



HAL
open science

**LES SEDIMENTS FINS DANS UN SYSTEME
MACROTIDAL ACTUEL (CONTINUUM
SEINE-BAIE DE SEINE) : caractérisations géochimiques
et minéralogiques, identification des sources**

Carole Dubrulle-Brunaud

► **To cite this version:**

Carole Dubrulle-Brunaud. LES SEDIMENTS FINS DANS UN SYSTEME MACROTIDAL ACTUEL (CONTINUUM SEINE-BAIE DE SEINE) : caractérisations géochimiques et minéralogiques, identification des sources. Géologie appliquée. Université de Rouen, 2007. Français. NNT : . tel-00214127

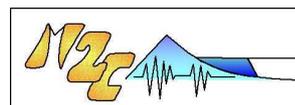
HAL Id: tel-00214127

<https://theses.hal.science/tel-00214127>

Submitted on 23 Jan 2008

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.



UMR-CNRS 6143
Morphodynamique continentale et côtière

UNIVERSITÉ DE ROUEN

ÉCOLE DOCTORALE NORMANDE DE CHIMIE-BIOLOGIE

THÈSE DE DOCTORAT

Discipline : Géologie

Spécialité : Sédimentologie et géochimie

**LES SÉDIMENTS FINS
DANS UN SYSTÈME MACROTIDAL ACTUEL
(CONTINUUM SEINE-BAIE DE SEINE) :
caractérisations géochimiques et minéralogiques,
identification des sources**

Présentée par

Mme DUBRULLE – BRUNAUD Carole

Soutenue le 9 novembre 2007 devant le jury composé de :

JOUANNEAU Jean-Marie, Directeur de Recherche CNRS, à l'Université Bordeaux 1

OUDDANE Baghdad, Professeur à l'Université Lille 1

CASTAING Patrice, Professeur à l'Université Bordeaux 1

BOUST Dominique, Docteur d'Etat - Chercheur au LRC-IRSN de Cherbourg-Octeville

DUGUE Olivier, Maître de conférence (HDR) à l'Université de Caen

LAFITE Robert, Professeur à l'Université de Rouen

LESUEUR Patrick, Professeur à l'Université de Caen

Rapporteur

Rapporteur

Examineur

Examineur

Examineur

Directeur de thèse

Directeur de thèse

***À Guillaume, mon mari
Avec qui je réalise tous mes rêves...***

À mes parents.

***"On ne fait jamais attention à ce qui a été fait,
on ne voit que ce qui reste à faire".***

Marie Curie

Après, quatre années sur cette thèse, je ne pouvais débiter ce manuscrit sans évoquer quelques personnes...

Mes premiers remerciements vont tout naturellement aux membres de mon jury de thèse :

Je tiens tout d'abord à remercier **M. Patrice Castaing**. Vous m'avez suivi pendant tout mon cursus universitaire à Bordeaux 1, depuis ma Licence jusqu'à mon DEA. Je vous suis très reconnaissante d'avoir accepté d'être dans mon jury et surtout de l'avoir présidé. Sans votre soutien et vos conseils pendant ces sept années (eh oui, déjà !!!), je n'aurai peut-être jamais débuté ce doctorat.

Je tiens ensuite à exprimer toute ma reconnaissance à **M. Baghdad Ouddane**, rapporteur de cette thèse. J'ai apprécié votre regard expert de chimiste et géochimiste sur les nombreux résultats de la thèse. Vos critiques et remarques apportent à ce travail toute la précision et la rigueur demandée en recherche.

Tous mes remerciements vont ensuite vers **M. Jean-Marie Jouanneau**, rapporteur également de cette thèse. Jean Marie, vous êtes l'un des premiers à m'avoir fait découvrir l'univers "vasouilleux". Certes, avec la Grande Vasière (qui n'est finalement qu'une Grande Sablière envasée), la vase restait encore un mystère ; et c'est avec l'estuaire de la Seine que la vase a révélé toute sa complexité. Je vous remercie donc d'avoir jugé, en tant que rapporteur, mon travail sur les envasements en système estuarien.

Je tiens ensuite à remercier mes quatre encadrants : **MM. Patrick Lesueur, Robert Lafite, Dominique Boust et Olivier Dugué**.

Merci Olivier. Vous avez délaissé quelques temps les terrains anciens de la Basse Normandie (chers à vos yeux) pour vous intéresser aux dépôts plus récents. En quelques mois, vous êtes devenu mon " gourou de la fraction inférieure à 2 μm " et m'avez fait découvrir le monde merveilleux des argiles. Grâce à vous, l'illite, la kaolinite, la chlorite, la vermiculite, les smectites et les nombreux minéraux interstratifiés n'ont presque plus de secrets pour moi.

Merci Dominique. J'ai retrouvé avec toi une rigueur et une organisation que j'avais acquise lors de mes premiers stages en géochimie. Tes connaissances sur les éléments traces et les radionucléides m'ont permis de consolider mes bases dans cette discipline. D'un point de vue plus personnel, je sais que nos échanges célestes se poursuivront et j'espère un jour te faire découvrir ma vision de l'astronomie.

Merci Robert. Tu as toujours été à l'écoute et toujours là, quand j'en avais besoin. Certes, nos bureaux n'étaient pas l'un en face de l'autre mais cela n'a pas empêché d'échanger souvent et de discuter longuement de l'estuaire de la Seine. Je suis contente de continuer à travailler avec toi sur de futurs projets, non plus dans l'estuaire de la Seine mais dans des contrées plus froides...

Merci Patrick. Bien que tu ne sois pas officiellement mon directeur de thèse, je t'ai toujours considéré comme tel. Pendant ces quatre années, j'ai partagé beaucoup de choses avec toi : les sorties sur le terrain (tes petites bouffées d'oxygène, comme tu aimes à le dire, entre tes

enseignements et tes réunions administratives), les préparations aux colloques, les rédactions des publications, des rapports d'activités et surtout nos discussions sur les différents résultats de la thèse. Tu as su me transmettre à merveille tes connaissances sédimentologiques sur les vases et sur l'estuaire de la Seine. Merci également de m'avoir fait découvrir tous les côtés, bons ou mauvais du travail de chercheur (mise en place d'un projet de recherche, prévisions budgétaires, élaboration de protocoles analytiques), et de m'avoir laissé une certaine autonomie dans mon travail. Enfin, heureuse de continuer à travailler à tes côtés, et ce d'autant plus je l'espère, après ton mandat de directeur de laboratoire.

Finalemment, chacun, dans votre discipline, vous m'avez apporté votre expérience, vos connaissances et votre savoir-faire : vous êtes en quelque sorte les quatre pôles du mélange que je suis devenue.

Pendant cette thèse, j'ai eu l'occasion de travailler avec de nombreuses personnes et je tiens à leur dire également merci.

Merci à **Mme Nicole Poupinet**. Lors de nos nombreuses sorties sur le terrain, tu m'as fait découvrir la Normandie, une région que je ne connaissais que trop peu. Tu m'as transmise ton savoir-faire et tes petits trucs sur le tamisage et la préparation des lames orientées. Je n'oublierai pas non plus nos nombreuses discussions (qui, certes, n'étaient pas toujours scientifiques...) et j'espère apprendre encore beaucoup auprès de toi avant que tu ne partes vers d'autres horizons...

Merci à **M. Mathieu Fournier**, mon " géostatisticien ". J'avoue qu'au début les statistiques étaient quelque chose de très flous pour moi. Mais grâce à toi, tu as su rendre les ACP, AFD et régressions multiples plus attractives. Merci de ton aide, de ta patience et de tes nombreuses explications. Bon courage pour la suite, docteur !!!.

Merci à **Melle Isabelle Bourgoïn** et **Melle Coralie Thouroude**. Vous avez été toutes les deux des aides précieuses pendant cette thèse. Isabelle, merci pour ton efficacité, ta rapidité et ton sérieux. Coralie, merci pour ta bonne humeur, ta rigueur et ta précision. Je suis heureuse de pouvoir continuer à travailler avec toi sur d'autres projets (c'est promis...les vases qui puent de l'estuaire de la Seine, c'est fini... en tout cas pour le moment !!!).

Merci à **M. Sandric Lesourd**. Quel honneur et bonheur d'avoir pu travailler avec LA (dernière) référence sur l'estuaire de la Seine. J'ai découvert au cours de nos nombreux échanges, une personne formidable. Merci d'avoir accepté de partager ton savoir sur ce système complexe et surtout d'avoir participé à la mission CYSAVA. À bientôt, je l'espère sur les flots...

Cette thèse n'aurait pas pu voir le jour sans une aide financière ni logistique, alors :

Merci au Programme Scientifique Seine Aval qui a financé cette thèse et à la Région Haute Normandie qui m'a permise de vivre pendant trois ans.

Merci également à tout l'équipage du Côte d'Aquitaine (INSU-CNRS), commandés par Guy Le Falher et Joël Perrot lors de la mission CYSAVA en baie et dans l'estuaire de la Seine.

Merci au Laboratoire de Radio-écologie (LRC-IRSN) de Cherbourg-Octeville et notamment Mme Marianne Rozet et M. Luc Solier pour les analyses radioisotopiques.

Merci au Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques (CRPG) et plus particulièrement au Service d'Analyse des Roches et des Minéraux du CNRS (SARM) de Nancy pour les analyses des éléments chimiques.

Je ne pourrais clore mes remerciements sans faire un petit coucou à toutes les personnes du laboratoire Morphodynamique Continentale et Côtière de Caen et de Rouen :

- les secrétaires, comptable, techniciens, ingénieurs... Valérie, Maria, Marie-Pierre, Anthony (Monsieur le magicien), Dominique, Sylvain, Michel, Isabelle N., Franck, Alain, Laurent B., Laurent P., Martine C., Martine D., Bernard, Irène ;

- les chercheurs et enseignants chercheurs... Marianne, Bernadette, Dominique, Damien, Julien D., Valérie, Sophie, Agnès, Jean-Paul, Bernard, Daniel, Jean-Louis, David, Jean-Claude, Alain, Benoît, Nicolas, Yoann, Anne, Jean-Pierre, Franck, Sylvie et plus récemment Alexander et Kevin ;

- les étudiants, doctorants, post-doctorants et docteurs...

Nicolas D. : tu m'as accueilli dans ton bureau ; Isabelle et moi avons envahi ton espace, mais l'expérience était inoubliable. Tu m'as manqué en fin de thèse : ta bonne humeur et tes blagounettes n'étaient plus là.

Isabelle : je pense que sans toi dans le bureau, je me serai ennuyée. Ta joie de vivre, tes angoisses parfois et tes quelques gaffes vont me manquer. Tu es devenue une amie, Isabelle et je ne peux que te souhaiter du bonheur.

Zohra : tu nous as rejoint dans le bureau au milieu de ma thèse. Le contraste avec Nicolas était brutale, mais j'ai apprécié nos échanges et nos discussions. Je vais en revanche regretter les macroutes...hum que c'est bon !!!

Aurélien : tu ne le sais peut-être pas, mais c'est un peu grâce à toi que j'ai continué en thèse. Lors de notre première rencontre, en DEA à Bordeaux, tu m'as fait partager ton enthousiasme pour la thèse et surtout dit de faire quelque chose qui me plaisait, peu importe ce qui arriverait après, alors Merci encore Docteur.

Et puis tous les autres comme Romain (eh, non pardon M. Desguée), Émeric, Simon, Nicolas R., Massinissa, Philippe, Milléna, Alexandra, Julien C., Kamel, Ernesto, Robinson, Romaric, Alexis, Yann, Danièle, Béatrice, Emmanuel, David, Javad, Mohammad, Johanna, Yu-e, Fidèle, Smail, Amer, Anne-Laure, Houcine, Zhibo, Guillaume H., Guillaume C. et les petits nouveaux Pierre, Benoît et Iman. Bon courage à vous tous, docteurs et futurs docteurs !!!

Enfin, je termine en remerciant mes parents, ma sœur et toute ma famille qui m'ont toujours soutenu et encouragé à faire ce que j'aimais le plus.

Guillaume, tu m'as dédicacé ta thèse, maintenant je te dédicace la mienne. Tu m'as suivi en Normandie, laissant tout derrière toi. Tu m'as encouragé, soutenu, aidé, aéré l'esprit quand j'en avais besoin et fait en sorte que cette thèse se passe dans les meilleures conditions pour moi. À mon tour maintenant de m'occuper de toi. L'année 2007 a été merveilleuse (une thèse et un mariage, que demander de plus...) et je ferai en sorte que l'année 2008 soit une année exceptionnelle pour toi.

Sommaire

Dédicace	1
Remerciements	5
Sommaire	11
Introduction générale	15

Chapitre 1 : Du marqueur particulaire à la source

Sommaire du chapitre 1	19
Introduction	21
I – La discrimination des sources de particules fines : une grande diversité	22
I.1. Marqueurs minéralogiques	22
I.2. Marqueurs géochimiques	26
I.3. Marqueurs radioactifs	30
I.4. Marqueurs organiques	33
I.5. Marqueurs biogènes	35
II – Marquage des particules fines dans le système estuarien de la Seine	36
II.1. Le système estuarien de la Seine	36
II.2. Bilans des sources et des transferts de sédiments fins dans le système estuarien de la Seine	57
Conclusion	62

Chapitre 2 : Stratégie d'échantillonnage et méthodologie analytique

Sommaire du chapitre 2	65
I – Prélèvements des dépôts envasés en estuaire et en baie de Seine	67
I.1. Échantillonnages en domaine intertidal	67
I.2. Échantillonnages en domaine subtidal	79
II – Méthodologie analytique	86
II.1. Séparation de la fraction fine (< 50 µm)	86
II.2. Analyse granulométrique des sédiments	88
II.3. Calcimétrie volumétrique des sédiments	89
II.4. Détermination et quantification des cortèges des minéraux argileux	89
II.5. Analyse des éléments majeurs-mineurs-traces	92
II.6. Analyse des radionucléides	93

Chapitre 3 : Distribution des marqueurs particuliers dans l'estuaire de la Seine, dans la baie de Seine, sur le littoral bas-normand et dans les cours d'eau côtiers bas-normands

Sommaire du chapitre 3	97
Introduction	99
I – L'estuaire de la Seine	99
I.1. Caractéristiques granulométriques des sédiments de l'estuaire de la Seine	99
I.2. Les minéraux argileux des sédiments dans l'estuaire de la Seine	102
I.3. Distribution des éléments majeurs-mineurs-traces dans les sédiments de l'estuaire de la Seine	109
I.4. Distribution des radionucléides naturels et artificiels dans les sédiments de l'estuaire de la Seine	124
Résumé : L'estuaire de la Seine	130

II – La baie de Seine et le littoral bas-normand	132
II.1. Caractéristiques granulométriques des sédiments en baie de Seine et sur le littoral bas-normand	132
II.2. Cortèges des minéraux argileux des sédiments en baie de Seine et sur le littoral bas-normand	140
II.3. Distribution des éléments majeurs-mineurs-traces des sédiments et des matières en suspension de la baie de Seine et du littoral bas-normand	154
II.4. Distribution des radionucléides des sédiments de la baie de Seine et du littoral bas-normand	172
Résumé : La baie de Seine et le littoral bas-normand	181
III – Les cours d'eau côtiers du Calvados : l'Orne, la Dives et la Touques	184
III.1. Présentation générale des trois cours d'eau côtiers	184
III.2. Caractéristiques granulométriques des sédiments des berges de l'Orne, la Dives et la Touques	190
III.3. Cortèges minéralogiques argileux des sédiments des berges des bas cours de l'Orne, la Dives et la Touques	192
III.4. Distribution des éléments majeurs-mineurs-traces des sédiments des berges de l'Orne, la Dives et la Touques	198
III.5. Distribution des radionucléides dans les sédiments des berges de l'Orne, la Dives et la Touques	213
Résumé : L'Orne, la Dives et la Touques	222
Chapitre 4 : Les contributions en matériel fin dans la sédimentation fine actuelle du système estuarien de la Seine	
<hr/>	
Sommaire du chapitre 4	227
Introduction	229
I – Synthèse des informations données par les marqueurs particuliers dans le système estuarien de la Seine	229
I.1. La granulométrie des sédiments fins	229
I.2. Les minéraux argileux des sédiments fins	231
I.3. Les éléments majeurs-mineurs-traces et la fraction fine	233
I.4. Les radionucléides des sédiments fins	241
Résumé cartographique	243
II – Détermination des différentes contributions en matériel fin dans la sédimentation fine actuelle	244
II.1. La sédimentation fine dans le système estuarien de la Seine : un mélange	244
II.2. Résolution du mélange particulaire	245
II.3. Le mélange particulaire dans le système estuarien de la Seine	261
Conclusion	268
Conclusions générales	271
Références bibliographiques	277
Liste des figures	307
Liste des tableaux	319
Glossaire	323
Table des matières	329
Planches plastifiées supplémentaires (estuaire de la Seine, baie de Seine et littoral bas-normand)	
Annexes (CD)	
Résumé/Abstract (quatrième de couverture)	

Introduction générale

Issues de l'érosion des surfaces continentales et de la production biologique, transportées par l'eau ou par l'air, les particules fines cheminent dans le milieu océanique vers les fonds abyssaux, lieu ultime possible de leur dépôt. Dans le contexte actuel de haut niveau marin relatif et dans les mers à marées, après que leur sédimentation ait eu lieu dans les fonds d'estuaires, elles tendent à envahir des domaines plus ouverts, tels que les plate-formes continentales, les baies et les embouchures d'estuaires.

Le matériel sédimentaire qui en résulte constitue en domaine côtier ce que l'on appelle communément « la vase », définie par Bourcart et Francis-Bœuf (1942), comme "un ensemble homogène à l'échelle de l'œil, rigide et thixotropique, composée d'une fraction inerte (sable et poudre minérale, carapaces d'animaux et de végétaux planctoniques) et d'une phase active formée de granules microscopiques (gels humiques, ferreux ou ferro-humiques, associés à d'autres substances organiques)".

De part ses propriétés physiques, chimiques et mécaniques complexes, la vase est étudiée dans de nombreux travaux tels que :

- la reconstitution d'environnements ou de paléo-environnements avec le dépôt de particules fines, comme témoins d'apports fluviaux, par exemple ;
- le suivi de contaminations (radioactive, par exemple) ou de pollutions (éléments métalliques généralement) par les vases dont l'affinité avec les éléments chimiques est connue.

Dans le cas de l'estuaire de la Seine, les dernières études sur les vases se sont focalisées principalement sur :

- les processus de dépôt à l'échelle de l'estuaire (Lesourd, 2000), de la baie de Seine (Garnaud, 2003) et de vasières intertidales (Deloffre, 2005) ;
- le transport en suspension du matériel particulaire (Guézennec, 1999) ;
- la modélisation du transport sédimentaire (Chauchat, 2007 ; Waeles, 2005).

En revanche, aucune étude récente ne s'est intéressée à *l'origine* de cette vase, dans un environnement fortement macrotidal où les forçages hydrodynamiques sont élevés, les sources de particules multiples et la pression anthropique importante.

Ainsi, un véritable travail de thèse sur le matériel fin du système estuarien de la Seine est nécessaire avec pour principaux objectifs de :

- caractériser d'un point de vue géochimique et minéralogique les dépôts vaseux de l'ensemble du continuum Seine-baie de Seine ;
- dégager des marqueurs particuliers susceptibles de discriminer une source donnée ;
- constituer un modèle de mélange et résoudre le mélange à l'aide de marqueurs soigneusement sélectionnés ;
- améliorer la compréhension des modalités de la sédimentation fine actuelle dans un système estuarien macrotidal.

Le **premier chapitre** de ce mémoire expose, d'abord, une liste non exhaustive des différents marqueurs particuliers utilisés pour rechercher et identifier les sources en matériel sédimentaire dans des environnements côtiers ; puis il détaille les caractéristiques géologiques, hydrologiques, hydrodynamiques et les bilans de matière du système estuarien de la Seine.

Le **second chapitre** est consacré à la présentation des différents sites d'échantillonnage du système estuarien de la Seine : l'estuaire de la Seine, la baie de Seine, le littoral bas-normand et les cours d'eau côtiers bas-normands (Orne, Dives et Touques). Ce chapitre décrit également les méthodes d'analyse employées lors de ce travail.

Le **troisième chapitre** présente et discute séparément les résultats des études minéralogiques et géochimiques des sédiments de trois zones géographiques définies : (1) estuaire de la Seine, (2) baie de Seine et littoral bas-normand, (3) cours d'eau côtiers (Orne, Dives et Touques).

Enfin, le **quatrième chapitre** synthétise pour l'ensemble du continuum Seine-baie de Seine les résultats obtenus géographiquement dans le troisième chapitre. Grâce à une méthode statistique, les bases d'un modèle de mélange sont alors établies et une approche des modalités de la sédimentation fine actuelle est proposée en fonction des différentes sources.

CHAPITRE 1

Du marqueur particulaire à la source

Introduction	21
I – La discrimination des sources de particules fines : une grande diversité	22
I.1. Marqueurs minéralogiques	22
<i>I.1.1. Analyse minéralogique globale</i>	22
<i>I.1.2. Analyse minéralogique spécifique : l'exemple des minéraux argileux</i>	23
I.2. Marqueurs géochimiques	26
<i>I.2.1. Identification de sources et dynamique sédimentaire associée</i>	27
<i>I.2.2. Marqueurs de pollution</i>	29
I.3. Marqueurs radioactifs	30
<i>I.3.1. Différence entre les radionucléides à longue et courte période</i>	31
<i>I.3.2. Utilisation des radionucléides artificiels</i>	32
I.4. Marqueurs organiques	33
I.5. Marqueurs biogènes	35
II – Marquage des particules fines dans le système estuarien de la Seine	36
II.1. Le système estuarien de la Seine	36
<i>II.1.1. Définitions d'un système estuarien</i>	36
<i>II.1.2. Zonation longitudinale de l'estuaire de la Seine au sens strict (s.s.)</i>	39
<i>II.1.3. Cadre géologique du système estuarien de la Seine</i>	41
<i>II.1.4. Géomorphologie du système estuarien de la Seine</i>	46
<i>II.1.5. Caractéristiques hydrodynamiques du système estuarien de la Seine</i>	48
<i>II.1.6. Caractéristiques hydrosédimentaires de l'estuaire de la Seine</i>	54
II.2. Bilans des sources et des transferts de sédiments fins dans le système estuarien de la Seine	57
<i>II.2.1. Sources et transferts depuis la Seine fluviale</i>	57
<i>II.2.2. Sources et transferts dans l'estuaire de la Seine</i>	57
<i>II.2.3. Sources et transferts en baie de Seine</i>	58
Conclusion	62

INTRODUCTION

En domaine marin côtier ouvert, généralement les dépôts vaseux s'étendent sur le plateau continental et forment en zones protégées soit des vasières de milieu de plateau, soit des vasières littorales (McCave, 1972). Dans les milieux plus littoraux de baie et d'estuaire, les sédiments fins se cantonnent le plus souvent aux parties internes où ils forment des vasières intertidales (Dalrymple *et al.*, 1992).

Leurs étendues et leurs localisations sont le résultat d'une combinaison de conditions hydrodynamiques, hydrologiques et météorologiques d'une part, et de flux sédimentaires d'autre part. Ainsi, si le matériel fin continental est important, les dépôts de vase sont contrôlés par les paramètres de forçage marin : la marée et la houle. Dans le cas d'estuaires macrotidaux, les sédiments fins sont apportés conjointement depuis les fleuves et le plateau continental : l'interface continent-océan devient alors une zone où les particules marines et fluviales se mélangent fortement sous l'effet des forts courants tidaux et de houles.

Les études récentes sur les vasières, dans des systèmes estuariens (Christie *et al.*, 1999 ; Dyer *et al.*, 2000), ont permis de comprendre les processus de dépôt et d'érosion dans les zones côtières, en se basant sur l'étude sédimentologique, les calculs des taux de sédimentations, ou leurs associations avec les organismes benthiques. Lorsqu'il s'agit d'identifier les différentes origines du matériel fin et de quantifier leur contribution relative à la sédimentation fine estuarienne, la complexité constitue un vrai défi à relever, les particules fines étant transportées et mélangées à différentes échelles de temps et d'espace.

En ce qui concerne le système estuarien de la Seine, de nombreuses études ont permis d'expliquer son fonctionnement. Dès la fin des années 1970, le SAUM (Schéma d'Aptitude à l'Utilisation de la Mer) a fait un bilan complet des connaissances sur la partie aval de l'estuaire moyen. De son côté, le programme Baie de Seine coordonné par le GDR Manche (Groupement de Recherche) a conduit des recherches pluridisciplinaires (physique, modélisation hydrodynamique, chimie, biologie, sédimentologie) à l'échelle de la baie de Seine en se focalisant dans sa partie orientale. Enfin, depuis le début des années 1990 et avec l'initiative du Programme Scientifique Seine Aval, les processus hydrodynamiques et sédimentaires dans l'ensemble de l'estuaire et de la baie de Seine orientale sont maintenant mieux compris (Avoine, 1981, 1986, 1994 ; Guézennec, 1999 ; Guézennec *et al.*, 1999 ; Lesourd, 2000 ; Garnaud, 2003 ; Garnaud *et al.*, 2003 ; Lesourd *et al.*, 2003). Par contre, les différentes recherches ont souligné la difficulté à quantifier les parts respectives correspondant aux différentes origines de matériel fin (argiles et silts). Cette grande difficulté tient, à la fois, à la diversité des sources en matériel fin, mais aussi à la complexité des processus hydrodynamiques et sédimentaires, dont les fluctuations s'opèrent à des fréquences très différentes pour un lieu considéré.

Quels sont alors les principaux types de marqueurs particuliers des éléments fins et comment peut-on les utiliser dans les environnements soumis à envasement ?

Dans le cas particulier de l'estuaire de la Seine, quels marqueurs particuliers peut-on et doit-on choisir pour caractériser au mieux la sédimentation fine actuelle ?

I – La discrimination des sources de particules fines : une grande diversité

La recherche bibliographique a permis de se rendre compte que l'étude des sources de matériel sédimentaire est une thématique répandue ainsi que la description de nombreux marqueurs particuliers. Cette partie du mémoire s'intéresse donc à faire l'inventaire des marqueurs utilisés, de dégager leurs particularités et leurs limites pour tracer l'origine du matériel sédimentaire. La liste potentielle étant très longue, seules quelques catégories sont présentées à la faveur d'exemples.

I.1. Marqueurs minéralogiques

Pour identifier les sources d'un matériel sédimentaire, les principaux critères sédimentologiques sont : (1) l'analyse minéralogique du sédiment brut (Pettijohn, 1975) ; (2) l'analyse d'un groupe spécifique de minéraux tels que les minéraux argileux (Gingele *et al.*, 2001) ou les minéraux lourds (Briggs, 1965 ; Lang et Stevens, 1999) ; (3) les analyses morphologiques, chimiques et radiométriques de grains isolés (Moral-Cardona *et al.*, 1996 ; Weltje et Eynatten, 2004).

I.1.1. Analyse minéralogique globale

Parmi de nombreuses références (Blatt *et al.*, 1972 ; Blashchishin, 1976 ; Blatt, 1985 ; Buckley et Cranston, 1991), les travaux de Kairyte *et al.* (2005) sur l'origine des silt-argiles dans les dépôts sableux du littoral lituanien, en mer Baltique ont permis d'établir la composition minéralogique de chaque échantillon et de la mettre en relation avec celles des sources géologiques régionales (Fig.1.1.). Il est apparu que seules deux sources en matériel fin alimentent cette zone : des sédiments fins apportés de la péninsule Sambian, marqués par une abondance en quartz, glauconie, micas et orthoclase ; et des sédiments fins marqués par une abondance en feldspaths, apportés par le fleuve Nemunas et drainés par le lagon Curonian. La comparaison entre l'analyse minéralogique des sédiments fins et des sédiments grossiers amènent aux mêmes sources principales. Kairyte *et al.* (2005) concluent donc que deux populations granulométriques, de même origine, peuvent être transportées différemment et se retrouver au même endroit au cours du dépôt.

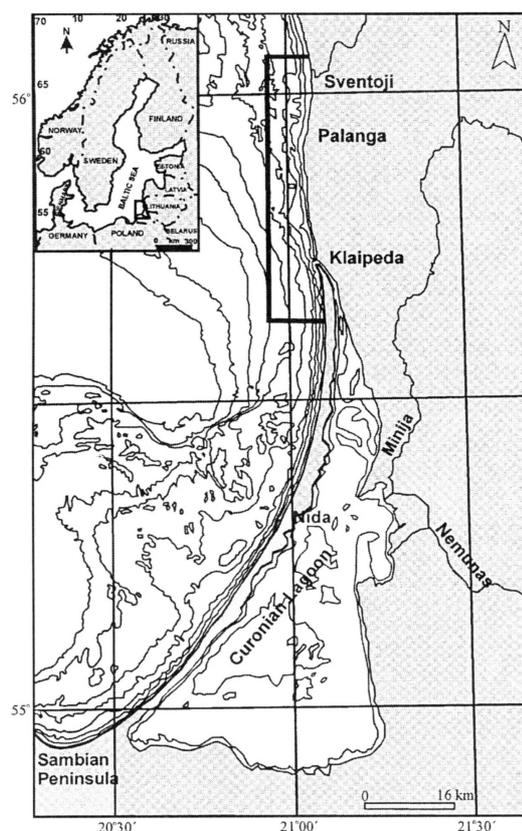


Figure 1.1. Localisation de la zone d'étude près de la Mer Baltique Lituanienne (Kairyte *et al.*, 2005).

Les études de Diekmann et Kuhn (1999) confirment l'utilité de l'analyse minéralogique dans l'identification des sources de matériel sédimentaire. La composition granulométrique et minéralogique de sédiments superficiels marin-glaciaire a permis de distinguer les variations spatiales et de suivre le transport des matériaux détritiques terrigènes originaires de l'Antarctique (Fig.1.2.). Ils arrivent à distinguer une source à l'est de l'Antarctique, ainsi qu'une source provenant du sud de la mer Weddel.

Les minéraux lourds, de la taille des sables peuvent par ailleurs marquer le déplacement dans la zone distale des transports par radeaux de glace depuis la zone d'étude.



Figure 1.2. Localisation de la zone d'étude près de la mer Weddel. (Diekmann et Kuhn, 1999).

1.1.2. Analyse minéralogique spécifique : l'exemple des minéraux argileux

Certains auteurs préfèrent ne s'intéresser qu'à un seul type de minéraux, tels que les minéraux argileux et arrivent à dégager des tendances quant au transport sédimentaire, ou à l'origine des différents stocks particuliers (Alimen et Caillère 1964a, 1964b ; Biscaye, 1965 ; Gibbs, 1967 ; Neiheisel et Weaver, 1967 ; Windom et Goldberg, 1967 ; Loughnan, 1971 ; Potter *et al.*, 1975, 1980 ; Snoussi, 1986 ; Chamley, 1989).

Oliviera *et al.* (2002) n'utilisent que les minéraux argileux comme indicateurs de la dynamique sédimentaire dans un système de plateau continental ouvert, le nord du plateau Ibérique (Fig.1.3.). Il apparaît que le cortège argileux des sédiments du plateau est peu différent de celui apporté par les fleuves. Néanmoins, il semble que les apports par ces derniers aient une certaine influence sur le cortège argileux, les sédiments proches des sources de matériel terrigène étant plus riches en kaolinite, et ceux plus éloignés plus riches en illite. Le fleuve Douro est donc la principale source

en matériel fin, à laquelle s'ajoute le fleuve Minho et dans une moindre mesure les rias espagnoles. La distribution des cortèges argileux leur a également permis de montrer qu'il existait un transport net du matériel fin à la fois vers le nord et au-delà du plateau continental.

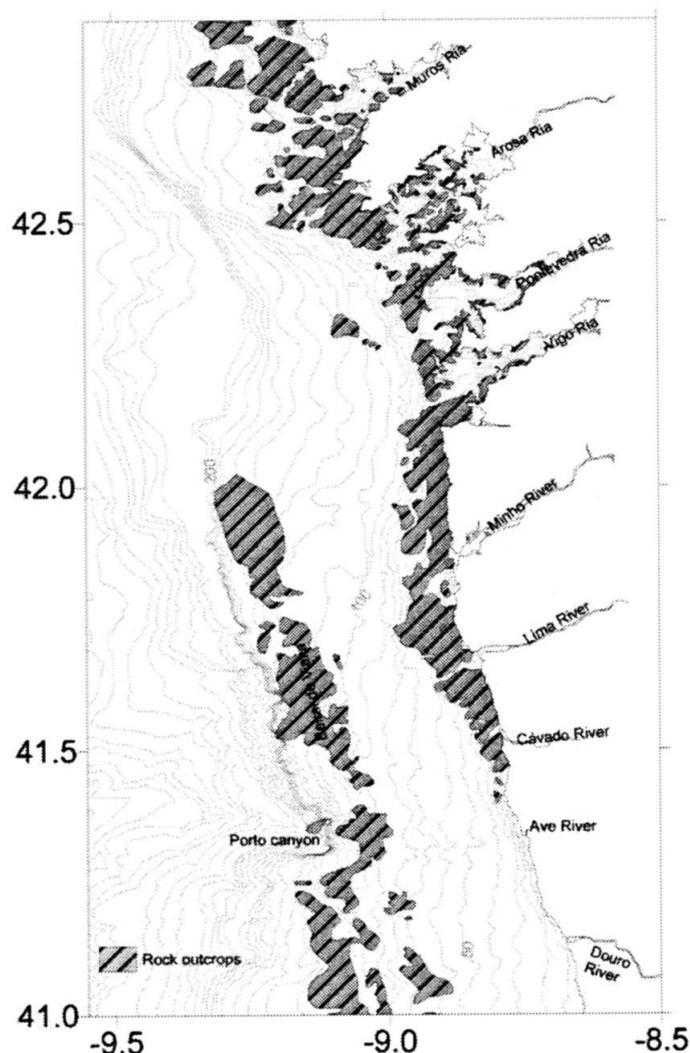


Figure 1.3. Localisation de l'étude menée sur les minéraux argileux par Oliveira *et al.*, 2002.

L'utilisation des minéraux argileux devient d'autant plus précieuse dans des environnements où les sources en matériel sédimentaire sont très variées. Par exemple, le détroit Bransfield en Antarctique (Yoon *et al.*, 1992) présente des distributions géographiques de minéraux argileux très distinctes. Un seul minéral peut caractériser une région du détroit (Fig.1.4.) : la kaolinite présente les plus fortes concentrations près de la côte du sud de l'île Shetland, la chlorite est dominante près de l'île Smith, l'illite par des teneurs importantes caractérise le plateau continental de la péninsule Antarctique et les smectites se distinguent au niveau des îles volcaniques Penguin et Bridgeman. Les augmentations des proportions de ces minéraux s'expliquent principalement par la proximité des sources, mais également par les courants géostrophiques qui distribuent le matériel sédimentaire dans cette zone.

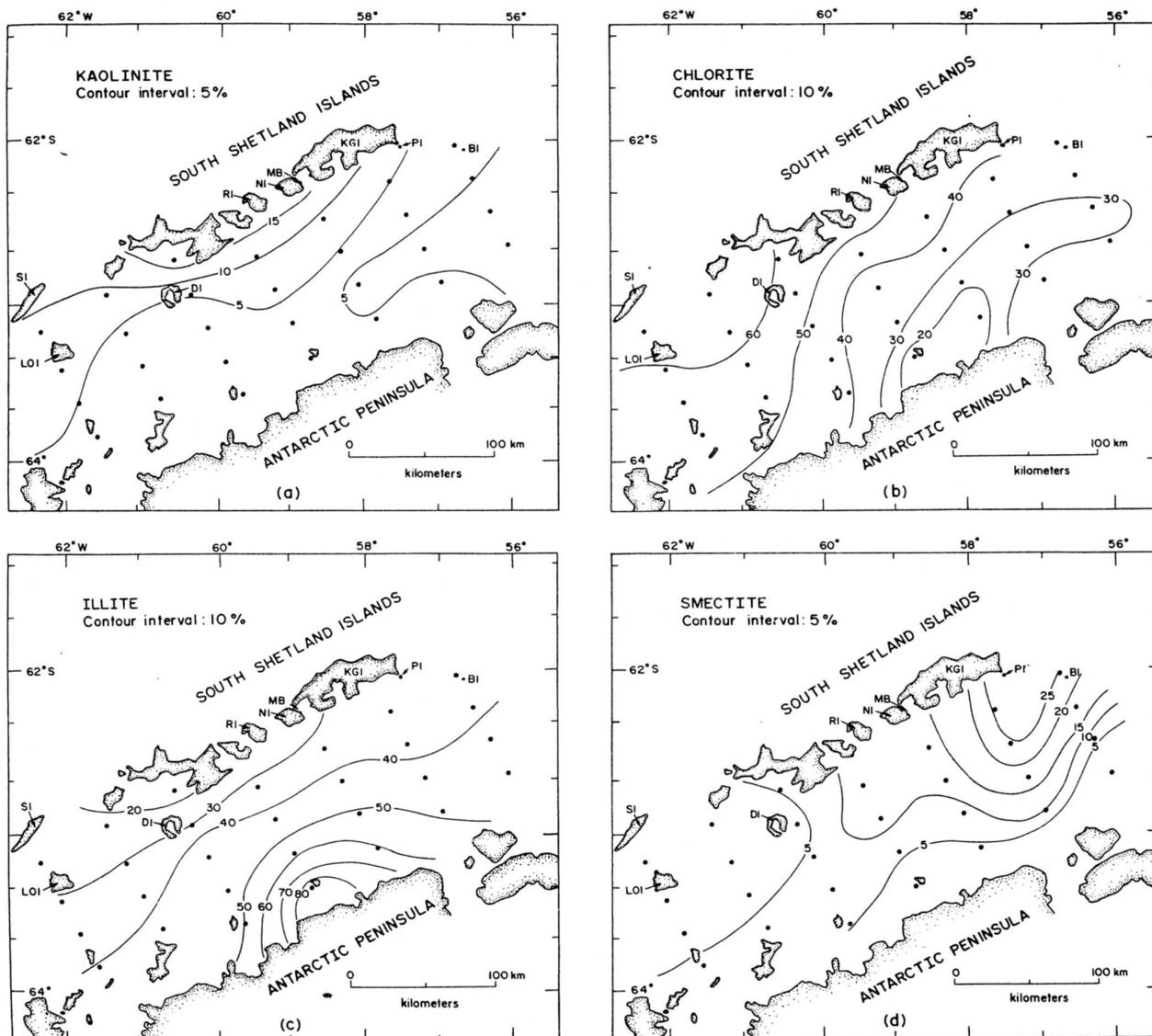


Figure 1.4. Distribution des minéraux argileux : (a) kaolinite, (b) chlorite, (c) illite, (d) smectites dans les sédiments superficiels du détroit Bransfield SI : Ile Smith ; Sni : Ile Snow ; LOI : Ile Low ; DI : Ile Deception ; RI : Ile Robert ; NI : Ile Nelson ; MB : Ile Maxwell ; KGI : Ile King George ; PI : Ile Penguin ; BI : Ile Bridgeman (Yoon *et al.*, 1992).

Dans un système fluvial, où les affluents peuvent être nombreux, les minéraux argileux permettent également de distinguer des sources de matériel fin.

Dans le sud-ouest de la France, Latouche (1971) compare les minéraux argileux des formations géologiques et pédologiques avec les alluvions récentes de la Garonne, et obtient une bonne corrélation (Fig.1.5.). Ainsi, la zone amont est caractérisée par des cortèges de minéraux argileux dominés par la chlorite et l'illite, résultat de l'érosion des formations cristallines pyrénéennes. La zone centrale de la Garonne, près de Toulouse est définie par un cortège composé de smectites, originaires des molasses tertiaires. Dans la partie aval du système, les nombreux affluents apportent des illites, dont les caractéristiques sont similaires à celles des argiles silteuses quaternaires. La partie la plus aval est, quant à elle, le mélange des différentes contributions citées précédemment dans la partie amont.

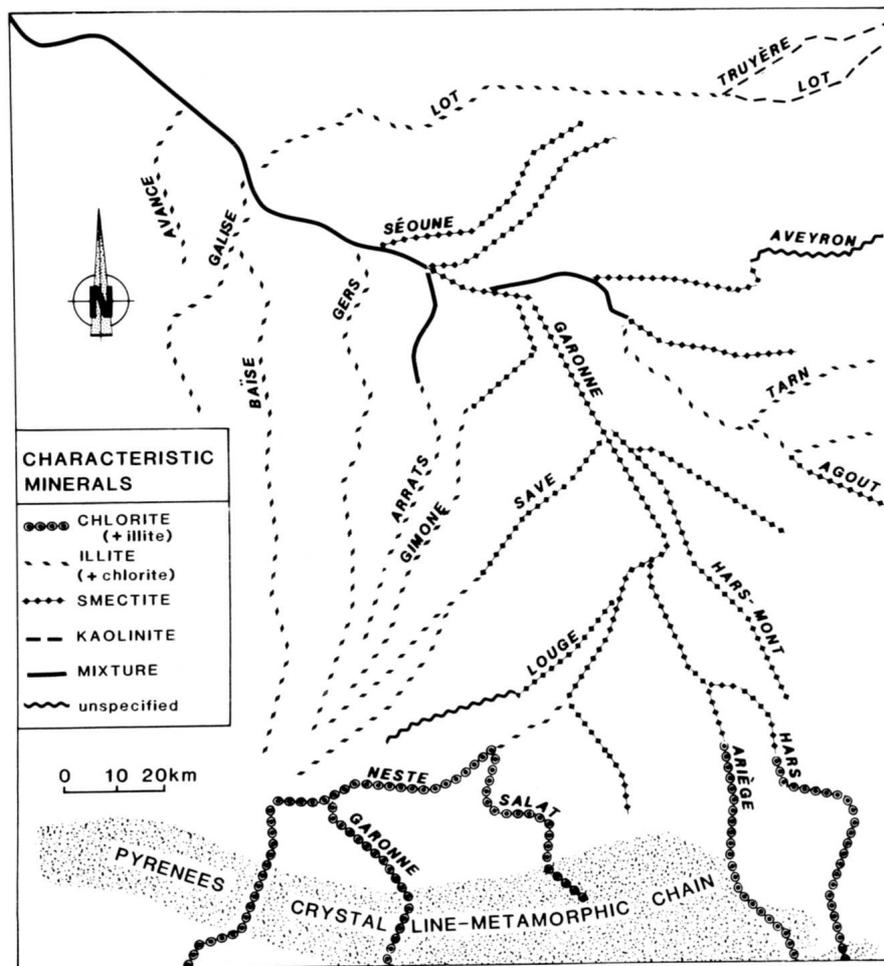


Figure 1.5. Distribution des minéraux argileux dans les alluvions récentes de la Garonne (Chamley, 1989, d'après Latouche, 1971).

L'analyse minéralogique globale d'un sédiment permet alors de discriminer différentes populations de matériaux sédimentaires dans n'importe quel environnement. L'utilisation d'un minéral spécifique va à la fois permettre de distinguer des populations sédimentaires et suivre son évolution dans l'environnement.

I.2. Marqueurs géochimiques

Une certaine affinité existe entre les particules sédimentaires, surtout les particules fines, et les éléments chimiques (Turekian et Wedepohl, 1961 ; Pickering *et al.*, 1966 ; Gibbs, 1977 ; Etcheber, 1978 ; Forstner et Wittmann, 1981 ; Martin et Meybeck, 1979). Ainsi, de nombreuses études utilisent les éléments chimiques comme marqueur du matériel sédimentaire (Bertine et Goldberg, 1973 ; Chow *et al.*, 1973 ; Jaffé et Walters, 1977 ; Goldberg *et al.*, 1979 ; Müller, 1979 ; Donazzolo *et al.*, 1981 ; Forstner et Wittmann, 1981 ; Sinex et Helz, 1981 ; MacDonald *et al.*, 1991 ; Otte *et al.*, 1991 ; Chen *et al.*, 1997 ; Tam et Wong, 2000 ; Chan *et al.*, 2001 ; Lee et Cundy, 2001 ; Santschi *et al.*, 2001).

I.2.1. Identification de sources et dynamique sédimentaire associée

Le premier objectif des études qui sont développées pour la recherche de sources particulières, est la distribution d'éléments chimiques dans une zone d'étude définie et le cas échéant, leurs quantifications (Cato, 1977 ; Wen *et al.*, 1987 ; Huh *et al.*, 1992 ; Morrissey *et al.*, 1994 ; Ergin *et al.*, 1996 ; Srisuksawad *et al.*, 1997 ; Basaham et El-Sayed, 1998 ; Cho *et al.*, 1999 ; Kim *et al.*, 1998 ; Sirocko *et al.*, 2000 ; Shumilin *et al.*, 2002 ; Yang *et al.*, 2002, 2003, 2004).

Par exemple, l'étude géochimique des sédiments superficiels de l'estuaire Pearl River en Chine a permis à Zhou *et al.* (2004) de caractériser les sources potentielles par un ou plusieurs éléments chimiques (Fig.1.6.). Ainsi, les sédiments déposés dans l'estuaire proviennent du mélange de quatre sources : une source naturelle résultant de l'altération des roches et des sols (marquée par Fe, Ti, V, Cr, Ni, Zn, Cu et Y), une source marine (marquée par Ca, Sr), une source atmosphérique (marquée par Pb et Co) et une source anthropique provenant des zones industrialisées (marquée par Cr, Ni, Zn, Cu, Y, Pb et Co).

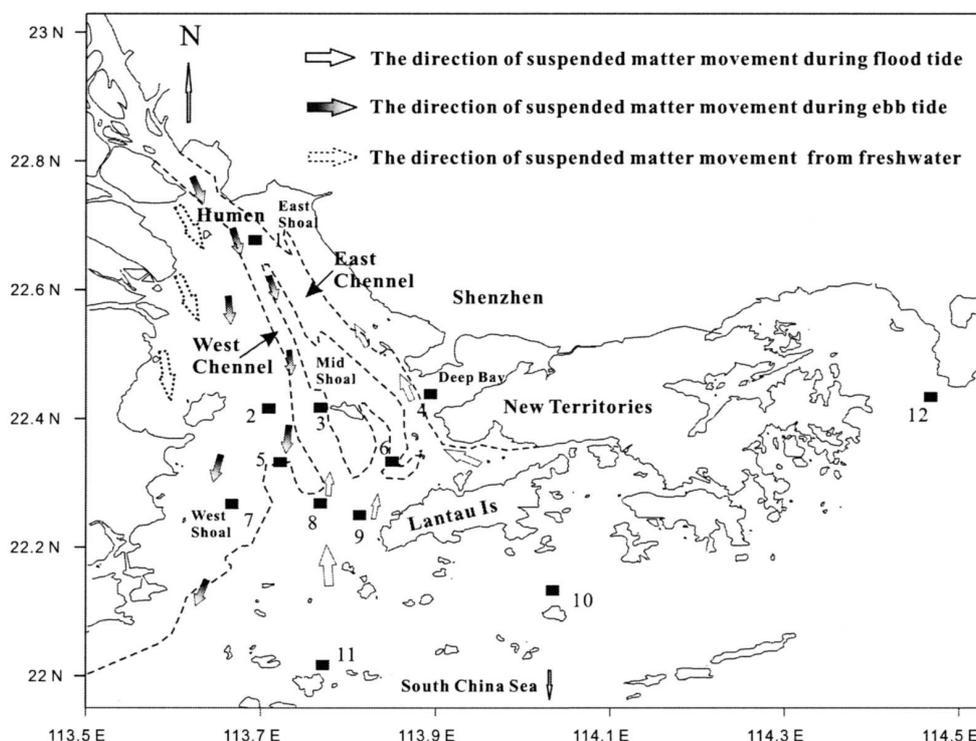


Figure 1.6. Zone d'étude de l'estuaire Pearl River et direction des transports des matières en suspension. Les nombres représentent les stations d'échantillonnage (Zhou *et al.*, 2004).

En complément des études menées par Oliveira *et al.* (2002) sur les minéraux argileux, Araujo *et al.* (2002) ont entrepris de déterminer les sources des vasières Douro et Galicia du plateau continental nord portugais à l'aide des éléments chimiques. Ils ont comparé les caractéristiques géochimiques des sédiments superficiels du plateau continental avec ceux des fleuves Minho et Douro. Il apparaît que la source principale en matériel fin de ces vasières de plateau est l'estuaire du Douro, les caractéristiques géochimiques des sédiments du fleuve Minho ne se retrouvant pas dans les sédiments de la vasière Galicia.

Dans certains travaux, l'identification des sources et la distribution des sédiments aident à la compréhension de la dynamique sédimentaire de la zone d'étude. Les variations latérales des caractéristiques chimiques et sédimentaires d'un sédiment peuvent rendre compte des conditions dynamiques actuelles (Boutier *et al.*, 2000 ; Leivuori et Niemisto, 1995 ; Brunskill *et al.*, 2001 ; Lin *et al.*, 2002), tandis que les variations verticales peuvent mettre en avant les changements des conditions de sédimentation au cours d'une période de plusieurs dizaines d'années (Sohlenius *et al.*, 2001).

Les travaux de Jouanneau *et al.* (1998) sur le plateau continental du Golfe de Gascogne, par exemple, ont permis de déterminer les sources principales des zones de dépôts fins grâce à quelques éléments traces (Pb, Zn, Cs et Sc) et quelques terres rares. Ces éléments permettent de suivre le transfert du matériel sédimentaire, et d'identifier les principales sources que sont la Loire et la Gironde dans la sédimentation fine actuelle de ce plateau, et ce malgré des conditions hydrodynamiques impliquant un mélange important.

En essayant d'identifier les sources de sédiments dans la Mer Jaune, à partir des sédiments apportés par les fleuves coréens et chinois, Lim *et al.* (2006) ont rencontré des problèmes pour comparer les données géochimiques des différents sédiments (Fig.1.7.) car, les effets de la taille granulométrique, la présence de matériel biogénique et de polluants ne permettent pas de différencier des caractéristiques chimiques et sédimentaires. Ils préconisent de s'affranchir des variations granulométriques en normalisant leurs résultats à l'aluminium.

Ainsi, ils arrivent à distinguer différentes populations de sédiments, et à conclure que les dépôts en Mer Jaune sont un mélange des différents matériaux sédimentaires

apportés par les fleuves coréens et chinois, avec une prédominance des apports en provenance de l'est de la Mer de Chine (dont les sédiments sont issus du drainage des fleuves chinois).

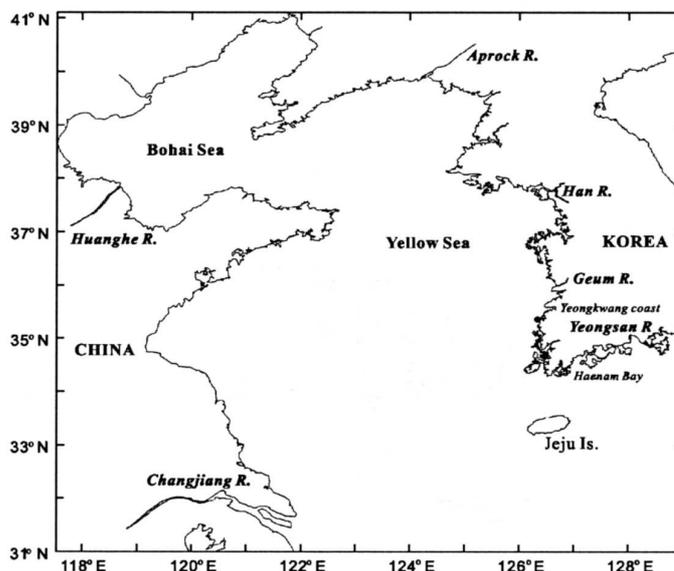


Figure 1.7. Localisation des systèmes fluviaux de la Corée et de la Chine (Lim *et al.*, 2006).

D'autres études sur l'utilisation des éléments chimiques comme marqueurs particuliers permettent de montrer des variations saisonnières. Alagarsamy (2006) a d'abord distingué deux sources dans les sédiments de l'estuaire Mandovi et du littoral adjacent, en Inde : une source fluviale et une source anthropique, issue des rejets, tels que des eaux usées et autres produits industriels (Fig.1.8.). La suite de son étude a consisté à suivre cette source anthropique et à voir comment elle évoluait dans l'estuaire selon la mousson. Il note alors que les plus faibles teneurs, pour certains éléments, apparaissent plutôt pendant la mousson, que pendant les périodes antérieure et postérieure.

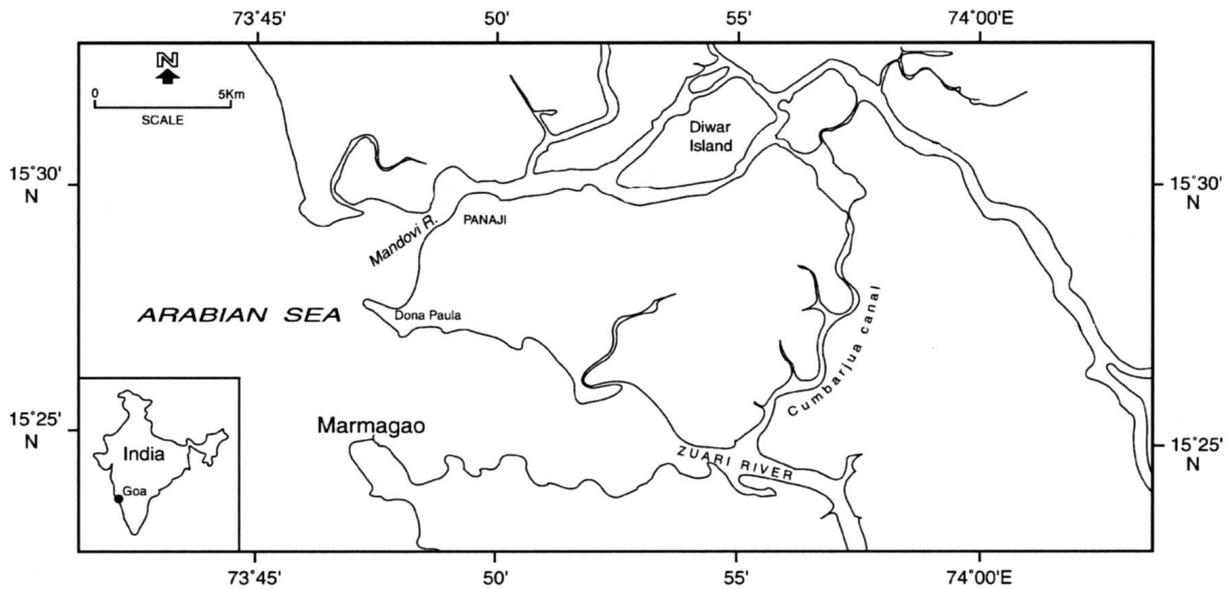


Figure 1.8. Localisation de l'estuaire Mondovi en Inde (Alagarsamy, 2005).

I.2.2. Marqueurs de pollution

Avec le développement des zones industrialisées en bordure de mer, de baie, d'estuaire, ou de rivières, l'homme a introduit dans le milieu de nombreux éléments chimiques, principalement des éléments traces (Grousset *et al.*, 1995). Le comportement de ces éléments dans l'environnement côtier peut être évalué pour comprendre la nature et l'étendue de l'influence anthropique (Boust *et al.*, 1981), et pour déterminer les possibles effets toxiques sur le milieu (Carlson et Morrison, 1992).

Par exemple, les études sur la dispersion des eaux usées rejetées à Sydney dans le sud de l'Océan Pacifique (Fig.1.9.) ont permis de montrer que les matières en suspension et les sédiments déposés près des émissions de rejets (notamment celle de Malabar) sont nettement enrichis en certains éléments métalliques (Matthai *et al.*, 2002). Il existe donc localement et près de la zone côtière de Sydney des dépôts de matériels pollués par les rejets d'eaux usées. Par contre, le suivi de ces éléments sur le plateau continental n'a pas montré de zones enrichies, car les très forts courants existants dans cette région diluent au large les rejets de eaux usées avec les eaux de l'Océan Pacifique.

L'ensemble des résultats obtenus avec ces différentes études montre donc que les éléments chimiques peuvent être de bons marqueurs particuliers. Il faut néanmoins tenir compte des effets liés à la granulométrie du sédiment et évidemment des facteurs extérieurs, de type pollution par exemple, qui pourraient modifier considérablement les interprétations.

