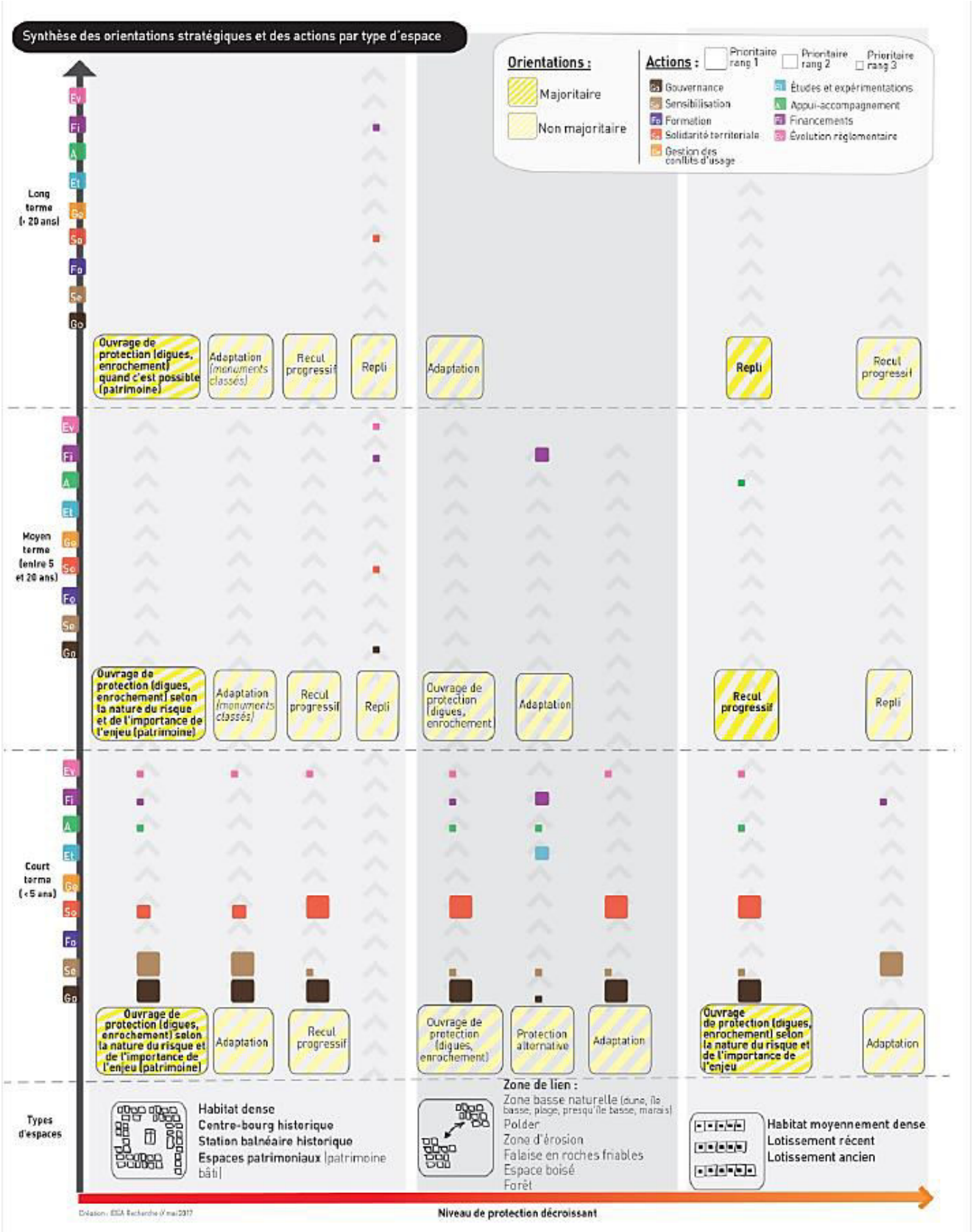
Annexe 18 : Liste des indicateurs de gestion sélectionnés et non-retenus.