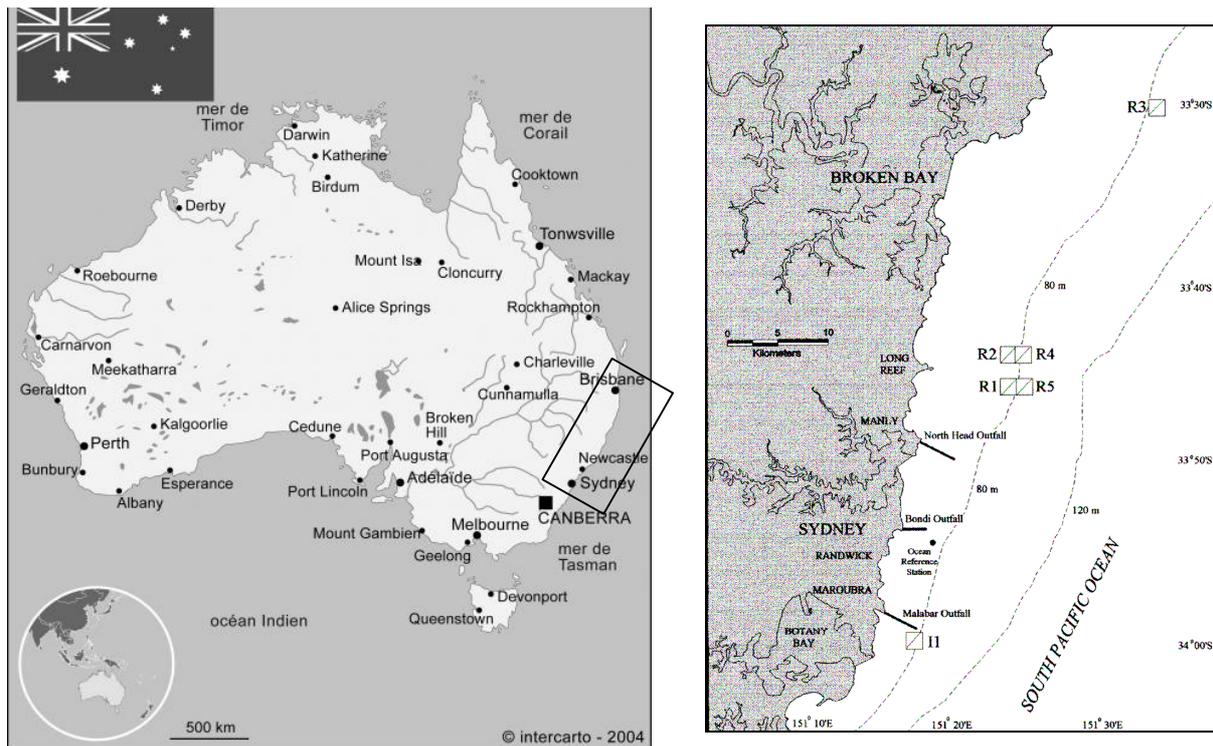


Figure 1.9. Localisation de la zone d'étude sur le plateau continental de Sydney. Les carrés R1-R5 et I1 correspondent aux stations d'échantillonnage (Matthai *et al.*, 2002).

I.3. Marqueurs radioactifs

D'ordinaire, les marqueurs radioactifs, de longue ou de courte période sont utilisés comme marqueurs temporels : ils permettent d'estimer l'âge d'un sédiment, de calculer des taux de sédimentation, des temps de résidence, des taux d'érosion, des taux de bioturbation, avec l'utilisation du ^{210}Pb ou du ^{137}Cs par exemple (Aller et Cochran, 1976 ; Nittrouer *et al.*, 1979 ; Nittrouer et Sternberg, 1981 ; Madsen, 1981 ; Kirchner et Ehlers, 1998 ; Sommerfield et Nittrouer, 1999 ; Lesueur *et al.*, 2001 ; Ligerio *et al.*, 2002 ; Lesueur *et al.*, 2003 ; Crusius *et al.*, 2004 ; Kim *et al.*, 2004 ; Ruiz-Fernández *et al.*, 2004 ; Sanders *et al.*, 2006 ; Wei *et al.*, 2007).

Dans le cadre d'un marquage de matériel particulaire, les éléments radioactifs peuvent aussi être précieux dans :

- l'identification de sources de matériel particulaire (Feng *et al.*, 1999 ; Bolsunovsky et Bondareva, 2003 ; Charmasson, 2003 ; Pfitzner *et al.*, 2004 ; Chappell *et al.*, 2006 ; Noakes et Jutte, 2006 ; Dibb, 2007),
- l'étude de transits sédimentaires (Anguenot et Monaco, 1967 ; Kautsky, 1988 ; McDonald *et al.*, 1990 ; Wong *et al.*, 1992),
- le suivi temporel et spatial de dépôts marqués par des rejets radioactifs artificiels, dits "anthropiques", d'une centrale nucléaire ou d'un centre de retraitement de combustibles usés radioactifs par exemple (Nakamura et Nagaya, 1975 ; Bailly du Bois et Guéguéniat, 1999 ; McMahon *et al.*, 2005 ; McCubbin *et al.*, 2006 ; Schnabel *et al.*, 2006).

I.3.1. Différence entre les radionucléides à longue et courte période

Outre leur capacité à discriminer des sources au sein d'un sédiment, les éléments radioactifs apportent des informations différentes selon leur période de décroissance. Les radionucléides à longue période ont la particularité d'exister et d'être en quantité suffisante dans le sédiment pour suivre l'évolution d'un système à long terme. Par contre, les radionucléides à courte période disparaissent rapidement, ils sont significatifs d'évènements, qui doivent être enregistrés et suivis sur des durées courtes.

L'étude de Charmasson (2003) à l'embouchure du Rhône a mis en avant les possibilités de certains éléments radioactifs à discréditer des sources. Avec l'aide du césium 137, Charmasson (2003) montre que les sédiments transportés par le Rhône se déposent à l'embouchure et forment un système deltaïque où pratiquement tout le matériel se retrouve au niveau du prodelta. Selon les inventaires en ^{137}Cs , différentes sources probables sont distinguées : (1) des dépôts dus aux retombées atmosphériques globales et celles marquées par l'accident de Tchernobyl, (2) des apports indirects par le drainage du bassin versant du Rhône, qui entraîne ces deux retombées, et (3) des rejets liquides des installations nucléaires construites sur le bord du Rhône.

En combinant les résultats obtenus à partir de différents radionucléides, tels que le plomb 210 et le plutonium 239-240, il est possible d'étudier le transport sédimentaire au sein d'une région. Su et Huh (2002) ont utilisé les activités en ^{210}Pb , ^{137}Cs et $^{239,240}\text{Pu}$ dans des sédiments carottés, pour définir les sources, les bilans et les transits des stocks en Mer de Chine. En associant l'ensemble de leurs données avec des taux de sédimentation et des inventaires de ces radionucléides, ils montrent que les particules sont transportées selon une direction sud longshore depuis l'embouchure du fleuve Yang Tsé Kiang et restent confinées dans la zone côtière. Les bilans de masse qui en sont déduits suggèrent que l'est de la mer de Chine est un puits pour le ^{210}Pb et le $^{239,240}\text{Pu}$ et une source en ^{137}Cs .

A une plus petite échelle temporelle, les éléments radioactifs peuvent être utilisés comme marqueurs particuliers d'un événement saisonnier ou événementiel. Le béryllium 7 (^7Be) et le thorium 234 (^{234}Th), de courte période (respectivement 53 jours et 24 jours) sont selon certains auteurs de bons traceurs du matériel sédimentaire fluvial (Guinasso et Schink, 1975 ; Nittrouer *et al.*, 1979 ; Olsen *et al.*, 1986 ; Dibb et Rice, 1989 ; Feng *et al.*, 1998).

Sommerfield *et al.* (1999) ont mesuré le béryllium 7 dans des sédiments récoltés sur le plateau continental du nord de la Californie et sur la pente, adjacent au fleuve Eel (Fig.1.10.). Les activités du ^7Be sur le plateau continental ont confirmé que des sédiments d'origine fluviale s'étaient très rapidement répartis sur le plateau continental jusqu'à l'isobathe - 500 m. L'observation de sédiments carottés et la comparaison des taux de sédimentation obtenus par le ^{210}Pb avec ceux estimés par le ^7Be , ont pu montrer que ces événements exceptionnels, résultant des crues du fleuve Eel, peuvent être enregistrés dans les dépôts les plus récents de la plateforme continentale. Plus récemment, Dubrulle *et al.* (2007), dans le Golfe de Gascogne, ont utilisé le ^{234}Th comme marqueur particulier saisonnier (Fig.1.11.). En effet, ce radionucléide a permis de montrer que les apports en sédiments fins, au niveau de la Grande Vasière fluctuent selon les saisons. Les activités élevées en ^{234}Th en excès indiquent que le matériel fin est d'origine fluvial, et qu'il provient en période de crue des panaches turbides présents à l'embouchure des principaux grands fleuves de cette région (Gironde, Loire, Charente...).

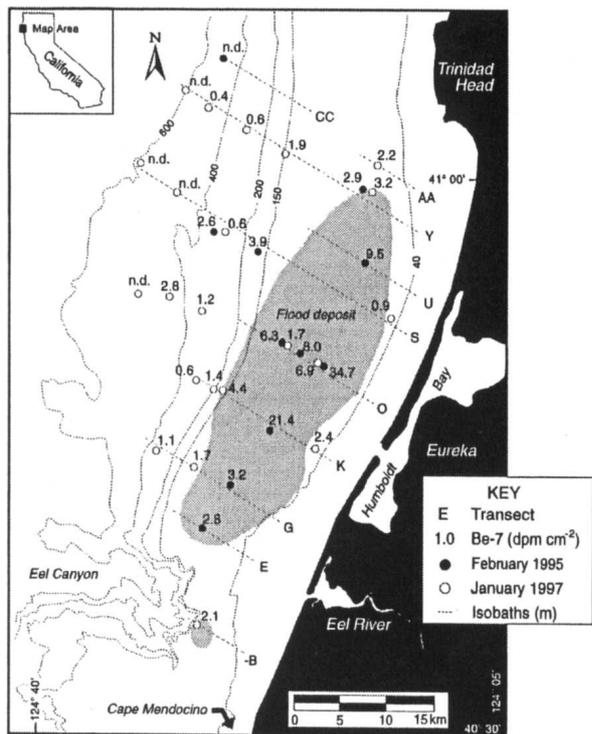


Figure 1.10. Localisation de la zone d'échantillonnage sur le plateau continental de la Californie et inventaires en ^7Be des sédiments superficiels (Sommerfield *et al.*, 1999).

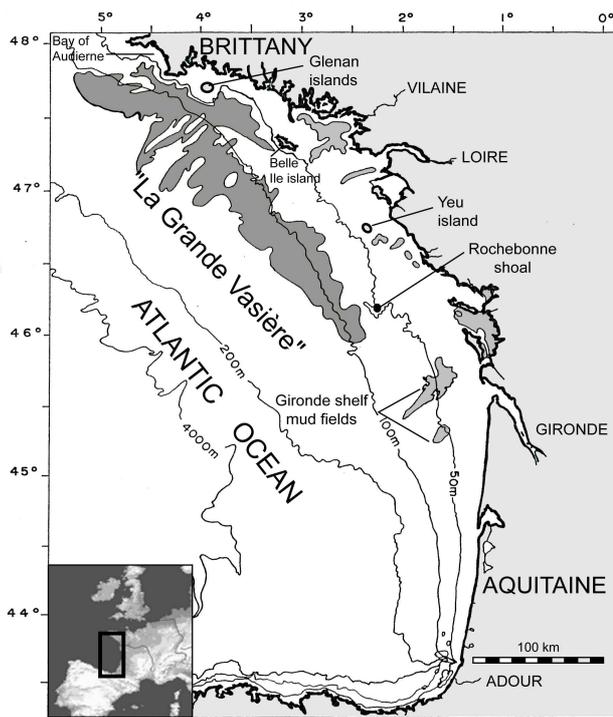


Figure 1.11. Localisation de la zone d'étude sur le plateau continental du Golfe de Gascogne (Dubrulle *et al.*, 2007).

1.3.2. Utilisation des radionucléides artificiels

Avec le développement des applications civiles et militaires de l'énergie nucléaire, de nombreux radionucléides artificiels ont été introduits dans le milieu marin. Contrairement aux radionucléides naturels, la quantité d'éléments radioactifs anthropiques, ou artificiels est généralement connue. Ces éléments peuvent donc être de très bons marqueurs de masses d'eau ou de transport sédimentaire (Pickering *et al.*, 1966 ; Nagaya et Saiki, 1967 ; Shiozaki *et al.*, 1972 ; Fukai et Murray, 1973 ; Guéguéniat *et al.*, 1979 ; Guéguéniat et Auffret, 1981 ; Cundy *et al.*, 1997).

L'exemple de l'étude de Nakamura et Nagaya (1975) dans la baie Urazoko montre l'impact des rejets de la centrale nucléaire dans le milieu marin en ^{90}Sr , ^{137}Cs et ^{60}Co , qui sont retrouvés dans les sédiments autour de la centrale nucléaire (Fig.1.12.). Les données concernant le rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ ne distinguent pas de variations saisonnières. Les teneurs des radionucléides dans les sédiments sont répartis géographiquement selon une simple fonction exponentielle depuis la zone source : la centrale nucléaire.

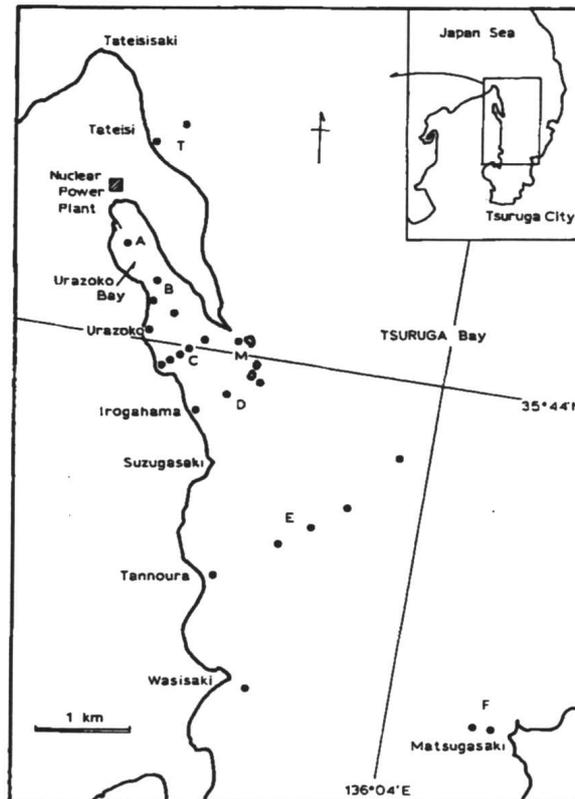


Figure 1.12. Localisation de la zone d'étude en Mer du Japon. Les points noirs correspondent aux stations de prélèvement (Nakamura et Nagaya, 1975).

Boust (1999) a mesuré les activités de quelques radionucléides naturels et artificiels des sédiments de la Manche. Il a mis en évidence que quelques radionucléides n'avaient pas le même comportement au sein du sédiment : le cobalt 60 et le plutonium 238 ont tendance à s'associer aux sédiments du fond de la Manche, tandis que le césium 137 est rapidement remis en suspension par les masses d'eau.

Cet auteur a pu également estimer des temps de transits du stock sédimentaire de la Manche, comme l'avaient fait Guéguéniat *et al.* (1995) pour les masses d'eau, en Manche centrale est et ouest.

Au vu des résultats obtenus par les différents auteurs, les éléments radioactifs semblent être utiles pour le marquage particulaire. Il est néanmoins nécessaire de connaître au préalable le type de radionucléides le plus approprié à l'étude (traçage à long terme ou suivi d'un épisode événementiel ?). Le choix le plus intéressant quand il existe, semble être celui d'un élément radioactif artificiel qui est plus facile à suivre, et dont les sources sont connues et quantifiées.

I.4. Marqueurs organiques

Les deltas, les plateaux continentaux et les estuaires, comme les environnements de transition, sont les principaux lieux où la matière organique, générée par la production primaire, est stockée. La première utilité des discriminations de sources de matière organique est de mieux comprendre les cycles globaux géochimiques (Hedges *et al.*, 1997 ; Silliman *et al.*, 1996 ; Muri *et al.*, 2004). À plus petite échelle, les études moléculaires organiques des sédiments récents ou anciens

apportent des informations spécifiques sur l'origine du matériel sédimentaire organique, et sur les processus adjacents d'altérations (géochimiques et biochimiques) auxquels ils ont été soumis (Di-Giovanni *et al.*, 1998 et 1999 ; Sebag *et al.*, 2006). Les études sur la matière organique utilisent les données obtenues directement par les pourcentages en carbone organique des sédiments, auxquelles s'ajoutent les résultats d'autres bio-traceurs comme les pourcentages en azote total ou les rapports isotopiques du carbone, $\delta^{13}\text{C}$ et de l'azote, $\delta^{15}\text{N}$ (Mariotti *et al.*, 1984 ; Cifuentes *et al.*, 1988 ; Altabet, 1996 ; Freudenthal *et al.*, 2001 ; De Brabandere *et al.*, 2002).

Par exemple, Hu *et al.* (2006) ont utilisé la combinaison de ces quatre marqueurs pour caractériser les sédiments superficiels de l'estuaire Pearl River et de son plateau continental adjacent, dans le sud de la mer de Chine (Fig.1.13.). Ils ont observé une décroissance notable des pourcentages en carbone organique, et en azote organique, entre les résultats obtenus dans l'estuaire et sur le plateau. Grâce à l'utilisation complémentaire des rapports isotopiques, ils ont pu différencier l'origine du matériel sédimentaire organique (source marine ou source continentale) et discréditer l'influence des impacts anthropiques. Hu *et al.* (2006) expliquent donc les variations des pourcentages en carbone organique et en azote organique par la variation de la production primaire et par une dilution avec de la matière inorganique.

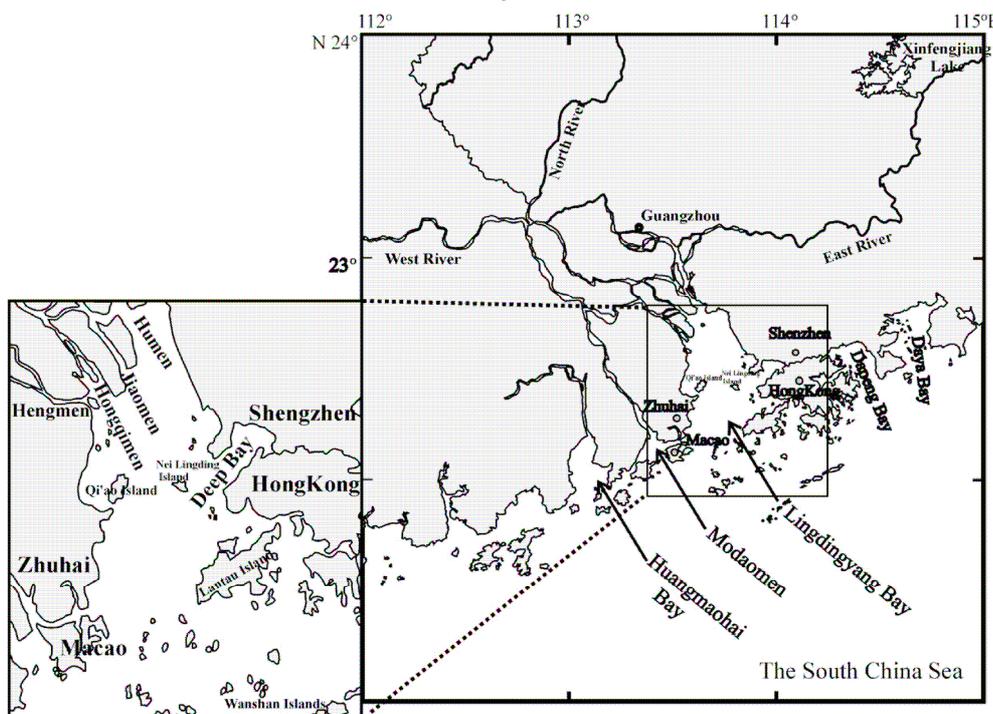


Figure 1.13. Localisation de l'estuaire Pearl River au Sud de la Mer de Chine (Hu *et al.*, 2006).

Gordon *et al.* (2001), dans le Golfe du Mexique, ont appliqué une stratégie d'étude similaire sur des sédiments superficiels et des carottes sédimentaires dans l'embouchure du fleuve Atchafalaya. Les pourcentages en carbone organique et azote total montrent des valeurs décroissantes vers le domaine ouvert, confirmées par les rapports isotopiques du carbone. L'étude plus approfondie sur le carbone organique particulaire et l'azote organique particulaire permet d'aboutir à des budgets en carbone et en azote pour toute la zone considérée. La comparaison des bilans avec les apports en carbone et en azote du fleuve Atchafalaya suggère que la source en matière organique est à la fois fluviale et marine, et suppose une reminéralisation d'origine alguaire dans la colonne d'eau.

Lü et Zhai (2006) restent néanmoins prudents sur la méthode de traçage par marqueurs organiques. L'étude du carbone organique, de l'azote organique et du $\delta^{13}\text{C}$, sur des sédiments superficiels du fleuve Yangtze, en Chine, montre la distinction de deux sources : continentale et marine (Fig.1.14.). Ils caractérisent la source continentale par un rapport C/N élevé et un $\delta^{13}\text{C}$ faible contrairement à la source marine qui présente un rapport C/N faible et un $\delta^{13}\text{C}$ élevé. Ces résultats ne sont pas tout à fait en accord avec les données obtenus par l'étude des acides gras, des alcanes, des alcools, des cétones, des stérones et des stérols de ces sédiments. Les acides gras suggèrent que la matière organique provient d'une source authigène, les alcanes, les alcools et les cétones, d'une source continentale et les stérols et les stérones d'un mélange entre une source authigène et continentale.

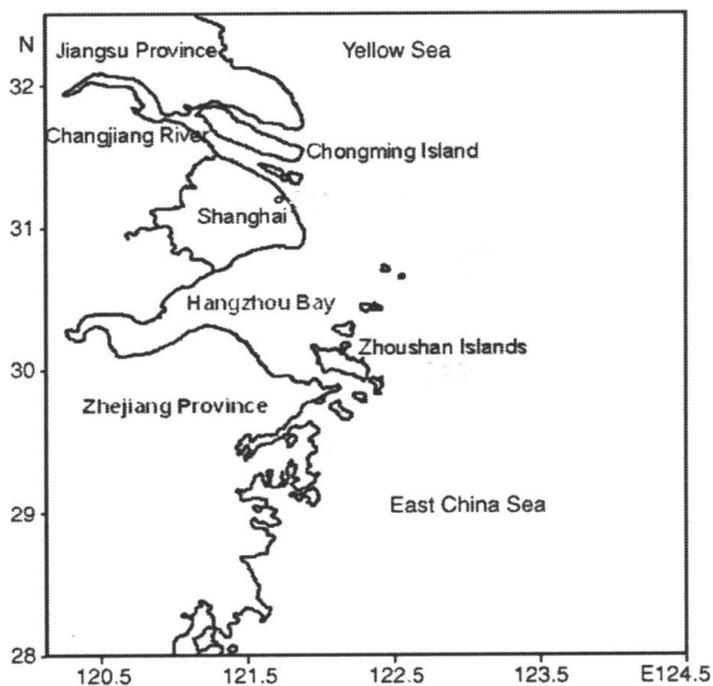


Figure 1.14. Localisation de la zone d'étude en Mer de Chine (d'après Lü et Zhai, 2006).

La différence d'informations obtenues tient, selon eux, au fait que ces bio-marqueurs ont des mécanismes différents de dégradation.

L'utilisation de marqueurs organiques semble être intéressante dans la recherche d'origine du matériel sédimentaire associé. Il faut néanmoins rester critique sur la validité des résultats obtenus et essayer de mieux cerner les problèmes liés à la dégradation de la matière organique dans certains environnements.

1.5. Marqueurs biogènes

Outre le marquage sédimentaire par la nature des grains, ou par les éléments adsorbés sur les particules, il est possible de caractériser un stock sédimentaire avec sa faune ou sa flore, qu'elle soit vivante ou non. Les foraminifères, ostracodes, diatomées, pollens sont des marqueurs biologiques utilisés depuis longtemps pour définir un environnement de dépôts, et s'avèrent précieux dans les reconstitutions de paléo-environnements (Stenner et Nickless, 1975 ; Scott *et al.*, 1980 ; Anantha et Nigam, 1984 ; Boomer, 1993 ; Boderga *et al.*, 1998 et 2002 ; Rathburn *et al.*, 2001 ; Osterman, 2003 ; Patterson *et al.*, 2005 ; Ferraro *et al.*, 2006 ; Mojtahid *et al.*, 2006 ; Albani *et al.*, 2007 ; Gebhardt et Zorn, sous presse).

Sarr *et al.* (2007) ont distingué grâce aux foraminifères, au bord du lac Retba au Sénégal différents types d'environnements qui correspondent implicitement à des apports différents, enregistrés dans une carotte sédimentaire. Les différentes espèces de foraminifères montrent l'évolution du lac :

tout d'abord une lagune faiblement ouverte sur la mer, ensuite un petit golfe marin bordé de mangrove, puis un passage en lagune fermée hypersaline enfin une lagune salée et ouverte. Cette même communauté que sont les foraminifères peut être utilisée comme bio-indicateurs de pollution. En effet, Armynot du Châtelet *et al.* (2004) ont collecté des foraminifères dans les sédiments des ports de la côte vendéenne en France. Associés à des mesures de métaux et de composés hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les assemblages de foraminifères ont mis en valeur un gradient décroissant des teneurs en métaux depuis les estuaires vers le domaine marin, montrant ainsi les zones les plus polluées au voisinage des ports.

En combinant différents marqueurs biologiques, il est possible de mieux comprendre un environnement sédimentaire et de définir les différents apports qui entrent en jeu. Groot *et al.* (1965) ont mis en relation l'analyse des spores, des pollens et des diatomées avec la provenance des sédiments du Bassin Argentin (d'une épaisseur moyenne de 2 km). Trois types de pollens ont pu être distingués : deux indiquent des alternances entre des périodes glaciaires et interglaciaires et le troisième caractérise une période post-glaciaire, ces résultats étant confirmés par les familles de diatomées. L'ensemble des données recueillies par les pollens et les diatomées suggère que les grains de pollen et les sédiments fins clastiques continentaux ont été transportés de la même manière par les fleuves, les courants océaniques et les courants de turbidité. L'origine des pollens et des spores serait donc liée à celle des particules fines (lutites), dans lesquelles sont présentes des microfaunes fossiles. Ces lutites quaternaires, proviennent par ailleurs de la partie sud de Rio de la Plata par drainage du bassin versant.

Si les organismes biologiques sont de bons indicateurs de milieu (salinité, température, pollution), ils s'avèrent être de moins bons marqueurs d'origine des particules. Il est facile de caractériser une source par un ou plusieurs organismes, mais il est plus difficile de suivre son évolution spatiale : il faut parfois émettre l'hypothèse que l'élément biologique considéré ait subi ou ait suivi le même vecteur de transport que le matériel sédimentaire étudié.

II – Marquage des particules fines dans le système estuarien de la Seine

II.1. Le système estuarien de la Seine

II.1.1. Définitions d'un système estuarien

La définition d'un estuaire et de ses limites varie beaucoup d'un auteur à l'autre, et peut être caractérisé selon des critères génétiques, géomorphologiques et/ou sédimentologiques.

Pritchard (1960) définit un estuaire selon son origine. Il en distingue quatre catégories : les vallées ennoyées au cours de la transgression flandrienne, les fjords, les estuaires à barres littorales et ceux formés par la tectonique. Hayes (1975) ne les classe qu'en fonction du marnage et différencie les estuaires microtidaux (marnage < 2 m), mésotidaux (marnage compris entre 2 et 4 m) et macrotidaux (marnage > 4 m). Fairbridge (1980) en propose une définition plus détaillée selon des caractéristiques morphologiques et hydrodynamiques. Il distingue les fjords, les fjards, les rias (calanques), les estuaires de plaine côtière ("open coastal plain estuaries", "barrier (semi-

enclosed) coastal plain estuaries"), les estuaires à barres littorales ("bar-built estuaries"), les estuaires temporairement fermés ("blind estuaries"), les estuaires deltaïques et les estuaires tectoniques.

Sur la base de la définition de Hayes (1975), Dalrymple *et al.* (1992) s'intéressent davantage à la combinaison de trois paramètres : l'importance relative des débits de la rivière, des vagues et de la marée, et de leur évolution au cours du temps. Ils définissent alors trois types d'estuaires : ceux dominés par les vagues, ceux dominés par la marée et les estuaires dits mixtes. Ils introduisent de nouvelles notions, telles que celles associées aux environnements côtiers fondés sur ces trois paramètres, pour des conditions données de niveau marin. La figure 1.15. ci-dessous ne concerne que l'exemple des estuaires dominés par la marée.

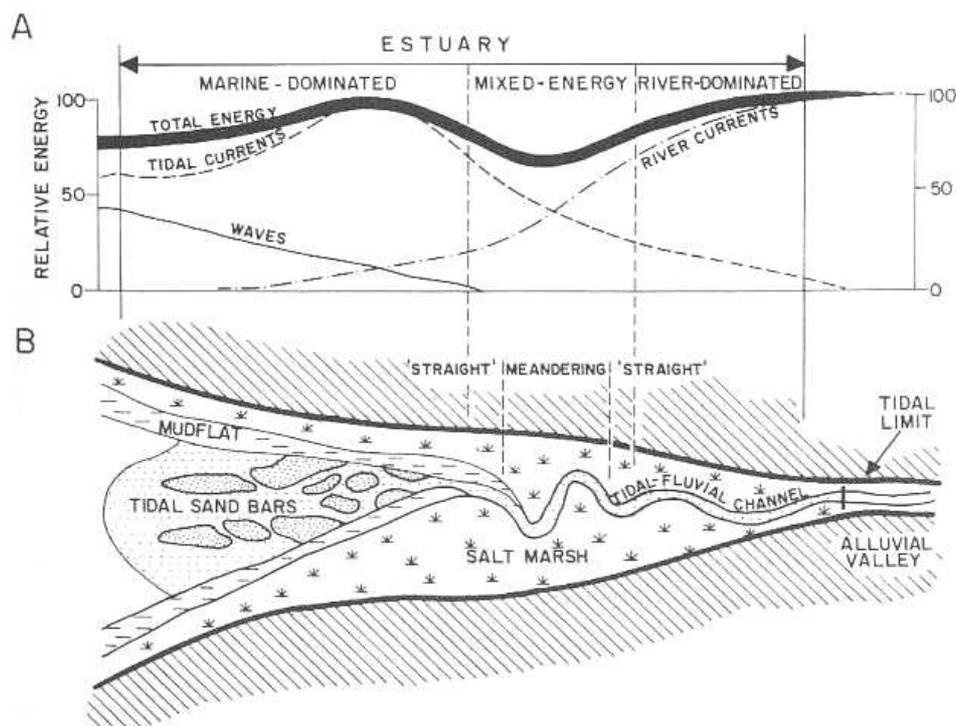


Figure 1.15. Estuaires dominés par la marée. A) Distribution des processus dynamiques le long de l'estuaire ; B) Distribution des principaux éléments morphologiques (d'après Dalrymple *et al.*, 1992 modifié).

Périllo (1995) suggère le regroupement de l'ensemble des paramètres pris en compte jusqu'alors pour définir un estuaire. Il en établit deux types suivant des caractéristiques génétiques et morphologiques (Fig.1.16.) :

- les estuaires primaires, dont les formes sont le résultat de processus terrestres et/ou tectoniques, non modifiées par la mer ;

- les estuaires secondaires, dont les formes résultent de processus marins et fluviaux.

Parmi les estuaires primaires, Périllo (1995) distingue les vallées fluviales (estuaires de plaine côtière, rias), les vallées glaciaires (fjords, fjards), les estuaires sous la dominance fluviale (rivières tidales, estuaires de front de delta) et les estuaires structuraux. Les estuaires secondaires regroupent quant à eux les lagons côtiers.

Au vu de l'ensemble de ces définitions, l'estuaire de la Seine est décrit comme un estuaire macrotidal selon la classification de Hayes (1975), sous dominance de la marée selon les critères

de Dalrymple *et al.* (1992) et peut être considéré comme un estuaire primaire, de la forme d'une vallée fluviale ("Tidal River") selon Perillo (1995).

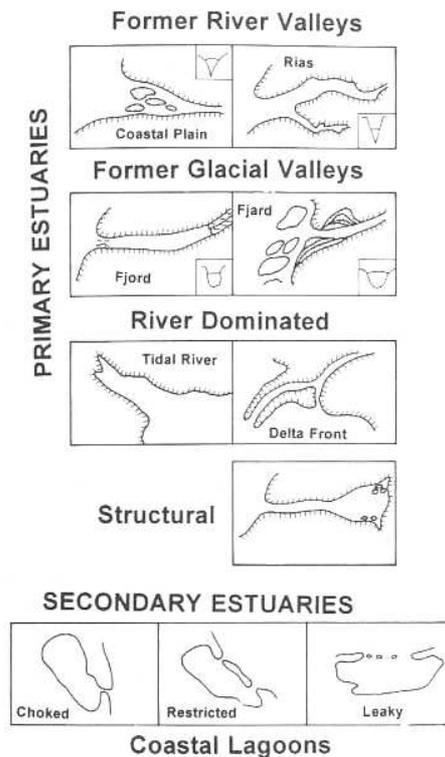


Figure 1.16. Classification morphogénétique des estuaires d'après Périllo (1995).

La zonation longitudinale d'un estuaire varie donc en fonction de la définition proposée. Lesourd (2000) présente la compilation des zonations déduites selon quelques auteurs (Dionne, 1963 ; Fairbridge, 1980 ; et Dalrymple *et al.*, 1992). D'un commun accord, la limite amont d'un estuaire est marquée par la limite extrême de la marée dynamique. Il se décompose alors (Fig.1.17.) en estuaire fluvial en amont (eau douce soumise à la marée dynamique), en estuaire moyen, (mélange d'eau douce et d'eau marine), et en estuaire marin en aval (soumis entièrement à la marée dynamique).

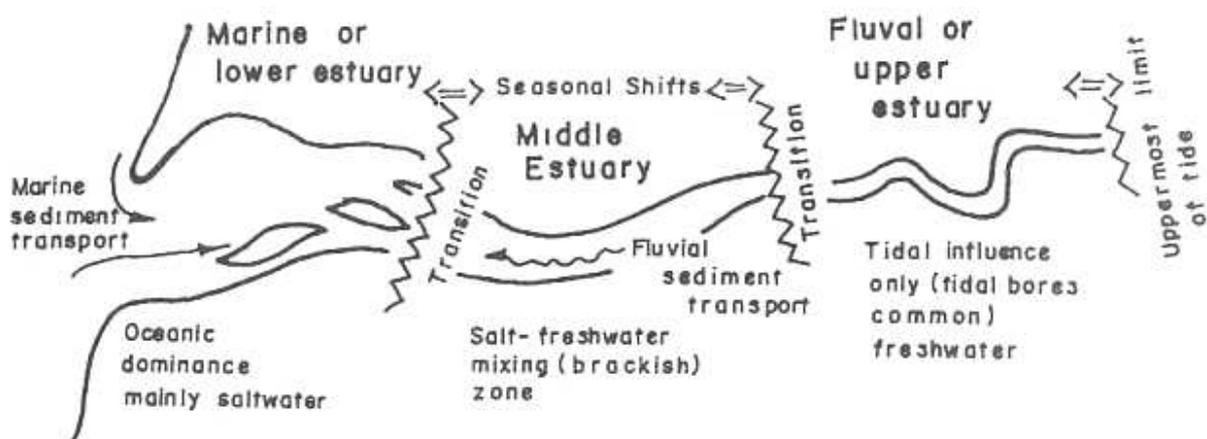


Figure 1.17. Description des différentes parties d'un estuaire proposée par Dionne (1963).

II.1.2. Zonation longitudinale de l'estuaire de la Seine au sens strict (s.s.)

Au sein de cette étude, l'estuaire de la Seine, tel que défini dans le cadre du Groupement d'Intérêt Public Seine Aval (GIP Seine Aval), comprend la Seine aval (en continuité avec le Seine amont, défini dans le programme PIREN Seine) et la baie de Seine orientale. La Seine aval s'étend depuis le barrage de Poses jusqu'à l'embouchure, soit toute la partie de l'estuaire soumise à la marée dynamique. La baie de Seine orientale, délimitée arbitrairement à l'ouest par la zone du Parfond et au nord par le Cap d'Antifer, succède de manière non physique à la Seine aval. Elle correspond à la zone marine définie précédemment par Dalrymple *et al.* (1992). Dans la suite de ce manuscrit, la Seine amont, exempte de toute influence marine et limitée par le barrage de Poses, correspond aux caractéristiques de la Seine fluviale (Fig.1.18.).

Le terme de "système estuarien" est adopté pour caractériser un domaine géographique qui s'étend plus largement que l'estuaire au sens strict avec ses limites géographiques. Il intègre en effet une partie de la baie de Seine orientale sous influence fluviale directe.

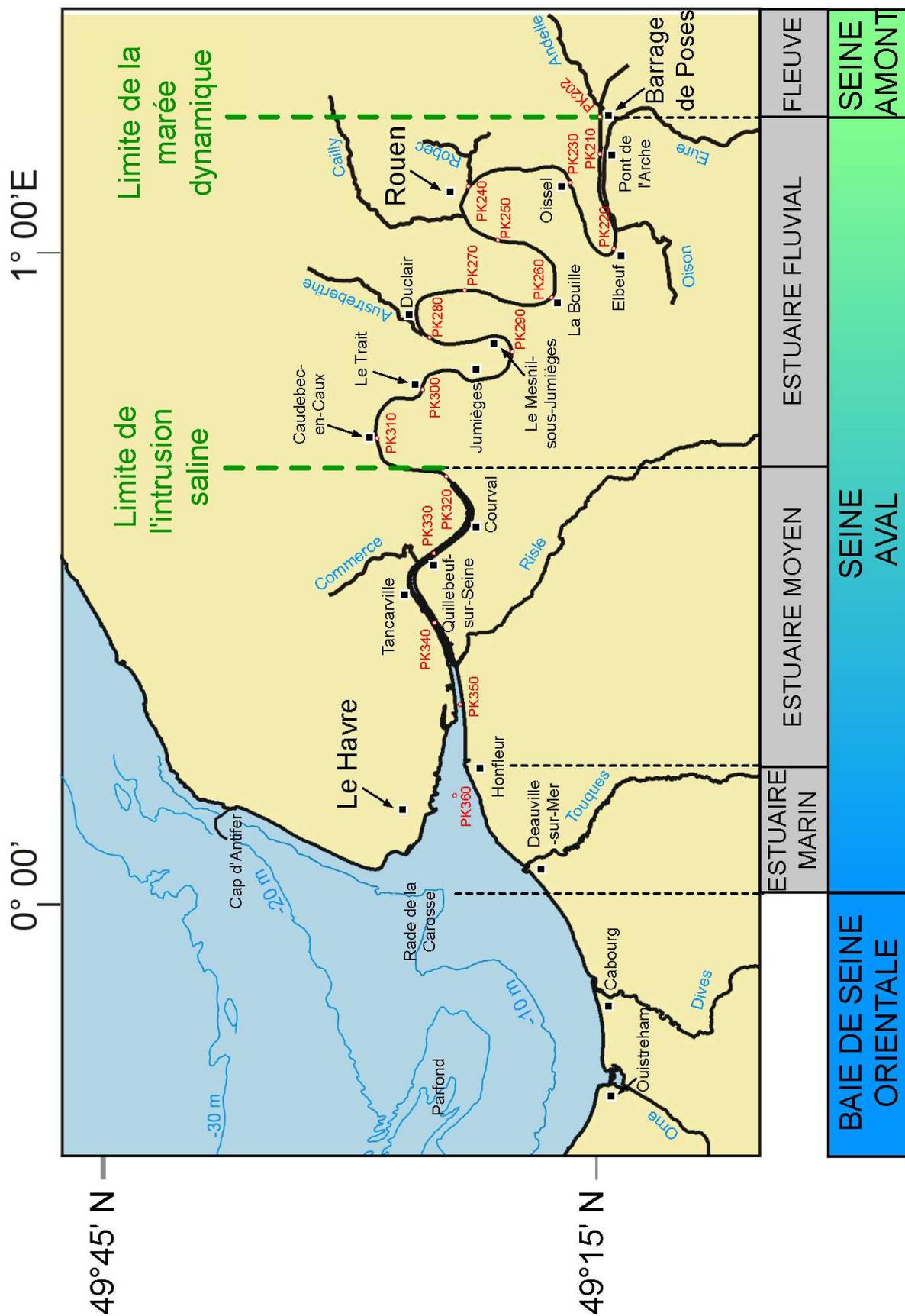


Figure 1.18. Le système estuarien de la Seine: zonations (en gris) d'après Fairbridge (1980), et délimitations pour la zone d'étude (en couleur).

II.1.3. Cadre géologique du système estuarien de la Seine (Fig. 1.19.)

- Histoire anté-quadernaire :

Le système estuarien de la Seine au sens large repose sur un substratum d'âge Mésozoïque, qui en baie de Seine, n'affleure que très rarement étant le plus souvent recouvert par des formations meubles (Larsonneur, 1971). Les accidents tectoniques sont néanmoins marqués par de longues failles d'orientation est-ouest. Les seuls témoins de cette couverture mésozoïque sont les affleurements jurassiques et triasiques présents sur le littoral normand, depuis le Cotentin, jusqu'au Havre. En Manche centrale, les terrains jurassiques couvrent de larges surfaces et en baie de Seine, Larsonneur (1971) observe quelques vastes surfaces calloviennes dans la partie centrale de la baie.

Le stade glaciaire Weichsélien (80000 -18000 ans B.P.), a provoqué la dernière baisse du niveau marin, qui a chuté de - 100 à - 120 m par rapport au niveau actuel, entraînant une incision importante des paléorivières dans le substratum mésozoïque de la baie de Seine. La Manche était alors drainée par un puissant fleuve et le littoral était situé à l'ouest de la mer celtique (Lautridou *et al.*, 1999). Le surcreusement du substratum par la paléo-Seine weichsélienne fut alors considérable : - 20 à - 25 m (sous le zéro des cartes marines) vers Tancarville, - 25 à - 30 m à Honfleur, - 70 m au nord du Cotentin. En bordure de la baie de Seine, les cours d'eau côtiers ont, eux aussi, été incisés et le bed-rock s'est abaissé de - 30 m au niveau de l'embouchure de l'Orne et de - 37 m à 15 Km au nord de Ouistreham. Héritée de cette ancienne paléovallée, une large dépression NO-SE s'est actuellement mise en place dans la baie de Seine.

Dans l'estuaire de la Seine, le substratum rocheux qui présente une légère pente vers le nord-est est affecté par de nombreux accidents tectoniques. Les dépôts crétacés transgressifs reposent en discordance sur des dépôts jurassiques plissés et faillés (Juignet, 1974). L'estuaire, en lui-même, s'est mis en place, selon Vigarié (1965) dans une zone tectonique, à la fin du Tertiaire.

Dans la Seine, le fleuve incise les dépôts crayeux du Crétacé supérieur. Le plateau du Pays de Caux, constitué de falaises crayeuses, est recouvert par un manteau épais d'argiles à silex. Dans l'estuaire aval, quelques formations de calcaires argileux et d'argiles du Jurassique supérieur, ainsi que des sables du Crétacé inférieur apparaissent dans le fond de la vallée alluviale.

- Histoire holocène :

En baie de Seine, l'histoire holocène non enregistrée dans sa totalité - seules quelques étapes sont conservées - est marquée par un remblaiement sédimentaire lié à la dernière remontée du niveau marin (- 18000 ans). Lors du dernier maximum glaciaire, la Manche et la baie de Seine étaient totalement exondées à la suite de la baisse du niveau marin (- 100 à - 120 m par rapport au niveau actuel). À partir de 16000 ans B.P., la transgression, intercalée par de brefs stabilisations et événements régressifs, s'amorce progressivement jusqu'en 2000-2500 ans B.P., où le niveau marin atteint son niveau actuel (Lefebvre *et al.*, 1974 ; Clet-Pellerin *et al.*, 1976 ; Morzadec-Kerfourn, 1995).

Au cours de cette transgression, les dépôts anciens terrigènes de la baie de Seine sont érodés, remaniés et redistribués. Les matériaux grossiers (sables graveleux, cailloutis) hérités des phases glaciaires pléistocènes couvrent les fonds marins de la baie de Seine (Lefebvre *et al.*, 1974). Les

sédiments holocènes forment des dépôts qui affleurent sur certains secteurs des fonds de la baie de Seine (Avoine, 1981) et le long des plages du Calvados (Larsonneur, 1977 ; Clet-Pellerin *et al.*, 1987 ; Lautridou *et al.*, 1987).

Dans l'estuaire de la Seine, l'histoire holocène est en revanche bien enregistrée. Les formes actuelles méandriiformes du cours de la Seine sont, en effet, héritées des incisions successives occasionnées :

- par les chutes du niveau marin pendant les périodes glaciaires quaternaires,
- par le soulèvement général de la région (épirogénèse)
- par les brèches creusées par les affluents (Lefebvre, 1988).

Définitif depuis le début de l'Holocène, le paléolith de la Seine est tapissé de dépôts fluviatiles tardiglaciaires (9000 B.P.), des cailloutis hétérométriques dérivés de dépôts périglaciaires (blocs, galets, graviers, mélangés à des sables localement argileux) qui composent la nappe de fond, épaisse en moyenne de 5 à 10 m pouvant atteindre 20 m (Lefebvre *et al.*, 1974 ; Porcher, 1977). L'histoire quaternaire récente est marquée par un remblaiement alluvionnaire (sédiments fins) lié à la transgression flandrienne. Il est possible d'observer des galets marins mélangés aux cailloutis de fond ou associés en lentilles à des sédiments fins (Lefebvre, 1977b).

Ce remblaiement holocène (- 10 000 ans à l'actuel) constitue les dépôts qui affleurent souvent au fond du chenal actuel de la Seine. Ainsi dans l'estuaire amont, les successions des dépôts holocènes sont des tufs calcaires, des sables contenant des organismes d'eaux douces, des sables très fins en lentilles sur les tufs, des argiles limoneuses, des argiles de décantation et des intercalations de tourbes (issus des dépôts de zones marginales telles que plaine alluviale, zones marécageuses), et des silts alluvionnaires d'origine estuarienne ou marine. Dans l'estuaire aval, les formations sédimentaires successives sont composées de la base au sommet : de cailloutis weichséliens hétérométriques, de cailloutis tardiglaciaires (originaires des remaniements des terrasses weichséliennes), d'argiles continentales (8 000 à 10 000 ans B.P.) et de grandes lentilles de sables où se trouvent des silts, des tourbes intercalées, des sables plus grossiers et des accumulations discontinues de galets flandriens (Ters *et al.*, 1971 ; Lefebvre *et al.*, 1974 ; Lefebvre, 1977a).

- Actuel :

La baie de Seine possède des fonds relativement plats, présentant une grande diversité de faciès sédimentaires. Les sédiments sablo-graveleux ou graveleux se retrouvent dans la baie occidentale et centrale (Larsonneur, 1969 ; Ehrhold, 1992 et 1993). En partie sud-orientale de la baie, les dépôts sont représentés par des sables fins, des sables vaseux, des vases sableuses et des vases. Face au Pays de Caux, les fonds sont grossiers, de type graviers et cailloutis. Répartis en différents lieux de la baie, de nombreux bancs de sables souvent façonnés en riddens (dunes hydrauliques) se sont mis en place sous l'effet des courants de marée : à l'embouchure de la Seine, près de Saint Marcouf, de Barfleur, ou du Cap d'Antifer. D'autres accumulations de dépôts sableux s'observent aux embouchures des fleuves adjacents à la baie de Seine (Orne, Dives et Touques), formant de véritables deltas de jusant, construits sous la dérive littorale ouest-est (Auffret et d'Ozouville, 1986).

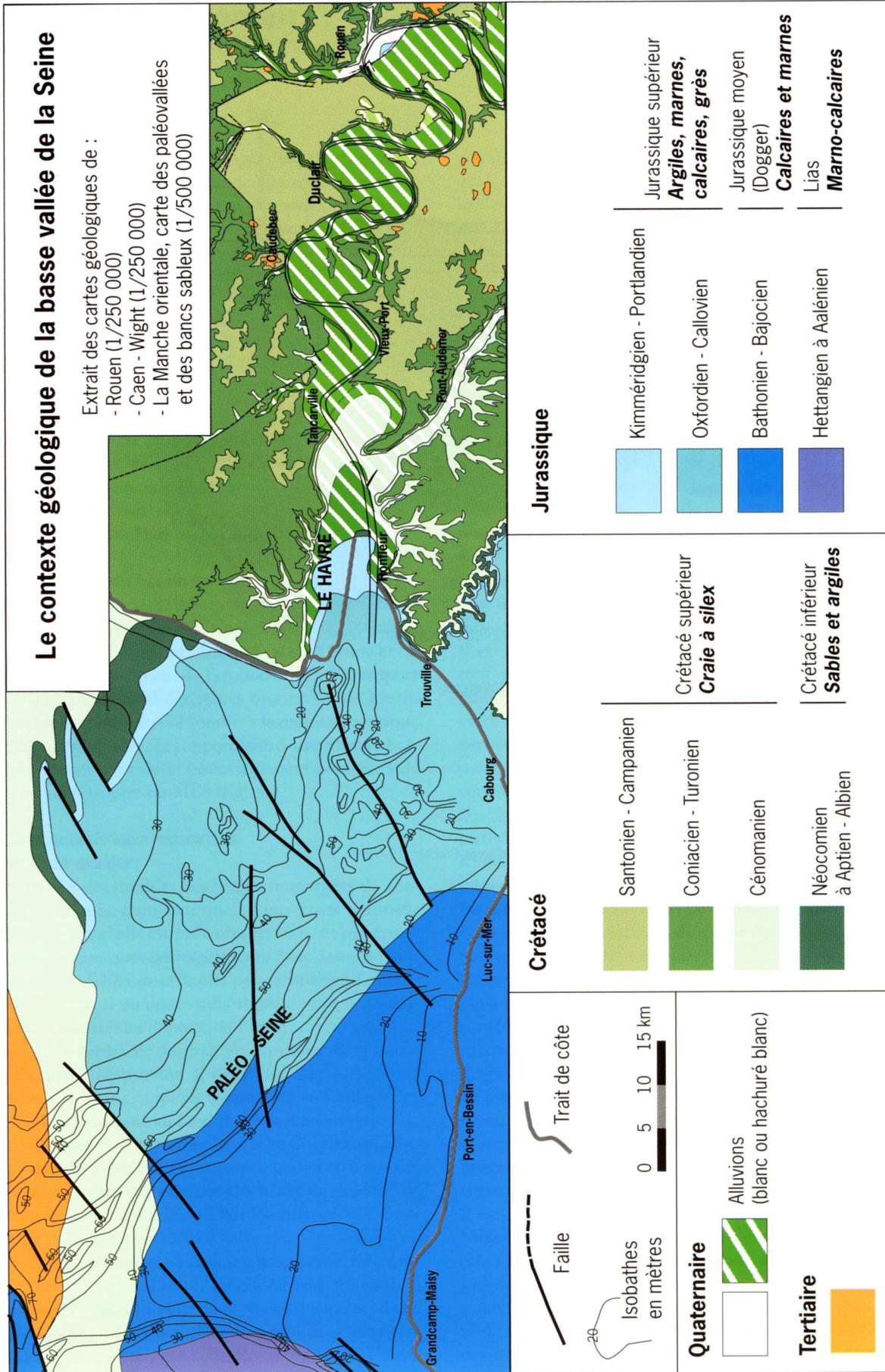


Figure 1.19. Carte géologique de la basse vallée de la Seine (Lesueur et Lesourd, 1999 ; Lesourd, 2003).

Il y a une décennie, les dépôts de sédiments fins étaient peu répandus sur l'ensemble de la baie et représentaient tout au plus 5 % de la superficie totale de la baie (Lafite, 1990). Les études les plus récentes ont montré, toutefois, que des placages de vases (de quelques millimètres à quelques centimètres d'épaisseur) existaient dans la partie sud-orientale de la baie (Garnaud, 2003), sur certaines plages du littoral est normand (Deloffre, 2005 ; Dubrulle *et al.*, 2007) et sur les flancs des bancs de l'estuaire de la Seine, notamment du banc du Ratier (Delsinne, 2005).

La cartographie des sédiments du chenal de la Seine effectuée par Lesueur et Lesourd (1999) et Lesourd (2000) a permis, au cours d'une campagne au sonar à balayage latéral, calibré par des prélèvements de sédiments superficiels, de distinguer de nombreux faciès sédimentaires et de mettre en avant de nombreuses variations le long de l'estuaire. On peut toutefois séparer l'estuaire en plusieurs tronçons (Fig. 1.20.) :

- entre Poses (PK202) et Rouen (PK244), la couverture sédimentaire est le reflet du contexte géologique local associé au remaniement des formations de la terrasse alluviale de la Seine. Cette zone, non endiguée est parsemée de chenaux secondaires limités par des îles, des bras morts et des zones abritées propices à la formation de petites vasières latérales (Oissel, par exemple).

- entre Rouen (PK244) et Grand-Couronne (PK254), les berges sont entièrement endiguées. À Rouen, le fond du chenal est composé de galets, de graviers de silex avec des débris coquilliers. Vers l'aval, les dépôts hétérogènes sont constitués de sables blanchâtres, carbonatés (provenant des tufs fossiles), de graviers calcaires, des débris organiques, ainsi que des débris anthropiques liés aux rejets de la zone portuaire et industrielle. Les dépôts vaseux s'installent dans les zones abritées soit au niveau des accès aux bassins portuaires et des zones d'approfondissement (zones d'évitages, souilles au pied des quais).

- de Grand-Couronne (PK254) à Val des Leux (PK265), les berges sont toujours endiguées. Au voisinage de La Bouille, les fonds consolidés sont mis à nu et font apparaître des galets et des graviers. Dans l'axe du chenal apparaissent des sables modelés en mégarides.

- de Val de Leux (PK265) à Yville (PK286), la couverture sédimentaire est relativement mince : le substratum est dénudé, et il apparaît des argiles compactes, des tufs et de la craie. Fréquemment, des fonds résiduels grossiers (blocs, cailloutis, galets à silex, débris crayeux, graviers coquilliers) sont rencontrés. Dans ce tronçon, les digues sont discontinues et les berges peuvent présenter des zones d'instabilité.

- d'Yville (PK286) à Yainville (PK297), la Seine est à nouveau endiguée. Les fonds sont grossiers et présentent des éléments fossiles : galets de silex, de craie, graviers silico-calcaires hétérométriques. À certains endroits, des mégarides de sables grossiers ou de graviers apparaissent ; les sédiments les plus fins sont quant à eux cantonnés sur les berges internes du méandre.

- la zone entre Yainville (PK297) et Caudebec-en-Caux (PK311), composée de méandres regroupe l'ensemble des faciès sédimentaires rencontrés en estuaire de Seine. À cela, s'ajoutent des fonds fossiles composés de tourbes, de tufs, d'argiles et de blocs de craie. La vase est présente sur certaines berges immergées ou dans quelques zones intertidales (banc du Malaquis au Trait).

- le tronçon de Caudebec-en-Caux (PK311) à Quillebeuf-sur-Seine (PK332) constitue une zone de transit de matériel sableux au fond, sur des graves caillouteuses (silex et craie). Le sable fin à moyen forme des mégarides et les dépôts vaseux restent confinés sur la bordure interne du vaste méandre face à Vieux-Port et près de Quillebeuf-en-Seine.