Catégorie	Indicateurs	Justification
Démarche locale	Présence d'une stratégie locale	
	Acteurs partenaires de la démarche	
	Intégration extraterritoriale	
	Compétences humaines sur les risques côtiers	
	Publications scientifiques sur les risques d'érosion	
	Prise en compte de la relocalisation	
	Mise en œuvre du programme d'actions PAPI	PAPI inexistants
	Actions dans chaque axe du PAPI	PAPI inexistants
Gestion du trait de côte	Mise en place de la compétence GEMAPI	
	État des ouvrages	
	Efficacité des ouvrages	Reflète la prise en compte des processus d'érosion impliqués
	Archivage des phénomènes d'érosion	Reflète le début d'action et une prise de conscience de l'intérêt des connaissances
	Études techniques réalisées sur les solutions d'aménagement	Reflète la volonté de trouver des solutions, avoir une meilleure connaissance sur les stratégies de gestion envisageables, donc exprime un "premier pas" vers l'action
	Réduction de la sensibilité du site à l'érosion - mitigation	Reflète le début d'actions et la prise en compte des processus d'érosion impliqués
Prise en compte du risque dans l'aménagement	État général du PPRL	
	Prise en compte du risque d'érosion de falaises meubles dans le SCOT	Reflète la prise en compte des risques dans l'aménagement à l'échelle pluri-communale
	Contraintes de construbilité (PLU) - limitation de l'urbanisation	Pour le risque d'érosion, l'aléa est toujours considéré "fort", donc analyse selon 3 niveaux de mesure : interdiction, limitation et autorisation de construction
Actions d'information et de sensibilisation	État et mode de diffusion du DICRIM	
	Analyse pédagogique du DICRIM	
	Présence d'associations sur les risques côtiers	
	Événements de sensibilisation dans les établissements scolaires	
	Panneaux d'avertissement (signalisation)	Adapté au contexte des falaises meubles car difficulté d'avoir des repères comme pour les submersions
	Publications dans la presse locale sur les risques côtiers	Reflète les actions d'information ou de mobilisation des élus, des riverains ou des associations
Gestion de crise	Mise à jour du PCS	
	Mise en place de mesures de sécurisation post-événement	Reflète la gestion après-crise
	Intégration du SDIS dans le PCS	Non pertinent pour étudier la gestion des risques d'érosion de falaise
	Mode d'alerte à la population	Non pertinent car difficulté de prévoir le moment du déclenchement du mouvement de terrain

Légende :

Indicateur OSIRISC retenu — Indicateur OSIRISC modifié — Indicateur OSIRISC non-retenu — Indicateur ajouté

Annexe 19 : Exemple de fiche « repères » synthétisant des orientations stratégiques et des actions par type d'espace (IDEA Recherche, 2017)



Annexe 20 : Calibrage des indicateurs de gestion

Domaine	Indicateur de Gestion	Discrétisation				
Démarche locale	Présence d'une stratégie locale	Absence de démarche	Présence d'une démarche de gestion des risques non labellisée	Présence d'une stratégie locale en construction	Présence d'une stratégie locale labellisée	Présence d'une stratégie locale labellisée intégrant un PAPI complet
		1	2	3	4	5
	Prise en compte de la relocalisation	Aucune réflexion sur la relocalisation	Étude de relocalisation dans la stratégie locale	Mise en place de l'outil dans certains documents d'aménagement	Mise en place de l'outil dans tous les documents d'aménagement	Opérations concrètes de relocalisation
		1	2	3	4	5
	Acteurs partenaires de la démarche	Structure seule	Très faible : services de l'État	Faible : Établissements publics	Moyen : Comité d'expert	Fort : Associations d'usagers
		1	2	3	4	5
	Intégration extraterritoriale	Absence de participation	Participation à moins de 2 travaux	Participation à moins de 5 travaux	Participation à moins de 10 travaux	Implication dans plus de 10 travaux
		1	2	3	4	5
	Publications scientifiques sur les risques d'érosion	Aucune étude	1 à 2 études	3 à 4 études	5 à 6 études	7 études et plus
		1	2	3	4	5
	Compétences humaines sur les risques côtiers	0,2 pt/1000 habs	0,2pt<>0,5 pt /1000 habs	0,5pt<>1 pt /1000 habs	1pt<>1,5 pt /1000 habs	>1,5 pt /1000 habs
		1	2	3	4	5
Gestion du trait de côte	Archivage des phénomènes d'érosion	Aucun archivage	Archivage des études	Archivage des études et de photographies	Archivage des études, de photographies et des dates d'événements	Archivage des études, de photographies, des dates et de témoignages de riverains
		1	2	3	4	5
	Mise en place de la compétence GEMAPI	Plus de 3 ans de retard dans l'identification de l'autorité compétente	1 an de retard ou plus dans l'identification de l'autorité compétente	Identification de l'autorité compétente	Déclaration du système d'endiguement	Prélèvement de la taxe GEMAPI
		1	2	3	4	5
	État des ouvrages	Tous les ouvrages en mauvais état	Moins d'un tiers (0,33) des ouvrages en mauvais état	Entre un et deux tiers (0,33 à 0,66) des ouvrages en mauvais état	Plus de deux tiers des ouvrages en bon état	Ensemble des ouvrages en bon état
		1	2	3	4	5
	Efficacité des ouvrages	Totalement inadapté : l'érosion se poursuit et/ou est accélérée	Érosion que lors d'événements météo-marins extrêmes	Aucune érosion en arrière mais impact sur la plage ou les secteurs voisins	Érosion freinée sans impact sur les milieux voisins	Érosion arrêtée sans impact sur les milieux voisins
		1	2	3	4	5
	Études techniques sur les solutions d'aménagement	Aucune étude		1 à 2 études		3 à 4 études
		1		3		5