- en aval de Quillebeuf-sur-Seine (PK332), les vases temporaires ou permanentes prennent une place prédominante. Elles se déposent sur les berges, dans les zones étroites intertidales, comme en aval de Tancarville. En amont du pont de Normandie, la vase est plus éphémère et recouvre des sables fins. À l'approche de l'embouchure de la Seine (PK352), les sables globalement moins envasés sur le fond de chenal sont façonnés en mégarides. Les vases se déposent surtout dans les zones marginales de l'embouchure (chenal et vasière Nord, bordure du banc du Ratier et du chenal Sud) et dans la rade de la Carosse, au débouché ouest du chenal de navigation.

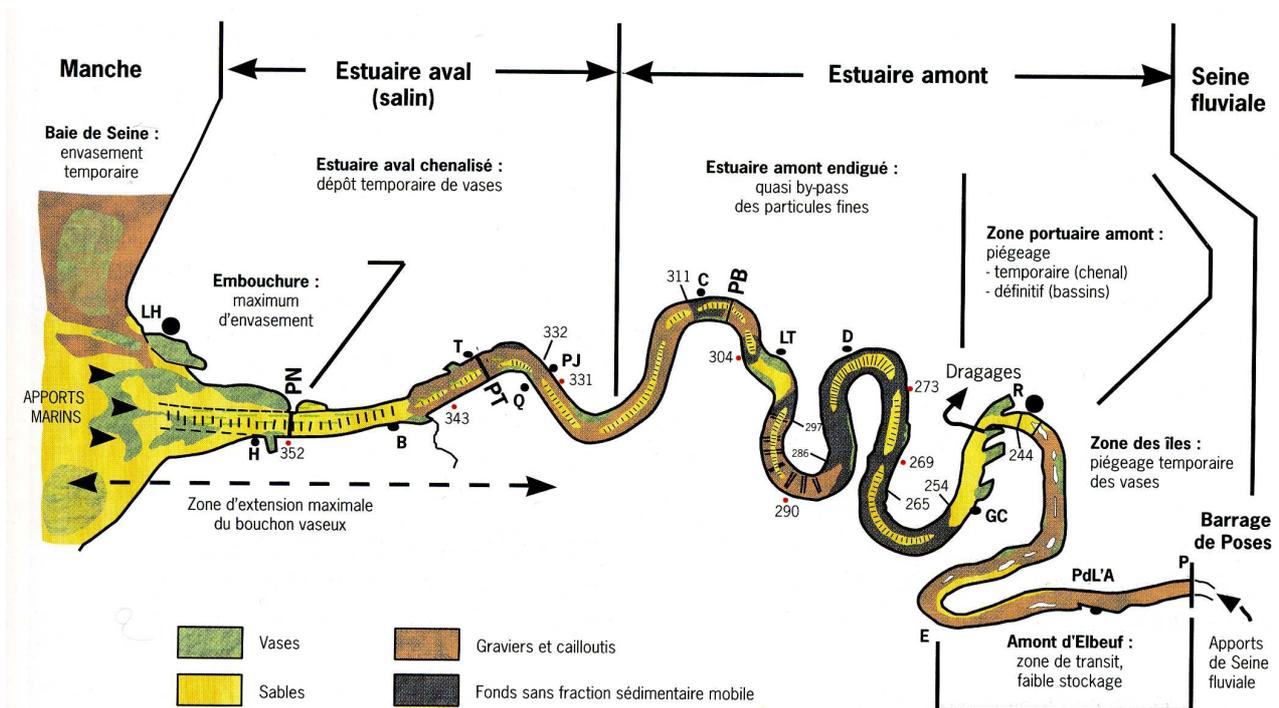


Figure 1.20. Carte synthétique de la couverture meuble des fonds de l'estuaire de la Seine (Lesueur et Lesourd, 1999). LH : Le Havre, H : Honfleur, PN : Pont de Normandie, B : Berville, T : Tancarville, Q : Quillebeuf, PJ : Port Jérôme, C : Caudebec, PB : pont de Brotonne, LT : Le Trait, D : Duclair, GC : Grand Couronne, R : Rouen, E : Elbeuf, Pd'A : Pont de l'Arche. Les nombres correspondent au PK (point kilométriques). N.B. : la largeur du chenal est considérablement majorée en amont de Tancarville.

II.1.4. Géomorphologie du système estuarien de la Seine

La baie de Seine, d'une superficie d'environ 5 000 Km², se présente comme un vaste bassin surbaissé de faible profondeur (fonds inférieurs à 40 m), marqué par une longue dépression NO-SE qui conduit au Parfond. Elle s'inscrit en continuité avec la Manche, une mer épicontinentale, de profondeur avoisinant - 100 m. Les principaux cours d'eau débouchant dans la baie de Seine sont d'ouest en est : la Saire, la Douve, la Vire, l'Aure, la Seulles, l'Orne, la Dives, la Touques. La Seine est le principal fleuve débouchant dans la Mer de la Manche.

La baie de Seine regroupe des côtes très diversifiées, liées à la nature pétrographique et lithologique des formations géologiques qui les forment. Des falaises littorales bordent aussi bien la Haute que la Basse Normandie (Fig.1.21.), sous des faciès durs ou tendres d'ouest en est (Dugué *et al.*, 1998) :

- des côtes rocheuses à la pointe de Barfleur constituées de massifs granitiques et d'auréole de métamorphisme ;

- des formations bajociennes à bathoniennes entre Port-en-Bessin et Saint-Honorine des Pertes, présentant de bas en haut : Malière (Aalénien moyen à Bajocien inférieur), formations oolithiques ferrugineuse de Bayeux (Bajocien inférieur à moyen), Calcaires à Spongiaires (Bajocien supérieur), Marnes de Port-en-Bessin (Bathonien inférieur à moyen) et enfin Calcaires de Saint-Pierre-du-Mont (Bathonien moyen). L'estran rocheux est formé de bancs calcaires gréseux de la Malière ;

- des dépôts carbonatés bathoniens supérieurs affleurent entre Saint-Aubin et Lion-sur-Mer, sous une grande diversité de faciès : oolithiques et bioclastiques marneux, voire récifaux. L'estran rocheux de Luc-sur-Mer est formé de bancs calcaires grisâtres de la Pierre de Ranville. La falaise est composée successivement, depuis la base, de formations d'âge bathonien supérieur : Pierre de Ranville, Marnes blondes, puis Calcaire de Langrune. Le sommet est recouvert de limons datés Pléistocène supérieur ;

- des séries du Callovien supérieur à l'Oxfordien moyen affleurent dans les falaises littorales des Vaches Noires, entre l'embouchure de la Dives et Villers-sur-Mer. Depuis la base, la falaise se compose en Marnes de Dives, Marnes de Villers, Oolithe ferrugineuse de Villers, Argiles à *Lopha gregarea*, Calcaire d'Auberville, Calcaire oolithique de Trouville, Coral Rag et enfin de craie à silex pour les formations crétacées au sommet ;

- des formations jurassiques des falaises des Roches Noires entre les embouchures de la Touques et de la Seine. La coupe des falaises littorales entre Hennequeville et Villerville présente ainsi les formations suivantes : à la base des Calcaires oolithique de Trouville (Oxfordien moyen), du Coral-Rag (Oxfordien moyen), Calcaire de Blangy (Oxfordien moyen), Calcaire gréseux de Hennequeville (Oxfordien supérieur) et enfin au sommet la base des Marnes de Villerville (Oxfordien supérieur).

- des grandes parois crayeuses blanches à lits de silex noirs du Pays de Caux, d'âge crétacé. Les plages sableuses sont peu représentées et les estrans sont occupés par un cordon de galets de silex situé au pied des falaises de craie (démantèlement mécanique des éboulis de craie) ;

En dehors des falaises littorales, la baie de Seine est bordée par des côtes meubles sableuses, présentes majoritairement sur le littoral bas-normand (plages de Merville-Franceville, d'Omaha Beach ou d'Utah Beach). Elles sont souvent marquées par un système de barre-bâche, auquel s'associent des dunes de haute plage.

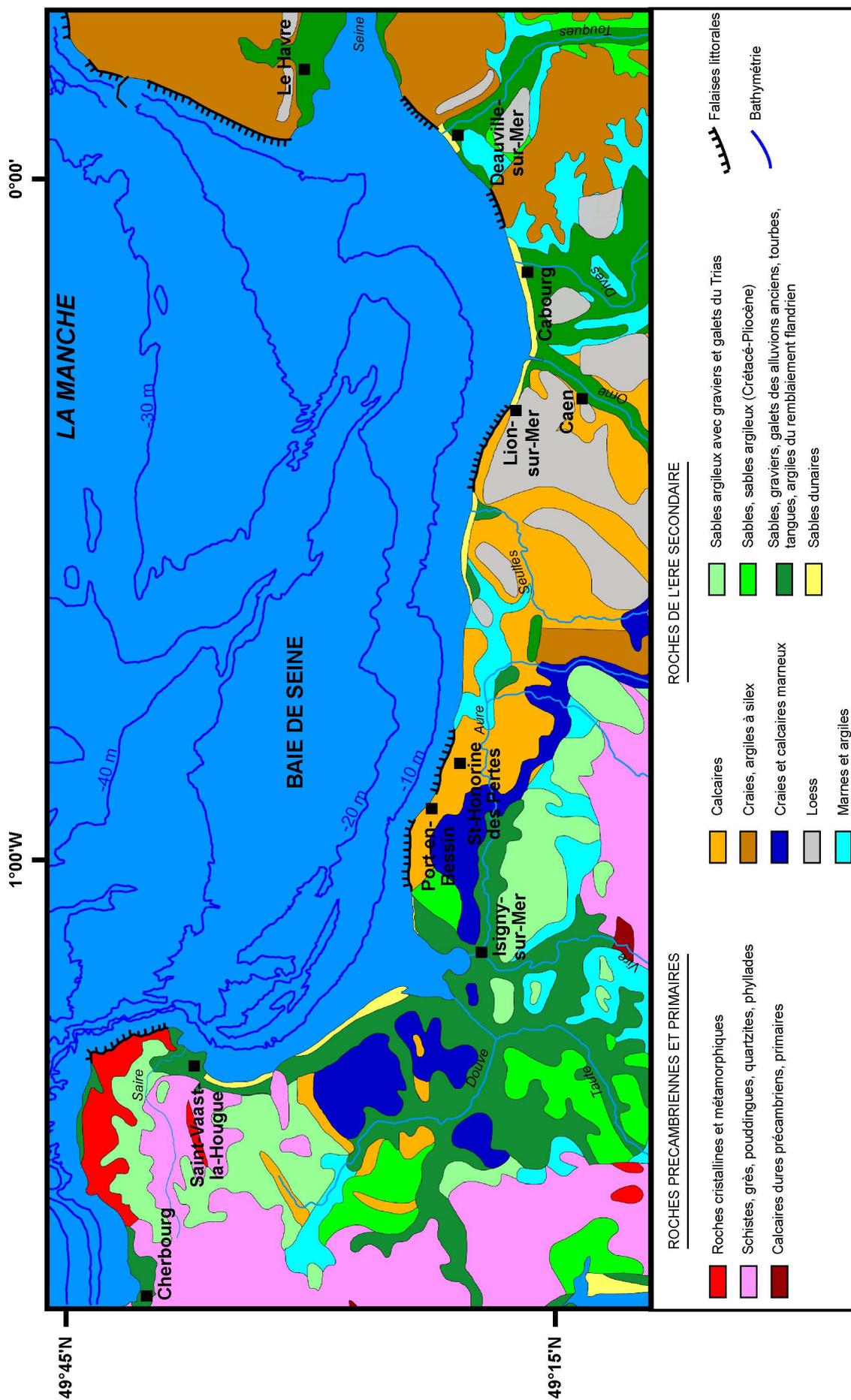


Figure 1.21. Carte lithologique et bathymétrie de la Normandie (d'après l'Atlas de la Normandie).

Le fleuve Seine long de 776 Km prend sa source sur le plateau de Langres (471 m d'altitude). Il traverse quatre régions et quatorze départements avant de se jeter dans la Manche. Le fleuve draine un bassin versant de 78 650 km², un des plus grands de France, est doté de nombreux affluents :

- avec l'Yonne, le Loing, l'Essonne, la Marne et l'Oise, pour les plus grands, tous hors Normandie ;

- et avec l'Epte, l'Andelle, l'Eure, l'Oison, le Robec, l'Aubette, le Cailly, l'Austreberthe, la Rançon, la Sainte-Gertrude, le Commerce, la Lézarde et la Risle pour les affluents normands.

Le bassin versant de la Seine regroupe 16 millions d'habitants, soit 26 % de la population, 50 % du trafic fluvial national, 40 % de l'activité économique française et 30 % de l'activité agricole française.

L'estuaire de la Seine constitue l'exutoire de ce vaste bassin, accumulant déchets industriels, urbains et agricoles de la région parisienne. Les contaminations microbiologiques et chimiques importantes sont liées principalement à la présence de métaux lourds, d'hydrocarbures, de composés organochlorés et d'autres composés organiques.

Avant le 19^{ème} siècle, la Seine était un fleuve large et peu profond, à pente faible et à méandres divagants. Les îles, présentes essentiellement dans la zone amont de Rouen, partageaient le lit en une multitude de bras secondaires. À partir de la moitié du 19^{ème} siècle, de nombreux aménagements ont été entrepris afin d'améliorer les conditions de navigation dans la Seine. La partie en amont de Rouen est l'une des seules à ne pas avoir été fortement aménagée ; peu profonde, elle est constituée d'îles pérennes (Guézennec, 1999). De Rouen à son embouchure, la Seine se présente désormais sous la forme d'un chenal unique, d'une largeur moyenne de 300 m, mais endigué sur presque toute sa longueur. Le chenal a une profondeur variant entre 5 et 12 m sous le zéro des cartes marines (Réf 0, Le Havre), mais le plafond a une morphologie chaotique, avec des hauts fonds et des dépressions naturelles (Lesourd, 2000). À l'embouchure de la Seine, l'écoulement se scinde en trois chenaux (chenal Nord, chenal de navigation et chenal Sud), séparés par des bancs de sables longitudinaux, le banc d'Amfard au Nord et le banc du Ratier au Sud. Au fur à mesure des aménagements, les dépocentres se sont déplacés et occupent actuellement une zone près du port du Havre : la vasière Nord.

Les derniers travaux de l'estuaire ont encore réduit l'espace disponible par l'extension portuaire du Havre (dite Port 2000), tandis que des mesures compensatoires ont conduit à la construction d'un épi et le creusement d'un chenal artificiel dans la zone Nord, et une île artificielle (reposoir à oiseaux) dans la zone Sud.

II.1.5. Caractéristiques hydrodynamiques du système estuarien de la Seine

- Courantologie dans la Mer de la Manche et la baie de Seine :

Dans la Mer de la Manche, la circulation des masses d'eau est très complexe, sous la double influence d'une branche européenne du Gulf Stream et des courants de marée. Elles pénètrent par l'ouest et se dirigent vers le Pas de Calais et la Mer du Nord.

Au cours d'une période de plusieurs cycles de marée, les masses d'eaux ont souvent des trajectoires oscillantes ou circulaires appelées "gyres" (Salomon et Breton, 1993). Leur circulation

est modifiée par l'approche du littoral et sa morphologie. Les courants, d'abord rotatifs au large, deviennent alternatifs et s'accroissent à proximité des côtes.

Dans la baie de Seine orientale et l'embouchure de la Seine, la circulation des eaux a fait l'objet de nombreux travaux (Le Hir *et al.*, 1986 ; Salomon, 1986 ; Avoine *et al.*, 1981 ; Salomon, 1981 ; Salomon et Le Hir, 1981). Elle est influencée par trois facteurs qui interfèrent : la marée, les gradients de salinité et les vents. Le Hir *et al.* (1986) ont ainsi mis en évidence la présence de gyres dans la partie nord-est de la baie, piégeant puis entraînant les eaux de la Seine vers la Manche orientale. Dans l'embouchure de la Seine, les eaux fluviales sont entraînées vers la baie de Seine malgré les gradients de salinité sur la verticale (Avoine *et al.*, 1981 ; Salomon, 1981). Des gyres sont mises en évidence à l'embouchure et s'expliquent du point de vue résiduel par un retour des masses d'eau vers le littoral ou l'intérieur de l'estuaire (Fig.1.22.).

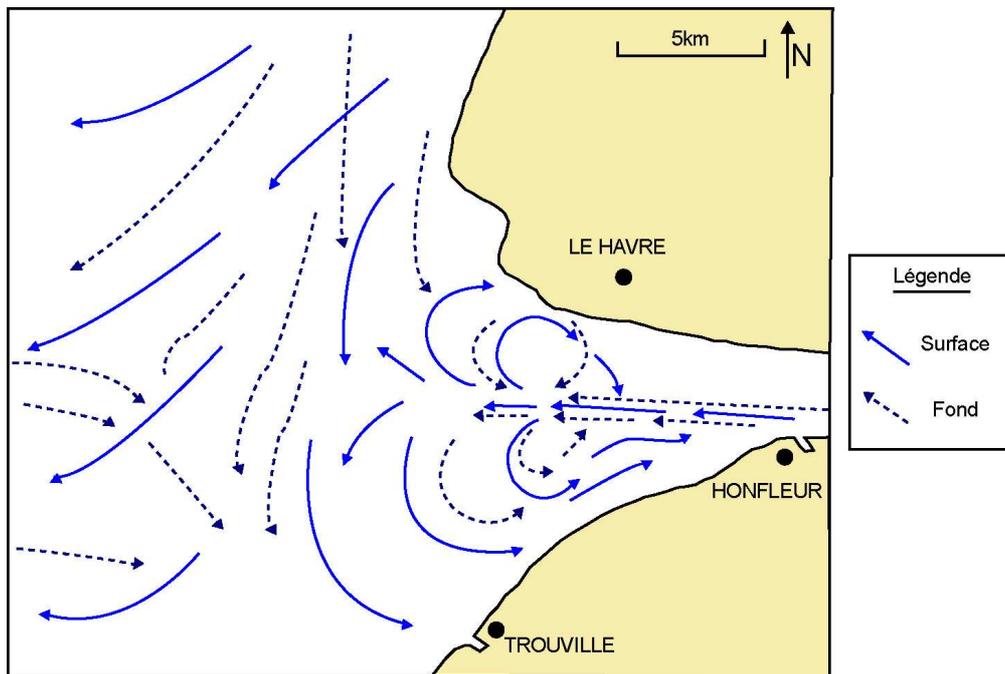


Figure 1.22. Schéma de la circulation résiduelle à l'embouchure de la Seine, basé sur des données de courant et des modèles numériques (d'après Avoine, 1986 ; Salomon et Le Hir, 1981).

- Courants de marée dans le système estuarien :

Si l'onde de marée progressive de type semi-diurne qui provient de l'Atlantique est de faible amplitude (1 m environ) aux abords occidentaux de la Manche, celle-ci augmente de manière très importante vers l'est et les fonds de baie. Comme presque partout en Manche, le régime de la marée est macrotidal. À l'entrée de la baie de Seine, cette onde acquiert déjà une asymétrie du fait des profondeurs décroissantes (Chabert d'Hières et Le Provost, 1978).

En baie de Seine orientale, le marnage varie entre 4 m en mortes eaux et 7,5 m en vives eaux. Au Havre, l'onde se caractérise par une période de montant (flot) légèrement plus courte (5h environ) que la période du baissant (jusant), de l'ordre de 7h30. L'une des particularités est l'existence d'une période d'étalement de pleine mer appelée "tenue du plein" (Lefloch, 1961) surtout marquée en vives eaux due à la combinaison d'ondes secondaires avec l'onde semi-diurne (dite M2, 12h25min). Cette étalement peut durer entre 2 et 3 heures et une double pleine mer peut être décelée.

L'estuaire de la Seine est considéré comme synchrone en mortes eaux (Germaneau, 1969) et hypersynchrone en vives eaux (Salomon, 1988). À cause du frottement de l'onde vers l'amont, son asymétrie s'accroît et son amplitude diminue. La propagation de la marée dure entre 3h et 6h du Havre à Rouen (Fig.1.23.) et le marnage n'atteint plus que quelques décimètres au maximum lorsqu'elle parvient au barrage de Poses à 160 Km de l'embouchure.

Du point de vue des vitesses des courants de marée, la déformation de l'onde vers l'estuaire amont entraîne une intensification des courants de flot vis-à-vis des courants de jusant. Si le mascaret a presque disparu de l'estuaire depuis les aménagements des années 1960, il persiste un phénomène dit de "coup de flot" très perceptible par forts marnages.

Enfin, il convient de noter les fortes vitesses de courants enregistrées dans l'estuaire, en particulier dans sa partie aval endiguée, lorsque se combinent jusant et forts débits fluviaux : des vitesses de 2 m.s^{-1} ne sont alors plus rares et l'inversion de marée au flot peut même ne pas être perçue (Lesourd, 2000).

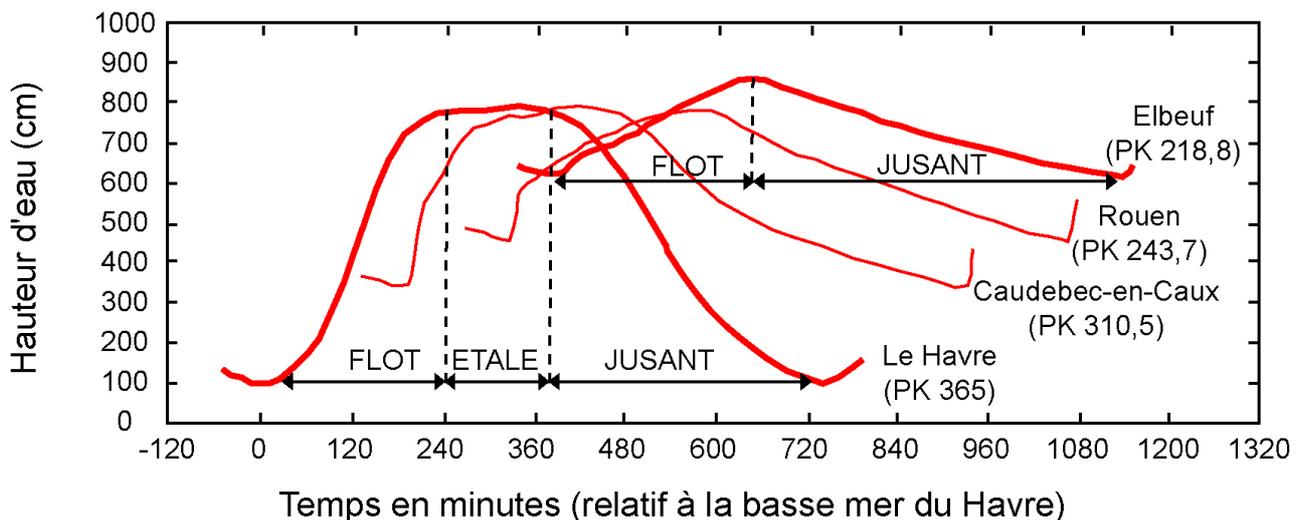


Figure 1.23. Déformation de l'onde de marée du 5 mai 1996 (coefficient 101, débit $200 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) au cours de sa progression dans l'estuaire amont de la Seine (d'après Guézennec, 1999, modifié) et illustration du flot, de l'étale et du jusant. Données PAR.

- Salinité :

En Manche centrale particulièrement, les eaux, à toutes profondeurs, sont relativement bien mélangées du fait des forts courants de marée. Les isohalines se disposent le long d'une ligne Boulogne-sur-Mer/Saint-Vaast-la-Hougue et les valeurs décroissent du large vers la côte (où elles sont partout inférieures à $34,5 \text{ ‰}$). En automne et en hiver, l'isohaline 35 ‰ pénètre plus en avant vers l'est.

En baie de Seine, la répartition des isohalines ne reste pas uniforme (Fig.1.24.). Entre Barfleur et Saint-Vaast-la-Hougue, la salinité varie peu entre les zones côtières et la Manche (de $34,5$ à $34,75 \text{ ‰}$). De Saint-Vaast-la-Hougue à la baie des Veys, la salinité peut descendre à moins de 33 ‰ ; cette diminution n'est toutefois enregistrée que dans les chenaux de la Vire et de la Douve lors d'un cycle tidal, les apports en eau douce étant trop faibles par rapport aux apports d'eau marine.

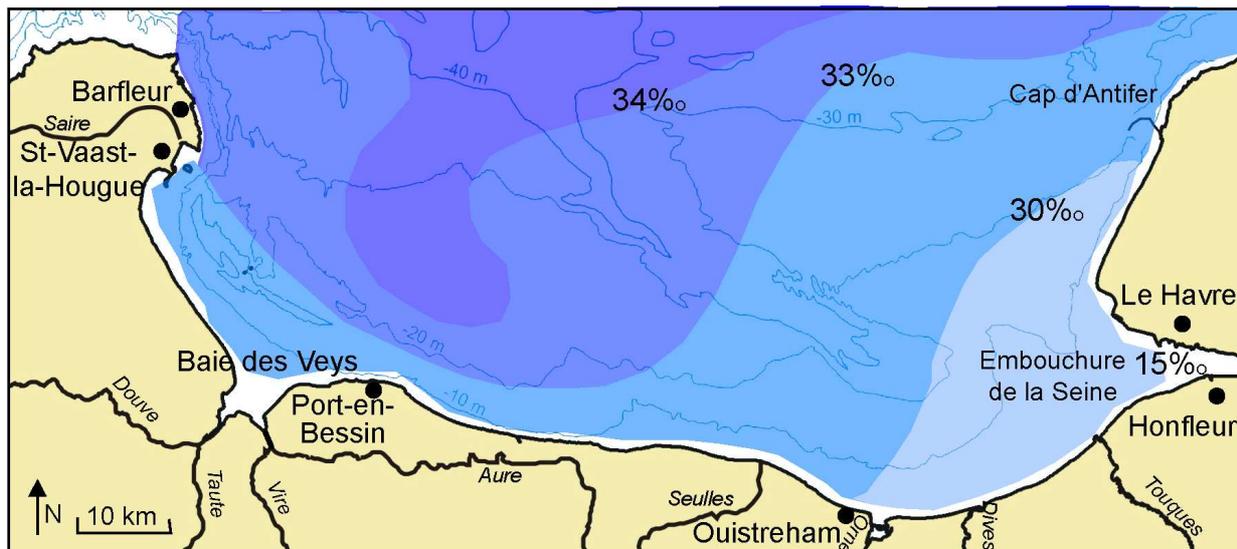


Figure 1.24. Salinité en période de crue fluviale, en baie de Seine (Données CNEXO-COB-ELGMM, d'après IFREMER).

Dans la partie est de la baie de Seine, en bordure du Pays de Caux, les isohalines s'orientent parallèlement à la côte, sous l'effet des influences continentales.

Dans la partie centrale de la baie de Seine et au sortir de l'estuaire de la Seine, les isohalines se répartissent en deux zones distinctes (Fig.1.25.) : une zone à l'ouest, dominée par une forte pénétration des eaux salines selon un axe nord ouest-sud est (Avoine, 1986) ; et une zone à l'est, fortement influencée par les régimes hydrologiques de la Seine (Avoine *et al.*, 1984 ; Le Hir *et al.*, 1986).

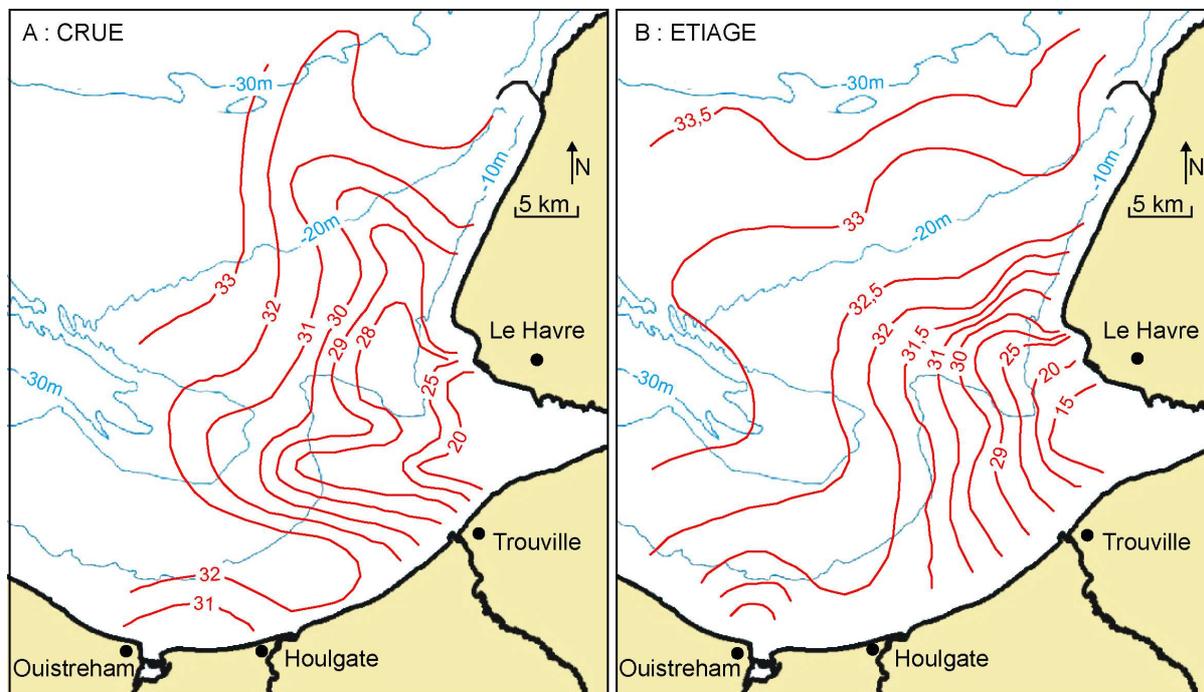


Figure 1.25. Distribution de la salinité en surface (‰) à marée basse, pendant une crue (A) et pendant un étiage (B) dans la baie de Seine orientale (Avoine, 1986 modifié).

La répartition des eaux salées en baie de Seine peut varier selon les conditions tidales (Lafite, 1990) :

- en période de vives eaux et à basse mer, l'extension de la dessalure en surface se fait vers le sud-ouest, le nord-ouest et le long du Pays de Caux. En pleine mer, le panache de dessalure à 30 ‰ ne subsiste qu'en surface et au milieu de la colonne d'eau. Au sud-ouest du port d'Antifer, la renverse des courants peut expliquer la pénétration de l'eau salée (> 34 ‰) le long de la côte, alors que, plus au large l'orientation des courants vers l'est conduit à la formation d'une lentille dessalée ;

- en période agitée de mortes eaux, l'expulsion à basse mer des eaux dessalées est moins marquée qu'en période de vives eaux, notamment par des formes d'isohalines très effilées. L'extension de l'isohaline 31,5 ‰ est cependant plus grande le long des zones côtières en mortes eaux.

Au sein de l'estuaire, l'intrusion saline (limitée par une valeur de 0,5 ‰) se fait sentir jusqu'à 20 Km de l'embouchure en période de crue, et 40 Km en période d'étiage. Ce gradient longitudinal de salinité varie aussi en fonction des cycles tidaux et peut migrer de 20 à 30 Km en vives eaux et de 10 Km en mortes eaux, quelque soit le débit de la Seine (Avoine, 1981). La position moyenne du front salin a varié au cours des dernières décennies. Avant 1960, l'intrusion saline se situait au niveau de Caudebec-en-Caux (Avoine, 1994). À partir de 1963 et jusqu'en 1999, la limite s'est déplacée entre les PK335 et PK350 (Avoine, 1994 ; Avoine *et al.*, 1996 ; Lesourd, 2000).

- Vent :

Les données du vent (intensité et direction) sont obtenues au Sémaphore du Cap de la Hève. La compilation des données entre 1976 et 1995, obtenues toutes les trois heures et moyennées sur dix minutes, indique des vitesses du vent au Cap de la Hève comprises entre 2,5 et 6 m.s⁻¹ (Le Hir *et al.*, 2001). Les principales directions du vent sont données dans le tableau 1.1. suivant. Ces résultats montrent que la direction SO est prédominante sur les autres.

Tableau 1.1. Principales directions de vent enregistrées au Cap de la Hève en baie de Seine.

Appellation	Force Beaufort	Direction du vent
Faibles brises à jolies brises	1 à 4	N-NE, voire SO
Bonnes brises à grands frais	5 à 7	SO
Coups de vent à tempêtes	> 8	S et O

Cette direction préférentielle des vents au Cap de la Hève est confirmée par Delsinne (2005). Entre 1998 et 2002, il détermine une prédominance des vents dans la direction SO avec une occurrence de 40 % et une répartition équivalente dans les directions NO à SE avec 20 % d'occurrence. Pour les directions NO à SE, 60 % des vents ne dépassent pas une vitesse de 5 m.s⁻¹ ; contrairement au secteur SO, où 80 % des vitesses sont supérieures à 5 m.s⁻¹. Il comptabilise, par ailleurs et pour cette direction, près de 85 % des vitesses de vent supérieures à 15 m.s⁻¹ pour la période 1998-2002.

À l'échelle annuelle, la prédominance des vents de secteur SO est conservée. De mars à juillet, les vents sont généralement de direction NO à O. Les vents de secteur NE prédominent en été et ceux de secteur SE en hiver. Les vents les plus forts (de secteur SO) se concentrent en automne et en hiver.

- Agitation :

Les houles en baie de Seine sont mesurées au large du Havre, à partir d'une bouée phare (49°31,22'N, 00°09,54'O) et sont acquises par le CE TMEF, via le projet de surveillance Candhis. Elles montrent que sur la période 1996-2001, les hauteurs moyennes des houles moyennes, comprises entre 0,2 et 0,4 m ont une occurrence entre 25 et 30 % (Fig.1.26. et Fig.1.27.). Par ailleurs, moins de 10 % des houles moyennes annuelles dépassent 1 m de hauteur. La période des houles moyennes observées pour cet intervalle de temps est estimée entre 5 et 5,5 s. Moins de 10 % des périodes moyennes dépassent 6 à 6,5 s, soit des houles considérées ici comme des houles de tempêtes.

A l'échelle annuelle, les plus fortes houles apparaissent en automne-hiver et sont généralement associées aux vents de secteur SO (Delsinne, 2005).

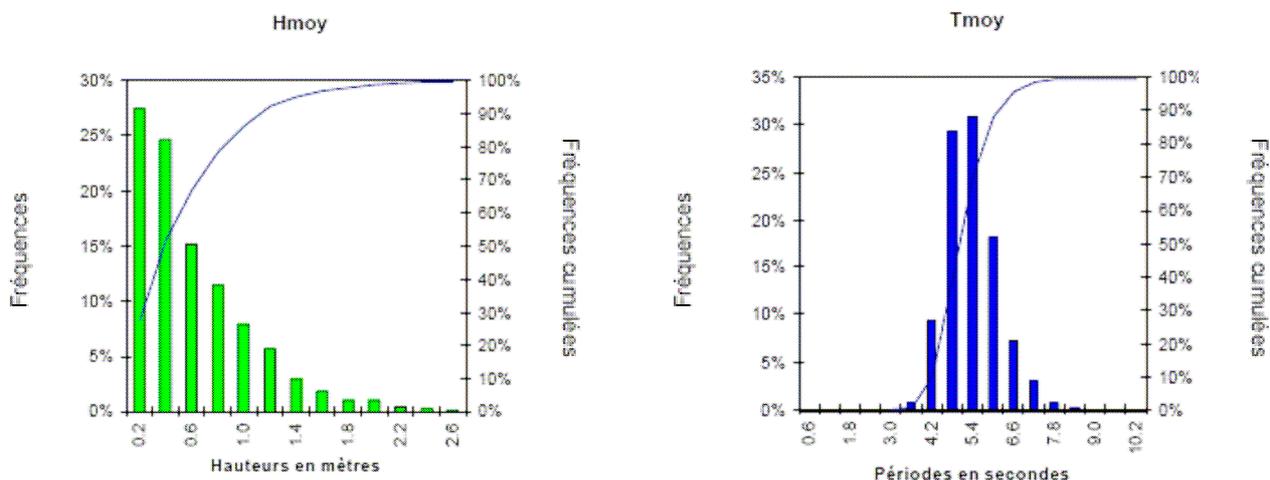


Figure 1.26. Fréquences et fréquences cumulées des hauteurs et des périodes des houles moyennes, (moyennées sur une année) entre août 1996 et mars 1998 (Données CETMEF réseau Candhis).

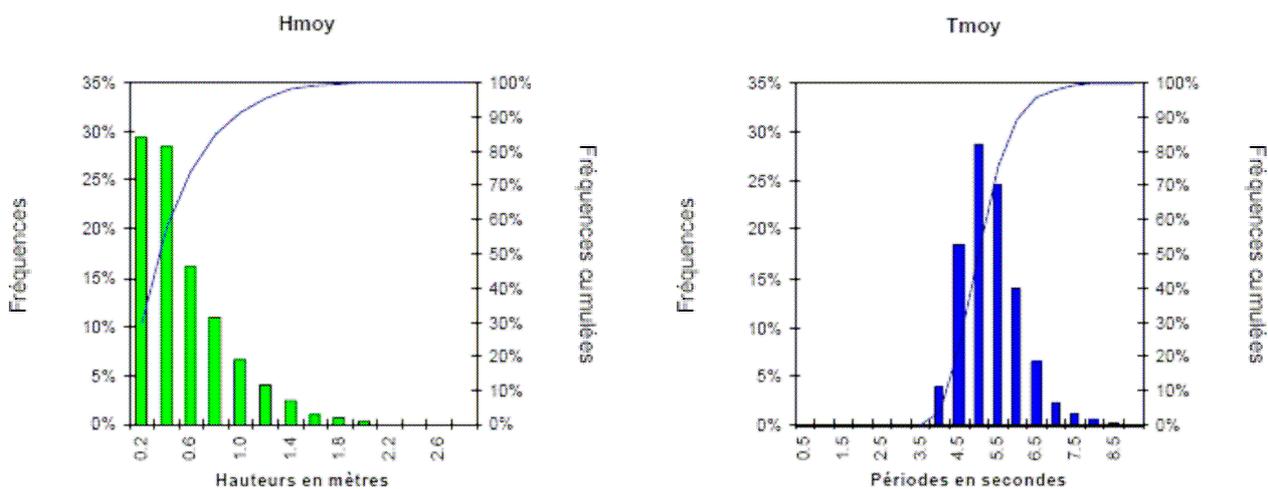


Figure 1.27. Fréquences et fréquences cumulées des hauteurs et des périodes des houles moyennes, (moyennées sur une année) entre janvier 1997 et juillet 2001 (Données CETMEF réseau Candhis).

Des études, menées dans le cadre du Programme Scientifique Seine Aval, sur l'enregistrement des conditions hydrodynamiques sur deux secteurs du littoral oriental du Calvados (Villers-sur-Mer, un site ouvert et Pennedepie, un site plus interne) ont permis de préciser l'orientation des

houles sur une période s'échelonnant de 2003 à 2005 (Levoy *et al.*, 2004 ; Dubrulle *et al.*, 2005). L'agitation est une mer de vent associée à des houles résiduelles plus longues. La figure 1.28. montre que les directions d'origine des houles se répartissent dans des secteurs étroits NO-NNO pour Villers-sur-Mer et ONO-NO pour Pennedepie. La différence entre les deux sites est due à la protection de l'est du Calvados des houles de NNO par le Cap de la Hève. On note aussi que la hauteur significative des houles est plus forte à Villers-sur-Mer qu'à Pennedepie (H_s (Penedepie) = 0,60 H_s (Villers-sur-Mer)), ce qui résulte de l'amortissement des houles vers l'intérieur de l'estuaire (réfraction sur le littoral). Cela suggère donc que le transport des sables littoraux se fait vers l'estuaire de la Seine, avec une remise en suspension des vases de bas estran (Dubrulle *et al.*, 2005).

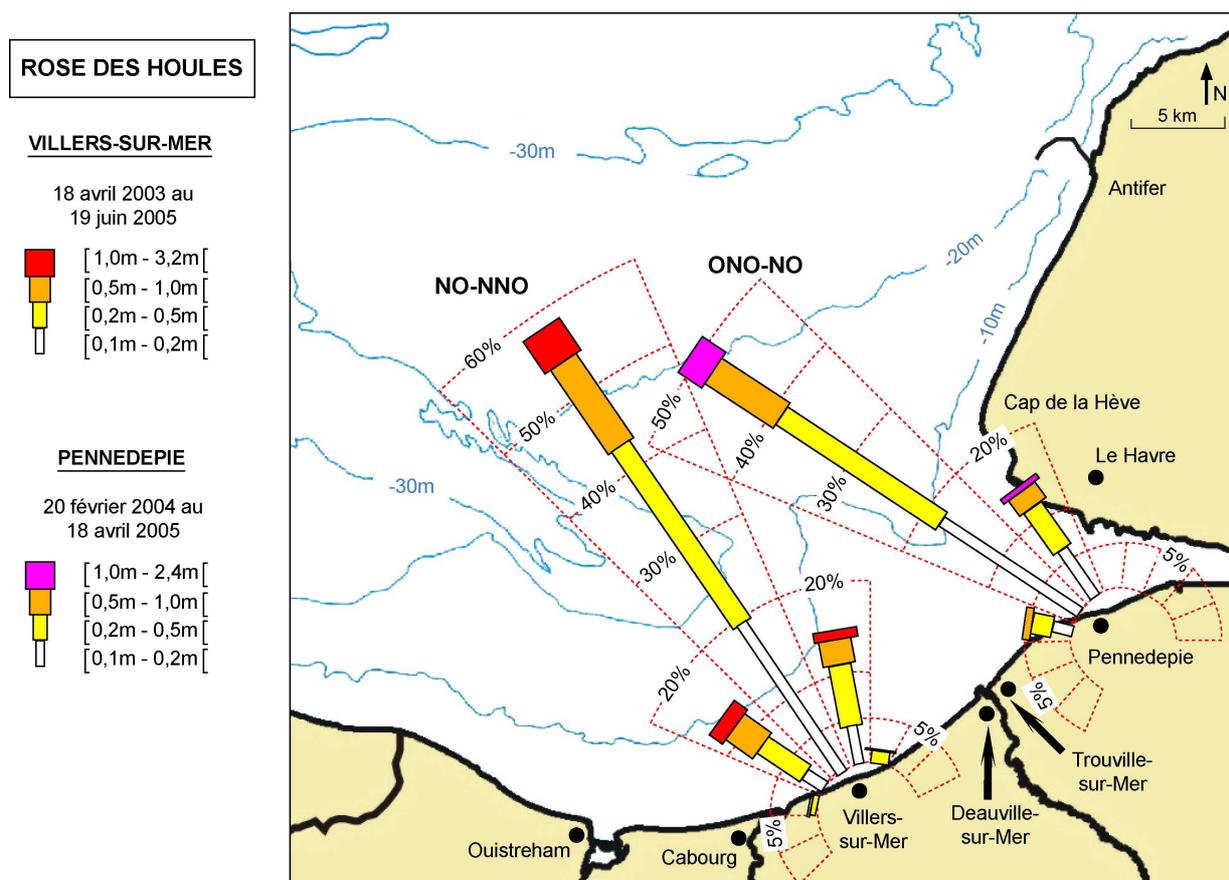


Figure 1.28. Rose des houles à Villerville et Pennedepie, entre 2003 et 2005 (d'après Dubrulle *et al.*, 2005 ; Levoy *et al.*, 2004). Le trait de côte est une donnée GIPSA, 2007.

II.1.6. Caractéristiques hydrosédimentaires de l'estuaire de la Seine

- Débits en Seine :

Le bassin versant de la Seine est soumis à un régime océanique modéré avec des périodes hivernales à climat continental froid et sec. La Seine fluviale a un régime hydrologique de type pluvial océanique, avec un débit moyen entre 1941 et 2005 de $439 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, majoré de 10 % en tenant compte des affluents de la Seine.

Les hautes eaux saisonnières, dites crues, se produisent généralement en période froide de l'année (janvier, février, mars, Guézennec, 1999), lorsque les précipitations sont abondantes et les

sols saturés (Guilcher, 1965). Ces hautes eaux alternent en période chaude (juillet, août, septembre, Guézennec, 1999), avec des basses eaux saisonnières, ou étiage (Fig.1.29.). Les débits de la Seine mesurés à Poses montrent néanmoins des valeurs contrastées avec des débits de crue, qui peuvent atteindre $2280 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (en 2001), et des débits d'étiage très faibles, de l'ordre de $40 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (en 1992).

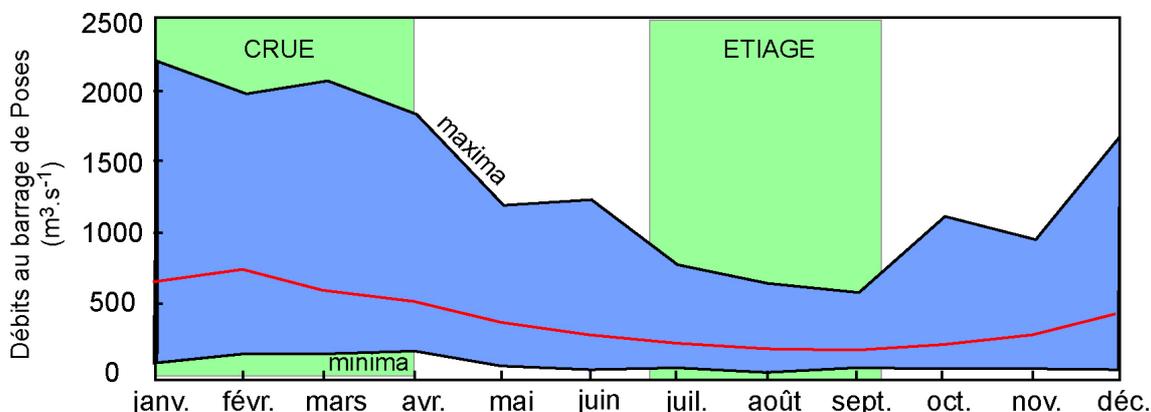


Figure 1.29. Débits de la Seine au barrage de Poses entre 1941 et 1990 : (—) courbes des débits minima et maxima, (—), débits mensuels moyens (Guézennec, 1999, modifié), Données PAR.

La dernière observation connue est celle de la présence accrue des épisodes de hautes eaux saisonnières dont le débit est supérieur à $1000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, appelés aussi des crues par Garnaud et Garland (2005). En effet, le nombre de crues a été multiplié par deux au cours des trois dernières décennies : il est passé de 17 crues excédant $1000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ entre 1941 et 1977, à 27 crues supérieures à $1000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ entre 1977 et 2001 (Garnaud et Garland, 2005). Depuis cette évaluation, soit entre 2001 et 2005, cette observation (hautes eaux saisonnières supérieures à $1000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) reste vraie excepté pour l'année 2005, où les plus forts débits n'ont atteint que $850 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (Fig.1.30.).

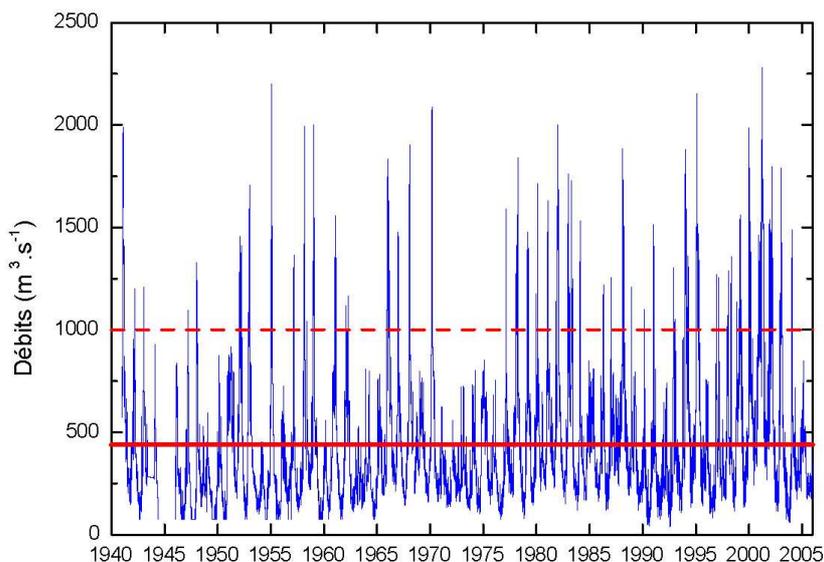


Figure 1.30. Débits de la Seine au barrage de Poses entre 1941 et 2005 : (—) débits journaliers, (—), débit moyen entre 1941 et 2005, (- - -) débits supérieurs à $1000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Données PAR et GIPSA.

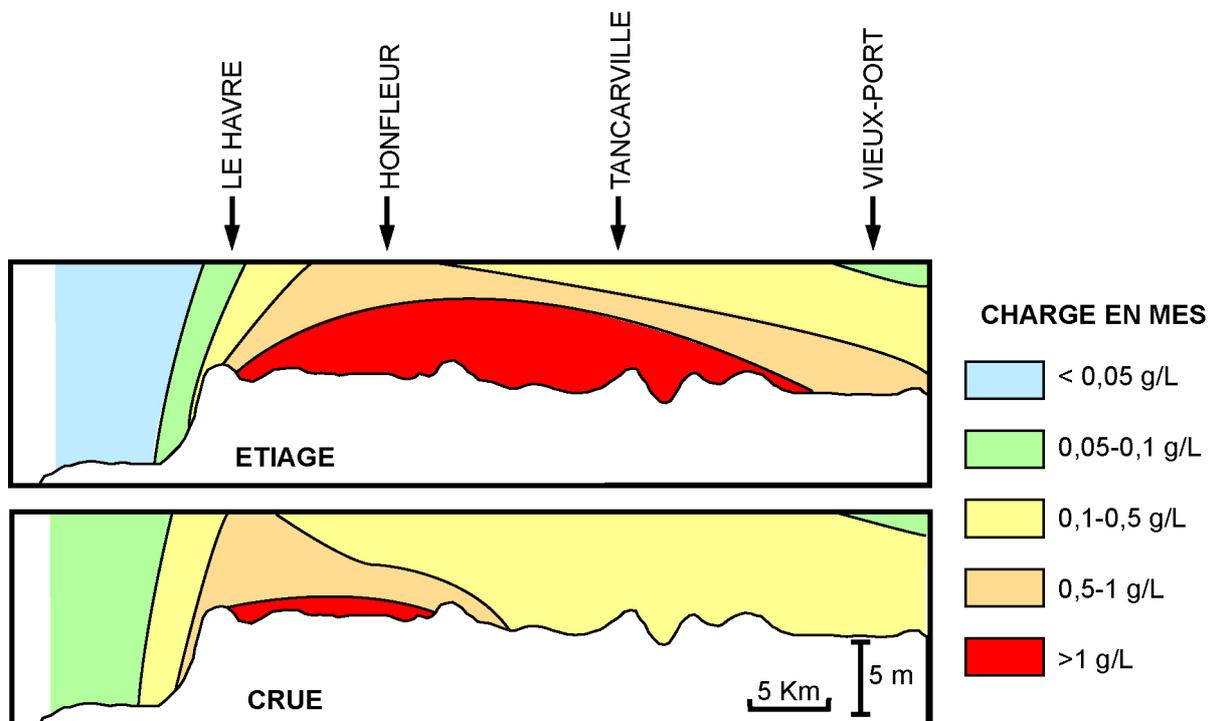
- Bouchon vaseux :

Dans les estuaires, le bouchon vaseux caractérise la zone où la teneur en matières en suspension (MES) est la plus importante. Ce bouchon vaseux constitue l'une des principales caractéristiques d'un domaine estuarien dominé par la marée (Wells, 1995). Sa formation est étroitement liée à la circulation résiduelle et à l'asymétrie de la marée.

Dans l'estuaire de la Seine, la formation du bouchon vaseux est surtout liée à l'asymétrie de la marée et il existe pour des concentrations en MES supérieures à 1 g.L^{-1} (Avoine, 1981). Le bouchon vaseux se déplace dans l'estuaire, au gré des conditions hydrologiques de la Seine et des cycles de marée. Sa concentration en matériel particulaire peut ainsi varier en fonction des conditions hydrologiques et tidales, auxquels peuvent s'ajouter les effets liés aux périodes de mortes-eaux et de vives-eaux (cycle semi-lunaire).

En hautes eaux saisonnières, le bouchon vaseux se situe très en aval dans l'estuaire. Les particules en suspension sont pour partie expulsées vers la baie de Seine, d'où des concentrations relativement faibles de l'ordre de $0,1-0,5 \text{ g.L}^{-1}$ (Fig.1.31.). En étiage, par contre, l'expulsion des MES vers la baie de Seine est beaucoup moins importante, le bouchon vaseux a donc des concentrations assez élevées pouvant atteindre 1 g.L^{-1} (Avoine, 1981).

En période de mortes-eaux, le bouchon vaseux est positionné entre les PK335 et PK345, en étiage et entre les PK350 et PK358 en crue. En période de vives-eaux, le bouchon vaseux s'étend davantage et peut s'étendre sur 30 Km de long. Son centre se situe entre les PK345 et PK355, en étiage, et entre les PK348 et PK363, en crue. Pour cette période, et lorsque le débit dépasse $500 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, une partie du bouchon vaseux est expulsée à marée basse vers la baie de Seine (Avoine, 1994).



II.2. Bilans des sources et des transferts de sédiments fins dans le système estuarien de la Seine

II.2.1. Sources et transferts depuis la Seine fluviale

Les principales sources de sédiment fin en amont du système étudié (estuaire de Seine et baie de Seine) proviennent des matériaux fins apportés par la Seine fluviale.

D'une manière générale et sous climat tempéré, les apports sédimentaires des fleuves se font essentiellement en suspension, le charriage étant d'importance secondaire (Müller et Forstner, 1968). Dans le cas de la Seine, les matériaux fins (silts et argiles) transitent comme les matières en suspension, et sont le résultat de l'érosion du bassin versant de la Seine (Bassin de Paris), en amont du barrage de Poses.

En établissant une relation entre le débit liquide et la concentration en matières en suspension, Avoine (1986) estime l'apport en MES d'origine fluviale à 500 000 t en moyenne par an, au niveau du barrage de Poses. Les quantités de matériel en suspension varient toutefois entre 200 000 t par an en période sèche et 1 000 000 t par an en période humide. Les dernières données de Guézennec (1999) corrigent ces estimations, évaluant en moyenne l'apport en MES au barrage de Poses entre 600 000 et 700 000 t par an. Les taux d'érosion du bassin versant de la Seine, pour un débit solide de 500 000 t sont estimés par Avoine (1986) à 7,5 t/ km²/an avec des valeurs extrêmes comprises entre 3 et 15 t/km²/an. D'après ces chiffres, l'arasement du bassin versant de la Seine serait alors de l'ordre de 0,4 cm par millénaire en condition moyenne.

II.2.2. Sources et transferts dans l'estuaire de la Seine

Dans l'emprise géographique de l'estuaire de la Seine, les sources en matériel fin sont plus nombreuses : cette zone se situe, en effet, à l'interface entre le domaine marin et le domaine fluviale. À l'aube de ce travail, il est possible d'énumérer les sources potentielles du sédiment fin, correspondant aux vases qui se déposent dans les différents compartiments de l'estuaire, mais il demeure très difficile d'évaluer la contribution de certaines d'entre elles. Les particules fines rencontrées dans l'estuaire de la Seine peuvent avoir des origines très variées (Fig.1.32.) :

- les particules fluviales du bassin versant amont de la Seine (Bassin de Paris), dont les quantités ont été estimées à 600 000 à 700 000 t en moyenne, sédimentent, une fois dans l'estuaire de la Seine, sur les berges, ou, transitent vers l'estuaire aval et se retrouvent au niveau du bouchon vaseux. Au maximum, le bouchon vaseux peut stocker 400 000 t de MES (Avoine *et al.*, 1986). Le temps de résidence des particules fines, dans l'estuaire de la Seine, a été estimé entre 0,4 et 2 ans avec une moyenne de 0,8 an, en dehors de toute sédimentation. Les éléments dissous, quant à eux, sont évacués vers la baie de Seine en 2 à 30 jours selon le débit fluvial.

- des stocks estuariens peuvent également se déplacer dans le système, au cours de crues longues et prolongées succédant à plusieurs années de débits faibles de la Seine, appelés "crues estuariennes". Le bouchon vaseux est alors quasiment expulsé en baie de Seine et les vasières longeant les berges de l'estuaire sont pratiquement décapées. L'embouchure de l'estuaire de la Seine et la baie de Seine orientale sont alors constituées d'un matériel sédimentaire fin estuarien relativement homogène (Garnaud *et al.*, 2003).

- en période de hautes eaux saisonnières, il est possible selon Guézennec (1999) qu'une partie du matériel particulaire arrivant dans l'estuaire amont n'atteigne pas l'estuaire aval : ce matériel se dépose alors en aval de Rouen, dans le secteur des îles sur des vasières latérales. La quantité de matériel sédimenté, en cette période de hautes eaux saisonnières, représente 105 000 à 158 000 t de matériel particulaire (20 à 30 %).

- les particules peuvent provenir des petits bassins versants intra-estuariens (Austreberthe, Andelle, Risle, Eure...). Selon les données de la DIREN de Haute Normandie, les apports hydriques des rivières latérales constituent environ 12 % des apports annuels en estuaire de la Seine, et peuvent atteindre jusqu'à 35 % en période d'étiage. Guézennec (1999) estime les apports intra-estuariens à 30 000-35 000 t/an pour les affluents de la Seine en amont de Caudebec en Caux, à 10 000 t/an pour la Risle et à 10 000 t/an également pour les rejets industriels au voisinage de Rouen. Ces quantités de sédiments intra-estuariens semblent importantes mais restent modérées au vu du lessivage des sols loessiques et des formations superficielles de la région Haute-Normandie. Dupuis *et al.* (2005) ont ainsi estimé les apports du massif crayeux de l'Austreberthe, de l'Andelle et de la Risle, par érosion chimique, à 77 t/km²/an, à 78-85 t/km²/an, et à 47-49 t/km²/an, respectivement. L'érosion mécanique n'apporte à l'estuaire de Seine, quant à elle, que 16 t/km²/an pour l'Austreberthe et 21 t/km²/an pour l'Andelle.

- l'introduction de particules fines peut également se faire par l'écoulement karstique via la nappe alluviale, mais aucune information quantifiée n'est encore disponible.

- les sédiments argileux et carbonatés (tufs) holocènes qui, depuis 7000 ans colmatent l'estuaire, sont sous des conditions actuelles ; mis à nu (ravinement par les courants sur une longueur importante du fond du chenal de navigation entre Rouen et l'estuaire aval) et contribuent à l'apport en matériel fin dans l'estuaire de la Seine.

- l'érosion des berges de l'estuaire de la Seine et des chambres de dépôts de dragages est une source significative en matériel fin, mais à l'heure actuelle non encore estimée.

- les particules marines (sables, silts et argiles) advectées depuis la Manche centrale et la baie de Seine occidentale correspondent à un transit par charriage et suspension du débit solide à l'embouchure vers l'estuaire de l'ordre de 65 000 m³ par an (Avoine *et al.*, 1984).

- l'apport saisonnier de particules fines par la production phytoplanctonique marine devient maximal entre le printemps et l'automne (Brunet *et al.*, 1996 ; Aminot *et al.*, 1997). Dupont *et al.* (2001) ont estimé cette contribution dans l'estuaire à environ 60 000 t par an.

II.2.3. Sources et transferts en baie de Seine

La baie de Seine, zone intermédiaire entre l'estuaire de la Seine et la Manche, est le lieu de stockage et de transits des sédiments fins (Fig.1.33.). De la même manière que pour l'estuaire de la Seine, le matériel fin provient de sources très variées :

- les apports (sédiments sableux et vaseux) de l'estuaire de la Seine à la baie de Seine ont été évalués par Avoine *et al.* (1984) à 700 000 m³/an en moyenne.

- les fleuves débouchant dans la baie de Seine ont leur part dans l'apport en matériel fin de la baie. Peu de données existent quant à la charge solide de chaque fleuve ou rivière, seule la charge liquide ainsi que les caractéristiques hydrologiques sont connues et mesurés pour chaque cours d'eau de Basse-Normandie. Hors périodes particulières de hautes eaux saisonnières, les particules sont à priori stockées dans le lit et les plaines alluviales de plusieurs cours d'eau.

Dubrulle (1982) est seul à donner une estimation des apports de l'Orne fluviale, à hauteur de 10 à 25 000 t/an, soit 20 000 à 50 000 m³/an.

- les dragages de l'estuaire de la Seine sont estimés à 600 000 m³ de matériel particulaire exporté hors du système estuarien de la Seine, et sont constitués par 80 % de particules fines (Duval, 1994), ce qui représente 480 000 m³, soit 134 400 t à 220 800 t de matériel particulaire exporté (Guézennec, 1999). Les dragages d'entretien du port du Havre sont déposés au large d'Octeville-sur-Mer (sédiments dominés par les vases) et représentent près de 2 400 000 m³/an hors travaux particuliers (Port 2000). Un tiers de ces dépôts reste sur place, deux tiers (la fraction la plus fine) sont expulsés vers le nord-nord-est, et se répartissent sur les fonds puis sont entraînés vers le nord-est hors de la baie de Seine (Chauvin *et al.*, 1985).

- aux dragages effectués dans l'estuaire de la Seine, il faut ajouter les dragages des ports bordant la baie de Seine. Pour l'Orne, le volume des dépôts de dragages de Ouistreham (dragages d'approfondissement d'accès au port et dragages d'entretien) atteint en moyenne 500 000 m³/an. Ces dépôts sableux et vaseux sont peu dispersés et restent cantonnés à une aire de 40 000 m² autour du point d'immersion en mer (Avoine, 1992 ; Avoine *et al.*, 1993).

- les remaniements des argiles fossiles holocènes affleurant en domaine subtidal jouent également un rôle en terme d'apports de matériel fin de la baie de Seine. Volmat (1929) suggère un démaigrissement annuel des fonds de la baie de Seine de 1 700 000 m³ entre le méridien d'Houlgate et le parallèle du Havre, une érosion qui s'élève à 3 000 000 m³/an pour un périmètre regroupant Le Havre, Le Parfond et Luc-sur-Mer (en pointillé sur la figure 1.33.)

- l'érosion littorale des argiles, des marnes d'âge mésozoïque (e.g. Villerville, falaises des Vaches Noires, falaises des Roches Noires) et des formations de versant quaternaires formant les falaises littorales du Pays d'Auge (et, en moindre part, du Pays de Caux). Elle est estimée à 200 000 m³/an pour la côte du Calvados (LCHF, 1973 ; LCHF et LNH, 1986 ; Volmat, 1929) et à 600 000 m³/an pour la côte du Pays de Caux (Volmat, 1929),

- les données sur les apports en matériel fin depuis la Manche ne sont pas connues, seules les estimations de ce matériel existent en baie de Seine. La quantité minimale de 5 000 000 m³ de sédiment marin est apportée en baie de Seine par an sur une surface de 3 800 Km² (Boust, 1999 ; Larsonneur, 1985).

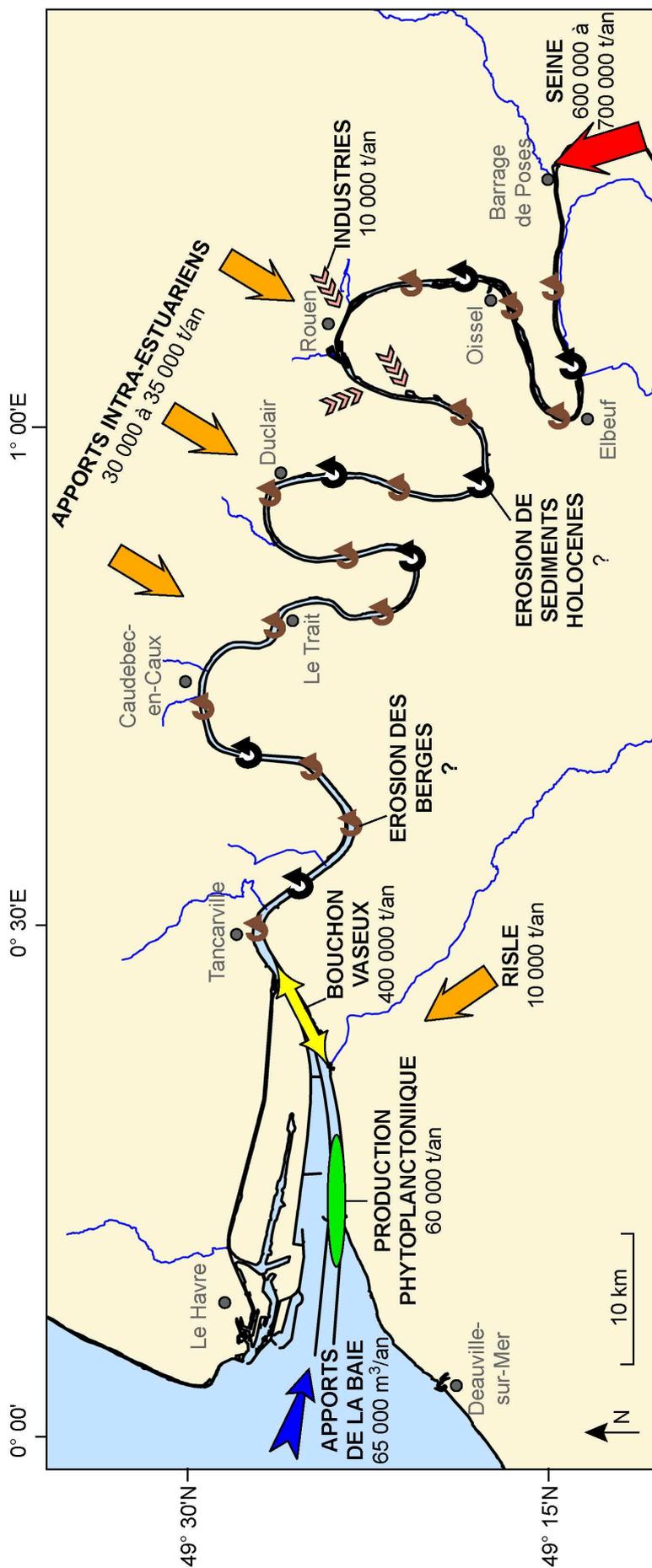


Figure 1.32. Sources potentielles en matériel fin dans l'estuaire de la Seine, exprimées en tonnes par an ou en mètres cube, (Avoine *et al.*, 1984 ; Avoine *et al.*, 1986 ; Dupont *et al.*, 2001 et Guézennec, 1999).

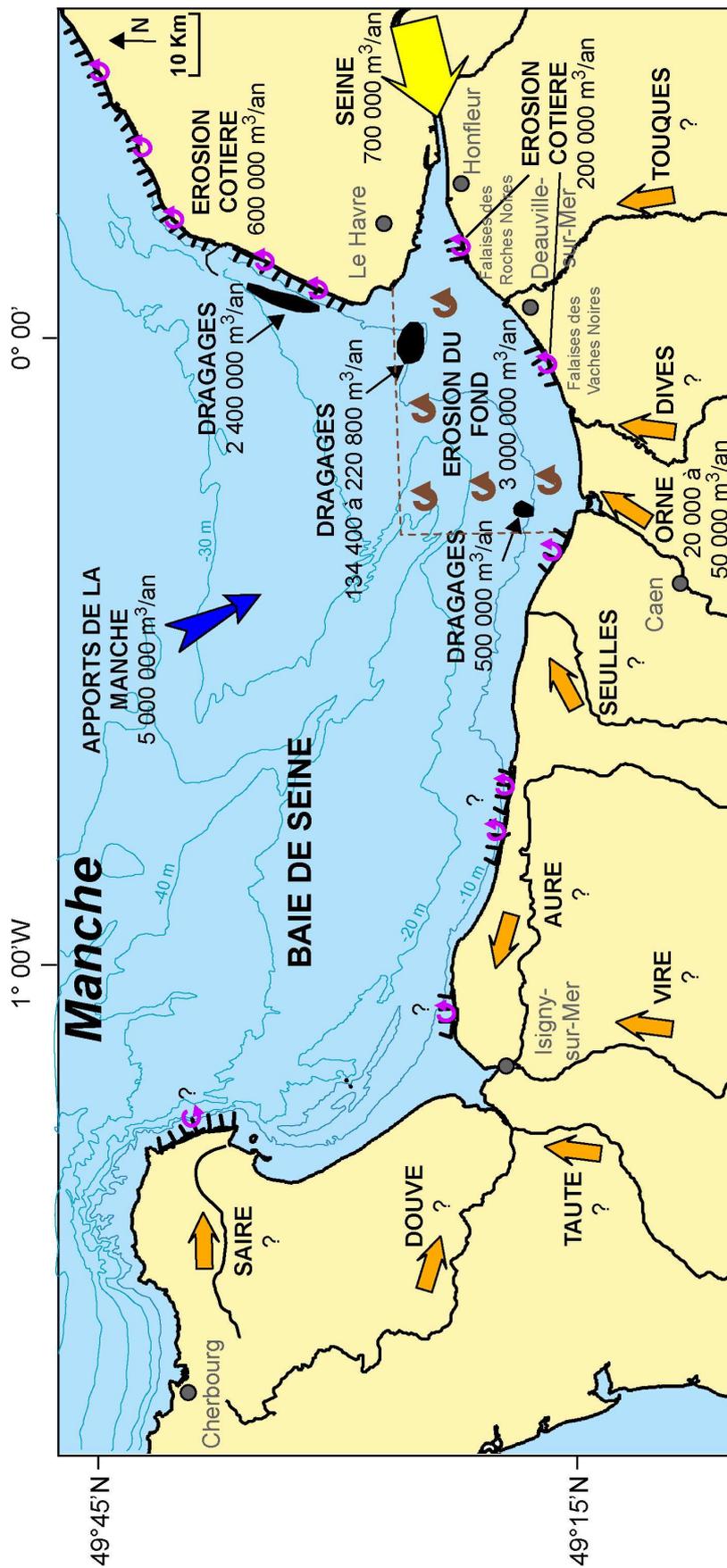


Figure 1.33. Sources potentielles en matériel fin dans la baie de Seine, exprimées en mètres cube par an, (Avoine, 1992 ; Avoine et al., 1985 ; Avoine et al., 1993 ; Boust, 1999 ; Chauvin et al., 1985 ; Dubrulle, 1982 ; Duval, 1994 ; Guézennec, 1999 ; Larssonner, 1985 ; LCHF, 1973 ; Volmat, 1929).

CONCLUSION

La description et l'utilisation des différents types de marqueurs sédimentaires, cités dans la littérature, permettent de faire le bilan des moyens d'étude utilisables pour la détermination des sources. Ainsi :

- la minéralogie permet de distinguer différents stocks particuliers. Les minéraux argileux ou les minéraux lourds, peuvent à la fois caractériser des sources sédimentaires et permettent de suivre leur répartition géographique et donc leurs transferts ;

- la géochimie des éléments stables peut être utilisée à la fois comme marqueur de source et comme marqueur de pollution. Adapté à tout type d'environnement, il est l'un des meilleurs candidats au marquage sédimentaire ;

- la géochimie des radionucléides est la plus appropriée quand une source d'éléments artificiels existe dans l'environnement de l'étude. Ses sources sont généralement bien connues et leur évolution dans le temps peut être calculée facilement grâce à leur période. Ce marqueur permet donc à partir d'un stock sédimentaire de suivre ses évolutions spatiales et temporelles ;

- le marqueur organique permet avant tout d'identifier une source de matériel sédimentaire. Toute la validité du résultat est généralement liée à la dégradation ou non de la matière organique ;

- le marqueur biologique est un excellent indicateur d'environnement, plus difficile, par contre, à utiliser comme marqueur particulier, puisqu'il évolue et s'adapte lorsqu'il change de milieu sédimentaire. Le suivi de ce marqueur dans un environnement donné est donc plus délicat. Tous ces marqueurs sont d'utilisation d'autant plus aisée que les mélanges d'eaux sont simples, le contraste hydrodynamique étant peu soumis à l'emprise géographique du secteur d'étude.

La présentation du système estuarien de la Seine définit ce milieu comme complexe. À l'interface entre le domaine marin et fluvial, il est à la fois soumis à de forts courants de marée, du fait de son régime macrotidal, et à une influence fluviale variable mais importante, illustrée par la récurrence d'importantes hautes eaux saisonnières.

Le bilan des différentes sources potentielles du matériel fin dans l'estuaire de la Seine et dans la baie de Seine rend jusqu'alors très difficile l'identification des différentes contributions dans la sédimentation fine actuelle. Le choix du marqueur particulier est alors important puisqu'il doit pouvoir :

- caractériser une source sédimentaire distinctement,
- suivre son évolution à court terme (quelques mois à quelques années),
- tracer la source sur l'ensemble du domaine estuarien de la Seine.

Au vu de la complexité hydrosédimentaire du système et des aptitudes de chaque marqueur particulier présenté dans ce chapitre, les marqueurs minéralogiques (plus particulièrement les minéraux argileux), géochimiques et radioactifs semblent les plus adaptés à cette étude, les marqueurs organiques et biologiques laissant trop d'incertitudes sur le suivi spatial et temporel des contributions sédimentaires.

CHAPITRE 2

**Stratégie d'échantillonnage et
méthodologie analytique**

I – Prélèvements des dépôts envasés en estuaire et en baie de Seine	67
I.1. Échantillonnages en domaine intertidal	67
<i>I.1.1. La Seine et son estuaire</i>	<i>68</i>
<i>I.1.2. Le littoral bas-normand en baie de Seine</i>	<i>71</i>
<i>I.1.3. Les cours d'eau côtiers bas-normands : Orne, Dives et Touques</i>	<i>76</i>
I.2. Échantillonnages en domaine subtidal	79
<i>I.2.1. Les sédiments vaseux en Seine et baie de Seine</i>	<i>79</i>
<i>I.2.2. Les matières en suspension (MES) en Seine et baie de Seine</i>	<i>85</i>
II – Méthodologie analytique	86
II.1. Séparation de la fraction fine (< 50 µm)	86
<i>II.1.1. Les sédiments superficiels</i>	<i>86</i>
<i>II.1.2. Les matières en suspension (MES)</i>	<i>88</i>
II.2. Analyse granulométrique des sédiments	88
II.3. Calcimétrie volumétrique des sédiments	89
II.4. Détermination et quantification des cortèges des minéraux argileux	89
<i>II.4.1. Préparation et fabrication des lames orientées</i>	<i>89</i>
<i>II.4.2. Analyse par diffractométrie RX</i>	<i>90</i>
<i>II.4.3. Écriture des cortèges des minéraux argileux</i>	<i>90</i>
<i>II.4.4. Indices de cristallinité</i>	<i>90</i>
<i>II.4.5. Semi-quantification des cortèges des minéraux argileux</i>	<i>91</i>
II.5. Analyse des éléments majeurs-mineurs-traces	92
<i>II.5.1. Préparation des échantillons</i>	<i>92</i>
<i>II.5.2. Analyse par ICP-MS et ICP-OES</i>	<i>92</i>
<i>II.5.3. Traitement des données</i>	<i>93</i>
II.6. Analyse des radionucléides	93
<i>II.6.1. Préparation des échantillons</i>	<i>93</i>
<i>II.6.2. Analyse par spectrométrie gamma</i>	<i>93</i>
<i>II.6.3. Origine des radionucléides artificiels et naturels</i>	<i>93</i>
<i>II.6.4. Normalisation des activités à une date de référence</i>	<i>94</i>

I – Prélèvements des dépôts envasés en estuaire et en baie de Seine

Cette première partie détaille les différents échantillonnages réalisés dans le système estuarien de la Seine, en domaine intertidal et subtidal : l'estuaire de la Seine, la baie de Seine et les cours d'eau côtiers (Orne, Dives et Touques) s'y jetant. La localisation des échantillons, les périodes de prélèvements et les typologies des dépôts y sont indiquées et illustrées par quelques cartes et photographies.

Pour l'ensemble des sites d'échantillonnages, le plus grand soin a été pris : seule la partie la plus superficielle du dépôt, la plus récente donc, a été prélevée, c'est-à-dire les deux premiers centimètres au maximum de l'interface air-eau-sédiment.

I.1. Échantillonnages en domaine intertidal

Cette partie décrit l'ensemble des échantillons prélevés en domaine intertidal sur l'ensemble du secteur étudié : estuaire de la Seine, baie de Seine et littoral bas-normand, ainsi que les cours d'eau côtiers bas-normands du Calvados (Orne, Dives et Touques).

La figure 2.1. ci-dessous présente la courbe des débits de la Seine et les différentes missions de prélèvements qui y ont été réalisées entre 2002 et 2005.

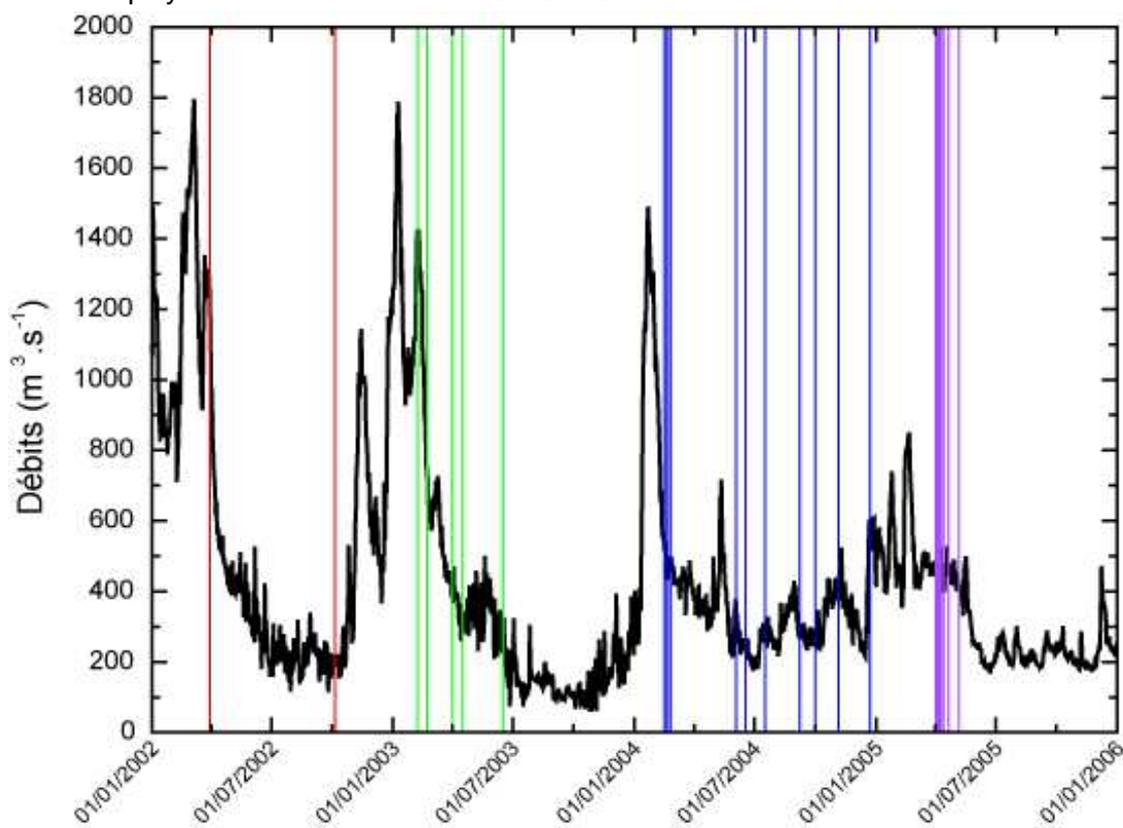


Figure 2.1. Débits de la Seine entre 2002 et 2005. Missions des prélèvements de sédiments en domaine intertidal (le domaine subtidal ne concerne que le mois d'avril 2005).

En rouge : année 2002, en vert : année 2003, en bleu : année 2004, en violet : année 2005.

1.1.1. La Seine et son estuaire

L'estuaire de la Seine - partie intégrante du système estuarien de la Seine - s'étend sur 150 Km de long de l'embouchure de la Seine à l'ouest (près de Honfleur) au barrage de Poses à l'est. La figure 2.2. présente l'ensemble des missions d'échantillonnage de l'estuaire de la Seine entre février 2004 et avril 2005. Ces sites de prélèvements choisis au départ par la Cellule anti-pollution du Port Autonome de Rouen ont été complétés par quelques stations supplémentaires pour couvrir l'ensemble de l'estuaire. Au total, 64 échantillons de sédiments vaseux ont été récoltés sur les berges de l'estuaire de la Seine, auxquels se sont ajoutés 2 échantillons sur les berges aval de la Risle, l'un des affluents de la Seine. Parmi les 64 échantillons, 3 récoltés en amont du barrage de Poses, servent de référence à la Seine fluviale.

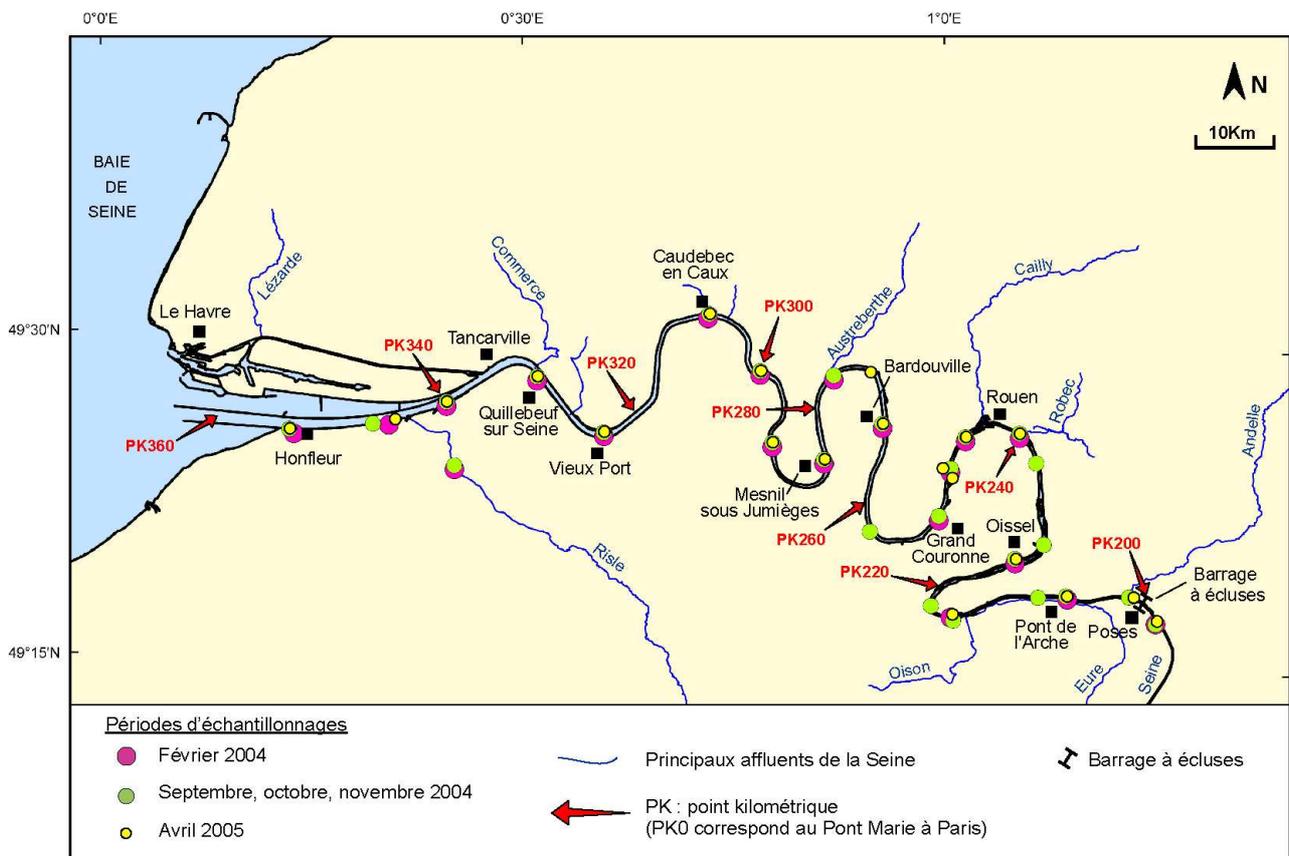


Figure 2.2. Carte de positionnement des échantillons prélevés en estuaire de Seine en 2004 et 2005. (Tracé de l'estuaire de la Seine : données GIPSA 2007). Les PK correspondent à des points kilométriques existant dans le chenal de la Seine. Le PK 0 correspond au Pont Marie à Paris. Les coordonnées géographiques et les descriptions de chaque échantillon sont détaillées en annexe.

L'estuaire de la Seine a été échantillonné en 2004 et en 2005. En 2004, deux campagnes d'échantillonnage se sont succédées l'une en février, juste après les hautes eaux saisonnières de fin janvier, avec des débits avoisinant les $1500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, et l'autre en septembre-octobre-novembre, en période de basses eaux saisonnières de la Seine avec des débits de l'ordre de $300\text{-}400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. En 2005, les sédiments ont été récoltés en avril, avec des débits de la Seine avoisinant $450 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. L'année 2005 n'a pas été marquée par de hautes eaux saisonnières significatives. Ainsi, les débits maxima généralement connus en janvier-février n'ont atteint que $850 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Du fait de l'endiguement presque généralisé du cours de la Seine à l'aval de Rouen, la dynamique de l'écoulement qui a été perturbé ne permet plus de dépôt des particules fines de manière pérenne dans l'axe du chenal (Lesueur et Lesourd, 1999). De ce fait, les envasements ne sont rencontrés que sur les marges et dans des endroits abrités : berges internes de méandres, et, plus localement, recoins de digues ou d'obstacles (descentes de bacs, épis).

La typologie des dépôts est variable. De l'embouchure de la Seine, à l'approche de la zone industrielle de Rouen, les envasements se présentent tantôt comme d'épais dépôts de près d'un mètre (près du pont de Tancarville), ou bien en placages (plus ou moins étendus) de vase molle entre les rochers au descente de bacs transbordeurs (Mesnil-sous-Jumièges), voire de minces placages millimétriques entre les rochers à Bardouville. Les méandres de la Seine ou les recoins de digue, déjà connues pour la majorité, constituent de belles étendues de vase relativement fluide à l'aspect récent, comme la vasière du Vieux Port ou d'Oissel, atteignant généralement 20 cm d'épaisseur (Fig.2.3.). À la descente de bateau de Quillebeuf-sur-Seine, le dépôt est formé d'un fin placage de vase d'épaisseur millimétrique à centimétrique (Fig.2.3.).

La zone portuaire de Rouen quant à elle présente de vastes envasements tout à fait particuliers de vase molle généralement accompagnée de bulles de gaz et d'odeurs d'hydrocarbures voir d'égouts principalement à la sortie d'une bouche d'évacuation, comme le site de Grand Couronne (Fig.2.3.).

En amont de l'estuaire (en amont de Rouen), les vases récentes rares sont en petits placages parmi des graviers (Pont de l'Arche).

L'échantillon pris comme échantillon représentatif de la Seine fluviale, en amont du barrage de Poses, présente un faciès très différent de celui rencontré précédemment. L'envasement est beaucoup moins prononcé ici, car les berges ne sont pas propices au dépôt vaseux francs. Les dépôts rencontrés sont alors très organiques, avec des feuilles et des brindilles mêlées à des particules fines.



Aval de Tancarville, avril 2005



Mesnil-sous-Jumièges, février 2004



Bardouville, février 2004



Oissel, février 2004



Grand Couronne, février 2004



Quillebeuf-sur-Seine, février 2004

Figure 2.3. Typologie de quelques envasements caractéristiques observés sur les berges de l'estuaire de la Seine.

I.1.2. Le littoral bas-normand en baie de Seine

L'échantillonnage du littoral normand en baie de Seine ne s'intéresse qu'au littoral bas-normand, car la présence de falaises vives calcaires sur le littoral haut-normand, n'est guère propice aux envasements.

L'échantillonnage sur le littoral bas-normand s'est tout d'abord effectué dans la partie proximale de l'embouchure de la Seine. Suite à une précédente étude du Programme Scientifique Seine-Aval, sept plages de l'est du Calvados (entre Honfleur et l'embouchure de l'Orne) ont été échantillonnées en 2002 et 2003, car des dépôts vaseux y avaient été observés. D'éventuels dépôts de particules fines sur les bas estrans des plages (Pennedepie, Villerville, Trouville-sur-Mer, Deauville-sur-Mer, Blonville-sur-Mer, Villers-sur-Mer et Cabourg) ont été recherchés et prélevés. L'objectif n'était pas l'identification et la caractérisation en un point fixe de la variation de l'envasement, mais la recherche sur une plage donnée, de la variation éventuelle des caractéristiques de l'envasement. Par la suite, ces 76 échantillons de sédiments vaseux, prélevés entre mars 2002 et juin 2003 ont été intégrés à la présente étude.

En juin 2004 et avril 2005, la zone des prélèvements a été élargie au reste du littoral bas-normand depuis Merville-Franceville jusqu'à Cherbourg. Enfin, quelques plages de l'est du Calvados, ont été à nouveau échantillonnées en juin 2005 (Pennedepie, Villerville, Trouville-sur-Mer, Blonville-sur-Mer et Cabourg).

La figure 2.4. présente la localisation des sites échantillonnés sur l'ensemble du littoral bas-normand de la baie de Seine. Les symboles en noir et en marron indiquent également quelques échantillons holocènes fossiles et des prélèvements mésozoïques, récoltés comme référence. L'objectif est de caractériser la fraction fine de ces dépôts et de la comparer au sédiment fin récent. Quelques échantillons, annotés "subtidaux actuels", correspondent à des prélèvements de la partie superficielle de carottes échantillonnées en 2002, lors de la mission VASTEDEBA (Garnaud, 2003).

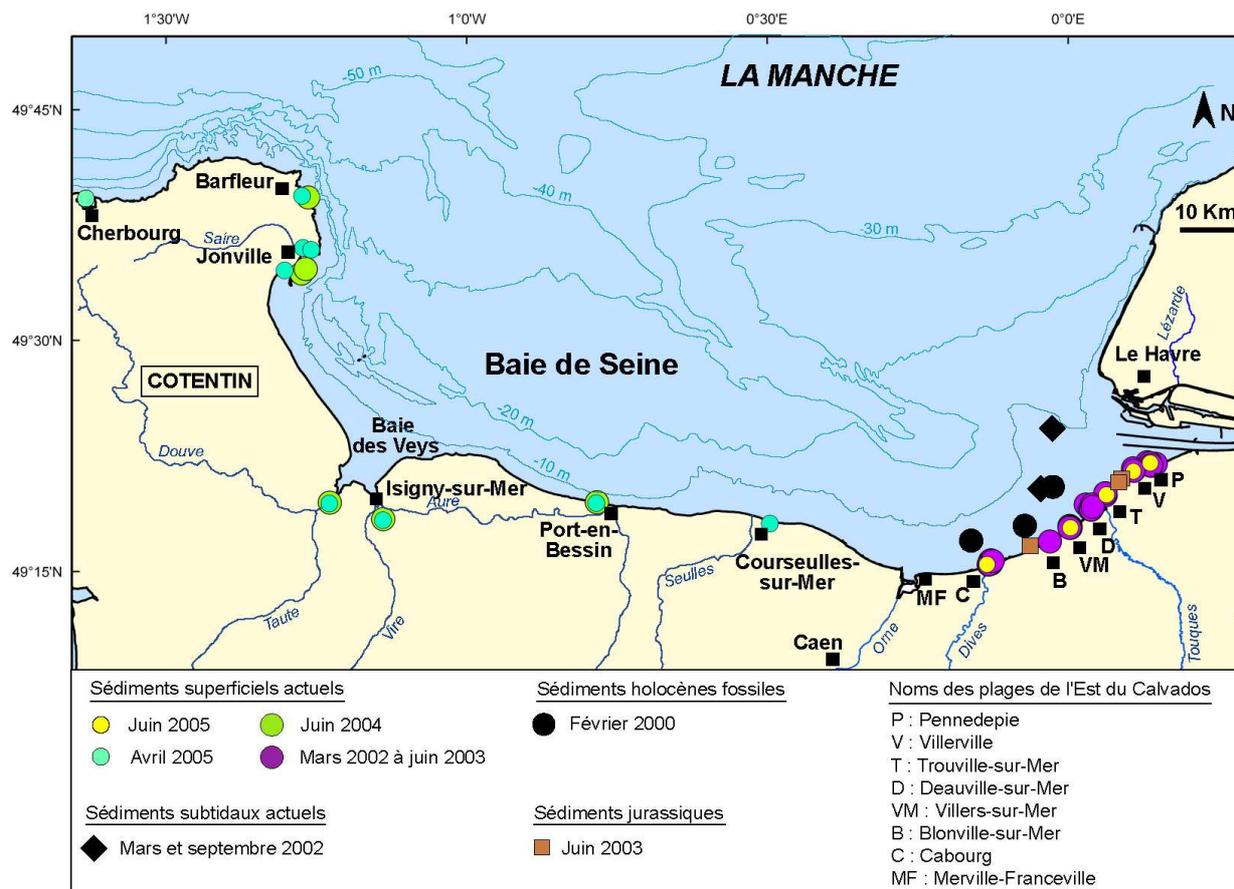


Figure 2.4. Carte de positionnement des échantillons prélevés le long du littoral bas-normand lors des campagnes de 2002, 2003, 2004 et 2005. Données GIPSA 2007 pour le trait de côte et les rivières. Les coordonnées géographiques et les descriptions de chaque échantillon sont détaillées en annexe.

Le long du littoral bas-normand, la typologie des dépôts intertidaux rencontrés varie d'un site à l'autre. Comme sur une partie notable du littoral sableux du Calvados, les plages normandes présentent une morphologie caractéristique de barres sableuses parallèles au trait de côte (Fig.2.5.).

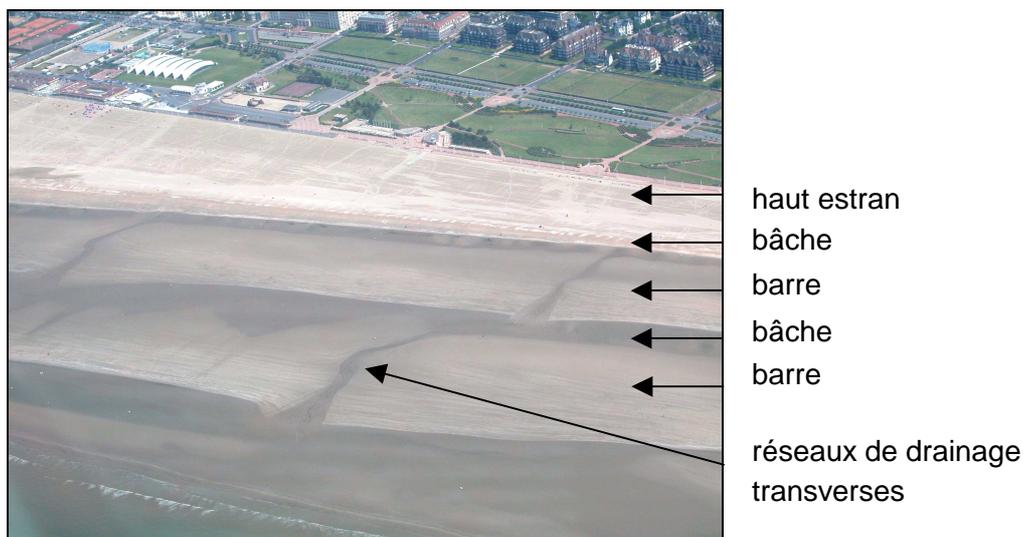


Figure 2.5. Vue aérienne du littoral de Deauville à basse mer, laissant découvrir la morphologie de la plage, avec barres et dépressions inter-barres (ou bâches) et réseaux de drainage transverses (Deauville-sur-Mer).

Le suivi et l'étude détaillée des envasements des plages durant 4 années consécutives permettent de distinguer deux zones de dépôts :

- une partie le long de l'embouchure de la Seine, où s'est installée une vasière de bas estran, tandis que la partie moyenne à haute du profil transversal laisse voir une plage sableuse avec des dépressions assez envasées et un haut de plage marqué par une accumulation de galets (Pennedepie). Ici, à Pennedepie sur le haut estran affleure épisodiquement sur plusieurs centaines de mètres une argile fossile gris-clair (flandrienne), à stolons de phragmites (roseaux), recouverte d'un lit de tourbe (faciès ancien à l'érosion). Ce tronçon borde le chenal sud de l'embouchure de la Seine et s'étend de Honfleur à l'est de Villerville.

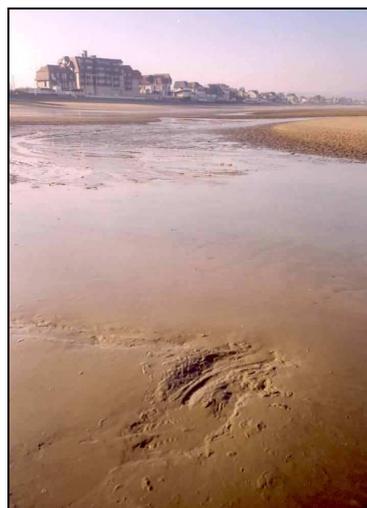
- à contrario, la partie plus éloignée de l'embouchure se caractérise par une morphologie générale de barres sableuses d'estran interrompues par des réseaux de drainage fonctionnels à marée descendante et basse mer. Sur cette morphologie particulière lié au régime macrotidal, les bas estrans des plages sableuses bas-normandes (Levoy *et al.*, 2000) ne constituent pas le lieu privilégié d'une décantation vaseuse : ce sont les dépressions, de quelque nature qu'elles soient, qui s'ensavent : c'est le cas de certaines bâches inter-barres surtout de haut du profil (Blonville-sur-Mer ou à Villers-sur-Mer, voire même à Deauville-sur-Mer). Ailleurs, des contours d'obstacles naturels (rochers) ou des obstacles artificiels (pieux) sont autant de zones de dépôts préférentiels. En effet, lors des périodes d'agitation, les vagues creusent à leur pied des affouillements ; les dépressions qui en résultent sont le siège de dépôt de vase molle lors des périodes de calme hydrodynamique et d'apports de sédiments fins au littoral. Ces vases peuvent se consolider et s'éroder.

Il est à remarquer que si l'on peut trouver régulièrement des particules fines sur l'ensemble des plages étudiées, elles le sont en quantités hautement variables et sous des formes très diverses :

- nappages millimétriques de vase fluide au sein de dépressions inter-barres (Deauville-sur-Mer ; Fig.2.6.C) ;
- sables quartzeux, coquilliers mélangés à une fraction parfois significative de particules fines (Deauville-sur-Mer, Cabourg, Villers-sur-Mer ; Fig.2.6.C) ;
- larges épandages pluricentimétriques à pluridécimétriques formant une véritable vasière de bas et moyen estran (Pennedepie, Villerville ; Fig.2.6.A) ;
- vase sombre consolidée en remplissage de dépressions ayant parfois déjà développée un caractère réduit (Trouville-sur-Mer, Blonville-sur-Mer, Villers-sur-Mer, Cabourg ; Fig.2.6.B et D).



A : vasière de bas estran à l'est du secteur d'étude, entre Pennedepie et Villerville



B : vase molle récente pluricentimétrique dans une bêche de haute plage de Blonville-sur-Mer



C : dépression inter-barres (bêche) très faiblement envasée à Deauville-sur-Mer.



D : épais dépôt vaseux en cours de consolidation soumis à l'érosion à l'est de la plage de Trouville-sur-Mer

Figure 2.6. Typologie de quelques envasements observés sur les plages du Calvados.

À l'ouest de la baie de Seine, depuis Courseulles-sur-Mer jusqu'à Cherbourg, l'envasement est rare sauf dans la baie des Veys. Les lieux de prélèvements ont été choisis dans des zones abritées et donc propices à la décantation fine.

Dans le fond de la baie des Veys, l'envasement est tel, que d'épais placages recouvrent les berges du port d'Isigny-sur-Mer. Le sédiment vaseux y est ici enrichi en matières organiques. À Jonville (est Cotentin), les sédiments sablo-vaseux très noirs sont également très riches en matières organiques et mélangés à une faune benthique importante (Fig.2.7.).

Du fait des très faibles teneurs de matières en suspension apportées par les eaux côtières, il est très difficile de trouver sur le littoral nord du Cotentin du matériel fin. Les dépôts, dans le port de Barfleur sont surtout constitués d'algues et de cailloutis. Le dépôt vaseux prélevé lors des campagnes de 2004 et 2005 est constitué essentiellement de matière organique. À l'ouest de la

baie de Seine, la seule zone, qui possède de réels dépôts de vase c'est la rade de Cherbourg, car son emplacement protégé est propice à la décantation des particules fines sur plusieurs centimètres.



Epais dépôts de vase organique sur les berges à l'entrée du port d'Isigny-sur-Mer, juin 2004



Sédiments sablo-vaseux organiques de Jonville, avril 2005



Dépôts de vases entre les cailloutis et les algues à Barfleur, avril 2005

Figure 2.7. Typologie de quelques envasements observés à l'ouest du littoral bas-normand de la baie de Seine.

Le long du littoral bas-normand, plusieurs falaises argilo-marneuses sont constamment érodées sous l'action des vagues et du vent : Port-en-Bessin (Bathonien inférieur à moyen), dans la partie sud-est de la baie de Seine, Vaches Noires et des Roches Noires (callovo-oxfordienne) éboulées aux pieds des falaises vives. Sur les plages, il est également possible de rencontrer localement à l'affleurement des argiles flandriennes et quelques dépôts de tourbes holocènes (Fig.2.8.).



*Marnes de Port-en-Bessin à Port-en-Bessin
(Bathonien inférieur et moyen)*



*Falaises éboulées à Villerville
(Oxfordien supérieur)*

Figure 2.8. Typologie de quelques affleurements de falaises vives le long du littoral bas-normand.

1.1.3. Les cours d'eaux côtiers bas-normands : Orne, Dives et Touques

Afin de comprendre quelle est la contribution dans l'envasement du système estuarien de la Seine, des cours d'eau côtiers, trois d'entre eux : l'Orne, la Dives et la Touques ont été choisis. L'Orne, le plus important des trois retenus, a été échantillonné une première fois en juin 2004 avec 7 échantillons.

Des prélèvements synchrones d'amont en aval sur les berges de ces cours d'eau ont été réalisés lors de conditions de basses mers de vives-eaux les 17 et 18 janvier 2005, à la recherche de dépôts vaseux. 15 échantillons (Fig.2.9.) ont été prélevés sur les berges de l'Orne (5), de la Dives (5) et de la Touques (5). Parmi ces 15 échantillons, 3 d'entre eux correspondent à des prélèvements de vase effectués sur les plages immédiatement adjacentes à leur embouchure : Merville-Franceville (Orne), Cabourg (Dives) et Trouville-sur-Mer (Touques). De plus, un échantillon amont pour chacun d'entre eux rend compte de l'Orne fluviale, de la Dives fluviale et de la Touques fluviale, situé respectivement à 21,9 Km, 13,5 Km, 15,7 Km de leur embouchure, après un ressaut hydraulique (porte à flot, barrage).

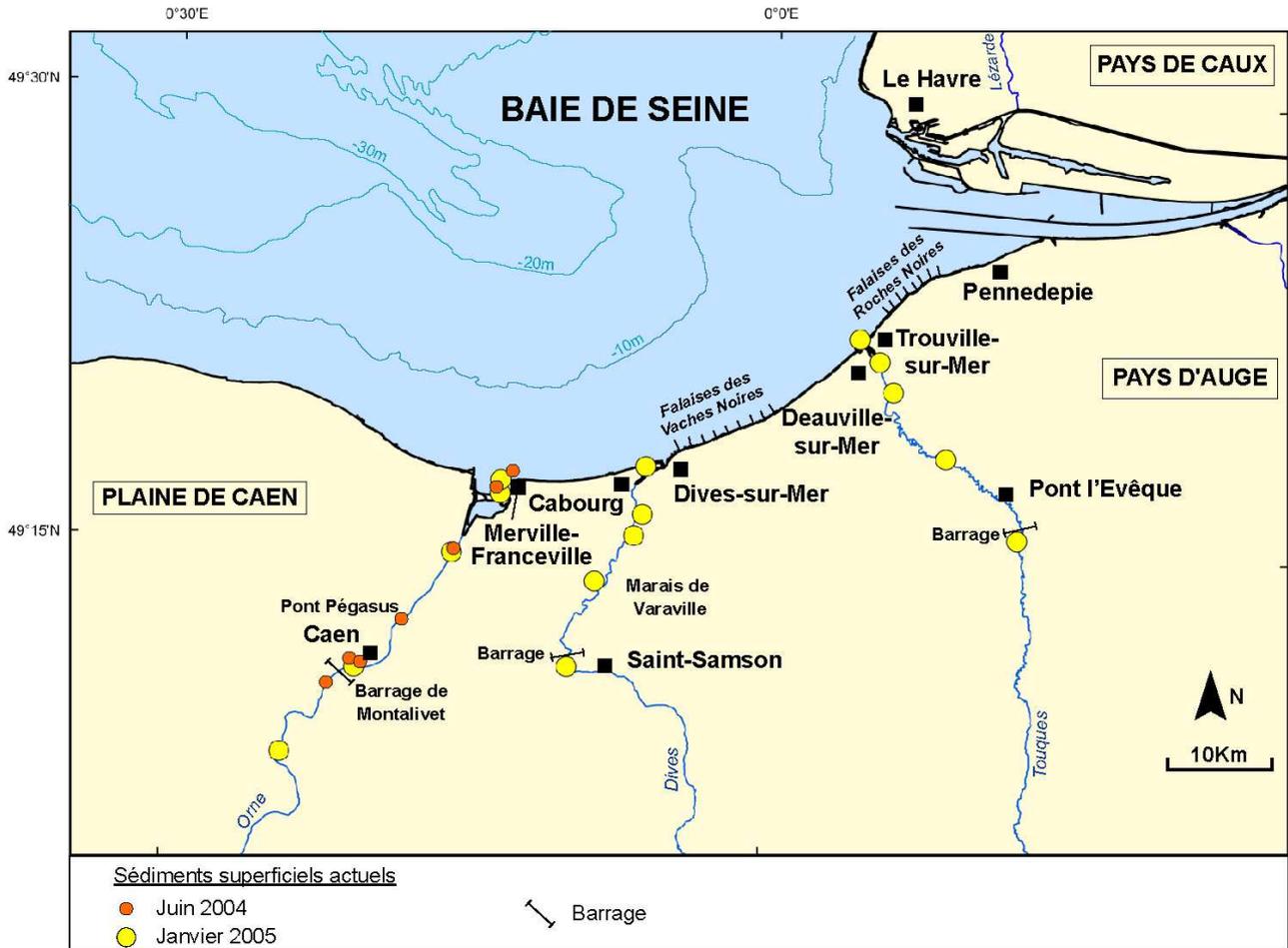


Figure 2.9. Localisation des échantillons prélevés sur les berges des cours d'eau côtiers (Orne, Dives et Touques) en 2004 et 2005. Données GIPSA 2007 pour le trait de côte et les cours d'eau côtiers. Les coordonnées géographiques et les descriptions de chaque échantillon sont détaillées en annexe.

Contrairement à l'ouest de la baie de Seine, les berges des cours d'eau côtiers sont très envasées, surtout entre l'embouchure et les barrages. Les dépôts de vase présentent une grande diversité de faciès (Fig.2.10.) :

- vase relativement fluide : aval du barrage de l'Orne,
- grands placages de vase de 10 à 20 cm d'épaisseur : Pegasus Bridge, sur l'Orne,
- vase réduite compacte avec une mince pellicule brunâtre (phytoplancton probablement),
- vase silteuse, à rare débris végétaux : berges de la Dives.

Sur les plages adjacentes à chaque exutoire des rivières, les dépôts de vase possèdent les mêmes caractéristiques, que celles décrites précédemment : à l'embouchure de l'Orne, fins placages de vase fluide récente sur le sable de la plage de Merville-Franceville, ou à l'embouchure de la Touques, mélange de vase de sable et de débris coquilliers, entre des enrochements sur la plage de Trouville (Fig.2.10.).



Partie aval de l'estuaire de l'Orne, janvier 2005



Vasière de Montalivet dans l'estuaire de l'Orne, près du barrage de Caen, janvier 2005



La Dives, près de Varaville, janvier 2005



La Touques, à la sortie de la ville, janvier 2005



Fin épandage de vase fluide sur la plage de Merville-Franceville, janvier 2005



Dépôts vaseux entre les enrochements sur la plage de Trouville-sur-Mer, janvier 2005

Figure 2.10. Typologie de quelques envasements caractéristiques observés sur les berges des trois cours d'eau côtiers : Orne, Dives et Touques.

En amont des barrages de chaque fleuve, les berges envasées deviennent plus rares ; il s'agit davantage d'un mélange de berges effondrées, de débris végétaux et de vase (Fig.2.11.). Ainsi, faute de vase accessible à pied, l'usage du cône Berthois a été nécessaire en amont du barrage sur l'Orne.



Récupération de sédiment vaseux à l'aide du cône Berthois à l'amont de l'Orne, janvier 2005



Léger envasement des berges à l'amont de la Dives, janvier 2005



Léger envasement mêlé à du sol de berge éboulé, à l'amont de la Touques, janvier 2005

Figure 2.11. Typologie de quelques envasements en amont des barrages de l'Orne, de la Dives et de la Touques.

I.2. Échantillonnages en domaine subtidal

I.2.1. Les sédiments vaseux en Seine et baie de Seine

L'échantillonnage des dépôts de vase dans le domaine subtidal de la baie et de l'estuaire de Seine s'est déroulé selon deux campagnes conjointes. La baie de Seine et le chenal de navigation de la Seine ont été échantillonnés du 1 au 11 avril 2005, à bord du N/O le Côte d'Aquitaine au cours de la mission CYSAVA (CYcle en Seine Aval des VAses). La campagne conjointe, DISPRO, s'est

déroulée du 3 au 13 avril 2005, à bord du N/O le Côte de la Manche. Sur les deux navires, les prélèvements ont été faits à la benne Shipek.

Cette méthode de prélèvement permet de ne récupérer que la partie la plus superficielle de l'interface (10 à 20 cm). Le protocole d'échantillonnage a été conservé mais seule la partie la plus superficielle du sédiment vaseux, soit les 2 à 3 premiers centimètres ont été prélevés.

La complémentarité des deux missions a permis de quadriller de manière synchrone les parties orientale et occidentale de la baie de Seine. En tout, 75 échantillons (68 pour la mission CYSAVA et 7 pour la mission DISPRO) de sédiments vaseux superficiels ont été récoltés (voir la figure 2.12. ci-dessous). Le quadrillage des échantillonnages montre un resserrement au niveau de l'embouchure de la Seine, définie par les études antérieures comme zone d'envasement maximal.