	Réduction de la vulnérabilité - mitigation		**Eaux usées non raccordées et se déversant dans la falaise**	**Eaux usées partiellement raccordées**	**Eaux usées raccordées**	**Eaux usées raccordées et végétation stabilisatrice ou dissuasive**
			2	3	4	5
Prise en compte du risque dans l'aménagement	**État général du PPRL**	**En révision ou pas de PPRL prescrit**	**En construction ou approuvé, ne prenant en compte que les zones basses**	**Approuvé mais pas encore intégré au PLU**	**Approuvé et intégré au PLU mais prescriptions non-suivies**	**Approuvé, intégré au PLU et prescriptions suivies**
		1	2	3	4	5
	Prise en compte du risque d'érosion de falaises meubles dans le SCOT	**Aucune prise en compte**	**Mention ou définition très brève (en 2 ou 3 phrases)**	**Définition et causes**	**Définition, causes et exemples (historique)**	**Description complète avec localisation du risque**
		1	2	3	4	5
	Contraintes de construbilité	**Autorisation de construction avec aucune prescription**		**Autorisation de construction avec des limitations**		**Interdiction de construction**
		1		3		5
Information aux risques	**État et mode de diffusion du DICRIM**	**Absence de DICRIM**	**Critères de niveau 0 validés**	**Critères de niveau 0 et 1 validés**	**Critères de niveau 0, 1 et 2 validés**	**Critères de niveau 0, 1, 2 et 3 validés**
		1	2	3	4	5
	Analyse pédagogique du DICRIM	**Aucune description du risque**		**Description sans localisation du risque sur la commune**		**Description avec localisation du risque sur la commune**
		1		3		5
	Présence de panneaux d'avertissement	**Aucun panneau**		**Un seul panneau sur tout le site**		**Au moins deux panneaux à chaque extrémité du site**
		1		3		5
	Publications dans la presse locale sur les risques côtiers	**Aucune publication**	**1 à 2 publications**	**3 à 4 publications**	**5 à 6 publications**	**7 publications et plus**
		1	2	3	4	5
	Événements de sensibilisation dans les établissements scolaires	**Aucun événement dans l'établissement**		**Moins d'un événement par an dans l'établissement**		**Un événement ou plus par an dans l'établissement**
		1		3		5
	Présence d'associations sur les risques côtiers	**Pas d'association sur les risques côtiers**	**Associations impliquées ponctuellement**	**Associations supra-territoriales**	**Associations impliquées dans les questions de gestion des risques côtiers**	**Associations entièrement consacrées aux risques côtiers**
		1	2	3	4	5
Gestion de crise	**Mise à jour du PCS**	**Pas de PCS ou mise à jour de plus de 5 ans**	**Mise à jour il y a plus de 3 ans**	**Mise à jour il y a moins de 3 ans**	**Mise à jour il y a moins de 2 ans**	**Mise à jour les 12 derniers mois**
		1	2	3	4	5
	Mise en place de sécurisation post-événement	**Aucune mise en place**		**Mise en place de barrières**		**Mise en place de barrières + panneaux**
		1		3		5

Annexe 21 : Diagnostics et études sur des solutions d'aménagement réalisés par des bureaux d'études à la demande des communes et des départements sur les six sites d'étude