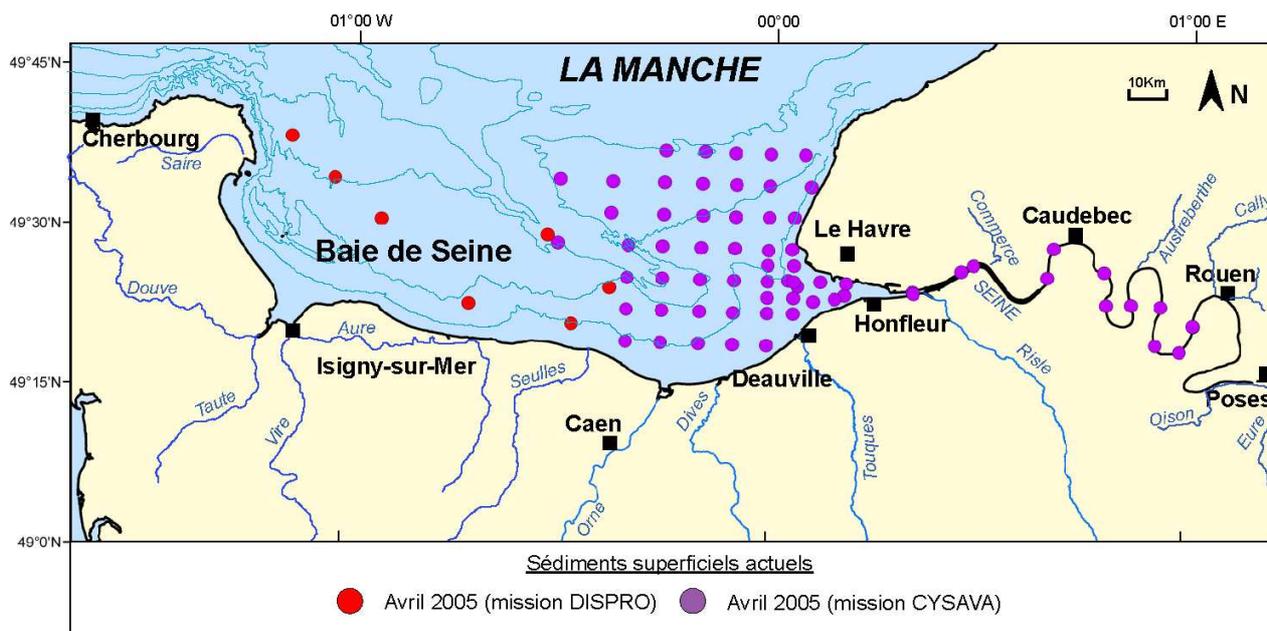


Figure 2.12. Carte de positionnement des échantillons prélevés en domaine subtidal en baie et estuaire de Seine en 2004 et 2005. Données GIPSA 2007 pour le trait de côte et les rivières.

Les coordonnées géographiques et les descriptions de chaque échantillon sont détaillées en annexe.

Typologie des dépôts subtidaux en estuaire de la Seine

L'ensemble de l'échantillonnage en domaine subtidal fait apparaître une multitude de faciès sédimentaires différents, décrits auparavant (Lesueur et Lesourd, 1999).

Dans le chenal de navigation de la Seine, les faciès sont très variables entre la zone industrielle voisine de Rouen et l'embouchure de la Seine (Fig.2.13.). De Rouen à la Bouille, les sédiments vaseux recueillis sont un mélange de vase relativement noire, plus ou moins compacte, à rares débris végétaux, et contenant généralement des traces de pollutions (hydrocarbures ou charbons). De la Bouille à Caudebec-en-Caux, le matériel remonté se présente sous forme d'un mélange de petits graviers envasés, quelques débris végétaux, du sable quartzueux et des débris de tufs carbonatés. Les dépôts de vase sont peu présents dans la partie centrale du chenal de navigation en raison de la dynamique du milieu, de la remise en suspension par le passage des bateaux, et les dragages. Le sédiment vaseux a été trouvé en se rapprochant des berges.



Sédiment sablo-vaseux riche en bivalves, près de Petit Couronne (station 3246)



Vase molle sableuse, près de la Bouille (station 3249)



Sable graveleux légèrement envasé, près du Mesnil-sous-Jumièges (station 3250)



Vase grise collante, près du Trait (station 3242)



Vase molle légèrement silteuse, près de Caudebec-en-Caux (station 3241)



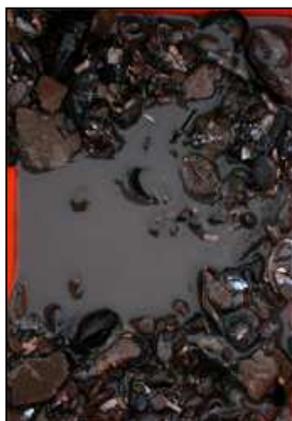
Sable fin coquillier très peu envasé, près de Tancarville (station 3239)

Figure 2.13. Typologie de quelques envasements subtidiaux du chenal de navigation, dans l'estuaire de la Seine, en avril 2005.

Typologie des dépôts subtidiaux à l'embouchure de l'estuaire de la Seine

Les dépôts envasés à l'embouchure de la Seine se présentent sous différents faciès. La cartographie établie il y a quelques années (Lesourd, 2000) a été utilisée pour sélectionner nos sites de prélèvements, mais des modifications ont été notées, notamment du fait de la construction de l'extension portuaire du Havre (dite Port 2000) et des conditions hydrologiques (faibles débits prolongés).

Au moment de la campagne CYSAVA, dans la partie nord de l'embouchure, les dépôts se caractérisent par un mélange de sable quartzeux et de graviers envasés (Fig.2.14.). Dans la partie sud, seul le faciès sableux est présent, du sable siliceux fin à moyen mélangé à quelques débris coquilliers. Par contre, les dépôts sont presque exclusivement vaseux dans le chenal de navigation de la Seine à l'embouchure. À l'ouest de l'embouchure, les dépôts de vase se raréfient : le sédiment se compose d'un mélange de sable fin quartzeux, de vase et de débris coquilliers à des coquilles entières.



*Sable graveleux envasé,
à débris coquilliers (station 3253)*



*Sable légèrement envasé,
riche en débris coquilliers (station 3237)*



*Vase molle sur vase sableuse quartzreuse
(station 3262)*



*Sable vaseux, à débris coquilliers
(station 3264)*

Figure 2.14. Typologie de quelques envasements subtidaux à l'embouchure de l'estuaire de la Seine, en avril 2005.

Typologie des dépôts subtidaux en baie de Seine

Les sédiments subtidaux récoltés en baie de Seine sont ceux qui présentent la plus grande diversité de faciès. Au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'estuaire de la Seine, les dépôts sont de plus en plus sableux et de plus en plus riches en faune benthique, tandis que la vase se raréfie. La partie nord-est de la baie est la partie envasée de la baie de Seine (Fig.2.15.). Le sédiment se compose essentiellement d'un mélange de sable, de cailloutis et graviers et de vase, le tout accompagné de nombreux débris coquilliers et d'ophiures (stations 3202 et 3205). Dans la partie centrale de la baie échantillonnée, les dépôts sont peu envasés : il s'agit d'un mélange de sable fin à moyen avec des graviers et quelques débris coquilliers (Fig.2.16. stations 3223 et 3221). Au sud-est de la baie, le sédiment presque exclusivement sableux est peu envasé (stations 3232 et 3268).

Dans la partie ouest de la baie (uniquement échantillonnée lors de la mission CYSAVA), la faune benthique est de plus en plus importante avec la présence de coquilles entières de bivalves, d'ophiures et d'oursins ; la vase n'est présente que sous la forme de galets mous. Le sédiment n'est composé que de sable fin à moyen et de gravier (Fig.2.17. stations 3227, 3229, 3213 et 3216). La baie de Seine occidentale échantillonnée lors de la mission DISPRO se caractérise (Larsonneur, 1971) par un mélange hétérométrique de sédiments très grossiers de graviers et coquilles, très rarement envasé.



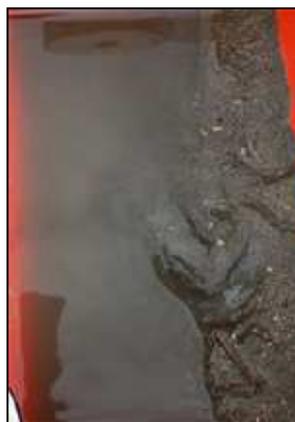
Mélange de sable, de cailloutis, de graviers et de vase molle (station 3202)



Sable graveleux associé à de la vase réduite, des débris coquilliers et des ophiures (station 3205)



Sable vaseux à rares débris coquilliers (station 3232)



Sable peu envasé à rares débris coquilliers (station 3268)

Figure 2.15. Typologie de quelques envasements subtidaux dans la partie est de la baie de Seine orientale, en avril 2005.



*Sable fin, peu envasé,
riche en débris coquilliers
(station 3221)*



*Mélange de sable et de graviers, associé à
des galets mous de vase, des gros débris
coquilliers, des ophiures et
des oursins (station 3223)*

Figure 2.16. Typologie de quelques envasements subtidaux dans la partie centrale de la baie de Seine orientale, en avril 2005.



*Sable coquillier,
peu envasé (station 3216)*



*Sable graveleux envasé,
présence de coquilles entières,
et d'ophiures (station 3213)*



*Sable coquillier peu
envasé (station 3229)*



*Mélange de sable et de graviers
à galets mous de vase (station 3227)*

Figure 2.17. Typologie de quelques envasements subtidaux dans la partie ouest de la baie de Seine orientale, en avril 2005.

I.2.2. Les matières en suspension (MES) en Seine et baie de Seine

Bien que l'intérêt principal de ce travail soit fixé sur les caractéristiques des dépôts superficiels de vase ou de sédiment envasé, il apparaît nécessaire néanmoins de prendre en compte les matières en suspension (MES), qui transitent dans ce système estuarien. Des échantillons d'eau ont donc été recueillis en 13 stations dans le chenal de navigation de la Seine, entre Rouen et l'embouchure, et dans la partie orientale de la baie de Seine. Les MES ont été récoltées à l'aide de bouteilles Niskin de 30 L et 5 L. Ainsi, pour chaque station, 35 L d'eau ont été prélevés, à l'exception des stations les plus au Nord de la baie, où 60 L d'eau ont été récoltés. Les prélèvements (W1 à W12, cf. annexe) ont été réalisés à 2 m au dessus du fond, sauf au niveau du bouchon vaseux où le prélèvement est également effectué à 1 m sous la surface de l'eau (station W13, cf. annexe). L'ensemble des stations d'échantillonnage est représenté sur la figure 2.18. Les échantillonnages se sont déroulés lors de la mission océanographique CYSAVA, entre le 1 et 11 avril 2005.

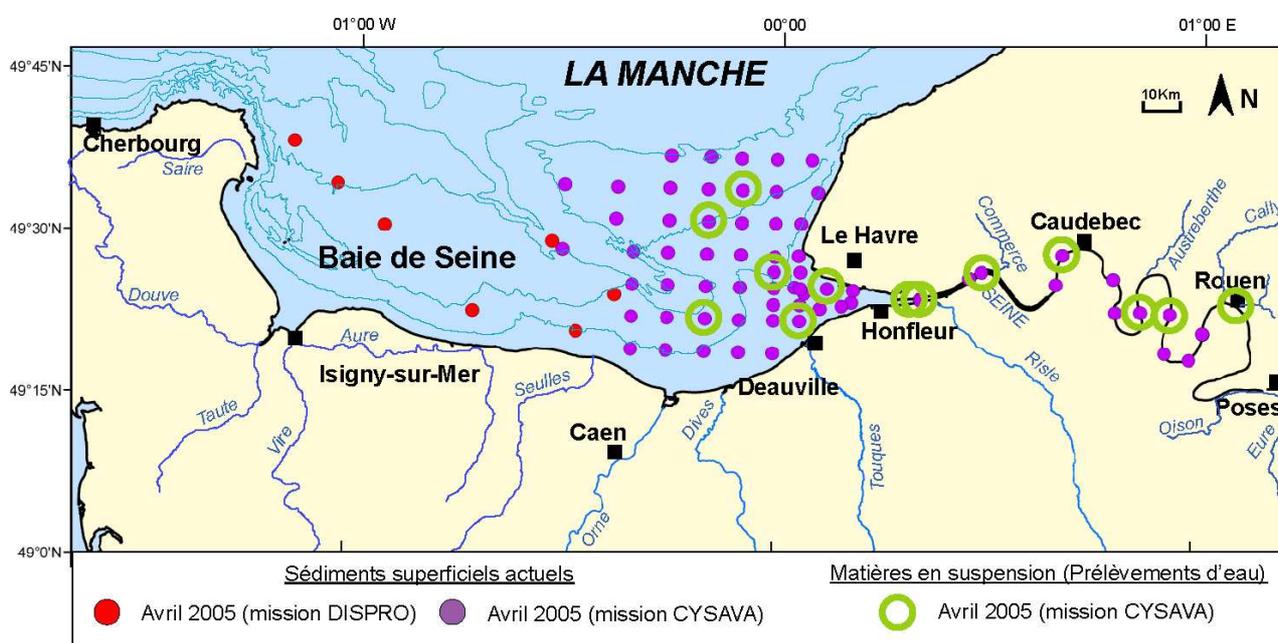


Figure 2.18. Carte de positionnement des matières en suspension (MES) prélevées en domaine subtidal en baie et estuaire de Seine en avril 2005. Données GIPSA 2007 pour le trait de côte et les rivières. Les coordonnées géographiques et les descriptions de chaque échantillon sont détaillées en annexe.

II – Méthodologie analytique

II.1. Séparation de la fraction fine (<50µm)

II.1.1. Les sédiments superficiels

- Récupération de la fraction < 50 µm

Le but de cette thèse étant de caractériser les envasements en domaine estuarien, le choix de la fraction à analyser s'est porté sur les particules les plus fines. Les tailles des particules sédimentaires sont définies selon différentes normes, la plus utilisée en France est la norme AFNOR qui délimite les argiles (< 0,004 mm), les silts (entre 0,004 et 0,063 mm) et les sables (entre 0,063 et 2 mm). Les particules fines regroupent les silts et les argiles, soit la fraction comprise entre 0 et 63 µm.

Dans cette étude, la classe des particules fines a été réduite (entre 0 et 50 µm). Cette coupure à 50 µm tronquant une partie des silts grossiers permet de mettre l'accent sur la fraction de surface spécifique importante. Elle a été par ailleurs utilisée au laboratoire Morphodynamique Continentale et Côtière à Caen dans les études antérieures (Larsonneur, 1971, Avoine, 1981 ; Lesourd, 2000 ; Garnaud, 2003) et il sera ainsi plus facile de comparer nos résultats avec ceux des auteurs cités précédemment.

Dans l'ensemble de cette étude, la fraction dite « fine » ou pélitique de tous les échantillons correspond à la taille granulométrique comprise entre 0 et 50 µm.

La récupération de cette fraction fine s'effectue par tamisage sous voie humide. Chaque échantillon brut non séché est lavé sous l'eau du robinet pour ôter le sel, pour les échantillons d'origine marine le cas échéant. Il est ensuite tamisé sur quatre tamis : 500 µm, 250 µm, 125 µm et 50 µm. Les refus des trois premiers tamis permettent d'enlever le maximum de particules grossières et d'éviter de colmater celui de 50 µm. Chaque refus de tamis est récupéré, séché à 30°C à l'étuve (pour ne pas altérer les minéraux argileux), puis pesé, annoté et conservé en sachet comme archive. La fraction inférieure à 50 µm est laissée dans de grands bacs jusqu'à décantation totale. L'eau surnageante est siphonnée, puis la fraction fine est récupérée et mise à sécher à l'étuve (toujours à 30°C).

La fraction fine, séchée et pesée, est utilisée pour l'ensemble des analyses ultérieures.

- Récupération des différentes fractions constituant la fraction fine

Très tôt, il est apparu utile de séparer différentes classes granulométriques qui composent la fraction fine. Les analyses entreprises, et expliquées par la suite dans ce chapitre sur l'ensemble des échantillons, sont intimement liées à la fraction la plus fine du sédiment. Une question s'est alors imposée : à savoir, comment se répartissent les éléments dosés en géochimie sur les différentes classes granulométriques de la fraction 0-50 µm ? Se fixent-ils préférentiellement sur une ou plusieurs classes granulométriques ?

Le fractionnement de la fraction fine est donc apparu important. Néanmoins, il est difficile par tamisage sous voie humide de séparer la fraction < 50 µm. Après toute une série de tests, le choix s'est finalement porté sur la décantation par ampoule à décanter, méthode généralement utilisée

pour la séparation de deux liquides ou de fluides et rarement employée pour la séparation de fractions granulométriques. Le principe est relativement simple : un peu de fraction fine est délayée dans de l'eau permutée ; une petite quantité de matériel est introduite dans l'ampoule à décanter fermée et l'on complète avec de l'eau permutée jusqu'au trois quart de l'ampoule. Après homogénéisation, l'ensemble décanse selon la loi de Stokes, qui est fonction de la vitesse de chute et du diamètre des particules. Les temps de décantation permettant de récupérer la classe granulométrique désirée ont été calculés selon l'équation de Stokes :

$$v = C.D^2$$

v correspond à la vitesse de chute d'une particule en cm.s^{-1} , C est la constante de Stokes et D le diamètre des particules assimilées à des sphères en μm .

Le tableau 2.1. ci-dessous reprend les temps nécessaires de décantation (moyennés sur plusieurs essais) pour récupérer les différentes fractions choisies :

Tableau 2.1. Temps de décantation pour séparer des fractions granulométriques.

Classes granulométriques	Temps de décantation
Argiles et silts très fins : 0-8 μm	3505 s
Silts fins : 8-16 μm	876 s
Silts moyens : 16-32 μm	219 s
Silts grossiers : 32-50 μm	90 s

Pour avoir la meilleure séparation, il est conseillé de commencer par extraire la fraction $> 8 \mu\text{m}$. Ainsi au bout de 3505 s, une limite, plus ou moins nette, se dessine (Fig.2.19.), on récupère la partie $> 8 \mu\text{m}$ en ouvrant le robinet au bas de l'ampoule à décanter, tandis que la fraction en suspension (0-8 μm) dans l'ampoule est conservée dans un grand récipient. On reprend le mélange $> 8 \mu\text{m}$ que l'on remet en suspension avec de l'eau permutée dans l'ampoule et l'on recommence l'opération avec le nouveau temps indiqué soit 876 s et ainsi de suite 219 s et enfin 90 s.

Pour être certain que ce que l'on a récupéré est bien ce que l'on a estimé, la granulométrie de chaque sous-échantillon de la fraction fine est analysée au granulomètre laser. Une fois que chaque fraction granulométrique est récupérée, on laisse décanter et sécher à l'étuve. Le matériel de chaque fraction subit ensuite le même protocole que celui effectué pour les analyses des éléments majeurs-mineurs-traces (cf. II.5.).

Pour des raisons évidentes de lenteur des opérations de ségrégation et de difficulté de récupération des sous fractions, l'expérience a été limitée à quatre échantillons représentatifs de sédiments récoltés en différents lieux du système estuarien de la Seine : les stations d'Honfleur, de Jumièges, de Blonville-sur-Mer et de la zone amont de l'estuaire de la Seine (amont du barrage de Poses), échantillonnées en avril 2005. Les résultats des tests sont donnés dans le chapitre 4 du manuscrit.



Figure 2.19. Photographies montrant le principe de décantation par ampoule à décanter. L'image de droite agrandie permet de voir nettement la limite entre deux classes granulométriques.

II.1.2. Les matières en suspension (MES)

L'eau prélevée en baie de Seine et en estuaire, dans des bidons de 35 L, a été filtrée sous pompe à vide afin de récupérer les matières en suspension, sur des filtres en fibre de verre (Whatman GF/F). Ces derniers, rincés abondamment à l'eau permutée (pour ôter toute trace de sel marin), sont séchés, broyés en fine poudre puis analysés par le CRPG-CNRS de Nancy pour le dosage des éléments majeurs et traces (partie II.5.). La faible quantité de matériel (entre 100 mg et 1 g) n'a pas permis d'effectuer d'autres analyses.

II.2. Analyse granulométrique des sédiments

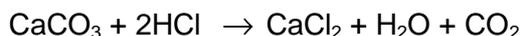
La description macroscopique des échantillons, comme expliquée précédemment est insuffisante, elle ne permet que d'indiquer le faciès sédimentaire et d'estimer la granulométrie d'un sédiment. Pour affiner l'analyse, chaque échantillon brut et humide est analysé par diffraction laser avec un granulomètre de type Coulter LS 230, dont le spectre granulométrique balaie les tailles comprises entre 0 et 2 mm. Les fractions >2 mm des quelques échantillons hétérométriques n'ont donc pas pu être analysées au granulomètre laser.

Les données sont ensuite compilées et les courbes granulométriques sont traitées avec le logiciel LS32.

Rappel, lors des échantillonnages, le principal intérêt étant de récupérer un maximum de matériel fin, tout naturellement un choix s'est opéré au départ, au détriment des particules les plus grossières. La granulométrie obtenue n'est donc absolument pas représentative du site échantillonné dans son ensemble mais du sédiment volontairement récolté (creux de dépression par exemple). Dans la suite du manuscrit, seule la fraction fine (ou fraction pélitique, <50 μm) sera étudiée en détail. La fraction supérieure (>50 μm) sera juste évoquée.

II.3. Calcimétrie volumétrique des sédiments

Pour le traitement des données géochimiques, il est nécessaire de déterminer la teneur en carbonates des échantillons qui est obtenue à partir de la méthode du Calcimètre Bernard. Cette méthode simple consiste à mesurer le volume de CO₂ dégagé dans un tube manométrique rempli d'eau sursaturée en NaCl, après attaque à l'acide chlorhydrique du sédiment broyé, suivant la formule :



Une formule de correction (température-pression) permet de passer facilement du volume de CO₂ au pourcentage de CaCO₃ selon :

$$\% \text{CaCO}_3 = (V_2 - V_1) \times \frac{K}{P} \quad \text{avec } K = 0,4 \times \left(\frac{293}{273 + t} \right) \times \left(\frac{H}{760} \right)$$

où V1 et V2 correspondent au volume de départ et volume après réaction, P à la masse de sédiment et K au coefficient qui varie en fonction de la température t (en °C) et de la pression atmosphérique (en mm Hg).

La teneur en carbonates a été mesurée sur la fraction fine de chaque échantillon, compilée puis traitée avec les données géochimiques.

II.4. Détermination et quantification des cortèges des minéraux argileux

II.4.1. Préparation et fabrication des lames orientées

Les techniques utilisées communément pour la préparation des lames orientées sont basées sur celles du laboratoire de Strasbourg et expliquées dans l'ouvrage d'Holtzapffel (1985). Ces protocoles se prêtant plus spécialement à des échantillons bruts ou de roches diverses, il a été nécessaire de les adapter pour un sédiment inférieur à 50 µm. La préparation des lames minces orientées dans cette étude a donc été la suivante :

20g d'échantillon sec broyé à la main dans un mortier en agate est réduit en poudre. Les différents traitements appliqués à l'échantillon permettent de le défloculer et d'éliminer toutes les particules supérieures à 2 µm. Tout d'abord, la matière organique, éventuellement présente dans le sédiment, est détruite par l'eau oxygénée (20 Volumes). Le reliquat est ensuite décalcifié à l'acide chlorhydrique (10%), rincé à l'eau permutée, puis concentré successivement par centrifugation (5 min à 4000 tr.min⁻¹) jusqu'à ce que le pH de la solution surnageante soit neutre. Le culot, dépourvu de matière organique et de calcite, est récupéré, puis remis en suspension dans de petits flacons, enfin laissé à décanter pendant 1h40. Seuls les deux premiers centimètres du surnageant turbide de chaque flacon sont prélevés et concentrés par centrifugation (40 min à 4000 tr.min⁻¹). Ce nouveau culot est récupéré pour la préparation des lames orientées : la pâte est étalée en une mince couche sur une lame de verre ; la lame mince orientée une fois séchée est alors prête pour être analysée.

II.4.2. Analyse par diffractométrie RX

L'analyse diffractométrique permet de caractériser la composition minéralogique des composants argileux après diffraction de leurs plans réticulaires par un faisceau de rayons X, selon la loi de Bragg. Les enregistrements ont été réalisés au Laboratoire Morphodynamique Continentale et Côtière (UMR-CNRS 6143) de l'Université de Caen sur un diffractomètre de marque Philips, modèle PW 3040/00 X'Pert MPD/MRD. Les paramètres physiques utilisés sont les suivants :

- anticathode au cobalt associée à un filtre de fer,
- puissance de l'appareil : 1350 W (30kV, 45mA).

Des analyses complémentaires ont également été réalisées au Laboratoire des Processus et Bilans des Domaines Sédimentaires (UMR-CNRS 8110) de l'Université de Lille 1.

Les lames minces orientées, pour un même échantillon passent trois fois au diffractomètre RX. La première analyse pendant 1h50 se fait sur la lame orientée séchée à l'air ambiant : le traitement sera donc défini comme étant au "naturel". Cette même lame est, ensuite, placée au contact de vapeurs d'éthylène glycol pendant 12 h, afin de modifier l'espace interfoliaire des "argiles gonflantes", puis est, à nouveau, analysée pendant 40 min. Enfin, le dernier traitement consiste à porter cette même lame à une température constante et précise de 540°C pendant 3 h 30, avant une nouvelle analyse de 40 min au diffractomètre. La compilation et la comparaison des trois diffractogrammes permettent d'identifier les minéraux argileux de chaque échantillon.

II.4.3. Écriture des cortèges des minéraux argileux

Selon les auteurs, les cortèges argileux peuvent s'écrire de multiples manières. Dans ce travail, les écritures choisies sont :

- pour les argiles présentes à 10 Å, l'illite notée I ou 10
- pour les argiles autour de 14 Å, la chlorite notée C, la chlorite gonflante notée Cg, la vermiculite notée V, les smectites notées Sm
- pour les argiles à 7 Å, la kaolinite notée K.

Les minéraux argileux réguliers et irréguliers seront écrits entre parenthèse par association de minéraux, telle que (10-C) ou (C-Sm).

II.4.4. Indices de cristallinité

L'état de cristallisation de certains minéraux comme l'illite et les smectites permet de caractériser les milieux de transport, de dépôt et d'évolution (Fig.2.20.) :

- indice de cristallinité de l'illite

L'indice de cristallinité de l'illite est celui défini par Kübler (1968) correspond à la largeur à mi-hauteur, il est exprimé en 2θ du pic à 10 Å sur l'essai glycolé sans bruit de fond.

Plus l'indice de cristallinité sera petit, plus l'illite sera bien cristallisée.

- indice de cristallinité des smectites

L'état de cristallinité des smectites sur l'essai glycolé a été calculé selon l'indice de Biscaye (1965) :

$$v/p$$

où v est la hauteur de la vallée bordant le pic des smectites vers les petits angles et p est la hauteur du pic des smectites.

Plus l'indice de cristallinité des smectites tend vers 1, plus les smectites sont bien cristallisées.

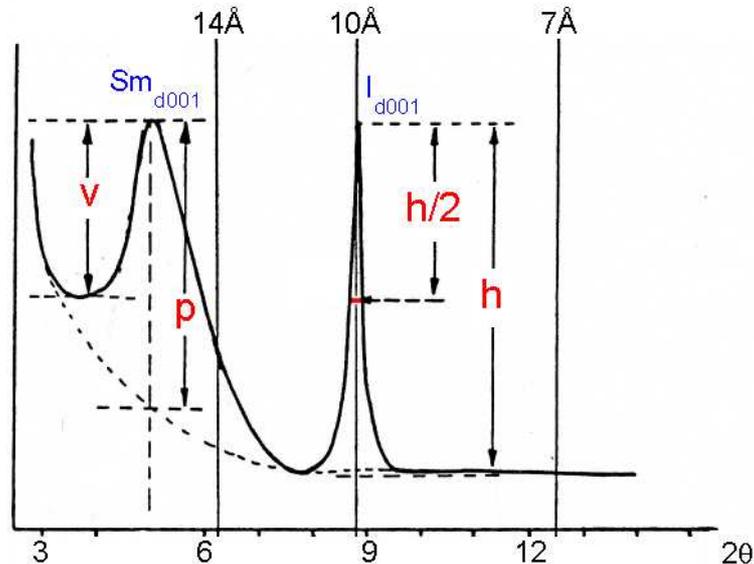


Figure 2.20. Mesure de la cristallinité de l'illite ou des smectites sur le diffractogramme de l'essai glycolé (d'après Holtzapffel, 1985, modifié).

II.4.5. Semi-quantification des cortèges des minéraux argileux

La semi-quantification des cortèges des minéraux argileux estime l'abondance relative des minéraux argileux dans le cortège. Les diverses méthodes utilisées sont basées soit sur la mesure de la hauteur relative du pic de la réflexion $d(001)$ (Latouche et Mailet, 1979), agrémentée quelquefois par d'autres auteurs d'un coefficient correcteur selon la forme du pic (Chamley, 1971 ; Holtzapffel, 1985) ; soit sur un calcul de surface du pic de la réflexion $d(001)$ pour chaque minéral argileux (Biscaye, 1965).

Pour la présente étude, la proportion relative de chaque minéral argileux a été calculée à partir de la méthode proposée par Holtzapffel (1985). La semi-quantification a été obtenue par calcul de surface de la réflexion $d(001)$ de chaque minéral argileux, enregistrée sur le diffractogramme de l'essai glycolé, en tenant compte du bruit de fond (Dunoyer de Ségonzac, 1969). Ce calcul de surface est estimé en considérant la forme du diffractogramme comme une somme de courbes de type lorentzien. Les surfaces sont déterminées à l'aide du logiciel Origin. On effectue ensuite la somme des valeurs obtenues pour chaque espèce argileuse identifiée, ramenée à 100 % et on obtient le pourcentage d'une espèce donnée pour les 100 % de minéraux argileux de la fraction analysée. Cette adaptation de la méthode proposée par Holtzapffel (1985) améliore sensiblement la précision passant d'une erreur de moins de 5 %.

II.5.3. Traitement des données

Les résultats bruts des analyses géochimiques ne peuvent pas être exploités directement. Les éléments ont d'abord été classés selon la méthode analytique employée (ICP-OES ou ICP-MS), puis selon leur numéro atomique : un groupe d'éléments majeurs (Si, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K, Ti, P) et la perte au feu, puis trois groupes répartis selon les éléments de Be à As, de Rb à Sb et de Cs à U, et enfin un dernier groupe dédié aux terres rares (ou lanthanides) de La à Lu.

Comme l'étude des éléments stables doit permettre de trouver des marqueurs discriminants de sources, une référence géochimique a été utilisée. Le choix de la référence importe peu puisqu'elle est utilisée de manière homogène sur tout le domaine de l'étude, à savoir le système estuarien de la Seine, et s'exprime au travers d'un facteur d'enrichissement (FE) calculé comme suit :

$$FE = (E/Al)_{\text{échantillon}} / (E/Al)_{\text{shales}}$$

où $(E/Al)_{\text{échantillon}}$ et $(E/Al)_{\text{shales}}$ font référence au rapport de la concentration en l'élément E à celle de l'aluminium, respectivement, dans l'échantillon et dans les shales.

La référence " shales " choisie correspond à une composition chimique théorique d'un matériel fin susceptible d'être expulsé en domaine marin. Les valeurs références sont données par Turekian et Wedepohl (1961) et Nance et Taylor (1976) pour les terres rares. Cette référence n'a pas été choisie au hasard. Elle a déjà été utilisée ultérieurement dans d'autres études sur des sédiments similaires prélevés également dans l'estuaire de la Seine (Avoine *et al.*, 1986)

II.6. Analyse des radionucléides

II.6.1. Préparation des échantillons

La fraction fine des différents échantillons, séchée à 30°C est broyée en fine poudre dans un mortier en agate, puis conditionnée en boîte de comptage.

II.6.2. Analyse par spectrométrie gamma

Les échantillons ont été analysés au Laboratoire de Radioécologie (LRC) de l'IRSN à Cherbourg-Octeville.

La mesure de l'activité des différents radioémetteurs γ est réalisée sur un détecteur à germanium hyperpur. Les données brutes sont traitées par le logiciel INTERGAMMA et conduisent à des activités spécifiques exprimées en Bq.kg^{-1} de sédiment sec, rapportées à la date du prélèvement.

II.6.3. Origine des radionucléides artificiels et naturels

Le cobalt 60 (^{60}Co), le césium 137 (^{137}Cs) et l'américium 241 (^{241}Am) sont des radionucléides d'origine artificielle avec des périodes radioactives respectives de 5,27 ans, 30,15 ans et 432 ans. Ils sont introduits dans le système estuarien de la Seine aussi bien par le domaine continental que par le domaine marin. En Manche, les rejets des effluents liquides de la Hague introduisent le ^{137}Cs , le ^{60}Co et le ^{241}Am . Les retombées atmosphériques des essais nucléaires sur la mer, ou

drainées par les cours d'eau côtiers apportent leur contribution en ^{137}Cs . À cela s'ajoutent en Seine les apports du ^{60}Co et du ^{137}Cs par les rejets de la centrale nucléaire de Nogent.

Le ^{40}K est un radionucléide naturel de longue période ($1,26 \cdot 10^9$ ans), ayant le comportement et les phases porteuses de son isotope stable, le ^{39}K . Contribuant pour 90 % de la radioactivité naturelle de la mer, il est contenu dans l'ensemble du cortège aluminosilicaté (phyllosilicates, tectosilicates). Ainsi, l'activité du ^{40}K permet de juger de l'homogénéité de la granulométrie des sédiments. De manière générale, les sédiments fins sont plus riches en ^{40}K que les sédiments grossiers.

Les concentrations respectives de ces radionucléides, notamment ^{60}Co et ^{137}Cs , offrent une intéressante possibilité d'étude de la pénétration des particules marines dans l'estuaire (Boust, 1998 ; Boust *et al.*, 2002).

II.6.4. Normalisation des activités à une date de référence

Le traitement des données des radionucléides n'a concerné que quelques radioisotopes tels que ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{241}Am et le ^{40}K . Dans la suite du manuscrit et pour quelques graphiques, les activités sont rapportées à une date de référence unique, le 1^{er} janvier 2005. Cette correction permet de s'affranchir de la décroissance radioactive des radionucléides aux périodes les plus courtes comme le ^{60}Co et le ^{137}Cs , et de comparer différents stocks sédimentaires échantillonnés à différentes périodes.

CHAPITRE 3

**Distribution des marqueurs
particulaires dans l'estuaire de la
Seine, dans la baie de Seine, sur le
littoral bas-normand et dans les
cours d'eau côtiers bas-normands**

Introduction	99
I – L'estuaire de la Seine	99
I.1. Caractéristiques granulométriques des sédiments de l'estuaire de la Seine	99
I.2. Les minéraux argileux des sédiments dans l'estuaire de la Seine	102
<i>I.2.1. Caractérisation des cortèges des minéraux argileux</i>	102
<i>I.2.2. Discussion sur l'origine des minéraux argileux de l'estuaire de la Seine</i>	108
I.3. Distribution des éléments majeurs-mineurs-traces dans les sédiments de l'estuaire de la Seine	109
<i>I.3.1. Facteurs d'enrichissement</i>	109
<i>I.3.2. Constituants majoritaires du mélange sédimentaire</i>	113
<i>I.3.3. Éléments en traces corrélés aux carbonates dans les sédiments</i>	116
<i>I.3.4. Éléments en traces corrélés à l'aluminium dans les sédiments</i>	117
<i>I.3.5. Éléments dont la concentration est modulée par la présence de minéraux lourds</i>	118
<i>I.3.6. Éléments en traces très excédentaires par rapport aux shales</i>	119
<i>I.3.7. Éléments chimiques susceptibles de constituer des marqueurs discriminants de stocks particuliers</i>	120
I.4. Distribution des radionucléides naturels et artificiels dans les sédiments de l'estuaire de la Seine	124
<i>I.4.1. Résultats bruts</i>	124
<i>I.4.2. Corrélations entre radionucléides</i>	126
<i>I.4.3. Corrélations des radionucléides à l'aluminium</i>	127
<i>I.4.4. Rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$</i>	128
Résumé : L'estuaire de la Seine	130
II – La baie de Seine et le littoral bas-normand	132
II.1. Caractéristiques granulométriques des sédiments en baie de Seine et sur le littoral bas-normand	132
<i>II.1.1. Zone ouest du littoral bas-normand</i>	132
<i>II.1.2. Zone est du littoral bas-normand</i>	134
<i>II.1.3. La baie de Seine</i>	137
II.2. Cortèges des minéraux argileux des sédiments en baie de Seine et sur le littoral bas-normand	140
<i>II.2.1. Caractérisation des cortèges des minéraux argileux</i>	140
<i>II.2.2. Discussion sur l'origine des minéraux argileux de la baie de Seine et du littoral bas-normand adjacent</i>	151
II.3. Distribution des éléments majeurs-mineurs-traces des sédiments et des matières en suspension de la baie de Seine et du littoral bas-normand	154
<i>II.3.1. Facteurs d'enrichissement</i>	154
<i>II.3.2. Constituants majoritaires du mélange sédimentaire</i>	160
<i>II.3.3. Les carbonates dans les sédiments et le strontium associé</i>	165
<i>II.3.4. Éléments en traces corrélés à l'aluminium dans les sédiments</i>	166

//.3.5. Éléments dont la concentration est modulée par la présence de minéraux lourds	167
//.3.6. Éléments en traces très excédentaires par rapport aux shales	169
//.3.7. Synthèse : candidats aux marquages particuliers du domaine fluvial	171
II.4. Distribution des radionucléides des sédiments de la baie de Seine et du littoral bas-normand	172
//.4.1. Caractéristiques des radionucléides	172
//.4.2. Corrélations entre radionucléides	174
//.4.3. Corrélations des radionucléides à l'aluminium	176
//.4.4. Rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$	177
Résumé : La baie de Seine et le littoral bas-normand	181
III – Les cours d'eau côtiers du Calvados : l'Orne, la Dives et la Touques	184
III.1. Présentation générale des trois cours d'eau côtiers	184
///.1.1. L'Orne	184
///.1.2. La Dives	186
///.1.3. La Touques	188
III.2. Caractéristiques granulométriques des sédiments des berges de l'Orne, la Dives et la Touques	190
III.3. Cortèges minéralogiques argileux des sédiments des berges des bas cours de l'Orne, la Dives et la Touques	192
///.3.1. Caractérisation des cortèges des minéraux argileux	192
///.3.2. Discussion sur l'origine des minéraux argileux des trois cours d'eau côtiers du Calvados	197
III.4. Distribution des éléments majeurs-mineurs-traces des sédiments des berges de l'Orne, la Dives et la Touques	198
///.4.1. Facteurs d'enrichissement	199
///.4.2. Constituants majoritaires du mélange sédimentaire	202
///.4.3. Les carbonates et le strontium dans les sédiments	205
///.4.4. Éléments en traces corrélés à l'aluminium dans les sédiments	207
///.4.5. Éléments dont la concentration est modulée par la présence de minéraux lourds	208
///.4.6. Éléments en traces très excédentaires par rapport aux shales	210
///.4.7. Éléments chimiques susceptibles de constituer des marqueurs discriminants de stocks particuliers	210
III.5. Distribution des radionucléides dans les sédiments des berges de l'Orne, la Dives et la Touques	213
///.5.1. Les radionucléides dans les cours d'eau côtiers du Calvados	213
///.5.2. Corrélations entre radionucléides	214
///.5.3. Corrélations entre les radionucléides et l'aluminium	216
///.5.4. Rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$	218
Résumé : L'Orne, la Dives et la Touques	222

INTRODUCTION

Le chapitre 3 décrit les résultats obtenus sur l'ensemble du système estuarien de la Seine, élargi à la baie de Seine et au littoral bas-normand. La région étudiée a été découpée en trois zones géographiques : l'estuaire de la Seine, en amont du barrage de Poses jusqu'à l'embouchure, la baie de Seine et le littoral bas-normand (entre l'embouchure et Cherbourg) et enfin les principaux cours d'eau côtiers du Calvados (Orne, Dives et Touques).

Ce chapitre détaille l'ensemble des résultats obtenus, dans chaque zone géographique, pour :

- la granulométrie de la fraction < 50µm,
- les minéraux argileux,
- les éléments majeurs-mineurs-traces,
- les radionucléides.

L'étude de chaque marqueur particulaire potentiel permet ainsi de caractériser chaque fraction fine de ce système, puis de définir le marqueur particulaire le plus représentatif d'une source donnée.

I – L'estuaire de la Seine

Ces paragraphes regroupent les résultats obtenus à partir des échantillons vaseux récoltés au cours des différentes périodes d'échantillonnages (années 2004 et 2005) dans l'estuaire de la Seine, en domaine intertidal et subtidal (berges et fond de chenal de l'estuaire de la Seine), et présentent successivement :

- les caractéristiques granulométriques de ces sédiments,
- les caractéristiques des minéraux argileux,
- la distribution des éléments majeurs-mineurs-traces,
- la distribution des éléments radioactifs.

I.1. Caractéristiques granulométriques des sédiments de l'estuaire de la Seine

L'étude granulométrique des sédiments vaseux récoltés ne s'intéresse qu'à la fraction de taille inférieure à 50 µm, dite encore fraction pélitique, utilisée pour les différentes analyses tant minéralogiques (argiles) que géochimiques. Sur chaque échantillon brut humide, la granulométrie a été étudiée, mais seule la fraction granulométrique < 50 µm est détaillée ci-après.

- Méthodologie :

La synthèse de l'ensemble des courbes granulométriques de la fraction pélitique est donnée dans la figure 3.1. ci-après. Pour une meilleure lisibilité, chaque classe granulométrique est représentée par une couleur différente, avec les limites suivantes :

- 0-4 µm : argiles
- 4-8 µm : silts très fins
- 8-16 µm : silts fins
- 16-32 µm : silts moyens
- 32-50 µm : silts grossiers tronqués en limite supérieure

Les trois périodes d'échantillonnages (février 2004, octobre-novembre 2004 et avril 2005) des sédiments intertidaux (berges) de l'estuaire de la Seine ont également été reportées.

Les sédiments bruts récoltés n'étant pas représentatifs d'un lieu donné, les résultats ne peuvent être exploités en terme de quantité, mais uniquement en terme de présence ou d'absence d'une population granulométrique. Le pourcentage de matériel de taille < 50 µm est calculé à partir de l'échantillon brut mesuré (annexe). Puis, toutes les valeurs, entre 0 et 50 µm, ont été recalculées en considérant la fraction fine comme représentant 100% de sédiment (annexe). Cet artifice en éliminant l'influence de la quantité des fractions plus grossières de l'échantillon par rapport à la quantité de fraction fine permet de ne s'intéresser qu'à la fraction pélitique.

- Résultats :

Pour la période de février 2004, en fonction de la classe granulométrique dominante dans la fraction inférieure à 50 µm, il est possible de séparer l'estuaire de la Seine en trois zones géographiques distinctes. De la station AMON (amont du barrage de Poses) jusqu'à Duclair (station DUCL), le diamètre moyen des particules fines correspond à des silts moyens, avec localement quelques pics de silts grossiers. Du Mesnil-sous-Jumièges (station LMSJ) à Caudebec-en-Caux (station CAUD), deux classes granulométriques prédominent : les silts fins et les silts grossiers. De Vieux Port (station COUR) à Honfleur (station HONF), les silts grossiers prédominent accompagnés des silts très fins.

Il apparaît donc une double tendance d'amont en aval de l'estuaire :

- la partie inférieure de la fraction pélitique évolue progressivement des silts moyens aux silts très fins ;
- la partie supérieure de la fraction pélitique passe des silts moyens à grossiers à des silts grossiers.

Les campagnes d'octobre-novembre 2004 et d'avril 2005 montrent que la répartition granulométrique dans la fraction pélitique reste la même d'amont en aval. Aucune variation temporelle liée aux conditions hydrologiques de la Seine n'est présente en 2004. Les sédiments vaseux des berges de la Seine ont des caractéristiques granulométriques similaires selon des périodes de post hautes eaux saisonnières et de basses eaux saisonnières. Par contre, entre 2004 et 2005, les conditions hydrologiques sont différentes, mais avec de faibles débits moyens et une absence de hautes eaux saisonnières au cours de l'hiver 2004-2005 (Fig.2.1., page 67, chap 2), c'est sans doute pourquoi les sédiments vaseux des berges de la Seine conservent les mêmes caractéristiques granulométriques dans la fraction concernée (0-50 µm).

Le travail sur la fraction pélitique a été jusqu'à présent peu développé. Avoine (1981) fournit des données sur l'échantillon total qu'à l'embouchure de la Seine, avec près de 70 à 90 % de fraction fine ; par contre au niveau de la grande vasière nord, 5 à 75 % de pélitiques sur le banc du Ratier et plus de 75 % à l'entrée du port du Havre et au nord du banc d'Amfard (Lesueur et Lesourd, 1999 ; Lesourd, 2000).

L'étude de la couverture sédimentaire des fonds de l'estuaire de la Seine, menée par Lesourd (2000), montre un fond de chenal constitué de cailloutis, graviers, sables et débris de tufs (remaniements des produits de la terrasse alluviale holocène (Porcher, 1977)). Les vases y sont rarement observées en tant que dépôts à part entière. Néanmoins, elles sont présentes sur les rives de l'estuaire : la vase s'accumule généralement dans des bras de méandres, constituant de

véritables vasières (vasière d'Oissel). Deloffre *et al.* (2005) ont étudié la granulométrie des sédiments en surface de cette vasière qui est similaire à celle étudiée ici, avec deux modes granulométriques : 15-20 μm et 200-800 μm . Les résultats granulométriques sur des sédiments vaseux (mélange de sables et de vases) entre Poses et Rouen indiquent la présence de sables moyens et grossiers, avec des pics à 200 et 800 μm , et des silts et sables fins, avec des pics à 10 et 80 μm (Deloffre, 2005).

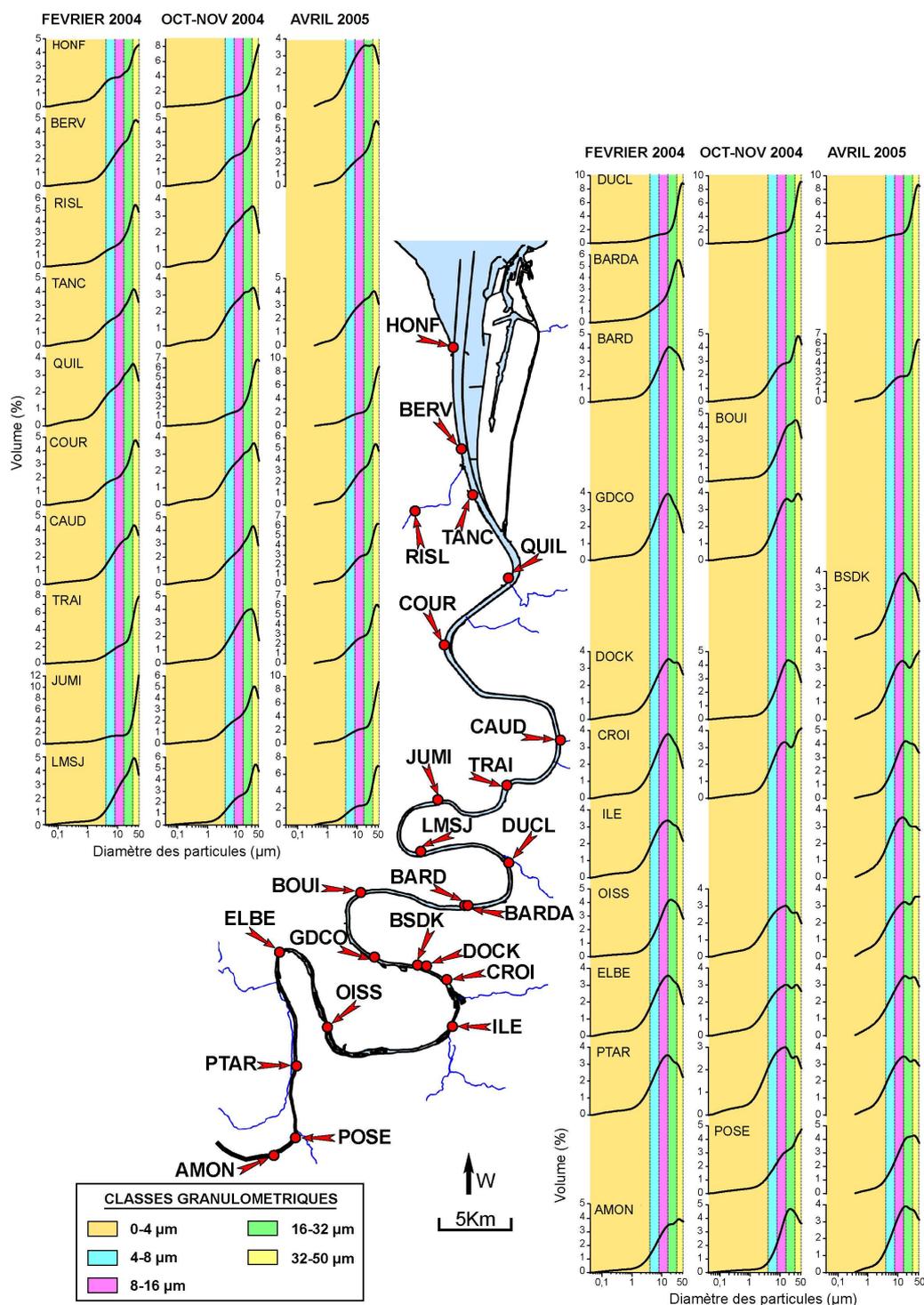


Figure 3.1. Courbes granulométriques de la fraction $< 50 \mu\text{m}$ des sédiments récoltés sur les berges de l'estuaire de la Seine en février 2004, octobre-novembre 2004 et avril 2005.

I.2. Les minéraux argileux des sédiments dans l'estuaire de la Seine

I.2.1. Caractérisation des cortèges des minéraux argileux

Les caractéristiques des cortèges des minéraux argileux des sédiments intertidaux et subtidaux de l'estuaire de la Seine sont définies selon :

- l'identification de chaque minéral argileux à partir de ses comportements à trois passages au diffractomètre (au naturel, à l'éthylène glycol et au chauffage),
- les indices de cristallinité de l'illite et des smectites,
- la semi-quantification de chaque minéral dans le cortège argileux.

- Identification des cortèges :

L'identification des cortèges argileux met en évidence trois principaux minéraux argileux dans l'estuaire de la Seine (Tab.3.1.) : l'illite (notée I, ou 10), la kaolinite (notée K) et les smectites (notées Sm). À cela s'ajoute une série de minéraux interstratifiés réguliers et irréguliers, comme les associations chlorite-chlorite gonflante (C-Cg), chlorite-smectite (C-Sm), illite-chlorite (10-C), fréquemment présents dans les cortèges, illite-chlorite gonflante (10-Cg) et dans une moindre mesure illite-smectite (10-Sm).

La figure 3.2. présente quelques diffractogrammes lissés, caractéristiques des cortèges argileux de l'estuaire de la Seine. L'illite et la kaolinite sont toujours présentes respectivement à 10 et 7 Å en réflexion d001. Les raies dans la zone du 14 Å regroupent des minéraux argileux tels que les smectites, la chlorite (notée C) et la chlorite gonflante (notée Cg). La distinction se fait au niveau des diffractogrammes après un traitement à l'éthylène glycol et au chauffage. La smectite est présente seule ou associée à des minéraux interstratifiés ((C-Cg) ou (C-Sm)). La réflexion d001 montre une smectite ouverte, mal cristallisée et d'une forte amplitude. Quelques échantillons (échantillon AMON, en avril 2005) montrent, par contre, la présence de chlorite associée à un minéral interstratifié (10-Cg), ou la présence d'une chlorite gonflante (échantillon BERV, en février 2004) associée également à un minéral interstratifié (C-Sm). Sur ces diffractogrammes, les réflexions d001 de la chlorite et de la chlorite gonflante sont ouvertes et ont une petite amplitude, par rapport aux smectites.

Tableau 3.1. Détermination et semi-quantification (%) des cortèges minéralogiques argileux des sédiments subtidiaux et intertidaux de l'estuaire de la Seine.

	Noms des échantillons	Cortèges argileux	C													K	Indice cristallinité I	Indice cristallinité Sm	
			C-(10-Cg)	Cg-(10-Cg)	Cg-(C-Sm)	I	(C-Cg)	(10-C)	(10-Cg)	(C-Sm)	Sm	Sm-(C-Cg)	Sm-(10-Cg)	Sm-(C-Sm)	Sm-(10-Sm)				
DOMAINE INTERTIDAL	FEVRIER 2004	AMON	I, (C-Cg), (10-C), Sm, K	0	0	0	0	11	22	2	0	0	35	0	0	0	29	0,35	0,85
		PTAR	I, (10-C), (10-Cg), Sm-(C-Cg), K	0	0	0	0	12	0	4	11	0	0	41	0	0	32	0,21	0,72
		ELBE	I, (10-C), Sm-(C-Cg), K	0	0	0	0	16	0	4	0	0	0	52	0	0	28	0,42	0,85
		OISS	I, (10-C), (C-Sm), Sm, K	0	0	0	0	15	0	5	0	14	40	0	0	0	27	0,42	0,73
		ILE	I, (10-C), Sm-(C-Cg), K	0	0	0	0	16	0	5	0	0	0	51	0	0	28	0,42	0,88
		CROI	I, (10-C), Sm-(10-Cg), K	0	0	0	0	18	0	6	0	0	0	44	0	0	32	0,42	0,79
		GDCO	I, (C-Cg), (10-C), Sm, K	0	0	0	0	24	11	6	0	0	25	0	0	0	34	0,49	0,80
		BARD	I, (10-C), Sm-(C-Cg), K	0	0	0	0	15	0	5	0	0	0	47	0	0	33	0,42	0,83
		BARD_A	I, (10-C), Sm-(C-Cg), K	0	0	0	0	19	0	6	0	0	0	51	0	0	24	0,63	0,79
		DUCL	I, (10-C), Sm-(C-Sm), K	0	0	0	0	15	0	5	0	0	0	0	57	0	24	0,49	0,90
		JUMI	I, (10-C), Sm-(C-Sm), K	0	0	0	0	20	0	4	0	0	0	0	51	0	25	0,63	0,81
		TRAI	I, (C-Cg), (10-C), Sm, K	0	0	0	0	16	16	3	0	0	34	0	0	0	31	0,35	0,76
		CAUD	I, (C-Cg), (10-C), Sm, K	0	0	0	0	16	16	2	0	0	35	0	0	0	30	0,35	0,72
		QUIL	I, (10-C), Sm-(C-Cg), K	0	0	0	0	23	0	3	0	0	0	45	0	0	29	0,35	0,80
	BERV	Cg-(C-Sm), I, (10-C), K	0	0	0	43	21	0	5	0	0	0	0	0	0	32	0,35	---	
	HONF	I, (10-C), Sm-(C-Cg), K	0	0	0	0	24	0	3	0	0	0	35	0	0	38	0,42	0,79	
	OCTOBRE-NOVEMBRE 2004	PTAR	I, (10-C), Sm-(C-Cg), K	0	0	0	0	22	0	4	0	0	40	0	0	34	0,28	0,71	
		ELBE	I, (10-C), Sm-(C-Cg), K	0	0	0	0	17	0	3	0	0	53	0	0	27	0,28	0,82	
		OISS	I, (10-C), Sm-(C-Sm), K	0	0	0	0	14	0	3	0	0	0	0	56	0	27	0,35	0,81
		ILE6	Cg-(10-Cg), I, (10-C), K	0	0	51	0	13	0	3	0	0	0	0	0	33	0,42	---	
		ILE	I, (10-C), Sm-(10-Sm), K	0	0	0	0	17	0	4	0	0	0	0	53	27	0,49	0,79	
		DOCK	I, (C-Cg), (10-C), Sm, K	0	0	0	0	10	18	2	0	0	52	0	0	18	0,49	0,76	
		GDCO	I, (10-C), Sm-(C-Cg), K	0	0	0	0	15	0	5	0	0	53	0	0	27	0,28	0,72	
		BARD	I, (10-C), Sm-(C-Cg), K	0	0	0	0	16	0	3	0	0	49	0	0	32	0,35	0,89	
		LMSJ	I, (10-C), Sm-(C-Cg), K	0	0	0	0	17	0	5	0	0	50	0	0	28	0,35	0,80	
		JUMI	I, (10-C), Sm-(C-Cg), K	0	0	0	0	16	0	3	0	0	51	0	0	30	0,28	0,78	
		TRAI	I, (10-C), (10-Cg), Sm, K	0	0	0	0	21	0	2	13	0	29	0	0	34	0,28	0,79	
		QUIL	I, (10-C), Sm-(C-Cg), K	0	0	0	0	23	0	3	0	0	37	0	0	37	0,35	0,89	
		TANC	I, (10-C), Sm-(C-Sm), K	0	0	0	0	19	0	3	0	0	0	44	0	34	0,49	0,87	
		AVRIL 2005	AMON	Cg-(10-Cg), I, K	0	43	0	0	26	0	0	0	0	0	0	0	31	0,60	---
	POSE		I, (10-Cg), Sm-(C-Sm), K	0	0	0	0	14	0	0	4	0	0	0	56	25	0,57	0,79	
	PTAR		I, (10-C), Sm-(C-Sm), K	0	0	0	0	15	0	3	0	0	0	46	0	35	0,53	0,83	
	OISS		I, (10-C), Sm-(C-Cg), K	0	0	0	0	14	0	18	0	0	41	0	0	27	0,63	0,80	
	ILE		I, (10-Cg), Sm-(C-Cg), K	0	0	0	0	19	0	0	2	0	42	0	0	37	0,63	0,60	
	CROI		I, (10-C), Sm-(C-Sm), K	0	0	0	0	25	0	15	0	0	0	31	0	29	0,53	0,87	
	DOCK		I, (10-C), Sm-(C-Cg), K	0	0	0	0	15	0	2	0	0	54	0	0	29	0,77	0,77	
	BSDK		I, (10-Cg), Sm-(C-Cg), K	0	0	0	0	18	0	0	2	0	45	0	0	35	0,71	0,82	
	DUCL		I, (10-Cg), Sm-(C-Sm), K	0	0	0	0	14	0	0	24	0	0	0	34	28	0,57	0,82	
	LMSJ		I, (10-C), Sm-(C-Cg), K	0	0	0	0	12	0	4	0	0	63	0	0	22	0,51	0,82	
	JUMI		I, (10-Cg), Sm-(C-Cg), K	0	0	0	0	15	0	0	12	0	42	0	0	30	0,62	0,76	
	TRAI		I, (10-C), Sm-(C-Cg), K	0	0	0	0	16	0	1	0	0	60	0	0	23	0,62	0,85	
	CAUD		I, (10-C), Sm-(C-Sm), K	0	0	0	0	14	0	10	0	0	0	0	47	28	0,52	0,83	
COUR	C, I, (10-C), (10-Cg), K		30	0	0	0	18	0	18	7	0	0	0	0	27	0,55	---		
QUIL	C, I, (10-C), K	7	0	0	0	20	0	25	0	0	0	0	0	48	0,60	---			
TANC	I, (10-C), Sm-(C-Sm), K	0	0	0	0	12	0	1	0	0	0	0	63	23	0,42	0,85			
BERV	I, Sm-(C-Cg), K	0	0	0	0	19	0	0	0	0	58	0	0	23	0,42	0,86			
DOMAINE SUBTIDAL	AVRIL 2005	3247	I, Sm-(C-Sm), K	0	0	0	0	17	0	0	0	0	0	59	24	0,49	0,83		
		3249	Cg-(C-Sm), I, (10-C), K	0	0	0	40	13	0	28	0	0	0	0	19	0,63	---		
		3245	I, (10-C), Sm-(C-Sm), K	0	0	0	0	17	0	2	0	0	0	56	25	0,66	0,81		
		3241	I, (10-C), Sm-(C-Cg), K	0	0	0	0	19	0	29	0	0	27	0	0	25	0,80	0,89	
		3240	I, Sm-(C-Sm), K	0	0	0	0	17	0	0	0	0	0	51	0	32	0,47	0,80	

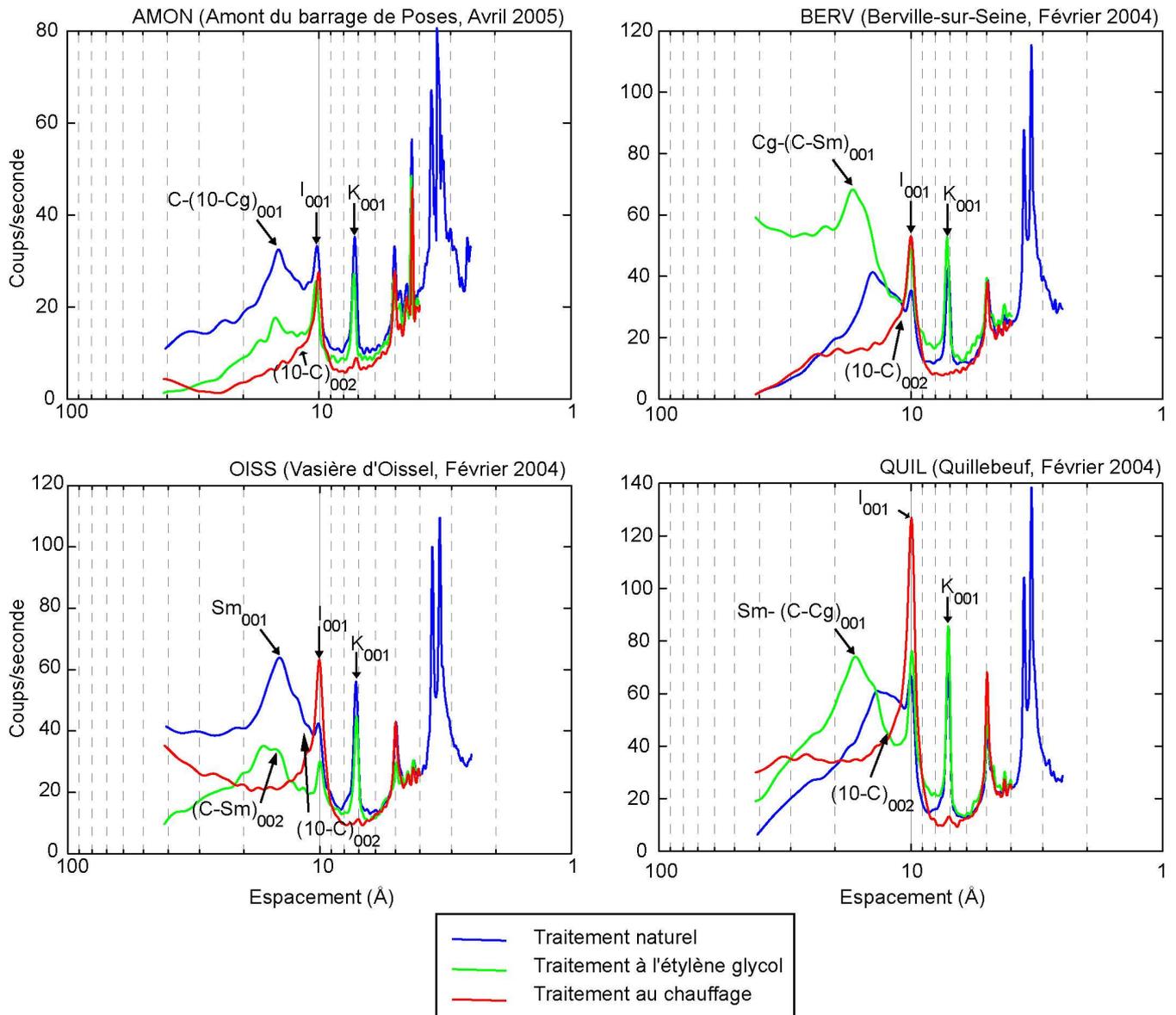


Figure 3.2. Diffractogrammes caractéristiques des cortèges argileux trouvés dans l'estuaire de la Seine.

La comparaison des différents cortèges selon les périodes de prélèvement des sédiments ne montre pas de réelle variation qui puisse être mise en relation avec les conditions hydrologiques de la Seine. Les principaux minéraux restent les mêmes, seuls les minéraux interstratifiés, seuls ou associés, diffèrent dans le cortège. En domaine subtidal, les cortèges sont analogues à ceux déterminés en domaine intertidal en un lieu considéré. Seuls les minéraux interstratifiés ne sont plus présents individuellement, excepté pour le minéral interstratifié (10-C).

- Indice de cristallinité de l'illite :

L'indice de cristallinité de l'illite dans les sédiments de l'estuaire de la Seine présente des valeurs très dispersées, comprises entre 0,2 et 0,8 2θ (Fig.3.3.). Des valeurs plus élevées se trouvent autour du PK260 (entre PK240 et PK280), entre Rouen et Duclair, sans qu'il n'existe une quelconque tendance de l'amont vers l'aval. En revanche, les indices de cristallinité pour la majorité des échantillons d'avril 2005 ont des valeurs plus élevées qu'en 2004, autour de 0,6 2θ ,

contre $0,45 \cdot 2\theta$. Cela signifie que les illites recueillies en 2005 sont moins bien cristallisées que celles de 2004 ; et cela suggère que les échantillons récoltés en 2005 ont une nature minéralogique argileuse différente de celle des sédiments prélevés en 2004.

Par contre, les indices de cristallinité des échantillons subtidaux et intertidaux de l'estuaire de la Seine restent similaires pour la période d'avril 2005.

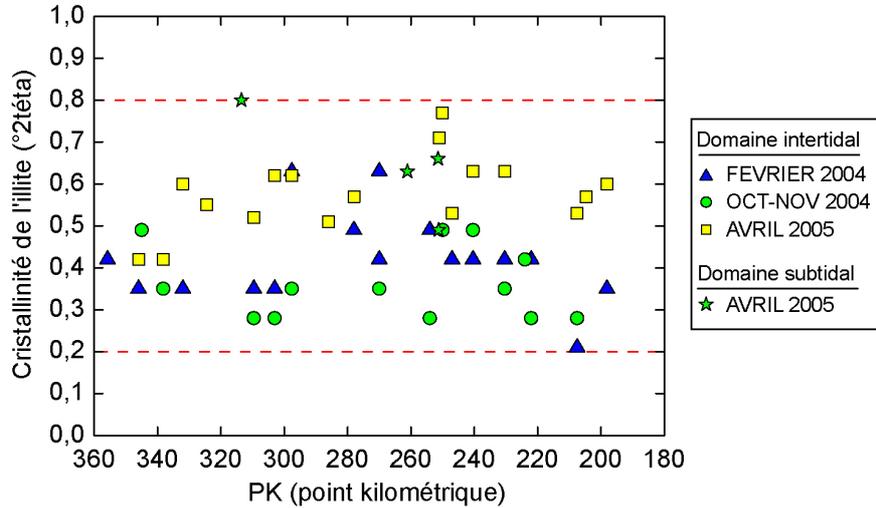


Figure 3.3. Relation entre l'indice de cristallinité de l'illite (en 2θ) et la distance dans l'estuaire de la Seine (PK) pour les sédiments intertidaux et subtidaux. Les lignes en pointillées correspondent aux valeurs supérieures et inférieures.

- Indice de cristallinité des smectites :

Les indices de cristallinité des smectites, contrairement à ceux de l'illite présentent dans l'estuaire des valeurs assez constantes, variant entre 0,6 et 0,9 (Fig.3.4.). La moyenne se situe autour de 0,8. L'indice de cristallinité des smectites est considéré comme bon lorsqu'il est proche de 1. Dans ce cas, cela signifie que la smectite se présente sous la forme d'une courbe de type lorentzien. Dans le cas contraire, la courbe n'est pas symétrique et indique soit une mauvaise cristallisation des smectites soit une altération de celles-ci. Il est à remarquer qu'aucune variation d'amont en aval, ni de variation saisonnière ou inter-annuelle n'apparaît le long de l'estuaire de la Seine pendant la période février 2004 et avril 2005.

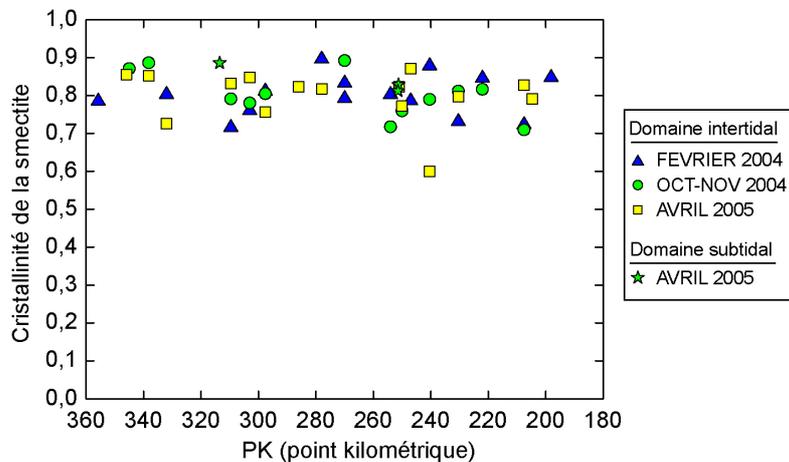


Figure 3.4. Relation entre l'indice de cristallinité des smectites et la distance dans l'estuaire de la Seine (PK) pour les sédiments intertidaux et subtidaux.

- Semi-quantification des cortèges :

Tous les résultats ont été reportés sur la figure 3.5., depuis l'amont vers l'aval entre février 2004 et avril 2005. Pour l'ensemble des résultats de semi-quantification des cortèges argileux, il n'apparaît aucune tendance nette d'amont en aval le long de l'estuaire de la Seine. Le cortège en amont du barrage de Poses (station AMON) présente, par ailleurs, un cortège différent entre 2004 et 2005. En 2004, ce sont des smectites qui s'expriment tandis qu'en 2005, une chlorite associée à un minéral interstratifié est identifiée. Il s'agit probablement d'une nature minéralogique différente du dépôt vaseux entre 2004 et 2005. Cette même disparité se retrouve à Quillebeuf (station QUIL) où la chlorite remplace la smectite en 2005.

Dans l'ensemble, les proportions du cortège argileux moyen sont composées d'environ 50 % de smectites (ou de chlorite ou chlorite gonflante pour quelques stations), de 25 à 35 % de kaolinite, de 15 à 20 % d'illite, de 5 % du minéral interstratifié (10-C), le reste étant attribué aux autres minéraux interstratifiés présents dans les cortèges, avec généralement (C-Sm) ou (C-Cg). Quand les smectites ne sont pas associées à des minéraux interstratifiés, elles constituent environ 40 % du cortège minéralogique argileux et restent majoritaires.

Les proportions des minéraux argileux sont différentes de celles proposées par Lesourd (2000) pour les sédiments intertidaux de l'estuaire de la Seine. Pour cet auteur et pour trois exemples de stations (Rouen, Jumièges et Caudebec-en-Caux), les cortèges sont constitués de 23 à 34 % d'illite, de 16 à 29 % de kaolinite, de 0 à 12 % de chlorite, de 17 à 27 % de chlorite gonflante et de 17 à 26 % de smectite. Rien n'indique, par contre, si la chlorite ou la chlorite gonflante sont seules ou associées en minéraux interstratifiés.

La comparaison de ces données avec les nôtres montre que :

- les proportions en smectites sont plus faibles et ne dominent plus dans le cortège,
- la chlorite et la chlorite gonflante sont présentes en quantité notable dans les échantillons de Lesourd (2000). Dans notre étude, elles sont associées aux smectites, ou associées entre elles, et n'apparaissent pas dans les proportions aussi importantes.

Lesourd (2000) met également en évidence l'existence d'une tendance générale :

- des valeurs décroissantes d'amont en aval de la proportion en kaolinite et en smectites,
- des valeurs croissantes d'amont en aval de la chlorite et de l'illite.

Ces caractéristiques n'ont pas été retrouvées sur l'ensemble des échantillons prélevés dans l'estuaire de la Seine et ce, quelque soit la période d'échantillonnage, et donc des conditions hydrologiques de la Seine.

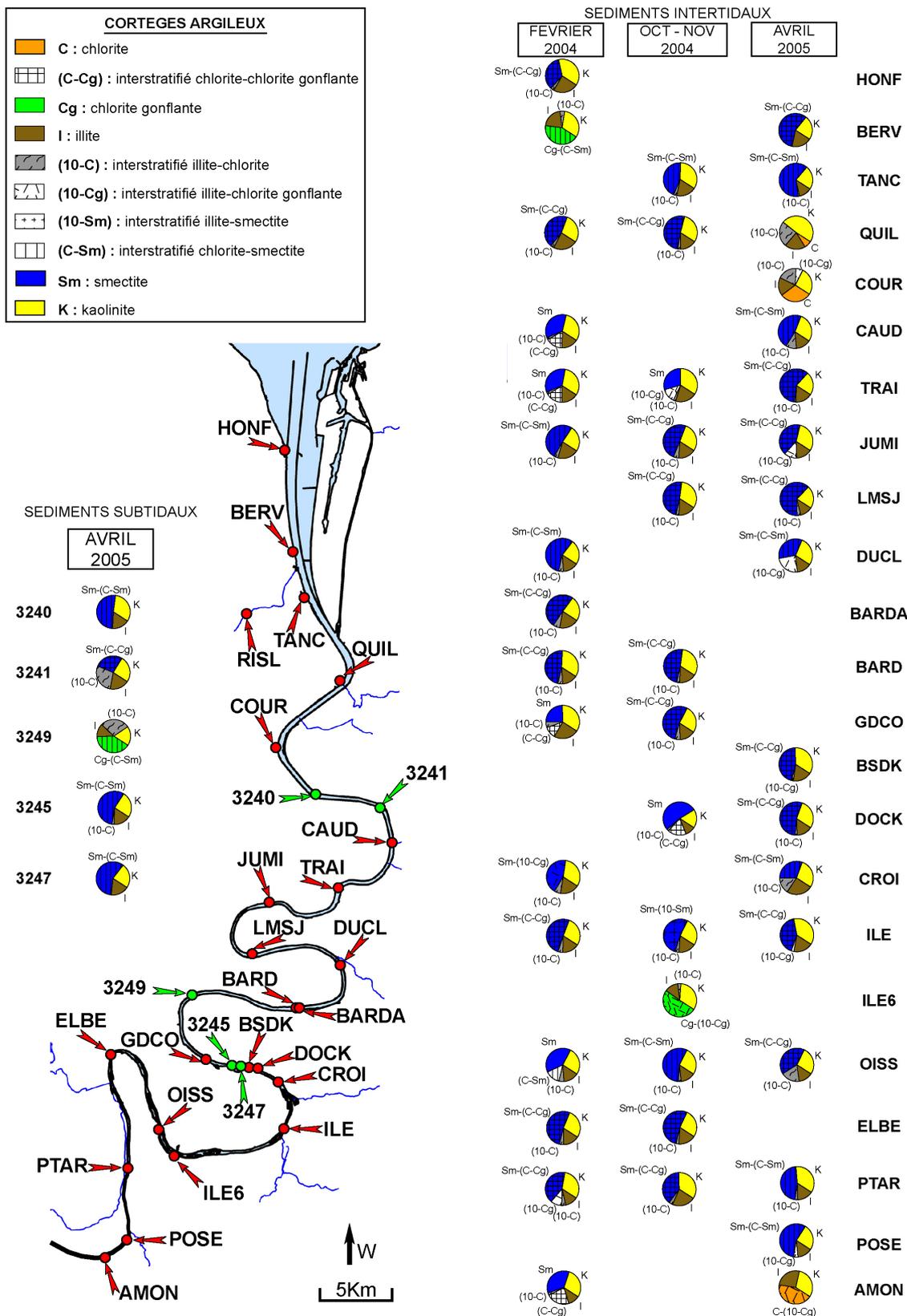


Figure 3.5. Semi-quantification des cortèges argileux dans l'estuaire de la Seine pour les sédiments intertidaux (berges) et subtidaux (fond de chenal).

I.2.2. Discussion sur l'origine des minéraux argileux de l'estuaire de la Seine

Avant de mettre en relation les résultats acquis sur les cortèges de minéraux argileux, dans l'estuaire de la Seine, avec les données antérieures, il est nécessaire de rappeler l'environnement géologique et géomorphologique de cet estuaire.

Dans l'estuaire amont, le substratum rocheux est constitué de séries mésozoïques. La Seine emprunte une vallée en auge creusée dans un plateau crayeux du Crétacé supérieur (Pays de Caux au Nord, Lieuvin, Roumois), qui forme les falaises bordant la plaine alluviale actuelle. Dans l'estuaire aval, le substratum est constitué de sables aptiens et de marnes albiennes vers Tancarville ; la rive droite est constituée de falaises crayeuses crétacées tandis que la rive gauche longe les collines argilo-calcaires du Pays d'Auge. Au niveau de l'embouchure, les argiles et calcaires argileux de l'Oxfordien et du Kimméridgien prennent place. Les formations crétacées sont recouvertes sur quelques secteurs (principalement en bordure de falaises) de dépôts éoliens de l'interglaciaire éémien et de loess de la dernière période froide (Lautridou, 1985).

Actuellement, la Seine traverse par de nombreux méandres la plaine alluviale composée d'alluvions et de colluvions holocènes datées entre 8500-2200 B.P. dans l'estuaire aval et entre 7500-10000 B.P. dans l'estuaire amont.

Les données antérieures concernant les cortèges des minéraux argileux peu nombreuses dans l'estuaire de la Seine (Fig.3.6.) datent pour la plupart, de plus de 30 ans. Les résultats sont à prendre avec réserve car les techniques d'analyses et d'interprétations ont évolué ces dernières années. Les travaux récents montrent que les argiles à silex tertiaires (Laignel *et al.*, 1998) contiennent de grandes quantités de kaolinite et de smectites (respectivement 60 et 35 %) et peu d'illite (5 %). La craie (Laignel, 1997) à smectites (85 %) dominantes renferme respectivement de 10 % d'illite et 5 % de kaolinite. Lautridou (1985) caractérise le cortège argileux des loess pléistocènes par 50 % de smectites, 22 % d'illite, 20 % de kaolinite, 8 % de chlorite et des traces de vermiculite. Plus récemment, les études sur les sédiments superficiels subtidiaux de l'estuaire de la Seine ont mis en évidence la présence de chlorite gonflante (Lesourd, 2000). Elle proviendrait pour cet auteur soit, de l'érosion des fonds du chenal de navigation de la Seine, soit de l'érosion du matériel constituant le bassin versant intra-estuarien, soit de l'érosion des berges de l'estuaire de la Seine.

Ces différents minéraux argileux, présents dans les formations affleurantes le long de l'estuaire de la Seine, expliquent la complexité des cortèges argileux définis dans ce travail. Les proportions importantes en smectites des formations mésozoïques expliquent la prédominance de celles-ci dans les cortèges des minéraux argileux des sédiments récents de l'estuaire de la Seine. Il est raisonnable de penser que le matériel fin dans l'estuaire de la Seine provient d'un point de vue minéralogique, de l'érosion et du transport de ces dépôts mésozoïques.

En revanche, les différentes formations n'offrent pas une diversité suffisante en terme de types d'argiles. Les minéraux argileux hélas ne permettent donc pas de distinguer les sources potentielles du matériel fin dans l'estuaire de la Seine.

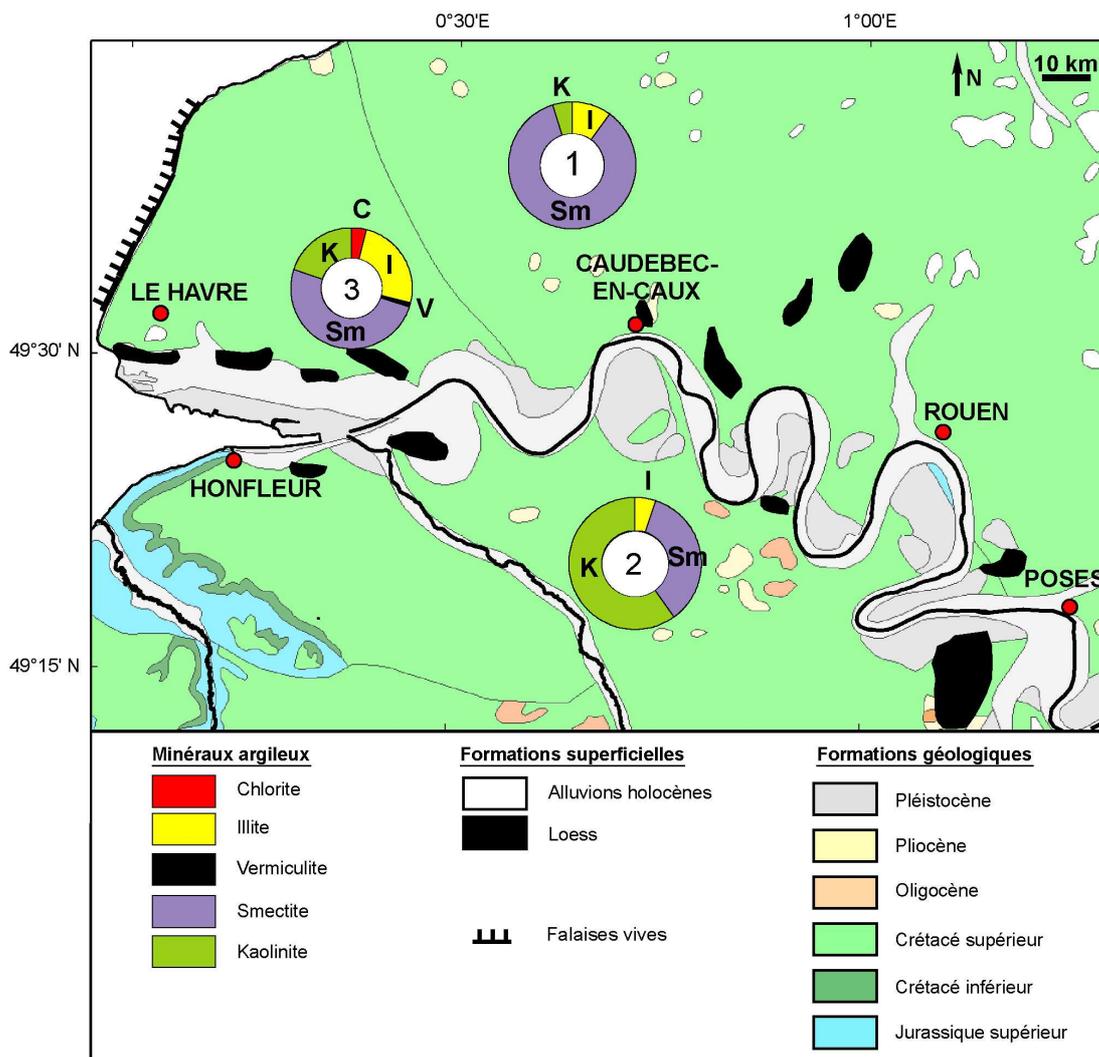


Figure 3.6. Carte géologique (extrait de la carte géologique de la Normandie au 1/50000, BRGM) et minéraux argileux associés de l'estuaire de la Seine. 1 : Craie (Laignel, 1997). 2 : Argiles à silex (Laignel et al., 1998). 3 : Loess pléistocènes (Lautridou, 1985).

I.3. Distribution des éléments majeurs-mineurs-traces dans les sédiments de l'estuaire de la Seine

I.3.1. Facteurs d'enrichissement

Au-delà de la comparaison des teneurs en chacun des éléments données par l'analyse chimique, il est pertinent d'adopter des critères, tel le facteur d'enrichissement défini dans le chapitre 2 :

$$FE = (E/AI)_{\text{échantillon}} / (E/AI)_{\text{shales}}$$

où $(E/AI)_{\text{échantillon}}$ et $(E/AI)_{\text{shales}}$ font référence au rapport de la concentration en l'élément E considéré à celle de l'aluminium, respectivement, dans l'échantillon et dans les shales.

FE = 1 : l'élément considéré a un rapport à l'aluminium de type shales.

FE < 1 : l'élément est déficitaire par rapport à la référence shales.

FE > 1 : l'élément est excédentaire par rapport à la référence shales.

La représentation graphique en ordonnée logarithmique conduit à une interprétation visuelle de l'écart par rapport à 1 identique que l'élément soit enrichi d'un facteur 2 ($FE = 2$) ou déficitaire d'un facteur 2 ($FE = 0,5$). Par définition, le facteur d'enrichissement de l'aluminium vaut 1.

Cette approche n'est pertinente que pour les éléments dont la concentration est positivement corrélée à l'aluminium. Ce n'est pas le cas pour les éléments portés par la phase carbonatée ou certains minéraux lourds, et pour les éléments enrichis par des apports anthropiques (ces quelques cas sont développés plus loin dans cette partie).

Les FE des différents échantillons prélevés en estuaire de Seine sont présentés dans la figure 3.7. pour le domaine intertidal (berges) et dans la figure 3.8. pour le domaine subtidal (fond du chenal). Cette même représentation sera conservée pour l'étude des échantillons prélevés en baie de Seine et sur le littoral bas-normand, ainsi que dans les cours d'eau côtiers. Les données des terres rares ne sont pas développées dans le manuscrit mais sont reportées en annexe.

Les deux figures 3.7. et 3.8. présentent des FE semblables entre les échantillons prélevés en domaine intertidal et en domaine subtidal, seuls les facteurs d'enrichissement ou d'appauvrissement sont quelquefois différents. Peu ou aucune différence significative n'apparaît entre les différentes périodes d'échantillonnage (février 2004, octobre-novembre 2004 et avril 2005) sur les zones intertidales des berges de l'estuaire de la Seine.

L'analyse détaillée des FE pour chaque élément permet de distinguer quelques particularités géochimiques des sédiments intertidaux et subtidaux de l'estuaire de la Seine :

- Série Na à Fe

Les éléments fer (Fe), manganèse (Mn), potassium (K) et magnésium (Mg) ont des FE proches de 1, leur signature de type shales est particulièrement homogène sur l'ensemble des échantillons prélevés dans les sédiments intertidaux et subtidaux. Les FE du titane (Ti) sont légèrement supérieurs à 1 mais peu dispersés. Si les FE du silicium (Si) varient entre 1 et 3 ; cela est dû au fait que le silicium est non seulement présent dans les aluminosilicates mais aussi dans la silice pure (quartz essentiellement) dont l'abondance varie. Les FE du calcium (Ca) montrent des excès très importants dus à l'abondance des carbonates dans tous les échantillons. Les excès en sodium (Na) sont importants et variables, il reste toujours un peu de sel de mer dans les échantillons même après un lavage minutieux. Le phosphore (P) est toujours excédentaire d'un facteur 5 à 10 quel que soit le domaine d'échantillonnage (intertidal ou subtidal), voire d'un facteur 40 pour l'échantillon 3247, situé à l'entrée d'un bassin abandonné et entièrement comblé par la vase. Cet excès est certes lié à des particularités locales d'origine naturelle, mais aussi à un apport anthropique (rejets de phosphogypses).

- Série Be à As

Les FE du béryllium (Be), du vanadium (V), du cobalt (Co), du nickel (Ni), du gallium (Ga) voisins de 1 sont peu dispersés : leur signature, de type shales, est particulièrement homogène sur tous les sites étudiés de l'estuaire de la Seine. Par contre, le zinc (Zn), le cuivre (Cu), le chrome (Cr), l'arsenic (As) et dans une moindre mesure le germanium (Ge) présentent les FE les plus élevés avec les valeurs maximales pour les quelques échantillons 3247 et 3249 subtidaux situés dans la zone industrielle de Rouen. Seuls les FE du Zn et du Cu sont très dispersés.

- Série Rb à Sb

Cette troisième série présente pour l'ensemble des échantillons des FE élevés et très dispersés. Les FE du rubidium (Rb), du molybdène (Mo), de l'indium (In) et dans une moindre mesure, de l'antimoine (Sb) proches de 1 sont peu dispersés. L'excès de strontium (Sr) s'explique par le fait qu'il est contenu pour partie dans la phase carbonatée. Les FE du cadmium (Cd) sont très importants avec un facteur égal ou supérieur à 10. Les valeurs de FE du zirconium (Zr) élevées et très dispersées s'expliquent par la présence de minéraux lourds. Les FE de l'étain (Sn) sont considérables avec un facteur similaire à celui du cadmium, soit égal ou supérieur à 10. Si comme pour la série précédente, les FE les plus élevés se retrouvent dans les échantillons subtidiaux (3247, 3249) de l'estuaire de Seine, ils sont essentiellement concentrés dans la zone industrielle voisine de Rouen (voir page 132 avec les corrélations /Al).

- Série Cs à U

Pour quasiment tous les éléments (césium (Cs), hafnium (Hf), tantale (Ta), tungstène (W), plomb (Pb), bismuth (Bi), thorium (Th) et uranium (U)), les FE en excès par rapport aux shales restent généralement très homogènes. Seul le baryum (Ba) qui présente des FE très proches de 1 ; a des propriétés géochimiques de type shales. Les FE du plomb et du bismuth plus élevés semblent être de bons discriminants puisque leurs valeurs sont un peu plus dispersées que pour les autres éléments de cette série. Comme pour le zirconium, précédemment cités, l'hafnium, ne peut être utilisé comme marqueur particulière car il a le même comportement que Zr. Encore une fois, les plus fortes valeurs de FE se retrouvent dans les échantillons subtidiaux situés dans la zone industrielle voisine de Rouen.

Aucun élément ne semble néanmoins être un marqueur complètement pertinent et discriminant. Cette approche a permis, a priori, de distinguer les éléments susceptibles d'être de bons marqueurs particuliers potentiels. Les éléments pré-sélectionnés pour caractériser le pôle sédimentaire estuarien sont alors : Zn, Cu, Cr, Cd, Pb et Bi.

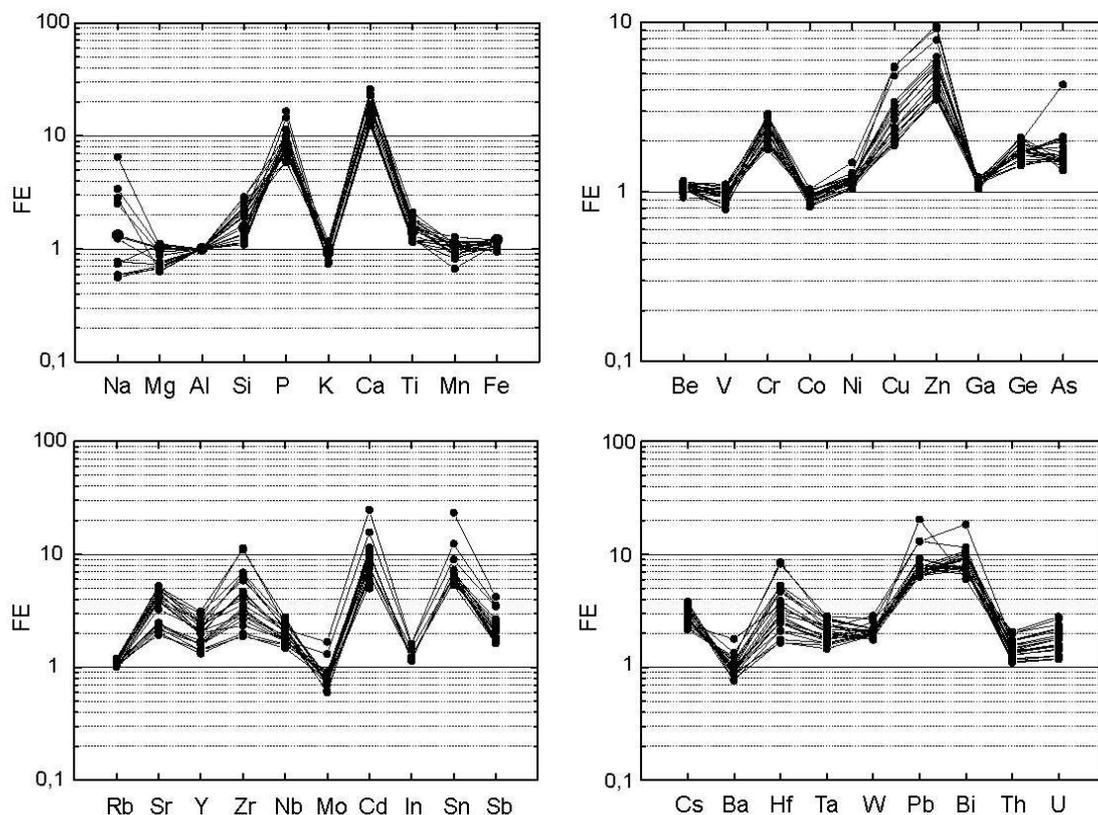


Figure 3.7. Facteurs d'enrichissement (FE) des échantillons des berges de l'estuaire de Seine, toutes années confondues (février 2004, octobre-novembre 2004 et avril 2005).

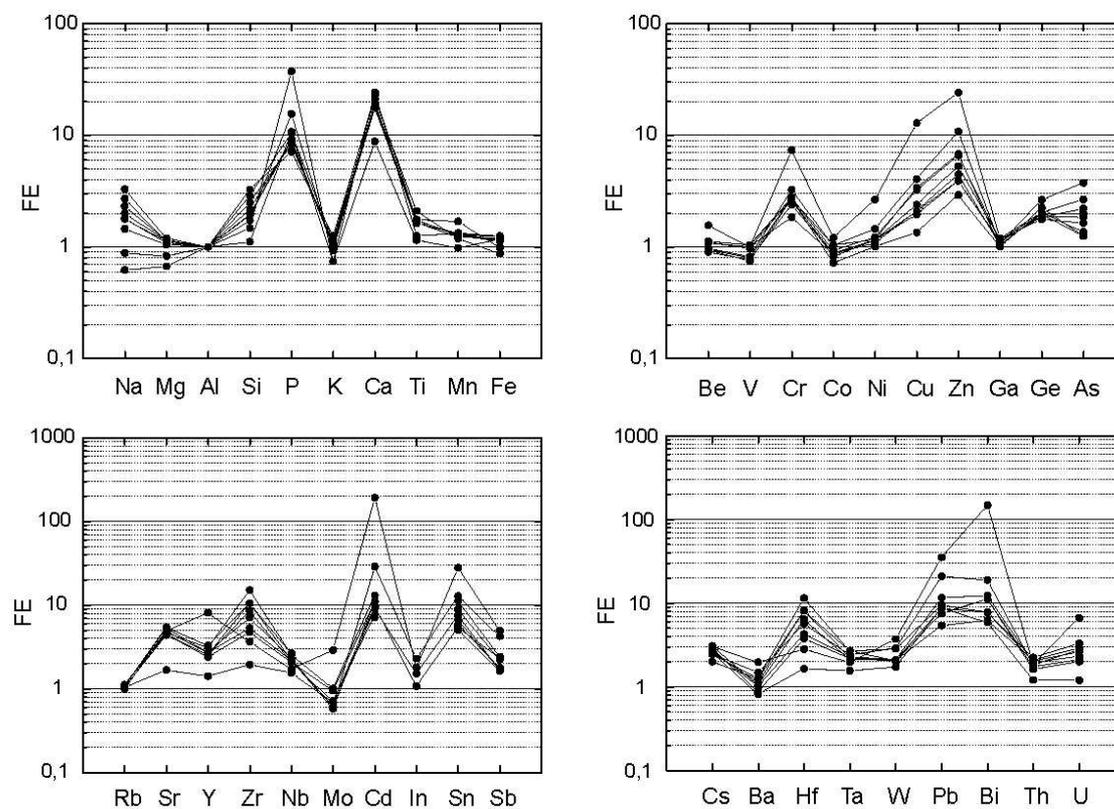


Figure 3.8. Facteurs d'enrichissement (FE) des échantillons subtidaux (fond de chenal) prélevés dans l'estuaire de Seine en avril 2005.

I.3.2. Constituants majoritaires du mélange sédimentaire

- Le système Ca-Al-Si :

Les sédiments étudiés résultent du mélange de trois constituants majeurs : les aluminosilicates (spécifiquement marqués par l'aluminium), les carbonates (marqués par le calcium) et la silice (quartz détritique pour l'essentiel, et marqué non spécifiquement par le silicium, contenu aussi dans les aluminosilicates). La combinaison de ces trois marqueurs permet de résoudre le mélange sédimentaire et d'estimer la contribution relative de ces trois constituants.

La teneur en carbonates est mesurée par calcimétrie Bernard quand le matériel est suffisant, sinon elle est estimée à partir des teneurs en Ca, dosées par ICPAES. Une quantité proportionnelle à son abondance dans un matériel de type shales est retranchée au Ca total (Ca_{tot}) ; on obtient ainsi la concentration en Ca lié aux carbonates, Ca_{bio} :

$$Ca_{bio} = Ca_{tot} - (Al_{tot} \times (Ca/Al)_{shales})$$

- les indices tot et shales font référence respectivement aux teneurs totales dans l'échantillon et dans les shales des éléments considérés. Cette correction est mineure car le calcium est majoritairement contenu dans les carbonates. Comme les carbonates ne contiennent ni Si, ni Al, il est possible d'exprimer les concentrations de ces éléments marqueurs des constituants détritiques sur la base d'un sédiment décarbonaté (CFB pour "carbonate free basis"), selon la formule suivante :

$$E_{CFB} = E_{tot} / ((100 - \%CaCO_3)/100)$$

- E_{CFB} et E_{tot} font référence respectivement aux concentrations de l'éléments E, carbonate free basis et totales.

La figure 3.9. représente la corrélation Si_{CFB} - Al_{CFB} ; la droite représentative du matériel de type shales a été tracée sur la base d'un rapport Si/Al de 3,125 ($Si_{shales} = 27,5\%$ et $Al_{shales} = 8,8\%$). La droite de corrélation (droite en pointillé rouge sur le graphique) représentative des sédiments de l'estuaire de la Seine en domaines intertidal et subtidal a une valeur à l'origine forcée à $Si = 46,7\%$ qui correspond à la teneur en Si dans le quartz ($Si/SiO_2 = 0,467$). Pour les plus fortes concentrations en aluminium, les concentrations en Si sont seulement dues aux aluminosilicates. En soustrayant des teneurs en Si, les quantités de Si liées aux aluminosilicates au pro-rata de leur abondance dans ce pôle de mélange, on obtient le Si lié au quartz dont il est possible d'évaluer l'abondance relative.

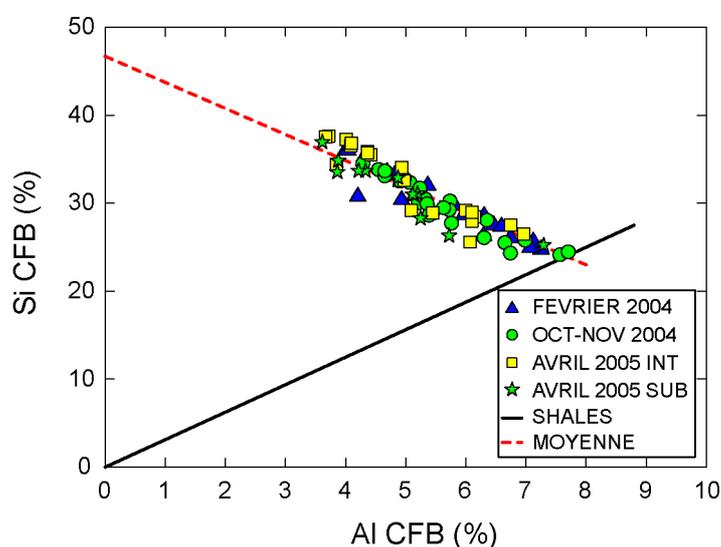


Figure 3.9. Relation entre les teneurs en Si et Al calculées sur la base d'un sédiment décarbonaté (CFB), droite représentative des sédiments intertidaux et subtidaux de l'estuaire de la Seine.

Cette approche suppose que l'excès de Si est essentiellement lié au quartz, voire à la silice biogène, ce qui semble être une bonne approximation.

Le mélange sédimentaire est ainsi résolu en ces trois constituants majoritaires : carbonates, quartz et aluminosilicates. La figure 3.10. présente deux diagrammes ternaires avec les proportions relatives de ces constituants pour les échantillons de l'estuaire de la Seine pris en domaines intertidal et subtidal. Quelles que soient les périodes de prélèvements, le mélange sédimentaire reste analogue. Seuls quelques échantillons intertidaux (ELBE, OISS, ILE, CROI, DOCK, GDCO, BARD, PTAR et HONF) prélevés en février 2004 en post hautes eaux saisonnière sont appauvris en quartz (< 15 %). De la même manière, cinq échantillons intertidaux (AMON, ELBE, JUMI, QUIL, HONF) prélevés en avril 2005 ont des valeurs en carbonates inférieures à 20 %. Le mélange sédimentaire des échantillons du domaine subtidal est, quant à lui stable et similaire à celui du domaine intertidal.

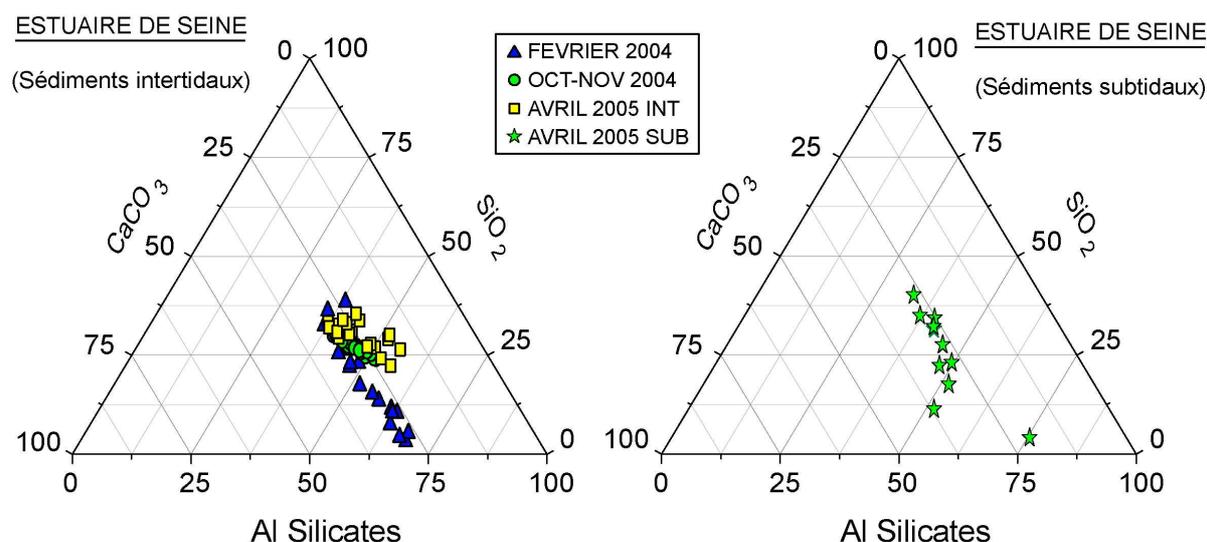


Figure 3.10. Diagrammes ternaires représentant la proportion en carbonates, quartz et aluminosilicates pour chaque échantillon prélevé sur les berges de la Seine (en février 2004, octobre-novembre 2004 et avril 2005) et dans le chenal de navigation de l'estuaire de Seine (avril 2005).

- Le potassium K :

La corrélation K-Al montre tout d'abord que la concentration en potassium est pour une partie des échantillons proportionnelle à l'aluminium, et se situe sur la droite des shales (Fig.3.11.) ; l'autre partie, quelle que soit la période d'échantillonnage, est légèrement inférieure à la référence shales. Pour rappel : le potassium n'est pas seulement présent dans les argiles (phyllosilicates) mais peut être contenu également dans les feldspaths potassiques. Il semble donc certains sites échantillonnés aient une nature minéralogique un peu différente du reste de l'estuaire, ou que le fond géochimique de l'estuaire diffère de celui défini par la référence shales.

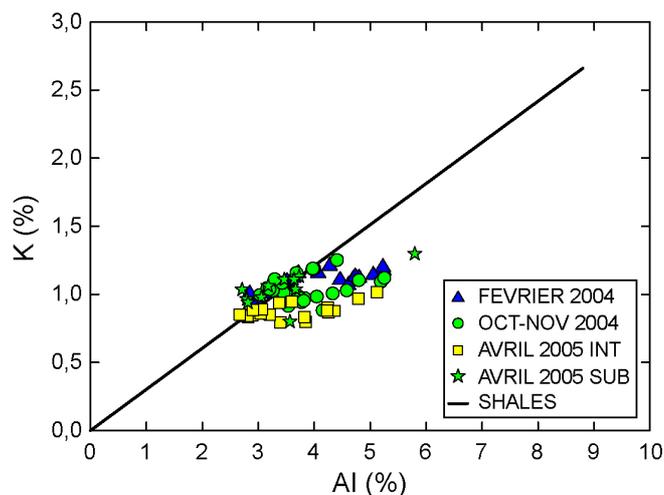


Figure 3.11. Relation entre les teneurs en K et Al pour les sédiments intertidaux et subtidaux de l'estuaire de la Seine.

- Le magnésium Mg :

L'ensemble des échantillons (Fig.3.12.) se regroupe près de la droite représentative des shales. Le magnésium semble donc être bien corrélé à l'aluminium. Les écarts (Mg excès) par rapport à la droite moyenne des shales ne sont pas corrélés aux teneurs en carbonates.

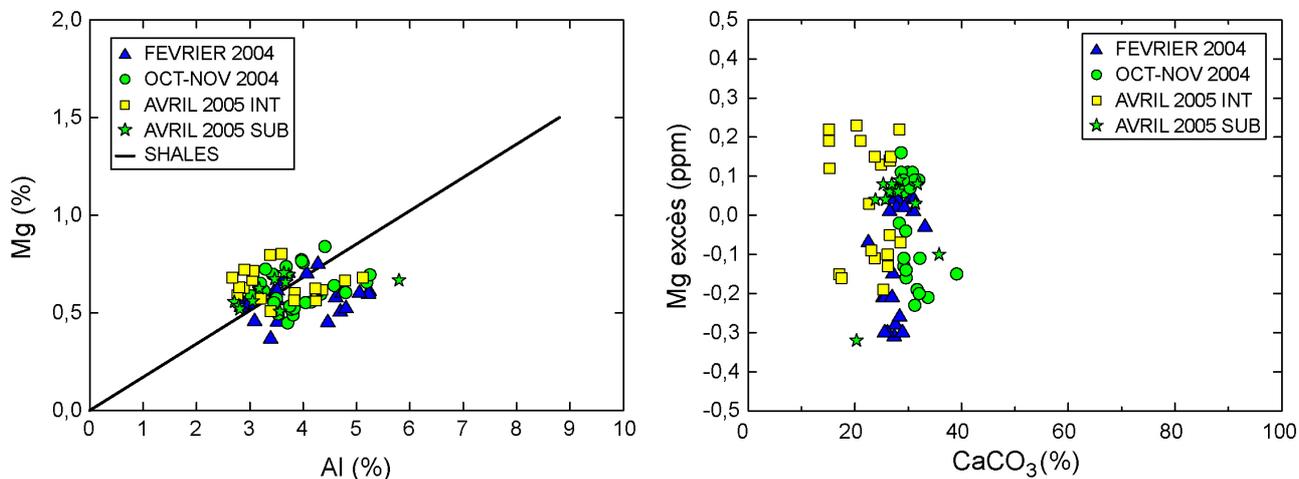


Figure 3.12. Relation entre les teneurs en Mg et Al pour les sédiments intertidaux et subtidaux de l'estuaire de la Seine.

- Le fer Fe :

Le fer est très bien corrélé à l'aluminium (Fig.3.13.). Le rapport moyen Fe/Al (0,60) est légèrement supérieur à celui des shales (0,54), pour les échantillons intertidaux (février 2004, octobre-novembre 2004) et subtidaux d'avril 2005. Le rapport moyen Fe/Al (0,40) pour les échantillons intertidaux prélevés en avril 2005 est légèrement inférieur à la référence shales, ce qui pourrait être expliqué par une nature minéralogique différente. L'hypothèse d'un dépôt plus ancien (de quelques mois ou quelques années) est à confirmer avec les autres caractéristiques géochimiques.

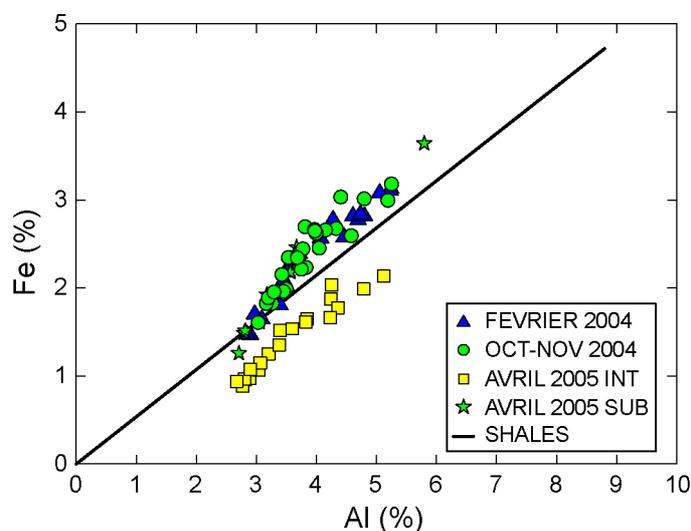


Figure 3.13. Relation entre les teneurs en Fe et Al pour les sédiments intertidaux et subtidaux de l'estuaire de la Seine.

- Le phosphore P et le titane Ti :

Comme déjà remarqué lors de l'analyse des facteurs d'enrichissement, le phosphore pour l'ensemble des échantillons intertidaux et subtidaux de l'estuaire de la Seine est très enrichi par rapport aux shales (Fig.3.14.). Cet excès peut être attribué aux phosphogypses qui ont été rejetés ou stockés dans la Seine jusqu'en 1986 (Chiffolleau *et al.*, 2001), et/ou à des processus

diagénétiques spécifiques des phosphates (précipitation de phosphates de calcium et de fer) dans les sédiments fins.

Le titane, comme le phosphate, a été rejeté par l'industrie dans l'estuaire (au rythme de 10 T/j dans les années 70, Chiffolleau *et al.*, 2001). Cela peut expliquer les teneurs élevées comparativement à celles du matériel de type shales. Les échantillons intertidaux d'avril 2005 présentent par ailleurs les plus fortes valeurs en titane. Ces valeurs plus élevées peuvent probablement s'expliquer par un sédiment fin érodé plus ancien, donc plus enrichi en titane que celui transporté actuellement et prélevé en 2004.

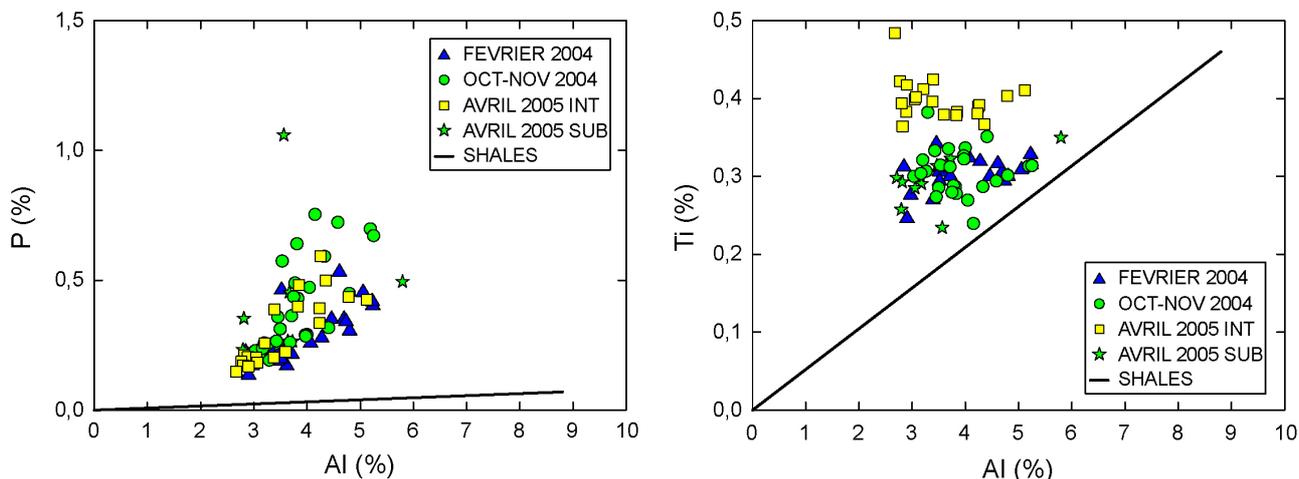


Figure 3.14. Relations entre les teneurs en P et Al, et les teneurs en Ti et Al pour les sédiments intertidaux et subtidaux de l'estuaire de la Seine.

I.3.3. Éléments en traces corrélés aux carbonates dans les sédiments

- Les carbonates dans les sédiments fins de l'estuaire de la Seine :

La figure 3.15. représente la teneur en carbonates dans les sédiments intertidaux et subtidaux de l'estuaire de la Seine. Il est à remarquer que les taux de carbonates varient peu entre l'amont et l'aval de l'estuaire : les valeurs se situent autour de 30 % (± 2 %) aussi bien pour les sédiments intertidaux que subtidaux. Seuls les sédiments prélevés sur les berges en avril 2005 ont des teneurs inférieures, autour de 20 % (± 4 %), fluctuant beaucoup le long de l'estuaire.