Site	Demandeur	Organisme	Année	Intitulé de l'étude
Pléneuf-Val-André	Mairie	Stabiplage	2007	Avis de faisabilité de la technique Stabiplage au droit de la falaise de Nantois
	Mairie	Arcadis	2007	Diagnostic visuel de la falaise de Nantois
	Mairie		2008	Diagnostic visuel de la falaise des Vallées
Plougrescant	Mairie	Tribunal Administratif de Rennes	2010	Enquête publique sur l'aménagement du site
	DDTM 22	BRGM	2013	Avis technique sur le phénomène d'érosion de la falaise de Pors-Hir
	DDTM 22	Cerema	2014	Diagnostic géotechnique - Recherche du toit rocheux
Trédrez-Locquémeau	Mairie	Antéa	2002	Étude du phénomène d'érosion de la falaise de Notigou
	Mairie	Hydratec	2015	Étude du phénomène d'érosion à Notigou et définition de solutions
Locquirec	Mairie	In Vivo-environnement	2008	Étude du phénomène d'érosion du littoral sur l'anse du Moulin de la Rive et solutions de protection
	Mairie	CNRS_UBO	2008	Rapport circonstancié sur les effondrements de la falaise du Moulin de la Rive
	Conseil général 29	Ginger-CEBTP	2014	Diagnostic géotechnique (G5) - Étude de la stabilité de la RD64A - Moulin de la Rive à Locquirec
	DDTM 29	Cerema	2015	Étude de l'érosion du trait de côte du site du Moulin de la Rive
	Conseil général 29	Ginger-CEBTP	2015	Étude géotechnique de conception phase projet (G2) – Confortement de la falaise - RD64A - Locquirec
Telgruc	Mairie	UBO	2015	Analyse géomorphologique de l'anse de Trez-Bellec et propositions d'aménagement du site
	Mairie	Arcadis	2016	Érosion marine et effondrement ; Telgruc-sur-Mer, Anse du Caon, Trez-Bellec Étude géotechnique de conception
Plozévet	DDTM 22	Cerema	2015	Diagnostic de risque d'instabilité du sentier littoral
	Mairie	Tribunal Administratif de Rennes	2017	Enquête publique sur la servitude de passage des piétons le long du littoral

Annexe 22 : Valeurs des indices et des sous-indices d'aléa, d'enjeux et de gestion obtenues sur les sites d'étude

	Indices			Sous-indices							
Sites d'étude	**Aléa**	**Enjeux**	**Gestion**	**Enjeux humains**	**Enjeux économiques**	**Enjeux structurels**	**Démarche de gestion**	**Application**	**Aménagement**	**Sensibilisation**	**Gestion de crise**
Pléneuf-Val-André	3,8	1,9	3,3	1,9	1,8	1,8	2,5	3,8	3,7	2,3	3,0
Plougrescant	5,0	2,6	2,7	2,5	1,7	3,0	2,5	2,8	2,3	2,2	3,0
Trédrez-Locquémeau	2,2	2,6	2,4	3,0	1,8	2,4	2,3	3,3	1,7	2,4	2,0
Locquirec	3,1	2,7	2,3	3,2	1,8	2,3	1,2	3,0	2,3	2,4	2,0
Telgruc-sur-Mer	2,5	2,5	2,3	2,3	2,0	2,9	1,8	3,3	2,0	1,8	2,0
Plozévet	2,8	2,6	2,9	2,6	2,2	2,4	2,3	2,8	3,7	2,4	2,0

Annexe 23 : Questionnaire d'analyse des besoins pour la gestion du risque d'érosion des falaises meubles

Partie A: Informations sur le répondant

A1. 1-Dans quel département se trouve votre institution ?

- ☐ Côtes d'Armor
- ☐ Finistère
- ☐ Ille-et-Vilaine
- ☐ Morbihan

A2. 2-Quelle est votre institution ?

- ☐ Conseil régional de Bretagne
- ☐ Conseil départemental
- ☐ EPCI
- ☐ Commune
- ☐ DREAL
- ☐ Préfecture
- ☐ DDTM
- ☐ Autre

Autre _____

3-Votre fonction :

- ☐ Directeur
- ☐ Ingénieur/Chargé d'études
- ☐ Technicien
- ☐ Maire
- ☐ Autre élu
- ☐ Autre

Autre _____

4-Quel est votre âge ? _____

5-Nombre d'années dans ce poste :

- ☐ Moins de 2 ans
- ☐ De 2 à 5 ans
- ☐ De 5 à 10 ans
- ☐ 10 ans et plus

Partie B: Besoins liés au risque d'érosion des falaises meubles

B1. **6-Parmi les éléments contribuant à la gestion du risque d'érosion des falaises, des quels estimez-vous avoir le plus besoin ? Noter sur une échelle de 1 à 5 (1 = pas de besoin, 5 = besoin important)**