Ces résultats sont tout à fait cohérents avec ceux obtenus par Avoine (1981) dans l'estuaire aval de la Seine (26,5 à 31,5 %) et ceux de Larssonner et Hommeril (1967) entre le Havre et Rouen (28 à 32 %).

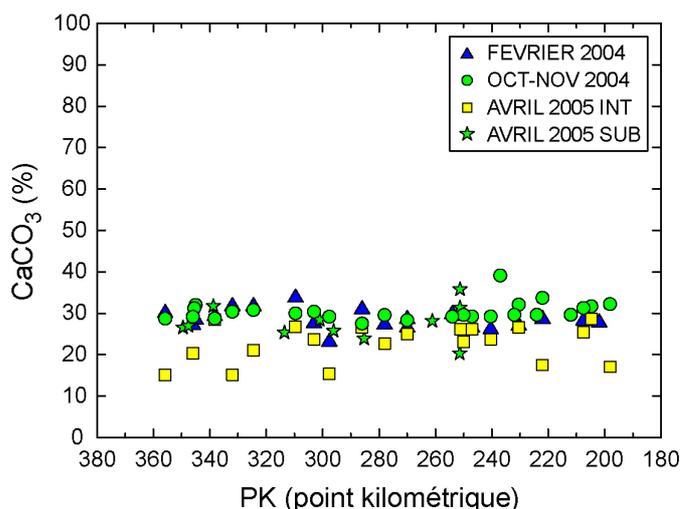


Figure 3.15. Répartition de la teneur en carbonates selon la distance pour les sédiments intertidaux et subtidaux de l'estuaire de la Seine.

Plus récemment, Lesourd (2000) estime le taux de carbonates à 30 % dans les sables et les sablons, et des proportions plus importantes dans les graviers et cailloutis au fond du chenal, la présence de tufs carbonatés dans les fractions grossières en serait la cause.

- Le strontium associé aux carbonates dans les sédiments :

La corrélation Sr-Al et la comparaison au matériel de type shales (Fig.3.16.) montrent que cet élément est très excédentaire dans l'ensemble de échantillons de l'estuaire de Seine. Un excès de strontium par rapport à la référence shales peut être calculé. L'excès ainsi obtenu n'est ni corrélé aux taux de carbonates pour les sédiments intertidaux de l'année 2004, et subtidaux d'avril 2005, et encore moins pour les échantillons intertidaux d'avril 2005.

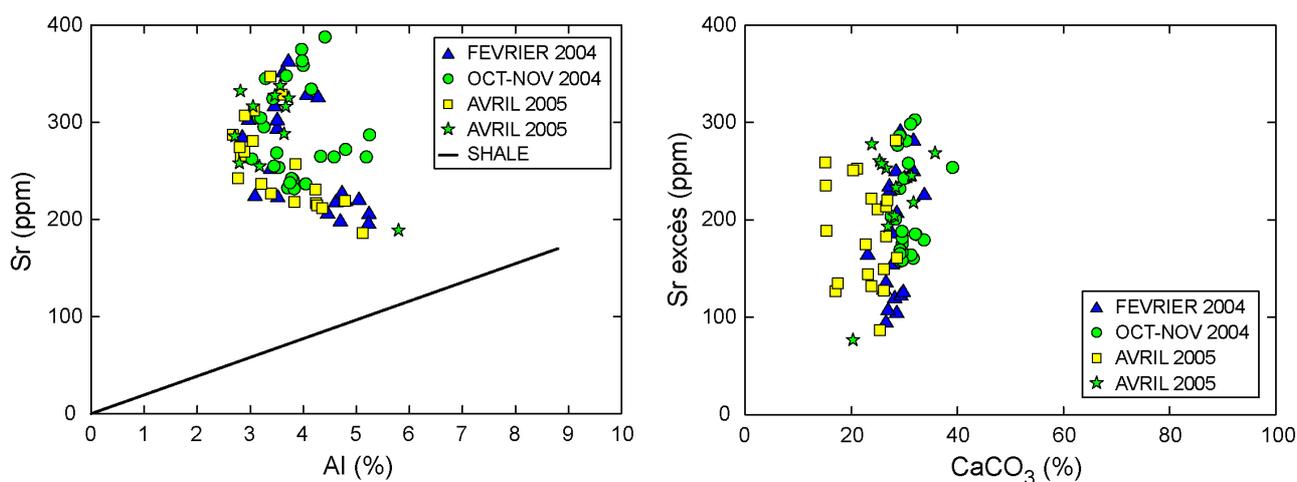


Figure 3.16. Relation entre les teneurs en Sr et Al pour les sédiments intertidaux et subtidaux de l'estuaire de la Seine.

I.3.4. Éléments en traces corrélés à l'aluminium dans les sédiments

Les éléments de ce groupe ont en commun de présenter une bonne corrélation avec l'aluminium ; cela signifie que leur abondance est essentiellement guidée par celle des aluminosilicates. Ils présentent de surcroît une grande analogie avec les shales ; il s'agit du Be, V, Co, Ga et Rb. Dans le cas du germanium (Ge), la corrélation à l'aluminium ne passe pas par l'origine. Cette observation rappelle celle rencontrée pour le potassium (K) et suggère des phases porteuses autres que les argiles, ou tout simplement la présence de quartz (Fig.3.17.). Le césium, par contre, est nettement enrichi par rapport aux shales : cela peut être dû à des spécificités locales naturelles (occurrence de minéraux porteurs spécifiques) ou anthropiques.

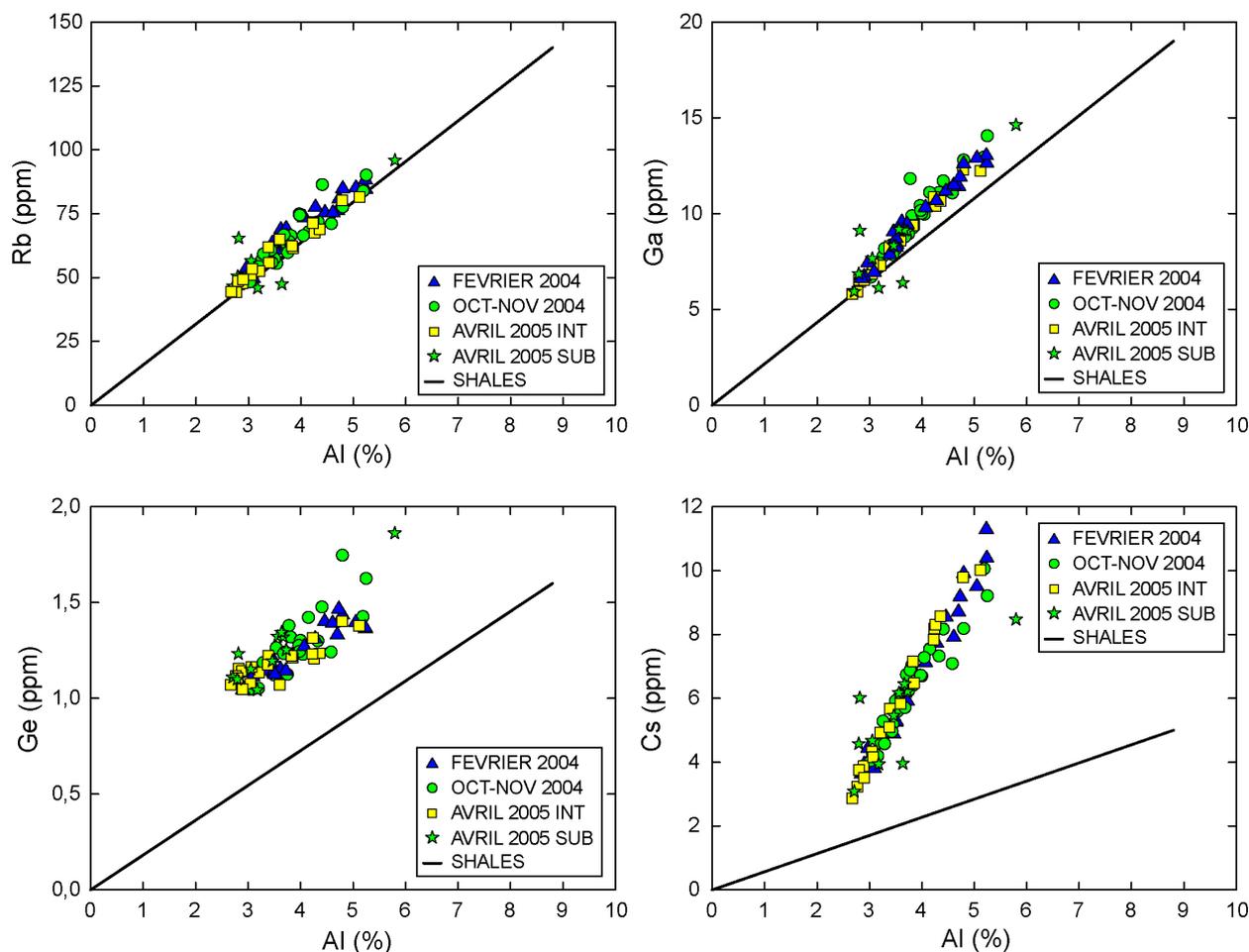


Figure 3.17. Corrélations à l'aluminium pour Rb, Ga, Ge et Cs pour les sédiments intertidaux et subtidaux de l'estuaire de la Seine.

I.3.5. Éléments dont la concentration est modulée par la présence de minéraux lourds

La corrélation Zr/Al montre que tous les échantillons ont des teneurs en excès par rapport à la référence shales (Fig.3.18.). Les teneurs les plus élevées se retrouvent pour les échantillons intertidaux de 2005. Cet excès en zirconium peut s'expliquer par la présence de minéraux lourds dans les échantillons ; de même que les concentrations en terres rares, tantale, thorium, uranium et, dans une moindre mesure, niobium, tungstène et yttrium qui sont modulées par l'abondance des minéraux lourds, contenus dans la fraction silteuse grossière la plus enrichie en quartz (Fig.3.19.). Cela se confirme avec la corrélation entre l'excès en Zr et celui en Si qui montre que plus l'excès en silicium est important, plus les teneurs en zirconium sont élevées. Ces teneurs sont d'autant plus élevées pour les sédiments intertidaux en 2005 qu'en 2004. La minéralogie de ces dépôts intertidaux en 2005 contient alors une fraction quartzreuse plus enrichie, voire probablement plus de minéraux lourds.

Or, les zircons ne sont pas les seules phases porteuses des éléments de ce groupe. En effet, l'excès de zirconium est bien corrélé à l'excès de titane (excepté pour un échantillon, de l'entrée du bassin des docks de Rouen), mais qui peut être porté également par des ilménites (TiO_2 , FeO , Fe_2O_3) ou des rutiles (TiO_2) souvent enrichis en terres rares (Fig.3.19.).

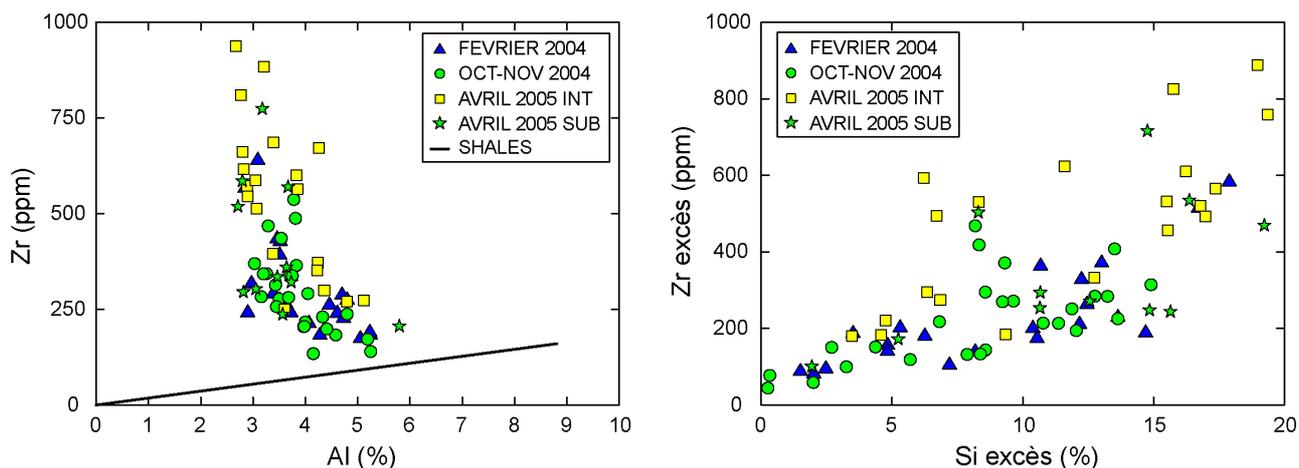


Figure 3.18. Corrélations à l'aluminium pour Zr et relation entre l'excès de Zr et Si pour les sédiments intertidaux et subtidaux de l'estuaire de la Seine.

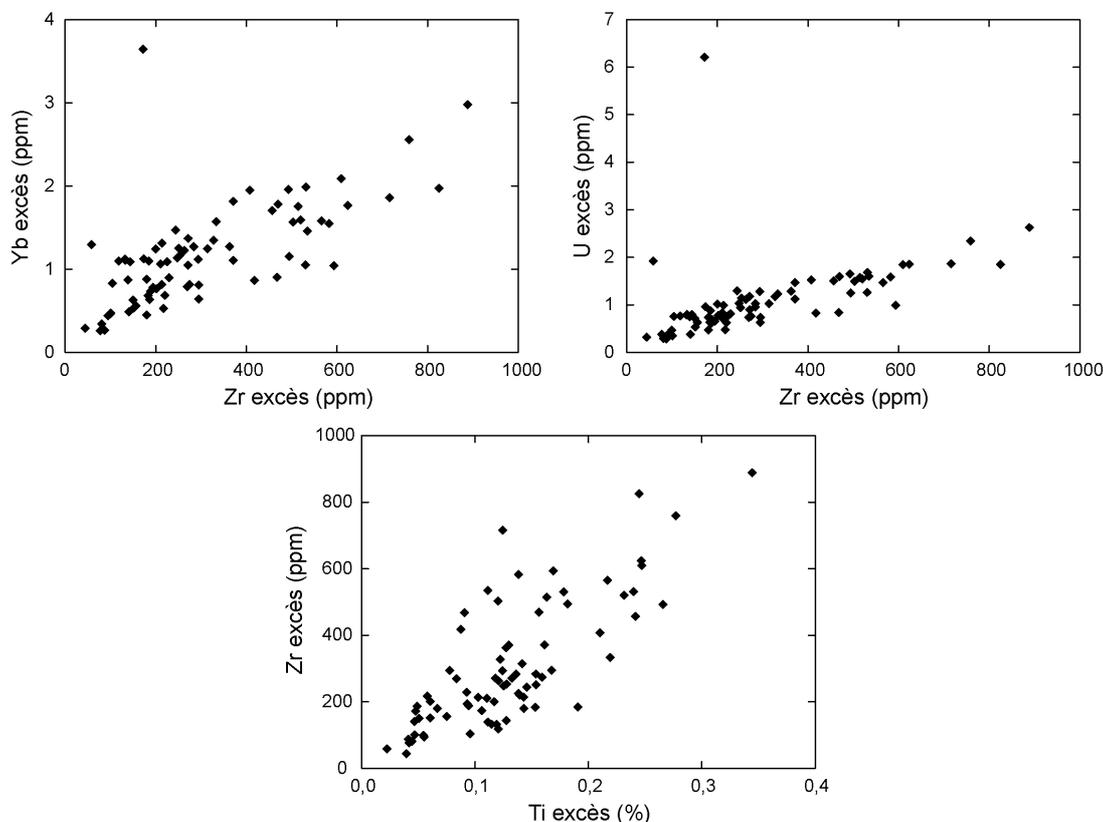


Figure 3.19. Relations entre et les excès de Yb, U avec les excès de Zr et les excès de Zr avec ceux de Ti, pour les sédiments intertidaux et subtidaux de l'estuaire de la Seine.

I.3.6. Éléments en traces très excédentaires par rapport aux shales

Les éléments de ce groupe ont en commun d'être enrichis à fortement enrichis par rapport aux shales ; ils sont pour la plupart habituellement reconnus comme des contaminants métalliques. Les corrélations à l'aluminium sont d'autant moins bonnes que l'excès par rapport aux shales est important ; c'est le cas pour les éléments observés lors de l'analyse des facteurs d'enrichissement, soit Zn, Cu, Cr, Cd, Sn, Sb, Pb et Bi (Fig.3.7. et 3.8., voir page 112).

Pour les 8 éléments, les teneurs en excès par rapport aux shales varient d'un facteur 2 à 4, voire plus. En comparant les différentes années de prélèvement, aucune variation significative n'apparaît. Seuls quelques échantillons, de 2004, en période de basses eaux saisonnières ont des teneurs plus élevées qu'en période de hautes eaux saisonnières. Ces échantillons correspondent aux sédiments pris autour de la zone voisine de Rouen (de Pont de l'Arche à Bardouville), auquel s'ajoute l'échantillon (AMON) recueilli en amont du barrage de Poses (Fig.3.20.).

En ce qui concerne les sédiments subtidiaux, les mêmes observations peuvent être faites : les valeurs les plus élevées correspondent aux sédiments prélevés dans la zone voisine de Rouen, sous influence industrielle. Parmi elles, un point correspond toujours aux plus fortes teneurs : le site à l'entrée du bassin des docks de Rouen, non utilisé actuellement par les navires et par là non dragué. Ici, les dépôts de vase s'y sont accumulés depuis des années. L'échantillon de l'entrée de ce bassin, extrait par benne, pourrait correspondre à des dépôts plus anciens que ceux des berges. Les très fortes valeurs rencontrées sont donc le résultat d'une accumulation de ces éléments, considérés comme " contaminants " pour certains.

D'une année sur l'autre, la signature géochimique des sédiments fins de l'estuaire de la Seine reste constante. Toutefois, quelques différences apparaissent selon les périodes hydrologiques de la Seine : les teneurs plus élevées dans l'estuaire amont sont mises en évidence en période de basses eaux saisonnières.

1.3.7. Éléments chimiques susceptibles de constituer des marqueurs discriminants de stocks particuliers

Pour être retenu comme marqueur de stock sédimentaire, un élément idéal doit être enrichi dans les sédiments, par rapport à la référence donnée, et présenter des valeurs très dispersées pour une zone géographique considérée. Sur ces critères, les éléments traces en fort excès par rapport aux shales semblent retenir l'attention.

La figure 3.21. (page 122) présente les facteurs d'enrichissement des éléments considérés précédemment, en fonction de la distance amont-aval (représenté en PK, Km) dans l'estuaire, en domaine intertidal et subtidal, et aux différentes époques d'échantillonnages.

Pour tous les éléments pré-sélectionnés précédemment, il apparaît un gradient décroissant depuis la zone la plus amont vers l'aval de l'estuaire de la Seine, aussi bien en domaine intertidal, qu'en domaine subtidal, et quelques soient les années. Les valeurs les plus élevées sont bien remarquables en échelle logarithmique et mettent en valeur la zone qui semble être une source de ces éléments dans la zone voisine de Rouen, sous influence industrielle (en amont du PK250, environ), ainsi que la partie la plus amont de l'estuaire de la Seine. Les teneurs élevées s'expliquent principalement par un apport de la Seine fluviale. Tessier (2003) a mis en évidence plusieurs éléments (Zn, Cr, Sb, Au et Ag) en fort excès dans la Seine en amont du barrage de Poses. Ces teneurs s'expliquent par un apport anthropique, probablement industriel et varient selon les phases de hautes eaux saisonnières et de basses eaux saisonnières du fleuve.

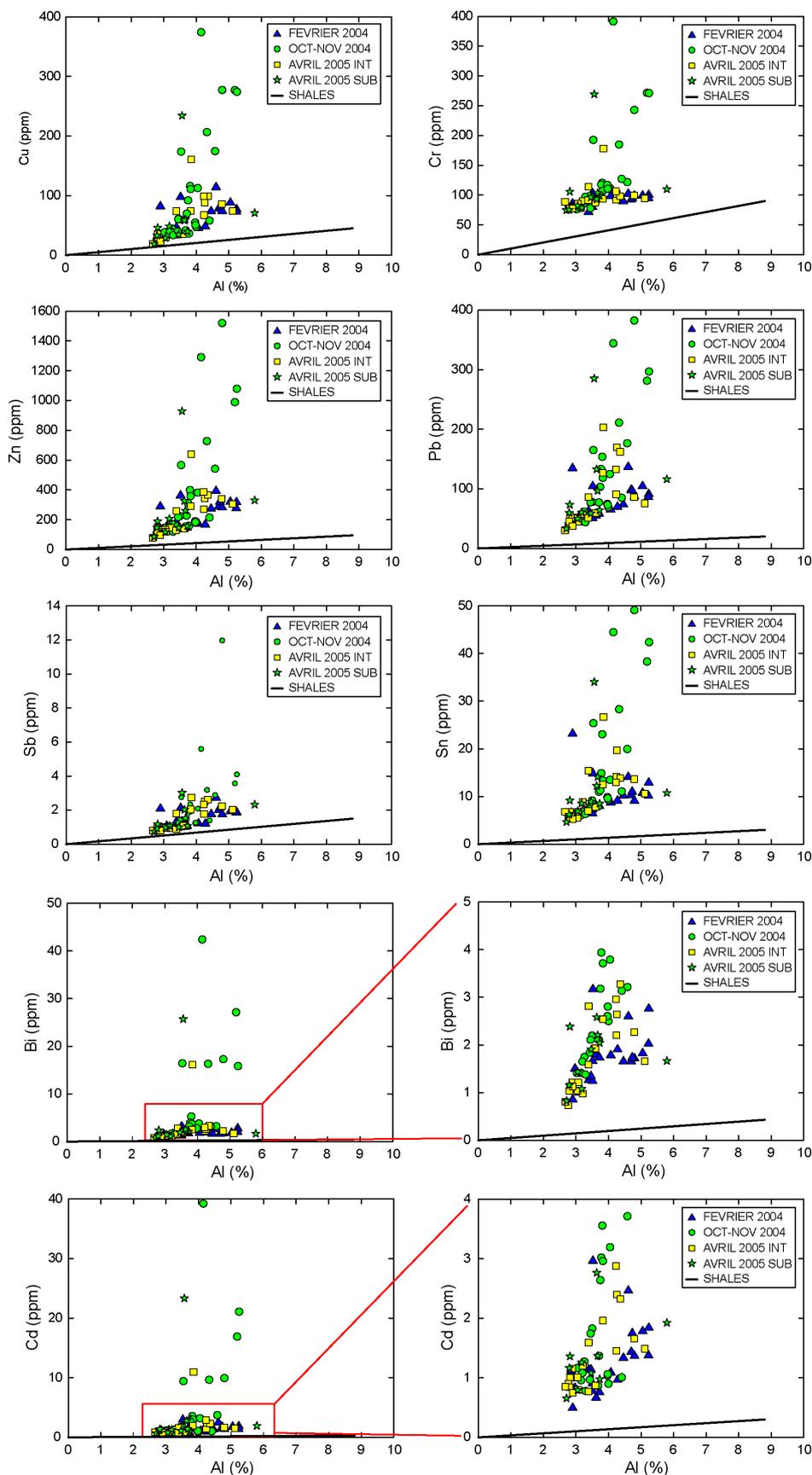


Figure 3.20. Corrélations à l'aluminium pour Zn, Cu, Cd, Cr, Sn, Sb, Pb et Bi pour les sédiments intertidaux et subtidaux de l'estuaire de la Seine. Des agrandissements sont présentés pour le Cd et le Bi (bas de la figure à droite).

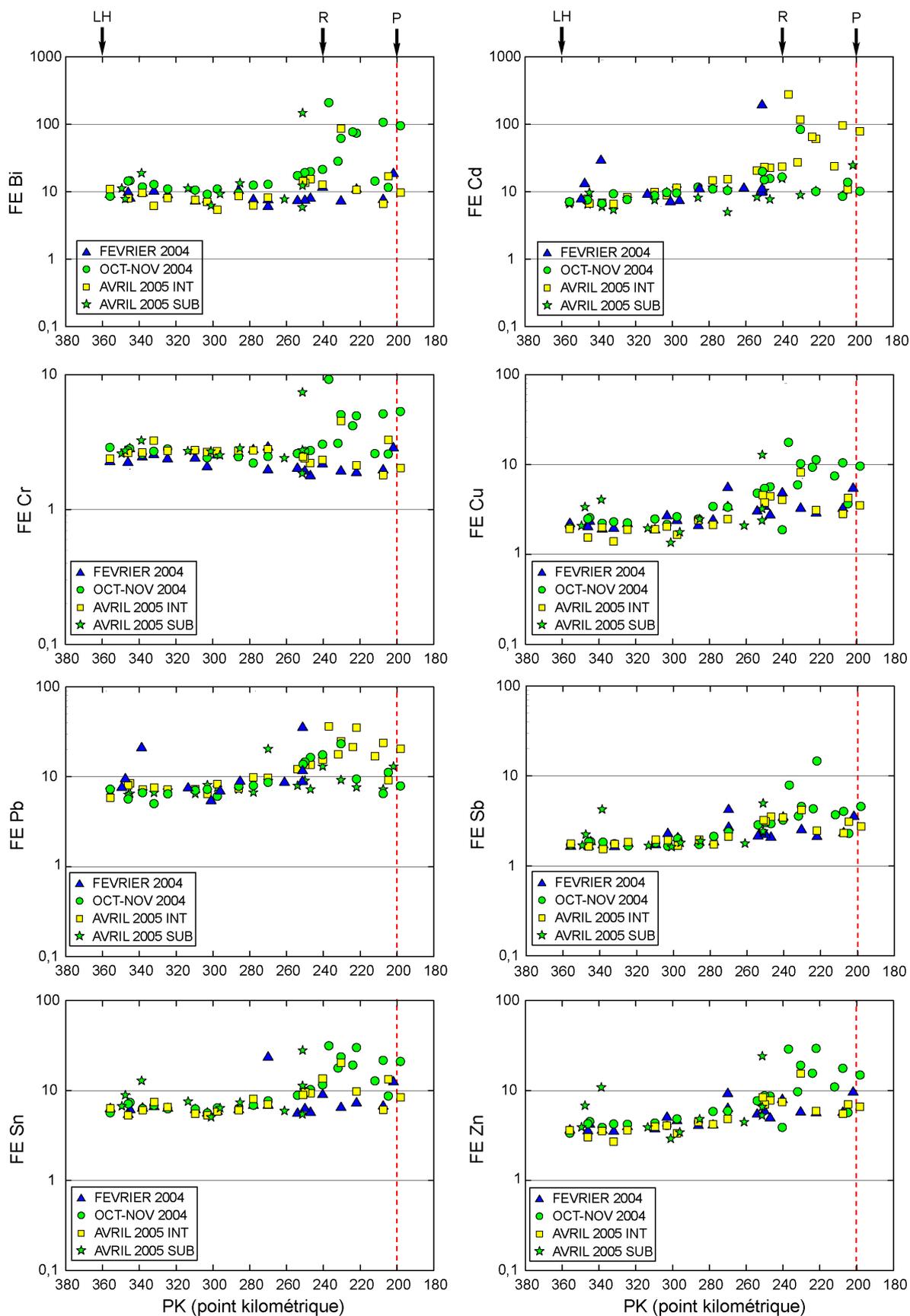


Figure 3.21. Facteurs d'enrichissement (FE) du Cd, Cu, Cr, Bi, Sn, Sb, Zn et Pb portés en fonction de la distance (PK) pour tous les échantillons prélevés en domaine intertidal et subtidal de l'estuaire de la Seine. LH : Le Havre, R : Rouen, P : Poses. La ligne rouge en pointillés situe le barrage à Poses.

Dans la partie aval de l'estuaire, si les teneurs sont plus faibles, elles restent néanmoins relativement constantes entre les PK250-260 et l'embouchure de la Seine. Cela suppose qu'il n'existe pas, a priori, de sources secondaires de ces quelques éléments, dans la partie aval ; cela incite à penser que ces valeurs mesurées sont le résultat d'un mélange de particules : des particules fines fluviales avec des particules fines d'origine marine probablement.

Cette tendance est confirmée par l'analyse des données géochimiques acquises, depuis 1980, par la cellule anti-pollution du port autonome de Rouen sur des échantillons de sédiments bruts (sable-silt-argile) récoltés en domaine intertidal, généralement en période de basses eaux saisonnières (Fig.3.22.). Les teneurs les plus fortes se situent dans l'estuaire amont et les teneurs les plus faibles dans l'estuaire aval. À chaque période d'échantillonnage, il se distingue depuis l'estuaire amont, une zone de transition autour des PK260 et PK300, où les teneurs diminuent pour se stabiliser dans l'estuaire aval.

Du point de vue géochimique, l'estuaire de la Seine se divise en trois ensembles (Fig.3.22.) :

- une zone comprise entre la Seine fluviale et le PK260, et est considérée comme source du domaine fluvial pour le reste du système estuarien,
- une zone de transition entre les PK 260 et PK300 (zone en vert sur la figure 3.22.), où le matériel fluvial transite vers l'estuaire aval,
- une zone de mélange entre le PK300 et l'embouchure, où le mélange de particules fines d'origine marine et d'origine fluviale s'effectue.

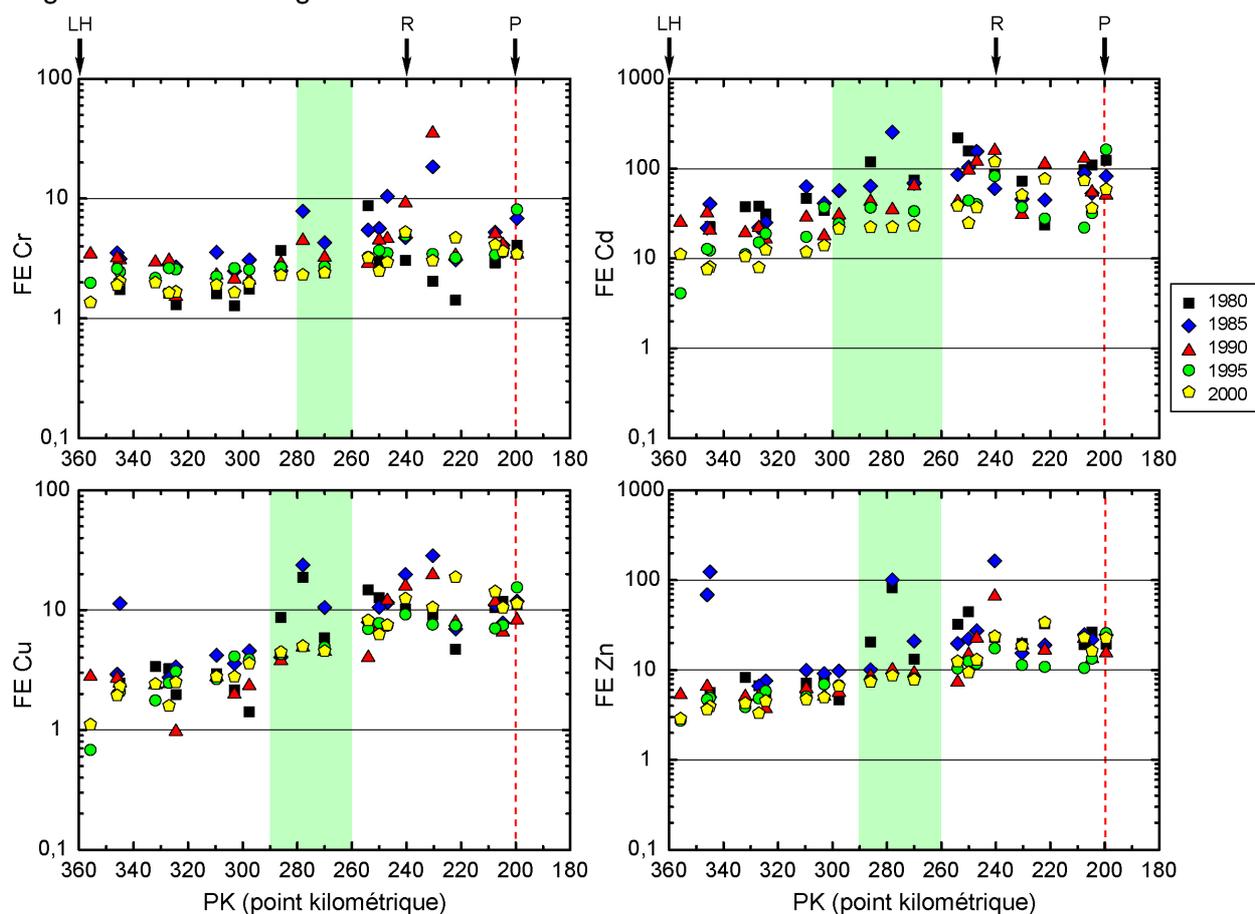


Figure 3.22. Facteurs d'enrichissement (FE) du Cr, Cd, Cu et Zn portés en fonction de la distance (PK) pour les échantillons prélevés en domaine intertidal de l'estuaire de la Seine, entre 1980 et 2000 (Données Cellule Anti-Pollution du port de Rouen). LH : Le Havre, R : Rouen, P : Poses. La ligne rouge en pointillés situe le barrage à Poses. La zone en vert indique la position de la zone de transition.

Les différentes observations sur les résultats des éléments majeurs-mineurs-traces tendent à confirmer que ces éléments peuvent être de bons marqueurs particuliers du domaine fluvial de la Seine. Sur les huit éléments pré-sélectionnés, zinc, antimoine, cadmium et cuivre semblent être les meilleurs discriminants, tout du moins dans l'estuaire de la Seine, puisque que leur gradient décroissant est nettement plus prononcé. Il reste à savoir si cette tendance et ces observations se retrouvent en baie de Seine, sur le littoral bas-normand et dans les cours d'eau côtiers.

I.4. Distribution des radionucléides naturels et artificiels dans les sédiments de l'estuaire de la Seine

I.4.1. Résultats bruts

Pour rappel, le cobalt 60 (^{60}Co), le césium 137 (^{137}Cs) et l'américium 241 (^{241}Am) sont des radionucléides artificiels ; respectivement leur période radioactive est de 5,27 ans, 30,15 ans et 432 ans.

Ils sont introduits dans l'estuaire :

- depuis l'amont : le ^{137}Cs provient des retombées d'essais d'armes nucléaires dans l'atmosphère, et le ^{60}Co est rejeté dans la Seine par la centrale de Nogent,
- depuis l'aval : le ^{60}Co , le ^{137}Cs et l' ^{241}Am proviennent des rejets contrôlés effectués en mer par l'usine de retraitement des combustibles usés AREVA située au cap de La Hague et le site nucléaire de Winfrith.

Le potassium 40 (^{40}K) est un radionucléide naturel de longue période ($1,26 \times 10^9$ ans) qui a le comportement et les phases porteuses de son isotope stable, le potassium 39 (^{39}K).

Les graphiques ci-dessous (Fig.3.23.) représentent les activités de ces radionucléides, dans les sédiments intertidaux et subtidaux, entre le PK380 dans l'estuaire de la Seine en 2004 (en période de post hautes eaux saisonnières et de basses eaux saisonnières) et en 2005.

Les activités en ^{40}K oscillent entre 300 et 400 Bq.kg^{-1} pour les années 2004 et 2005. Les activités les plus faibles, autour de 300 Bq.kg^{-1} , se situent toujours dans la zone comprise entre les PK250 et PK300 (PK260-PK300 pour les échantillons de février 2004 ; entre PK250-PK290, pour les sédiments d'octobre-novembre 2004 ; et PK260-PK290 pour les échantillons intertidaux et subtidaux d'avril 2005). Puisque les activités en ^{40}K varient peu alors que les conditions de prélèvements sont très différentes et que la même tendance est observée, le stock sédimentaire dans cette portion de l'estuaire (entre les PK250 et PK300) doit avoir une nature minéralogique différente de celui de l'estuaire amont et de l'estuaire aval.

En revanche, les activités des échantillons subtidaux de l'estuaire fluctuent beaucoup pour une même zone d'échantillonnage. Ces variations montrent la grande variabilité des faciès sédimentaires pour une même zone de l'estuaire. Les sédiments prélevés sont soit plus anciens, soit ont une composition minéralogique totalement différente.

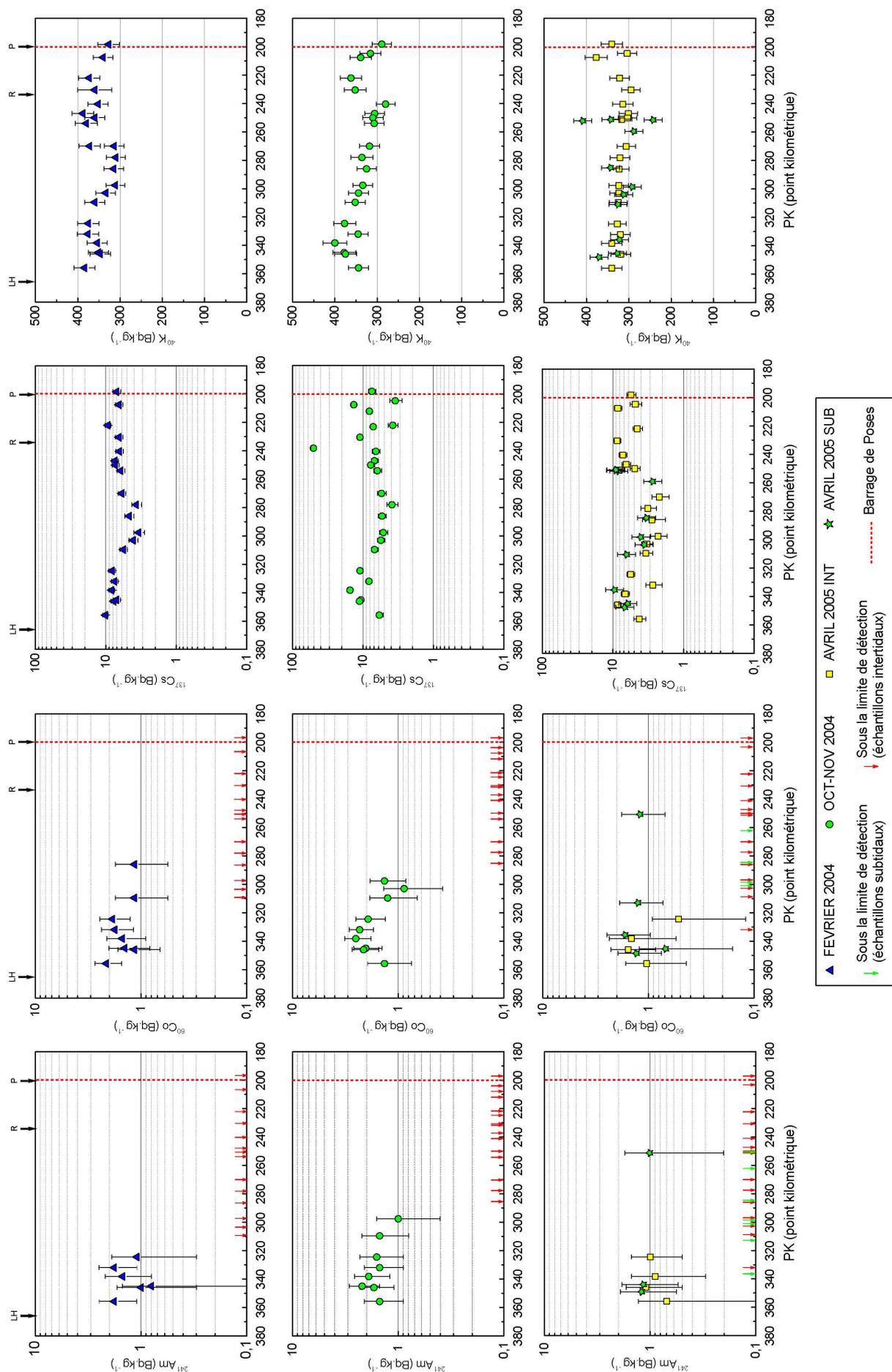


Figure 3.23. Activités du ^{241}Am , du ^{60}Co , du ^{137}Cs et du ^{40}K mesurées dans les sédiments des berges de l'estuaire de la Seine en 2004 et 2005 (toutes les activités ont été référencées au 1 janvier 2005).

Les activités en ^{137}Cs mesurées dans les sédiments des berges de l'estuaire de la Seine sont comprises entre 3 et 10 Bq.kg^{-1} pour février 2004, entre 3 et 18 Bq.kg^{-1} pour octobre-novembre 2004, entre 2 et 10 Bq.kg^{-1} pour avril 2005. Les activités en ^{137}Cs confirment la même tendance spatiale observée avec les mesures en ^{40}K : c'est la zone située encore entre les PK250 et PK310. En revanche, les mesures en ^{137}Cs des sédiments intertidaux et subtidaux restent concordantes. Ponctuellement, on note une valeur très élevée pour l'échantillon prélevé dans une île en amont de Rouen au PK237 : 52 Bq.kg^{-1} . Il est probable que cette anomalie soit due à une remobilisation de sédiments marqués par les retombées de Tchernobyl. Une réintroduction périodique de matériel ancien plus marqué en ^{137}Cs à partir de sédiments remobilisés dans le lit du fleuve ou à partir des surfaces exposées du bassin versant peut expliquer la dispersion des activités mesurées.

Le ^{60}Co et l' ^{241}Am , mesurés dans les sédiments intertidaux de l'estuaire, sont détectés jusqu'au PK285. La même tendance est observée entre les différentes périodes d'échantillonnage. Cela signifie donc que du matériel fin d'origine marine pénètre dans l'estuaire de la Seine, au moins dans une bonne partie de l'estuaire aval. La présence de ces particules fines marines peut être suspectée dans l'estuaire amont puisque les mesures en ^{60}Co dans les échantillons subtidaux d'avril 2005 sont significatives jusqu'au PK250.

1.4.2. Corrélations entre radionucléides

L'analyse des corrélations entre radionucléides permet de comprendre leurs modes d'association aux particules fines et la dynamique des stocks sédimentaires auxquels ils sont associés. La figure 3.24., ci-dessous, présente les corrélations inter-radionucléides pour tous les sédiments des berges et du domaine subtidal de l'estuaire de la Seine en 2004 (février et octobre-novembre) et 2005 (avril). La valeur en ^{137}Cs de 52 Bq.kg^{-1} a été volontairement enlevée des graphiques. Pour l'ensemble des échantillons, la corrélation ^{137}Cs - ^{40}K indique une certaine homogénéité du stock particulaire dans l'estuaire de la Seine. La corrélation indique également que la présence de ^{40}K n'est pas seulement liée à la fixation du ^{137}Cs ; en effet, lorsque l'activité en ^{137}Cs est nulle, l'activité en ^{40}K est de l'ordre de 260 Bq.kg^{-1} . Le ^{40}K n'est donc pas uniquement lié à la fraction fine des échantillons, soit principalement aux phyllosilicates, et peut être contenu par d'autres minéraux, tels que les feldspaths potassiques, par exemple. La même tendance est observée pour le ^{60}Co .

La corrélation ^{60}Co - ^{137}Cs indique un accroissement en ^{60}Co relativement au ^{137}Cs pour les quelques sédiments prélevés en 2004, notamment en basses eaux saisonnières (octobre-novembre 2004). Ceci est probablement dû à l'apport de particules fines marquées par ce radionucléide en provenance de la Manche (Boust *et al.*, 1999 ; Boust *et al.*, 2002).

La corrélation ^{241}Am - ^{60}Co indique un stock particulaire très homogène, ce qui est tout à fait compréhensible, ces deux radionucléides provenant d'un même stock sédimentaire de la Manche, sont marqués par les rejets de l'usine de retraits des combustibles usés située au Cap de la Hague.

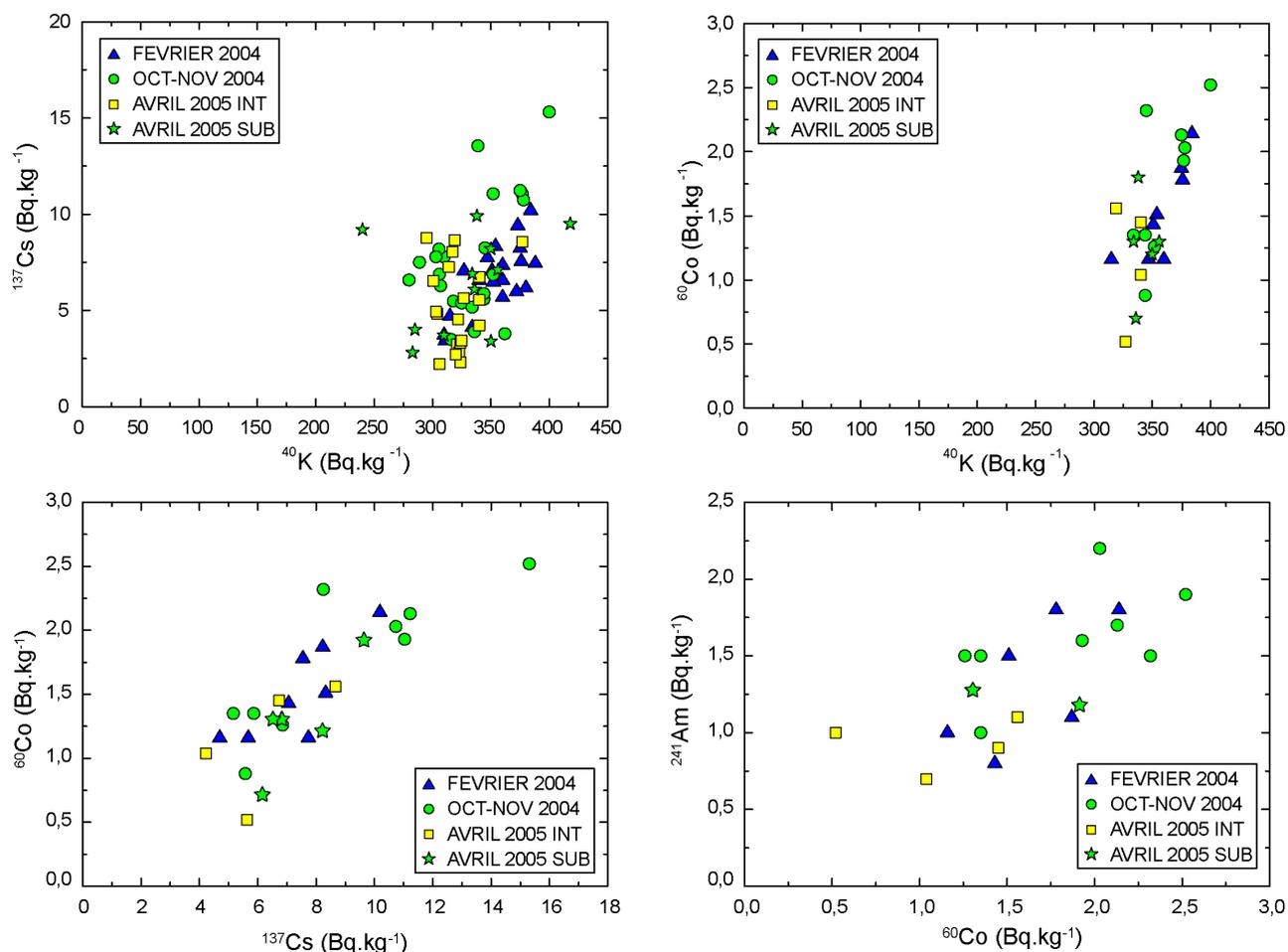


Figure 3.24. Quelques corrélations entre des radionucléides naturels (^{40}K) et artificielles (^{60}Co , ^{137}Cs et ^{241}Am) dans les fractions fines des sédiments intertidaux et subtidaux de l'estuaire de la Seine en 2004 et 2005.

I.4.3. Corrélations des radionucléides à l'aluminium

Les représentations des activités en ^{137}Cs et en ^{60}Co avec l'aluminium montre de belles corrélations (Fig.3.25.). Cela signifie que pour une même fraction fine, le sédiment peut contenir des activités dans une gamme assez large, mais également que les phases porteuses de ces radionucléides, essentiellement les argiles, sont bien contenues dans la fraction fine. Les concentrations en ^{137}Cs et en ^{60}Co varient alors essentiellement en réponse à la nature minéralogique et/ou granulométrique.

L'évolution longitudinale des rapports $^{137}\text{Cs}/\text{Al}$ et $^{60}\text{Co}/\text{Al}$ (Fig.3.25.) confirment les tendances décrites pour les activités brutes (Fig.3.23.), avec une moindre dispersion des valeurs (la valeur de 52 Bq.kg^{-1} a été volontairement enlevée des graphiques) :

- pour le ^{137}Cs , le rapport décroît de l'embouchure jusqu'au PK270 et devient très dispersé dans l'estuaire amont,
- pour le ^{60}Co , le rapport décroît légèrement de la même manière que celui du ^{137}Cs jusqu'au PK285, au-delà le ^{60}Co n'est plus détecté (l'échantillon au PK250 indique la présence de particules fines d'origine marine, mais le pourcentage d'erreur est nettement supérieur à la valeur mesurée).

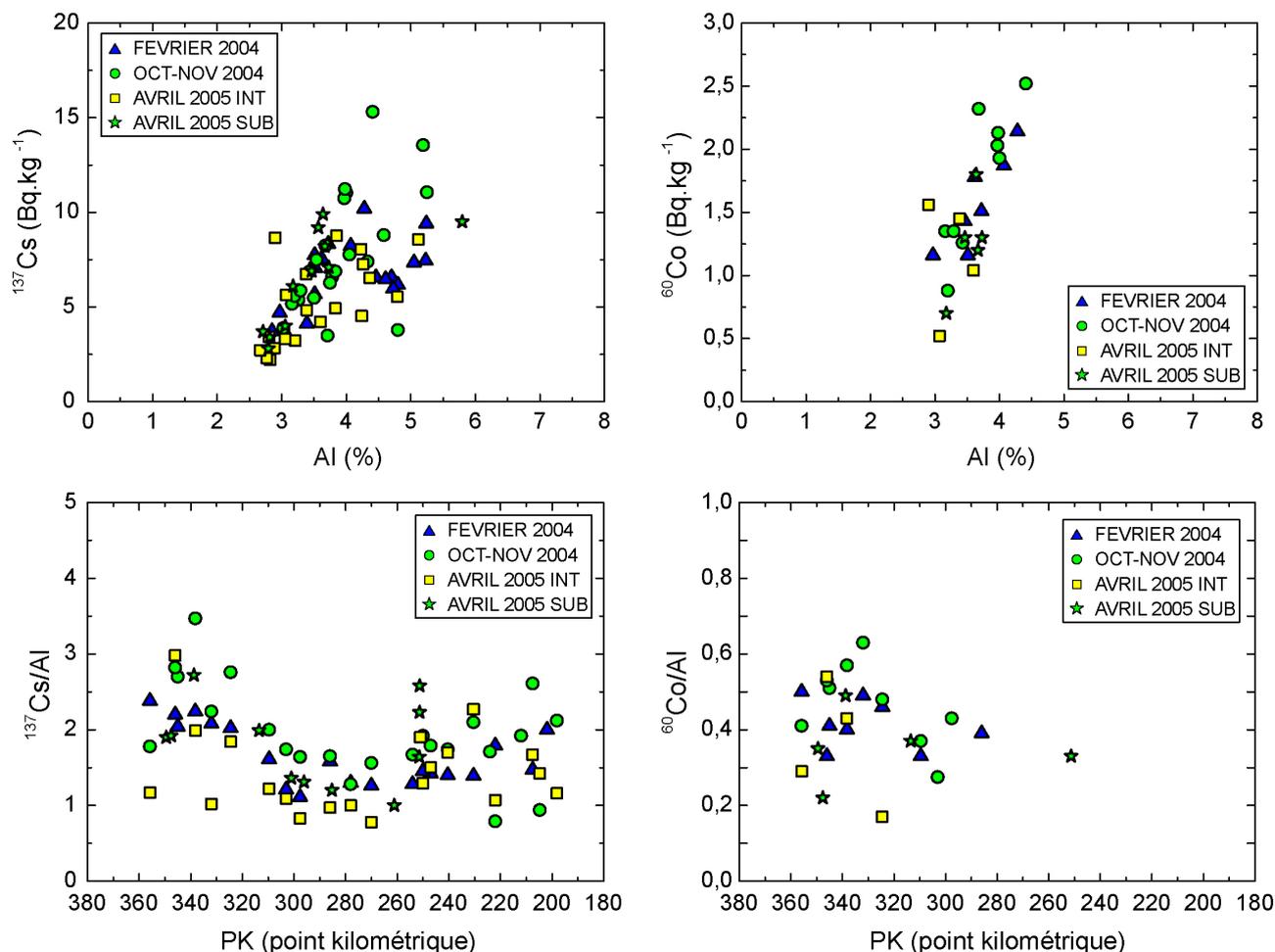


Figure 3.25. Corrélations ^{137}Cs -Al et ^{60}Co -Al, et représentations des rapports $^{137}\text{Cs}/\text{Al}$ et $^{60}\text{Co}/\text{Al}$ selon le PK (point kilométrique) pour les sédiments intertidaux et subtidaux de l'estuaire de la Seine en 2004 et 2005.

I.4.4. Rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$

La difficulté d'utiliser le ^{40}K comme élément de normalisation, qui aurait permis de s'affranchir des variations d'activités liées à la seule abondance de la fraction fine, conduit à préférer calculer des rapports d'activités. Comme l'américium 241 est souvent détecté avec une erreur relativement importante, induisant une forte imprécision dans le rapport $^{241}\text{Am}/^{137}\text{Cs}$, seul le rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ sera ensuite considéré. La figure 3.26. donne l'évolution du rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ en fonction de la distance dans l'estuaire de la Seine, pour les années 2004 (post hautes eaux saisonnières : février 2004 et basses eaux saisonnières : octobre-novembre 2004) et 2005 (avril).

Entre les PK180 (station en amont du barrage de Poses) et PK280 (entre Duclair et le Mesnil-sous-Jumièges), le ^{60}Co n'est pas détecté dans les sédiments, soit il est absent, ses activités se situant en dessous de la limite de détection du spectromètre gamma (symbolisées par des flèches rouges et vertes sur la figure 3.26.).

Entre les PK280 et 360, le rapport se situe aux environs de 0,2 quelle que soit la période de prélèvement des sédiments. Il apparaît néanmoins que le ^{60}Co a été détecté plus en amont dans l'estuaire en 2004 qu'en 2005, avec une pénétration de particules fines marines (marquées par le ^{60}Co uniquement) jusqu'au Mesnil-sous-Jumièges. En 2005, il n'est détecté que jusqu'à Quillebeuf (PK320) en domaine intertidal et jusqu'au PK250 en domaine subtidal.

La présence de particules fines marines, grâce à l'utilisation du cobalt 60 comme marqueur particulaire, avait déjà été observée antérieurement sur des matières en suspension et des sédiments superficiels (Guézennec *et al.*, 1999) et sur des sédiments bruts des berges de la Seine (Boust *et al.*, 2002), où le ^{60}Co avait pu être détecté jusqu'à Rouen pour les sédiments intertidaux, soit à près de 120 Km de l'embouchure de l'estuaire de la Seine.

Ces différentes observations confirment encore une fois de plus la présence de particules fines d'origine marine dans le stock de particules fines fluviales, constituant les envasements des berges du fleuve. La partie aval de l'estuaire de la Seine présente donc des envasements d'une double origine, marine et fluviale, avec la présence de particules fines marines jusqu'au Mesnil-sous-Jumièges (pour ce qui concerne cette présente étude).