	1	2	3	4	5
Connaissances et accès aux données	☐	☐	☐	☐	☐
Suivi et mesures sur le terrain	☐	☐	☐	☐	☐
Sensibilisation citoyenne	☐	☐	☐	☐	☐
Définition des responsabilités entre les acteurs	☐	☐	☐	☐	☐
Echanges entre gestionnaires et scientifiques	☐	☐	☐	☐	☐
Ressources humaines qualifiées	☐	☐	☐	☐	☐
Formations professionnelles	☐	☐	☐	☐	☐
Définition de stratégies de gestion locales	☐	☐	☐	☐	☐
Mise en oeuvre des stratégies de gestion	☐	☐	☐	☐	☐
Financement	☐	☐	☐	☐	☐
Adaptation à la réglementation	☐	☐	☐	☐	☐
Développement d'un système de vigilance local aux risques d'érosion des falaises meubles	☐	☐	☐	☐	☐

B2. **7-Autres éléments non-cités ci-dessus dont vous estimez avoir besoin ? (avec sa note d'importance de 1 à 5)**

Partie C: Outils d'adaptation au risque d'érosion des falaises meubles

C1. **8-Noter sur une échelle de 1 à 5 (1 = pas important, 5 = très important), les OUTILS suivants qui seraient utiles, selon vous, en termes de CONNAISSANCES sur les risques d'érosion des falaises**

	1	2	3	4	5
Cartographie des processus actifs sur les falaises (glissement, éboulement, ruissellement...)	☐	☐	☐	☐	☐
Cartographie de l'évolution passée du trait de côte et taux de recul	☐	☐	☐	☐	☐
Cartographie des enjeux exposés à l'érosion à terme	☐	☐	☐	☐	☐
Fiche d'informations communale (type de côte, changements historiques et récents, photos...)	☐	☐	☐	☐	☐
Diagnostic sur l'état et l'efficacité des ouvrages de défense contre la mer présents sur votre territoire	☐	☐	☐	☐	☐
Recueil des lois et des règlements liés aux risques côtiers	☐	☐	☐	☐	☐
Annuaire des ressources spécialisées en milieu côtier (bureaux d'études publics ou privés, groupes de recherche...)	☐	☐	☐	☐	☐
Plateforme Web pour l'accès aux données actualisées sur les zones côtières	☐	☐	☐	☐	☐

C2. **9-Noter sur une échelle de 1 à 5 (1 = pas important, 5 = très important), les OUTILS suivants qui seraient utiles, selon vous, en terme de METHODOLOGIE pour la gestion des risques côtiers ?**

	1	2	3	4	5
Fiche protocole de diagnostic de risque	☐	☐	☐	☐	☐
Fiche protocole de suivi du territoire	☐	☐	☐	☐	☐
Supports pour la sensibilisation citoyenne (diaporama, poster, vidéo…)	☐	☐	☐	☐	☐
Enquêtes auprès de la population	☐	☐	☐	☐	☐
Guide d'évaluation économique de solutions (analyse multicritère, analyse coût-avantage)	☐	☐	☐	☐	☐
Guide d'identification de solutions (clé décisionnelle, ouvrages à favoriser ou à éviter…)	☐	☐	☐	☐	☐
Guide des procédures administratives (autorisations, étapes…) pour la mise en place de mesures d'adaptation	☐	☐	☐	☐	☐

C3. **10-Autres outils non-cités ci-dessus, en termes de connaissances et de méthodologie, dont vous estimez avoir besoin ? (avec sa note d'importance de 1 à 5)**

Merci d'avoir répondu à notre questionnaire.

Annexe 24 : Notes moyennes attribuées par les institutions aux 12 types de besoin de gestion du risque d'érosion

	Moyenne						Écart-type					
Institutions	**Commune**	**EPCI**	**DDTM**	**Préfecture**	**Conseil départem**	**DREAL**	**Commune**	**EPCI**	**DDTM**	**Préfecture**	**Conseil départem**	**DREAL**
Nombre de répondants	**53**	**23**	**9**	**4**	**3**	**2**	**53**	**23**	**9**	**4**	**3**	**2**
Connaissances et accès aux données	3,70	4,27	4,44	4,75	3,00	3,00	1,11	0,91	0,83	0,43	1,63	2,00
Suivi et mesures sur le terrain	3,65	4,23	4,56	4,00	4,33	3,00	1,24	1,03	0,50	1,22	0,47	0,00
Sensibilisation citoyenne	3,00	3,32	2,78	3,00	2,00	4,00	1,25	1,09	1,23	1,00	0,82	1,00
Définition des responsabilités entre les acteurs	3,58	4,00	4,22	4,25	2,00	4,00	1,20	1,12	0,79	1,30	1,41	1,00
Échanges entre gestionnaires et scientifiques	3,37	4,09	4,22	3,00	3,33	2,50	1,00	0,72	0,63	1,41	1,70	2,50
Ressources humaines qualifiées	3,40	3,55	4,11	2,33	4,33	3,00	0,96	1,10	0,74	1,25	0,47	0,00
Formations professionnelles	3,02	3,57	2,67	3,00	4,00	2,50	0,95	0,94	1,15	0,82	0,82	0,50
Définition de stratégies de gestion	3,77	3,91	3,44	3,50	4,00	4,00	1,17	1,00	1,42	0,50	0,00	1,00
Mise en œuvre des stratégies de gestion	3,81	3,95	3,67	3,50	4,00	4,00	1,06	1,02	1,15	0,50	0,00	1,00
Financement	3,96	4,41	3,11	3,67	3,67	4,00	1,18	0,77	1,29	1,89	0,94	1,00
Adaptation de la réglementation	3,57	3,71	4,22	3,33	3,00	4,00	1,09	0,92	0,79	0,47	1,63	1,00
Développement d'un système de vigilance local	3,77	3,59	3,44	4,33	2,67	2,00	1,27	1,06	1,34	0,94	1,25	1,00

Annexe 25 : Notes moyennes attribuées par les institutions aux outils de connaissance et de méthodologie.

- **Outils de connaissance**

	Moyenne						Écart-type					
Institutions	**Commune**	**EPCI**	**DDTM**	**Préfecture**	**Conseil départem**	**DREAL**	**Commune**	**EPCI**	**DDTM**	**Préfecture**	**Conseil départem**	**DREAL**
Nombre de répondants	**53**	**23**	**9**	**4**	**3**	**2**	**53**	**23**	**9**	**4**	**3**	**2**
Cartographie des processus côtiers actifs	3,96	4,57	4,00	4,50	3,33	2,50	1,19	0,65	0,76	1,22	1,70	1,50
Cartographie des taux recul	4,00	4,67	4,29	4,00	3,67	2,00	1,15	0,55	1,03	0,83	1,89	1,00
Cartographie des enjeux	4,11	4,33	4,86	5,00	2,67	3,50	1,11	0,83	0,35	1,30	1,25	0,50
Fiche d'informations communale	3,94	4,19	3,67	4,50	2,33	2,00	1,04	0,90	0,47	0,83	0,94	1,00
Diagnostic des ouvrages	4,02	4,10	4,00	4,50	2,33	3,50	1,17	0,97	0,93	0,71	1,25	0,50
Recueil des lois	3,53	3,81	3,86	3,00	2,67	3,50	0,96	0,97	0,83	1,25	0,47	1,50
Annuaire des ressources spécialisées	3,19	3,10	3,43	3,00	2,33	1,50	1,11	1,19	0,90	0,82	0,94	0,50
Plateforme Web	3,68	4,05	3,43	4,00	3,00	2,50	1,23	1,08	1,18	0,50	1,41	0,50

- **Outils de méthodologie**

	Moyenne						Écart-type					
Institutions	**Commune**	**EPCI**	**DDTM**	**Préfecture**	**Conseil départem**	**DREAL**	**Commune**	**EPCI**	**DDTM**	**Préfecture**	**Conseil départem**	**DREAL**
Nombre de répondants	**53**	**23**	**9**	**4**	**3**	**2**	**53**	**23**	**9**	**4**	**3**	**2**
Fiche de diagnostic du risque	3,78	4,48	3,57	3,75	3,00	2,00	1,01	0,84	0,73	1,09	1,63	1,00
Fiche de suivi du territoire	3,63	4,43	3,43	3,50	3,33	2,50	1,07	0,99	0,90	1,12	0,47	1,50
Supports de sensibilisation	3,28	3,76	3,43	3,25	3,00	3,50	1,07	1,27	1,29	0,83	0,00	0,50
Enquêtes auprès de la population	2,78	3,14	2,71	3,00	3,00	2,00	1,09	1,00	1,16	1,00	0,00	1,00
Guide d'évaluation économique de solutions	3,51	4,14	3,43	3,50	3,33	2,50	1,06	0,94	1,40	0,87	0,94	1,50
Guide d'identification de solutions	3,74	4,67	4,43	3,50	3,33	2,50	1,11	0,55	1,05	1,12	0,94	1,50
Guide de procédures administratives	3,81	4,48	4,00	3,50	3,00	4,00	1,13	0,66	0,93	1,12	1,41	1,00

Annexe 26 : Avantages et inconvénients de solutions « dures » et « douces » pouvant être employées pour ralentir ou stopper le recul des falaises meubles (d'après ANCORIM, 2012)

Type de méthode	Parade	Avantages	Inconvénients / Contraintes	Exemple
Dure	**Ancrages et boulonnage**	- Augmentation de la stabilité de la falaise ; - Solution prévue pour durer longtemps (plusieurs années à décennies)	- Coûts élevés ; - Entretien régulier ; - Inapplicable à tout type de falaise ; - Amaigrissement de la plage par réflexion des vagues sur la paroi artificielle ; - Dégradation du paysage	 Saint-Quay-Portrieux (22) *Ouest-Acro*
	Enrochement	- Augmentation de la stabilité superficielle de la falaise ; - Dissipation des vagues (sur la paroi) ; - Études simples ; - Solution prévue pour durer plusieurs années - Plus ou moins coûteux (selon les caractéristiques du site)	- Non adapté aux falaises reculant par érosion continentale ; - Rupture dans les apports sédimentaires ; - Affouillement et perte de sédiments à la base ; - Surveillance régulière ; - Impact paysager	 Penhors (29) *Basara, 2016*
	Mur en béton ou maçonné	- Augmentation de la stabilité du pied de la falaise ; - Solution prévue pour durer plusieurs décennies ; - Intervention simple	- Non adapté aux falaises reculant par érosion continentale ; - Rupture dans les apports sédimentaires ; - Affouillement et perte de sédiments à la base ; - Surveillance régulière ; - Impact paysager	 Locquirec (29) *Basara, 2016*
Douce	**Végétalisation Restauration du couvert végétal**	- Réduction de l'érosion des sols ; - Faible impact paysager ; - Peu coûteux	- Applicable sur de petites surfaces ; - Végétaux non invasifs ; - Fracturation de la roche (effet balancier) ; - Entretien fréquent ; - Solution non pérenne	 Lorient (56) *Le Cornec, 2015*
	Rechargement de plage	- Compensation du déséquilibre sédimentaire ; - Impact paysager faible	- Coûteux lors de la mise en place ; - Entretien régulier ; - Besoin de la proximité de zones de prélèvement des matériaux	 Dragapor (Portugal) *Dias Neves, 2019*

	Reprofilage	- Augmentation de la stabilité de la falaise ; - Étude simple ; - Solution prévue pour durer plusieurs années mais reprofilages successifs à prévoir	- Nécessite qu'il y ait de la place en arrière du sommet de la falaise pour pouvoir reculer le sommet lors du reprofilage (donc non applicable sur des sommets de falaise urbanisés) ; - Surveillance régulière ; - Coûts pouvant être élevés en fonction de l'importance du terrassement ; - Perturbation de la biodiversité	
	Système de drainage par rigole drainante	- Diminution de la teneur en eau des formations ; - Peu onéreux	- Suivi et connaissances préalables des variations du toit de la nappe ; - Travaux de tranchées importants à prévoir ; - Dispositif fragile ; - Entretien continu ; - Impact paysager	
	Système de drainage par drains sub-horizontaux	- Évacuation des eaux continentales - Études de projet simples ; - Solution durable	- Bonne connaissance des ruissellements et des infiltrations du milieu ; - Risque de colmatage ; - Entretien régulier	
	Géogrille	- Augmentation de la stabilité de la falaise ; - Favorise le développement de la végétation ; - Études de projet simples ; - Solution durable	- Inadapté à tout type de falaise ; - Surveillance régulière	

N.B : Les solutions employées pour ralentir ou stopper le recul des falaises meubles peuvent avoir un ou deux modes d'action : la protection du pied de la falaise afin de limiter l'érosion marine et stabiliser le pied de falaise ; la stabilisation du versant contre les processus continentaux. Il est à noter aussi que, bien souvent, l'utilisation d'une seule méthode ne suffit pas, il faut généralement avoir recours à la combinaison de plusieurs parades pour stabiliser une falaise (ex : schéma de droite).

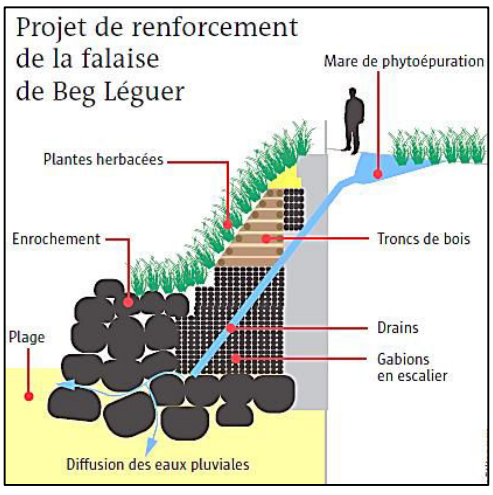


Schéma du dispositif de protection de la falaise meuble de Beg-Léguer à Lannion.

(Le Télégramme, 2017)

UNIVERSITE SCIENCES BRETAGNE DE LA MER LOIRE ET DU LITTORAL

UBO Université de Bretagne Occidentale

Titre : **L'érosion des littoraux à falaises meubles en Bretagne : aléa, enjeux et gestion du risque**

Mots clés : falaises meubles, recul du trait de côte, Bretagne, géomorphologie littorale, risques côtiers d'érosion, gestion

Résumé : L'érosion des falaises meubles résulte de la dénudation progressive des formations superficielles héritées recouvrant les littoraux actuels. Leur recul est irrégulier et souvent plus modéré que le recul des littoraux d'accumulation. Ce type de falaise s'étend, en Bretagne, sur 20 % du linéaire côtier. Malgré une dynamique encore mal cernée, l'urbanisation et les activités humaines se sont densifiés à leur sommet et en arrière des versants au cours des dernières décennies. Leur érosion est donc étudiée dans cette thèse sous l'angle des risques côtiers générés par l'occupation actuelle des versants des falaises meubles régionales. L'analyse porte sur l'aléa, les enjeux exposés et la gestion afin d'évaluer le risque d'érosion et d'approcher la vulnérabilité de ces territoires.

L'approche systémique vise, par emboitement d'échelles temporelles et spatiales, à identifier les composantes contribuant à augmenter la vulnérabilité de ces littoraux. Une chronique d'aléas sur les 20e et 21e siècles présente la répartition spatio-temporelle régionale de l'érosion et les facteurs générateurs. Sur six sites d'étude représentatifs, la photo-interprétation (entre 1950 et 2015) et un suivi photogrammétrique (de 2017 à 2019) quantifient les vitesses et les rythmes de recul des falaises meubles. La cartographie géomorphologique aboutit à un nouveau paradigme pour l'évaluation du risque d'érosion de ces littoraux. Enfin, des indicateurs d'enjeux et de gestion déterminent la vulnérabilité sur ces sites et une enquête régionale menée auprès des acteurs institutionnels identifie les dispositifs de gestion absents. Selon leur typologie, les falaises meubles sont diversement exposées à une érosion favorisée par les facteurs météo-marins combinés, incluant notamment les précipitations. En Bretagne, leur recul menace surtout des terrains résidentiels et agricoles. Les indicateurs de vulnérabilité mettent en évidence l'insuffisance des documents réglementaires, de stratégies locales, de concertation et de sensibilisation des citoyens. Ils permettent de mieux comprendre les difficultés posées par la gestion du risque d'érosion.

Title : **Erosion of soft cliffs in Brittany : hazards, stakes and risk management**

Keywords : soft cliffs, coastline retreat, Brittany, coastal geomorphology, erosion risk, management

Abstract : The erosion of soft cliffs results from the denudation of inherited, superficial formations covering the current coastlines. Their retreat rate is unsteady and often smaller than on accumulation coasts. This type of cliffs represents, in Brittany, 20 % of the coastline. Although their evolution is not fully understood, urbanization and human activities have grown denser at the top of these soft cliffs and behind, in recent decades. This thesis addresses coastal erosion with a focus on coastal risks induced by current urbanization of these soft cliffs at regional scale. The analysis tackles the hazard, stakes and management components in order to assess erosion risk and to draw near the vulnerability of these territories.

A systemic approach is adopted, nesting temporal and spatial scales, with the objective to identify the components contributing to the vulnerability of these coastal territories. A chronicle of erosion events at regional scale is produced to present the spatio-temporal distribution of erosion over the 20th and 21st centuries and to analyze the generating factors. Focusing on six representative sites, aerial photographs (between 1950 and 2015) and photogrammetric monitoring (from 2017 to 2019) allow a quantitative study of the kinematics of soft cliffs retreat. A new paradigm for assessing and mapping the erosion risk for soft cliffs is proposed. Finally, indicators for stakes and risk management allow assessing vulnerability at these sites, and a survey conducted among regional stakeholders identifies gaps in risk management policies. According to their type, soft cliffs show a range of erosion responses, controlled by a combination of subaerial and marine factors, including rainfall. In Brittany, their retreat threatens mainly residential and agricultural lands. The vulnerability indicators highlight the paucity of regulations, local management strategies, dialogue and public awareness. They allow a better understanding of the challenges raised by risk erosion management.