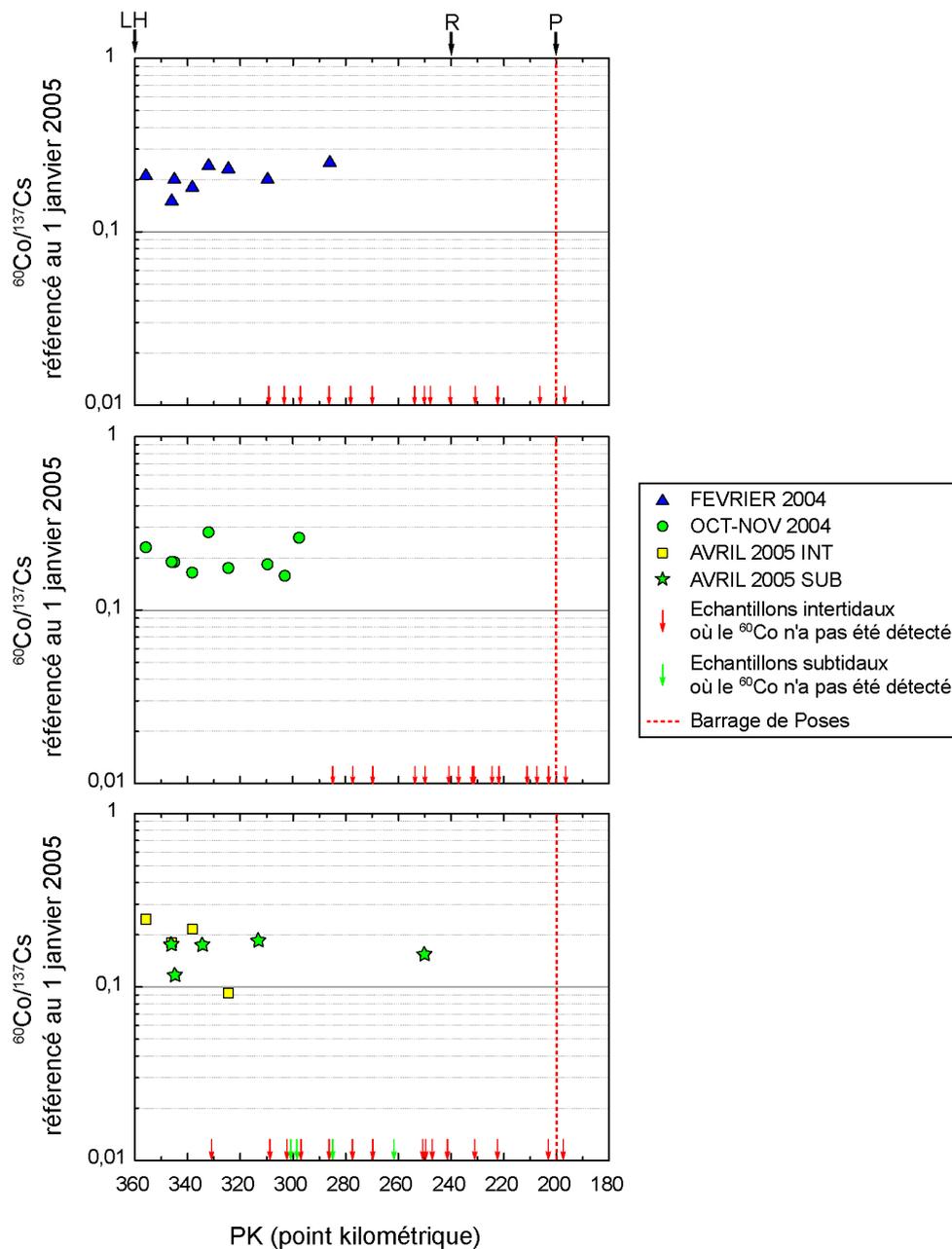


Figure 3.26. Evolution du rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ dans les fractions fines des sédiments des berges de la Seine, en 2004 et 2005 en fonction de la distance (PK). LH : Le Havre, R : Rouen et P : Barrage de Poses.

L'estuaire de la Seine

Granulométrie de la fraction fine des sédiments intertidaux et subtidaux

La granulométrie des sédiments meubles dans l'estuaire de la Seine présente des variations d'amont en aval. Trois zones géographiques se distinguent :

- de l'amont du barrage de Poses à Duclair, les silts moyens à grossiers dominent.
- du Mesnil-sous-Jumièges à Caudebec-en-Caux, les silts fins et grossiers sont rencontrés
- de Vieux Port à Honfleur, les silts fins font place aux silts très fins, les silts grossiers étant quant à eux toujours présents.

Ces répartitions géographiques et granulométriques restent similaires quelles que soient les conditions hydrologiques de la Seine et ne varient pas d'une année sur l'autre.

Minéralogie argileuse de la fraction fine des sédiments intertidaux et subtidaux

L'étude des minéraux argileux dans l'estuaire de la Seine montre un cortège minéralogique argileux moyen composé de 50 % de smectites, 15 à 20 % d'illite, 25 à 35 % de kaolinite, 5 % de minéral interstratifié (10-C) et d'autres minéraux interstratifiés tels que (C-Sm) et (C-Cg).

Les indices de cristallinité de l'illite montrent que celle-ci est mieux cristallisée en 2004 qu'en 2005 et suggère qu'un stock sédimentaire nouveau a été introduit dans le système entre ces deux périodes où les conditions hydrologiques de la Seine sont contrastées. En revanche, les indices de cristallinité homogènes des smectites ne permettent pas de confirmer cette tendance.

Le cortège moyen des minéraux argileux pour les sédiments récents de l'estuaire de la Seine est le résultat de la convergence de l'érosion des formations superficielles (loess pléistocènes) et du drainage du bassin versant de la Seine (craies et argiles à silex crétacées). Du fait de la faible diversité des minéraux argileux et du manque d'un minéral discriminant dans les différentes formations géologiques, le marquage particulière par les minéraux argileux dans l'estuaire de la Seine reste à ce jour inapproprié.

Les éléments majeurs-mineurs-traces dans la fraction fine des sédiments intertidaux et subtidaux

Les éléments majeurs-mineurs-traces permettent de caractériser d'un point de vue géochimique tous les sédiments intertidaux et subtidaux de l'estuaire de la Seine. Ils permettent dans l'estuaire :

- d'établir une " carte d'identité chimique " des sédiments fins ;
- de distinguer une zone hétérogène dans l'estuaire amont (entre les PK200 et PK250), une zone de transition (entre les PK250 et PK310), puis une zone homogène dans le reste de l'estuaire aval (du PK310 à l'embouchure de l'estuaire). Deux stocks sédimentaires principaux sont donc présents dans l'estuaire de la Seine ;
- de définir une zone enrichie en quelques éléments chimiques (Zn, Cu, Cd, Pb, Bi, Sn, Sb) dans la zone industrielle voisine de Rouen, dans l'estuaire en amont de Rouen et dans la Seine fluviale.

Ces éléments en excès semblent être de bons marqueurs particuliers du domaine fluvial.

Les radionucléides dans la fraction fine des sédiments intertidaux et subtidaux

La recherche de marqueurs particuliers parmi les radionucléides semble acquise depuis que les radionucléides artificiels (^{60}Co , ^{137}Cs et ^{241}Am) rejetés par l'usine de retraits des combustibles usés AREVA au Cap de la Hague (Nord Cotentin) sont devenus pour les chercheurs d'excellents traceurs du domaine marin.

Leur étude (tant pour les radionucléides artificiels que naturel (^{40}K)) dans les sédiments permet de montrer l'affinité existante entre la fraction argileuse et les radionucléides. La distinction entre les PK250 et PK310 d'une zone de transition est à nouveau identifiée, là où les teneurs plus faibles en ^{137}Cs et en ^{40}K suggèrent ici une nature minéralogique différente du reste de l'estuaire de la Seine.

Enfin, l'utilisation du rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ met clairement en évidence la pénétration de matériel fin d'origine marine jusqu'au PK285 en domaine intertidal et jusqu'au PK250 en domaine subtidal, soit 100 Km à l'intérieur de l'estuaire de la Seine.

II – La baie de Seine et le littoral bas-normand

Cette deuxième partie du chapitre 3 se focalise sur la baie de Seine et la façade littorale bas-normande. Les résultats acquis pour chaque marqueur particulaire potentiel sont successivement détaillés et interprétés. Les caractéristiques sédimentaires, minéralogiques et géochimiques permettent ainsi de mieux cerner le fonctionnement sédimentaire des particules fines en domaine intertidal et subtidal, dans la baie de Seine, et d'évaluer la contribution des différentes sources dans la sédimentation fine actuelle.

II.1. Caractéristiques granulométriques des sédiments en baie de Seine et sur le littoral bas-normand

Rappelons que seule la fraction < 50 µm des échantillons récoltés, non représentative du site, est détaillée ensuite. Le littoral bas-normand est découpé arbitrairement en deux zones géographiques : la zone est (de l'embouchure de l'estuaire de la Seine à Courseulles-sur-Mer) et la zone ouest (de Courseulles-sur-Mer à Cherbourg). Les caractéristiques granulométriques en baie de Seine, quant à elles, sont définies selon la cartographie des classes granulométriques qui constituent la fraction pélagique.

II.1.1. Zone ouest du littoral bas-normand

Cette zone concerne les stations de prélèvement entre Courseulles-sur-Mer et Cherbourg. La figure 3.27. résume les courbes granulométriques de la fraction fine des différentes stations échantillonnées en juin 2004 et avril 2005, sur cette section ouest du littoral bas-normand.

D'une manière générale, entre Courseulles-sur-Mer (COUS) et Brévands (BREV) en baie des Veys, la distribution granulométrique de la fraction fine est assez proche. Deux populations granulométriques prédominent : les silts fins (8-16 µm) et les silts grossiers (32-50 µm). Il est à noter également la présence d'une quantité significative d'argiles (0-4 µm), essentiellement pour les stations au sud ouest de la baie de Seine (PTBS, Port-en-Bessin et COUS, Courseulles-sur-Mer).

En remontant vers le nord du Cotentin, les populations granulométriques changent. Les fractions fines des stations VAAS (Saint-Vaast-La-Hougue) et JONV (Jonville) conservent une prédominance des silts fins mais la bimodalité s'accroît, avec des silts grossiers tendant vers 50 µm voire plus. À la pointe du Cotentin, aux stations BARF (Barfleur) et CHER (Cherbourg), les courbes granulométriques ne présentent principalement qu'une seule population granulométrique : les silts grossiers, ce qui illustre un accroissement des tailles de particules.

Sur ce tronçon du littoral bas-normand, un échantillon, dit " fossile ", a été prélevé. Il s'agit des Marnes de Port-en-Bessin (PTBSM), dont la fraction fine est constituée de l'ensemble des classes granulométriques : argiles, silts fins à très fins, silts moyens et grossiers.

Quant à l'échantillon SAIR (embouchure de la Saire), la fraction fine est principalement dominée par les silts moyens à grossiers.

La comparaison des résultats montre qu'aucune variation des populations granulométriques n'existe entre les deux périodes d'échantillonnage : la fraction fine reste identique pendant ces deux années. En revanche, il est intéressant de souligner que la fraction fine évolue progressivement de trois modes granulométriques, au sud-ouest de la baie, vers deux modes au

nord Cotentin, puis à un unique mode à la pointe du Cotentin. Selon la même tendance géographique, les particules les plus fines (argiles et silts fins à très fins) disparaissent progressivement au profit de particules fines plus grossières (silts moyens à grossiers).

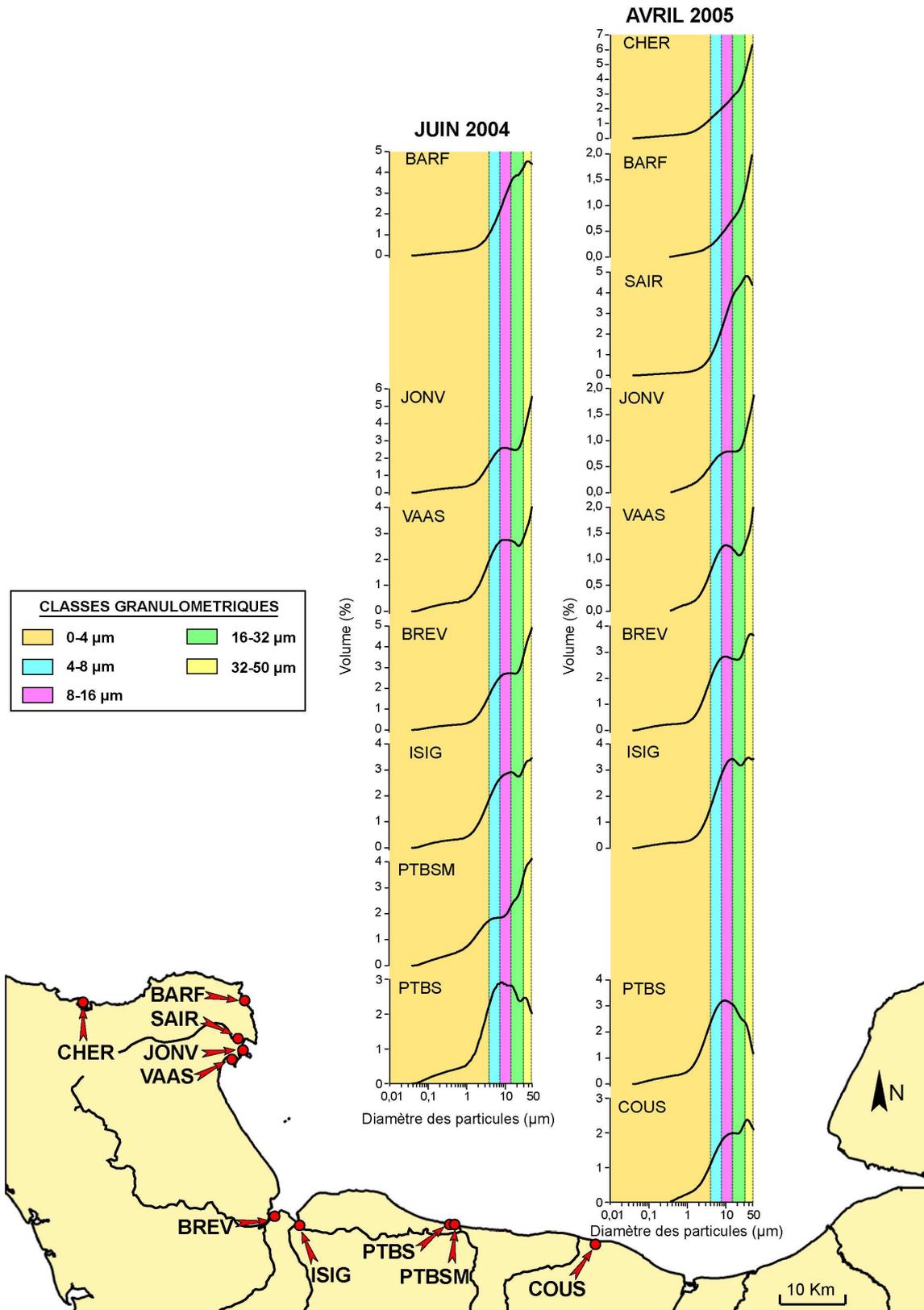


Figure 3.27. Courbes granulométriques de la fraction $< 50 \mu\text{m}$ de l'ensemble des sédiments récoltés à l'ouest du littoral normand en juin 2004 et avril 2005.

Dans cette partie du littoral bas-normand, les résultats obtenus sur la fraction pélitique des sédiments vaseux des plages ne permettent pas de comparer faute de travaux antérieurs. En effet, aucune étude n'avait été entreprise sur les envasements des plages de la Basse Normandie. Toutefois, les données et les descriptions, en baie de Seine, de Larssonneur (1971) indiquent que la fraction pélitique présente dans les parties abritées du littoral, au niveau des hautes slikkes et des schorres, est plus élevée au nord de Port-en-Bessin, en bordure de la côte est du Cotentin et dans la région cherbourgeoise. Caplat (2001) ajoute que la plupart des dépôts de la baie des Veys contiennent de 25 à 75 % de fraction pélitique. Cette proportion est beaucoup plus importante pour les sédiments de la zone abritée du port de Port-en-Bessin, où le pourcentage moyen en fraction fine atteint 93 %.

II.1.2. Zone est du littoral bas-normand

L'est du littoral bas-normand est représenté par les plages comprises entre l'Orne et l'estuaire de la Seine. Les études granulométriques des sédiments de ce secteur ont été réalisées au cours de l'étude de l'envasement du littoral concerné (Dubrulle *et al.*, 2007), soumis aux apports de la Seine et des cours d'eau côtiers du Calvados. Les échantillonnages ont été réalisés entre 2002 et 2003 (puis en 2005 pour certains), à différentes périodes de l'année, combinant différents contextes d'agitations et de conditions hydrologiques.

- Variations granulométriques pour une même station

La figure 3.28. ci-après montre la superposition des courbes granulométriques de différents envasements sur un même site (ici Pennedepie et Blonville-sur-Mer) pour une même période et pour des saisons contrastées (printemps et hiver).

Sur la plage de Blonville-sur-Mer et sur celle de Pennedepie, 8 et 12 échantillons de sédiments ont été prélevés. Entre 2002 et 2003, les courbes granulométriques de ces deux plages sont presque superposables et multimodales, marqués par trois populations de particules classées dans les argiles (0-4 μm), les silts fins (8-16 μm) et les silts grossiers (32-50 μm). Tout juste peut-on mentionner que seuls trois échantillons (PEN04-fév. 2003, PEN13-juin 2003 et BLON03-oct. 2002) présentent une courbe granulométrique à deux modes dominants seulement : argiles et silts moyens à grossiers.

Il apparaît donc que sur une même station de prélèvement, même si le matériel sédimentaire est de faciès différent, vase molle, fluide ou compacte, la fraction fine se caractérise par une granulométrie constante.

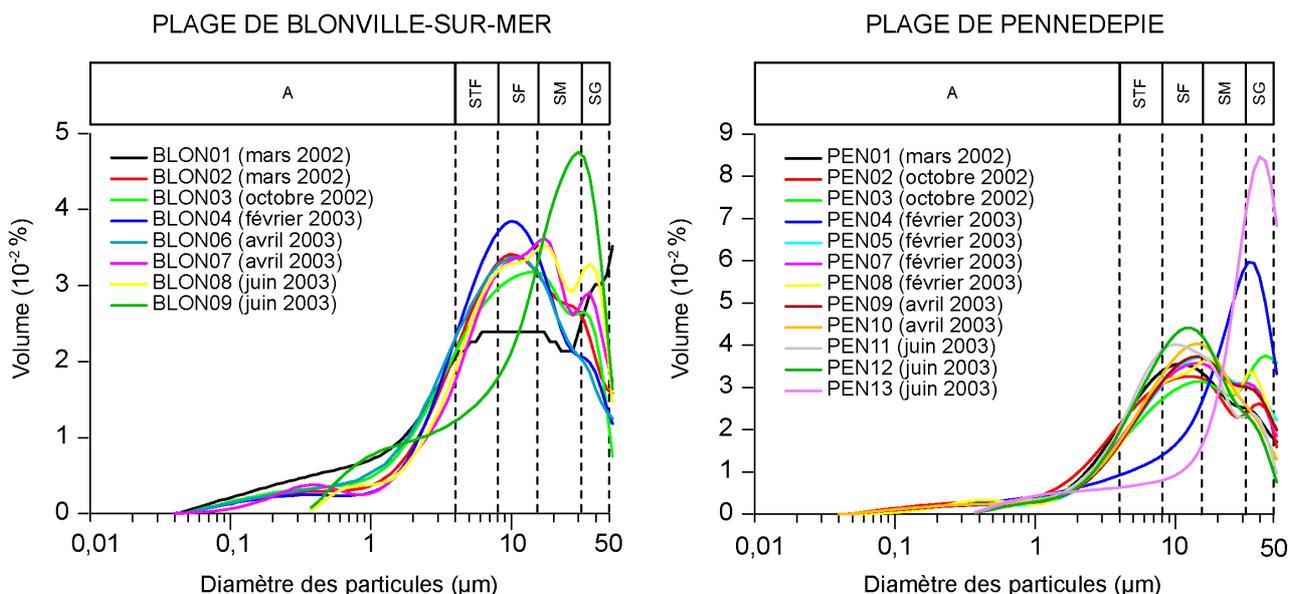


Figure 3.28. Courbes granulométriques de la fraction < 50 µm de deux plages de l'est du Calvados (PEN : Penne-depie, à l'est ; BLON : Blonville-sur-Mer, à l'ouest) entre mars 2002 et juin 2003. A : Argile (0-4 µm), STF : silt très fin (4-8 µm), SF : silt fin (8-16 µm), SM : silt moyen (16-32 µm), SG : silt grossier avec la limite supérieure tronquée à 50 µm (32-50 µm).

- Variations entre les stations

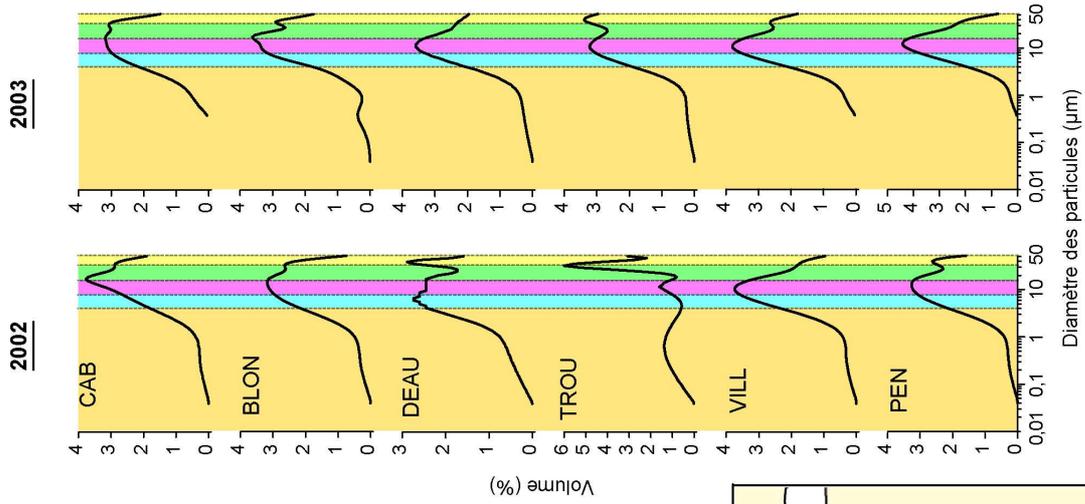
Même si la granulométrie de la fraction fine semble être la même quelle que soit la station d'échantillonnage sur l'est du littoral bas-normand, il est intéressant de comparer l'ensemble des plages sur plusieurs années (2002, 2003 et 2005) et durant les périodes contrastées des faibles et forts débits de la Seine (Fig.3.29.).

Six plages du Calvados sont comparées : Penne-depie (station PEN), Villerville (station VILL), Trouville-sur-Mer (station TROU), Deauville-sur-Mer (station DEAU), Blonville-sur-Mer (station BLON) et Cabourg (station CAB). Ces plages ont été échantillonnées en 2002, 2003 et 2005, lors de forts débits de la Seine en hiver ($1350 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en mars 2002 ; $1425 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en février 2003 ; $450 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en avril 2005) et uniquement en 2002 et 2003 lors de faibles débits de la Seine au printemps ($215 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en octobre 2002 ; $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en avril 2003 ; $235 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en juin 2003).

En faibles débits de la Seine, la distribution granulométrique de la fraction fine des sédiments reste homogène d'une plage à l'autre. Les courbes granulométriques sont principalement bimodales avec un mode dominant dans les silts fins et un autre mode dans les silts moyens à grossiers. Ces caractéristiques se retrouvent aussi bien en 2002 qu'en 2003, avec probablement la présence d'argiles en quantités plus significatives en 2002 par rapport à 2003.

Par forts débits de la Seine en 2002, les sédiments prélevés ont une fraction fine identique avec un mode principal centré sur les silts fins. Il semble apparaître néanmoins un second mode dans les silts moyens à grossiers, essentiellement pour les stations TROU et DEAU. En 2003, la fraction fine est toujours caractérisée par les silts fins mais le mode silts moyens à grossiers est bien présent sur l'ensemble des plages. En 2005, la fraction fine reste analogue à l'ensemble des plages avec deux modes dominants : les silts fins et les silts grossiers.

FAIBLES DEBITS DE LA SEINE



FORTS DEBITS DE LA SEINE

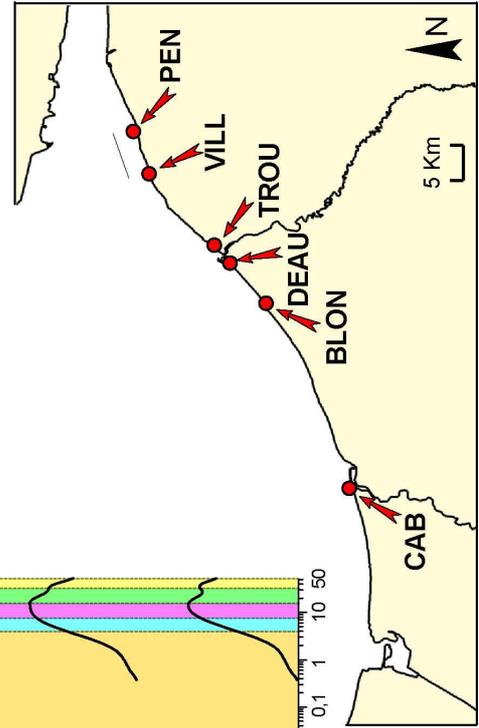
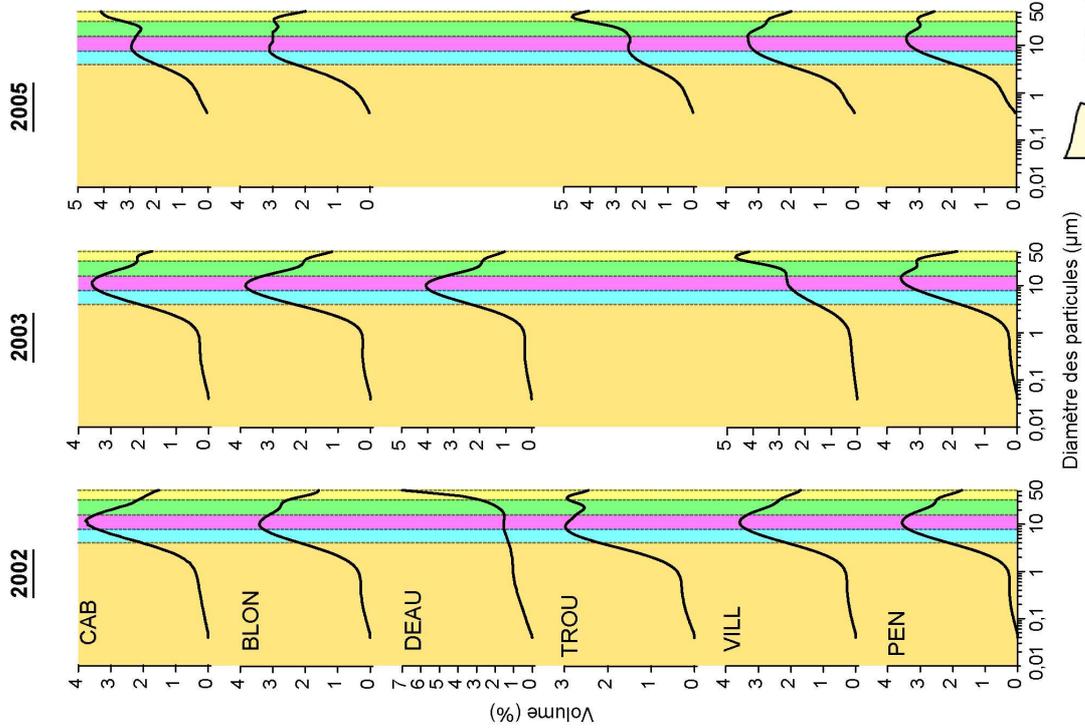


Figure 3.29. Courbes granulométriques de la fraction < 50 µm de l'ensemble des sédiments récoltés à l'est du littoral normand entre mars 2002 et juin 2003 et avril 2005.

Il apparaît ainsi qu'il n'existe aucune variation annuelle ou saisonnière dans les populations granulométriques de la fraction fine, ni de gradient quelconque E-O sur le littoral est normand. La seule différence qui apparaît c'est le passage d'une distribution granulométrique des particules fines d'un mode à deux modes entre 2002 et 2003 lors de forts débits de la Seine. Cet enrichissement peut être interprété comme le résultat d'apports en particules fines des hautes eaux saisonnières de la Seine.

Le littoral est bas-normand a été peu étudié. Larssonneur (1971) est l'un des premiers à estimer de 5 à 10 % la fraction pélitique dans les dépôts vaseux entre Merville-Franceville et Houlgate, aux abords de Trouville-sur-Mer pour des fonds subtidiaux entre - 5 et - 10 m, soit dans la zone d'énergie hydrodynamique minimale (Larssonneur, 1969). Cette zone sera, par ailleurs, confirmée par Garnaud (2003).

II.1.3. La baie de Seine

- Distribution de la fraction < 50 µm dans la baie

La figure 3.30. ci-après représente la répartition de la fraction fine (< 50 µm) dans le sédiment brut prélevé lors des missions océanographiques CYSAVA et DISPRO en avril 2005. Comme la fraction fine a été recherchée lors du prélèvement (sélection du sédiment prélevé), l'interprétation de cette carte peut être discutée. Néanmoins, les observations sur la répartition de la fraction pélitique sont cohérentes avec les données antérieures qui définissent la localisation des dépôts vaseux dans l'embouchure de la Seine et dans la partie orientale de la baie (Avoine, 1981 ; Crevel, 1983 ; Garnaud, 2003 ; Lesourd *et al.*, 2001 ; Lesourd *et al.*, 2003).

Sur cette carte, la zone préférentielle de dépôts pélitiques se situe à l'embouchure de la Seine avec près de 45 % de fraction fine. Cette zone, voisine du dépôt de dragage du Kannik, montre à l'échantillonnage un faciès vaseux sombre inconnu des sédiments dragués couramment dans le chenal aval de la Seine. Au nord du Havre, la zone côtière de la baie proche des dépôts de dragages d'Octeville-sur-Mer présente une proportion en fraction fine voisine de 20 %. Les dépôts de la partie est de la baie de Seine (entre l'embouchure de la Seine et l'Orne) comportent une proportion en fraction fine autour de 5 à 15 %, contre 5 % pour la partie située à l'ouest de l'Orne.

Contrairement au littoral bas-normand, très peu étudié, la baie de Seine a fait l'objet de nombreux travaux. Les premiers résultats d'Avoine (1981) montrent que les dépôts à l'embouchure de la Seine, au sud du port du Havre et près du banc du Ratier, atteignent près de 75 % de fraction pélitique. Ces importantes variations de dépôts vaseux en baie et à l'embouchure sont fonction de la saison et notamment des conditions hydrologiques de la Seine. En hautes eaux saisonnières, 25 à 75 % de vases sont notés à l'embouchure contre 10 à 25 % en basses eaux saisonnières (Lesourd *et al.*, 2003).

Garnaud (2003) estime par ailleurs que les zones d'envasement s'étendent sur la partie sud-orientale de la baie, passant de 5 % en 1967 à 10 % en 2000. La même tendance avait déjà été évoquée par Lesourd *et al.* (2001) pour les zones envasées à l'embouchure de la Seine. Dans la partie nord-est de la baie de Seine, Crevel (1983) met en évidence trois zones à teneur supérieure à 50 % de pélites : (1) anse créée par la digue du port d'Antifer, (2) dépôts de dragages d'Octeville-sur-Mer et (3) chenal d'accès et l'avant port du Havre. Au large et au-delà de - 20 m de profondeur, les teneurs deviennent inférieures à 5 %.

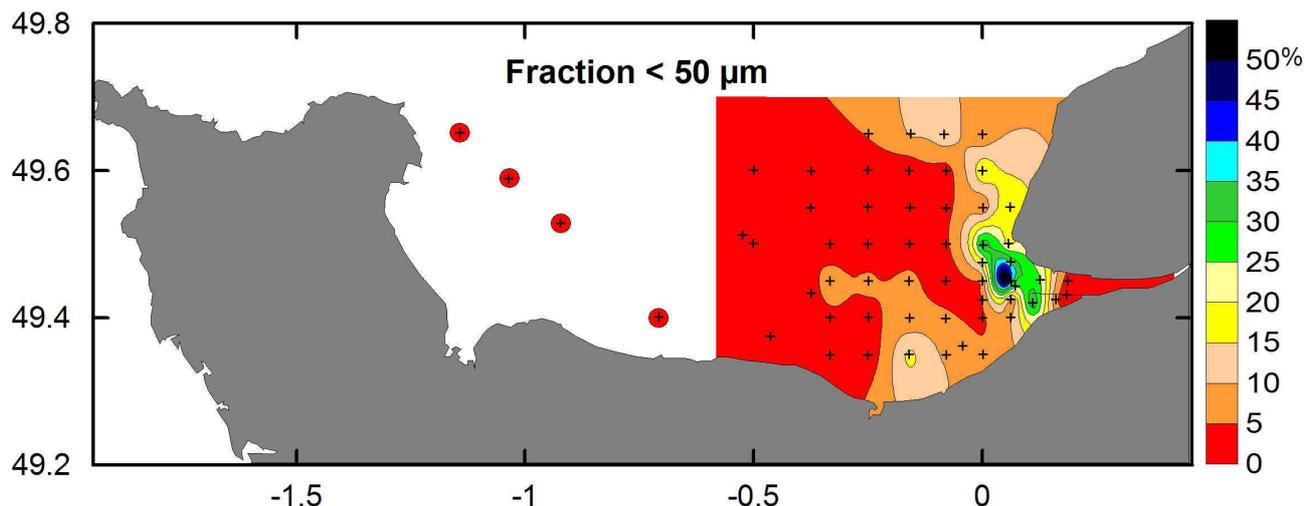


Figure 3.30. Répartition de la fraction < 50 µm (exprimée en pourcentage) des sédiments bruts récoltés en domaine subtidal en avril 2005 dans la baie de Seine. Les petites croix noires représentent les stations d'échantillonnage (missions CYSAVA et DISPRO).

- Distributions des classes granulométriques dans la fraction fine

Au sein de la fraction fine, il est important de comprendre la répartition des différentes fractions granulométriques dans la baie et la localisation des zones préférentielles pour chaque classe de particule. Les classes granulométriques sont décrites en terme d'abondance malgré les aléas d'échantillonnage : les observations et les interprétations seront donc bien sûr à nuancer.

La figure 3.31. montre que les argiles (0-4 µm) représentent 25 à 35 % du sédiment dans la partie orientale de la baie de Seine contre 15 à 25 % dans la partie occidentale.

Les silts très fins (4-8 µm) sont répartis avec une moyenne de 20 % de manière assez homogène sur l'ensemble du domaine subtidal de la baie.

De la même manière, les silts fins (8-16 µm) de l'ordre de 20-25 % et les silts moyens (16-32 µm) de 15-20 % révèlent comme à l'embouchure de la Seine quelques zones plus enrichies autour de 25-30 %.

La classe granulométrique des silts grossiers (32-50 µm) est la moins représentée dans la baie. Au nord-ouest de la baie, les silts moyens atteignent 5 à 10 % ; dans la partie centrale 10-15 % et dans la partie ouest 15 à 20 % (le résultat est ici à pondérer puisque l'extrapolation des données s'est faite uniquement à partir de deux points). Il apparaît toutefois deux zones enrichies dans la partie orientale de la baie (25 à 30 % de silts grossiers) correspondant aux deux sites déjà évoqués précédemment ceux des dépôts de dragages du Kannik et d'Octeville-sur-Mer.

Boust (1981) fut l'un des premiers à donner les modes granulométriques de la fraction pélitique en baie et à l'embouchure de la Seine : 60 à 70 % de particules inférieures à 16 µm, 25 à 35 % de particules inférieures à 4 µm et 10 à 20 % de particules inférieures à 2 µm. Ces résultats sont bien en accord avec ceux cités au dessus, malgré les méthodes d'analyses différentes.

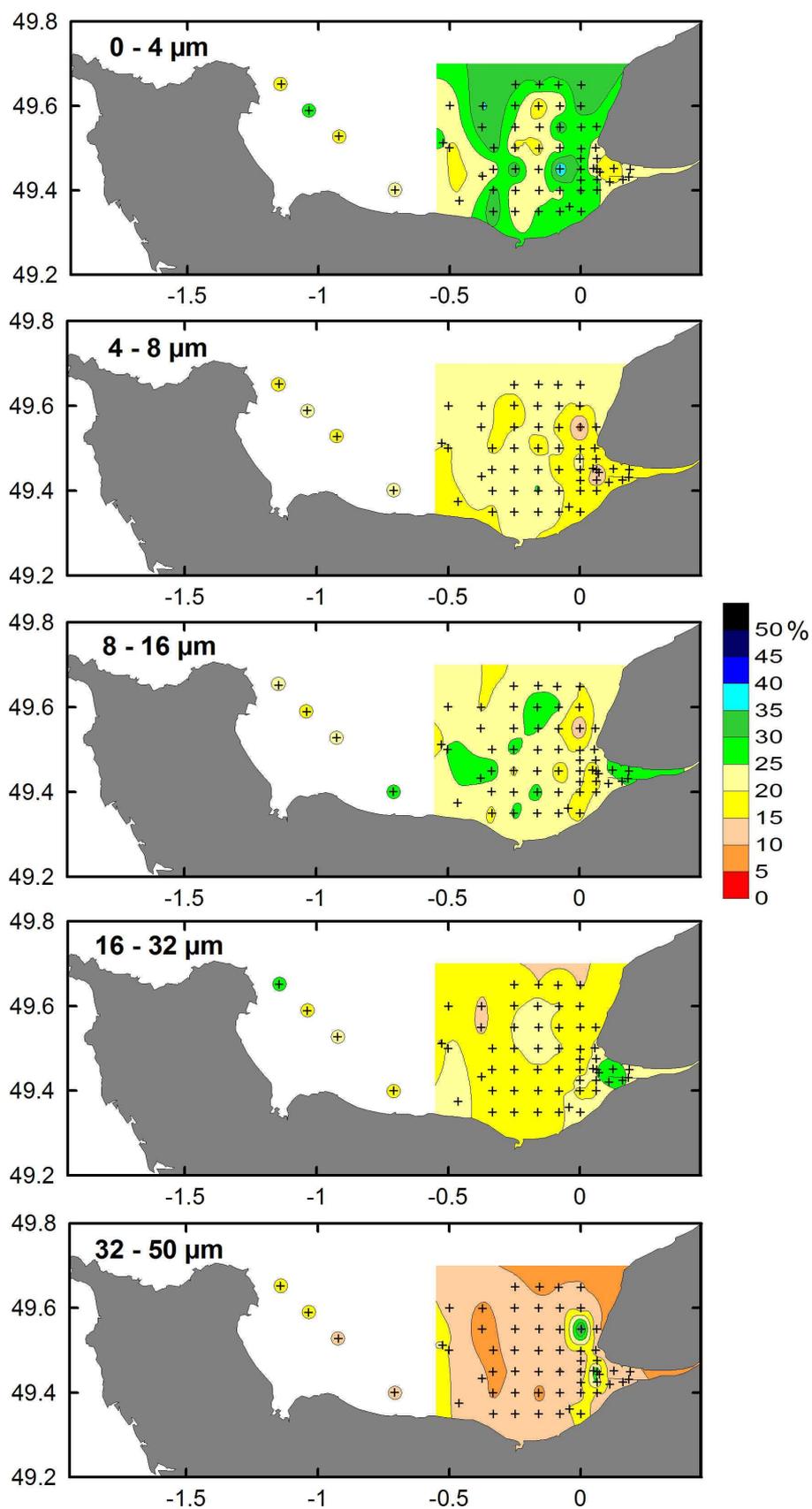


Figure 3.31. Cartographies des pourcentages de 5 classes granulométriques (argile (0-4 µm), silts très fins (4-8 µm), silts fins (8-16 µm), silts moyens (16-32 µm) et silts grossiers tronqués en limite supérieure (32-50 µm)) de la fraction fine (< 50 µm) des sédiments subtidaux prélevés en avril 2005 dans la baie de Seine. Les petites croix noires représentent les stations d'échantillonnage.

En résumé, l'ensemble des classes granulométriques de la fraction < 50 µm est présent et réparti de façon assez homogène sur l'ensemble de la baie. Seules les particules de la classe des argiles sont enrichies dans la partie orientale de la baie au détriment des silts grossiers, et appauvries de ce fait dans la partie occidentale de la baie, marquant bien une zonation longitudinale des sédiments fins de la baie de Seine.

II.2. Cortèges des minéraux argileux des sédiments en baie de Seine et sur le littoral bas-normand

II.2.1. Caractérisation des cortèges des minéraux argileux

- Identification des cortèges

Pour procéder de manière organisée et mettre en valeur les principales informations apportées par la caractérisation des minéraux argileux, la zone d'étude de la baie de Seine et de son littoral a été découpée :

- (1) le littoral ouest bas-normand,
- (2) le littoral est bas-normand (en période de forts et faibles débits de la Seine),
- (3) la baie de Seine. En raison des faibles quantités de particules fines rencontrées, seule sa partie orientale est étudiée.

Le tableau 3.2. présente les cortèges minéralogiques argileux des échantillons de la zone géographique considérée. Il met en avant une grande différence entre ceux du littoral ouest et ceux du littoral est bas-normand.

Le cortège argileux du littoral ouest est constitué, entre Courseulles-sur-Mer et Saint-Vaast-La-Hougue, de smectites, seules ou associées à un minéral interstratifié ((C-Sm), principalement les échantillons de 2004, ou de (C-Cg), de 2005), d'illite, de kaolinite et du minéral interstratifié (10-C). À partir de l'embouchure de la Saire (nord Cotentin) et vers le nord, le cortège est différent : les smectites disparaissent, remplacées par la chlorite. Elle est accompagnée dans le nord Cotentin par un minéral interstratifié (10-Cg) ou (10-Sm). À Cherbourg, le cortège argileux n'est composé que de chlorite, d'illite, de kaolinite et du minéral interstratifié (10-C). Cela semble faire apparaître des sources distinctes en minéraux argileux.

Sur le littoral est de la baie, les cortèges argileux sont analogues à ceux déterminés dans l'estuaire de la Seine. Le cortège est le même de Cabourg (station CAB) à Pennedepie (station PEN), il est constitué de smectites, de chlorite associées à un minéral interstratifié (C-Sm), d'illite, de kaolinite et d'un minéral interstratifié (10-C). Entre les deux, les sédiments récents des plages ont des cortèges argileux similaires, constitués de smectites seules ou associées à des minéraux interstratifiés (C-Cg) ou (C-Sm), de l'illite, de la kaolinite et du minéral interstratifié (10-C). Sur l'ensemble de ce tronçon, il n'apparaît aucune variation est-ouest, pas de variation selon les conditions hydrologiques de la Seine (faibles ou forts débits), ni de variation du cortège argileux sur une même plage à différentes périodes de prélèvements (Dubrulle *et al.*, 2007).

Tableau 3.2. Détermination des cortèges minéralogiques argileux des sédiments intertidaux et subtidaux de la baie de Seine et du littoral bas-normand.

	Noms d'échantillon	Cortèges argileux	C														K	Indice cristallinité I	Indice cristallinité Sm			
			Cg	C-(10-C)	C-(10-Cg)	C-(10-Sm)	Cg-(10-Cg)	C-(C-Cg)	C-(C-Sm)	I	(C-Cg)	(10-C)	(10-Cg)	(C-Sm)	Sm	Sm-(C-Cg)				Sm-(C-Sm)		
LITTORAL OUEST	JUN 2004	PTBS	I, (10-C), (C-Sm), Sm, K	0	0	0	0	0	0	0	0	32	0	1	0	13	18	0	0	35	0,68	0,80
		BREV	Cg, I, (10-C), (C-Sm), K	0	17	0	0	0	0	0	0	28	0	3	0	28	0	0	0	25	0,71	--
		JONV	I, (10-C), Sm-(C-Sm), K	0	0	0	0	0	0	0	0	37	0	4	0	0	0	0	0	26	0,33	0,76
		VAAS	I, (10-C), Sm-(C-Sm), K	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	8	0	0	0	0	0	28	0,33	0,42
		BARF	C-(10-Cg), I, (10-C), K	0	0	0	27	0	0	0	0	39	0	1	0	0	0	0	0	33	0,64	--
	AVRIL 2005	COUS	I, Sm, K	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	53	0	0	27	0,46	0,83
		PTBS	I, Sm-(C-Cg), K	0	0	0	0	0	0	0	0	22	0	0	0	0	0	5	0	28	0,44	0,83
		BREV	I, (10-C), Sm-(C-Cg), K	0	0	0	0	0	0	0	0	27	0	4	0	0	0	46	0	24	0,56	0,85
		ISIG	I, (10-C), Sm, K	0	0	0	0	0	0	0	0	29	19	0	0	0	2	0	0	31	0,52	0,89
		JONV	I, (10-C), Sm, K	0	0	0	0	0	0	0	0	27	14	0	0	0	4	0	0	29	0,43	0,76
		VAAS	I, (10-C), Sm-(C-Cg), K	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	15	0	0	0	25	0	30	0,51	0,86
		SAIR	C-(10-Cg), I, (10-C), K	0	0	0	36	0	0	0	0	2	0	16	0	0	0	0	0	28	0,58	--
		BARF	C-(10-Sm), I, (10-C), K	0	0	0	0	26	0	0	0	33	0	8	0	0	0	0	0	34	0,53	--
		CHER	C, I, (10-C), K	34	0	0	0	0	0	0	0	29	0	1	0	0	0	0	0	37	0,53	--
LITTORAL EST	2002	CAB02	C-(C-Sm), I, (10-C), Sm, K	0	0	0	0	0	0	0	15	20	0	20	0	0	25	0	20	0,58	0,83	
		TROU01	I, (C-Cg), (10-C), Sm-(C-Sm), K	0	0	0	0	0	0	0	0	20	10	5	0	0	35	0	30	0,59	0,95	
		VILL01	I, (10-C), (C-Sm), Sm, K	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0	5	0	15	25	0	35	0,55	0,90	
		PEN01	C-(C-Sm), I, (10-C), Sm, K	0	0	0	0	0	0	0	5	25	0	15	0	0	25	0	30	0,55	0,70	
		CAB05	C-(C-Sm), I, (10-C), Sm, K	0	0	0	0	0	0	0	10	15	0	10	0	0	40	0	25	0,4	0,70	
	2003	BLON04	I, (10-C), Sm-(C-Sm), K	0	0	0	0	0	0	0	0	25	0	10	0	0	35	0	30	0,51	0,75	
		DEAU05	I, (C-Cg), (10-C), Sm, K	0	0	0	0	0	0	0	0	20	10	10	0	0	30	0	30	0,52	0,81	
		VILL06	I, (10-C), (C-Sm), Sm, K	0	0	0	0	0	0	0	0	20	5	5	0	0	40	0	30	0,54	0,87	
		PEN07	C-(C-Sm), I, (10-C), Sm, K	0	0	0	0	0	0	0	13	9	0	18	0	0	37	0	23	0,33	0,81	
		CAB	I, Sm-(C-Sm), K	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	59	21	0,74	0,85	
	2005	BLON	I, (C-Cg), Sm, K	0	0	0	0	0	0	0	0	27	46	0	0	0	0	0	23	0,85	0,66	
		TROU	I, Sm-(C-Cg), K	0	0	0	0	0	0	0	0	23	0	0	0	0	0	46	0	0,30	0,57	
		VILL	I, Sm-(C-Sm), K	0	0	0	0	0	0	0	0	16	0	0	0	0	0	53	31	0,7	0,76	
		PEN	I, Sm-(C-Sm), K	0	0	0	0	0	0	0	0	19	0	0	0	0	0	53	28	0,48	0,79	
		CAB04	C-(C-Sm), I, (10-C), Sm, K	0	0	0	0	0	0	0	5	25	0	10	0	0	30	0	30	0,6	0,81	
	2002	BLON03	I, (C-Cg), (10-C), Sm, K	0	0	0	0	0	0	0	0	20	5	10	0	0	35	0	30	0,63	0,80	
		VILL02	I, (10-C), (C-Sm), Sm, K	0	0	0	0	0	0	0	0	25	0	5	0	10	25	0	35	0,54	0,75	
		PEN02	C-(C-Sm), I, (10-C), Sm, K	0	0	0	0	0	0	0	5	20	0	10	0	0	35	0	30	0,61	0,94	
		CAB11	C-(C-Sm), I, (10-C), Sm, K	0	0	0	0	0	0	0	10	25	0	10	0	0	30	0	25	0,58	0,89	
		BLON07	I, (C-Cg), (10-C), Sm, K	0	0	0	0	0	0	0	0	25	5	10	0	0	35	0	30	0,7	0,81	
DEAU07		I, (C-Cg), (10-C), Sm, K	0	0	0	0	0	0	0	0	20	5	5	0	0	35	0	35	0,62	0,90		
TROU05		I, (10-C), (C-Sm), Sm-(C-Cg), K	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0	5	0	10	0	35	0	0,30	0,4		
VILL09		I, (10-C), (C-Sm), Sm, K	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0	5	0	5	45	0	25	0,64	0,80		
PEN12		C-(C-Sm), I, (10-C), Sm, K	0	0	0	0	0	0	0	12	16	0	15	0	0	34	0	23	0,47	0,81		
BAIE DE SEINE		AVRIL 2005	3265	C-(10-C), I, K	0	0	74	0	0	0	0	0	12	0	0	0	0	0	0	15	0,59	0,76
			3268	I, Sm-(C-Sm), K	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	58	0,22	0,55
			3263	Cg-(10-Cg), I, K	0	0	0	0	59	0	0	0	14	0	0	0	0	0	0	26	0,51	0,81
			3262	I, (10-C), (10-Cg), (C-Sm), K	0	0	0	0	0	0	0	0	18	0	14	34	13	0	0	0	0,22	0,64
			3260	I, (10-C), (C-Sm), K	0	0	0	0	0	0	0	0	14	0	10	0	47	0	0	0	0,31	0,66
			3259	I, (10-C), (C-Sm), K	0	0	0	0	0	0	0	0	24	0	13	0	28	0	0	0	0,36	0,62
	3253		I, (10-C), Sm-(C-Cg), K	0	0	0	0	0	0	0	0	16	0	2	0	0	0	57	0	0,25	0,56	
	3236		I, (10-C), Sm-(C-Cg), K	0	0	0	0	0	0	0	0	19	0	14	0	0	0	37	0	0,30	0,58	
	3232		I, (10-C), Sm-(C-Sm), K	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	15	0	0	0	0	35	0,31	0,46	
	3231		I, (10-C), Sm-(C-Cg), K	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0	3	0	0	0	60	0	0,17	0,52	
	3203		I, Sm-(C-Cg), K	0	0	0	0	0	0	0	0	18	0	0	0	0	0	7	0	0,21	0,49	
	3202		I, (10-C), Sm, K	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0	25	0	0	33	0	0	0,23	0,59	

Ainsi, les cortèges argileux définis jusqu'à présent dans le système estuarien se retrouvent en baie de Seine. Les smectites sont toujours présentes, l'illite et la kaolinite également. Certains échantillons ne présentent uniquement qu'une série de minéraux interstratifiés et pas de smectites, ni de chlorite ou chlorite gonflante. Il semble donc que la baie de Seine regroupe l'ensemble des cortèges déjà identifiés dans l'estuaire de la Seine et sur le littoral bas-normand.

L'étude des sédiments du littoral bas-normand permet d'identifier certaines caractéristiques sur les minéraux argileux (Fig.3.32.). À Cherbourg, le pic d001 de la chlorite apparaît très étroit, par contre la kaolinite et l'illite sont bien exprimées : les pics sont fermés et grands en amplitude (Fig.3.32.). Les diffractogrammes de Saint-Vaast-la-Hougue sont similaires aux diffractogrammes déjà étudiés dans l'estuaire de la Seine.

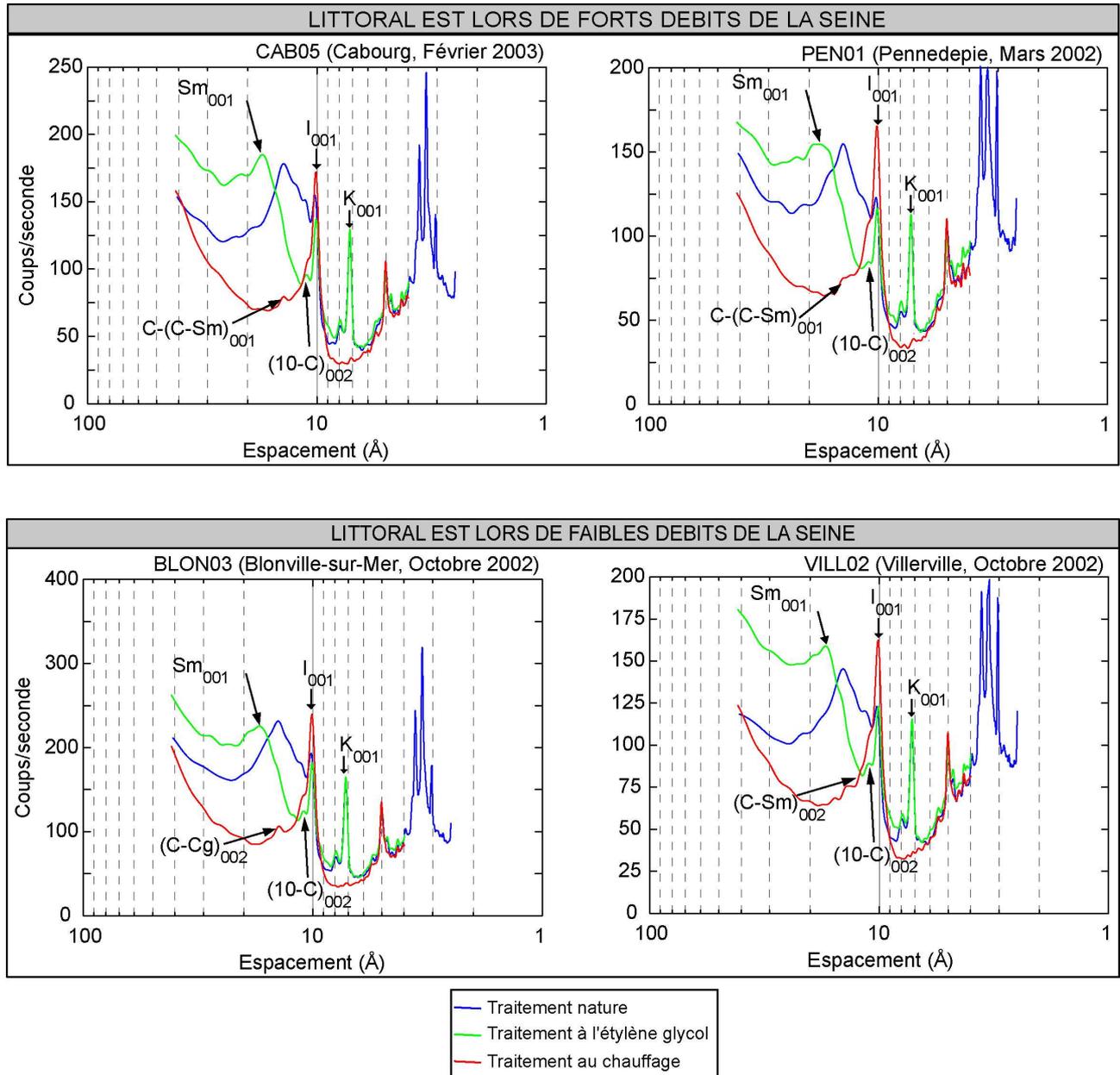


Figure 3.32. Exemples de diffractogrammes des sédiments actuels intertidaux du littoral bas-normand oriental, lors de forts ou faibles débits de la Seine.

Sur le littoral bas-normand oriental, les diffractogrammes présentent des réflexions d001 et d002 des minéraux argileux similaires d'une station à l'autre. Les pics autour de 14 Å sont assez ouverts et faibles en amplitude. La comparaison entre les périodes de prélèvement à forts débits ou faibles débits de la Seine, ne fait apparaître aucune différence sur les diffractogrammes et dans les cortèges. L'allure des pics des différents types de minéraux argileux reste analogue.

En baie de Seine, les échantillons, qui présentent des cortèges constitués uniquement de minéraux interstratifiés, montrent ainsi des diffractogrammes avec une série de petits pics autour du complexe à 14 Å (Fig.3.33., échantillon 3259). La chlorite gonflante présente les mêmes caractéristiques que celle identifiée dans l'estuaire de la Seine, à Berville (station BERV).

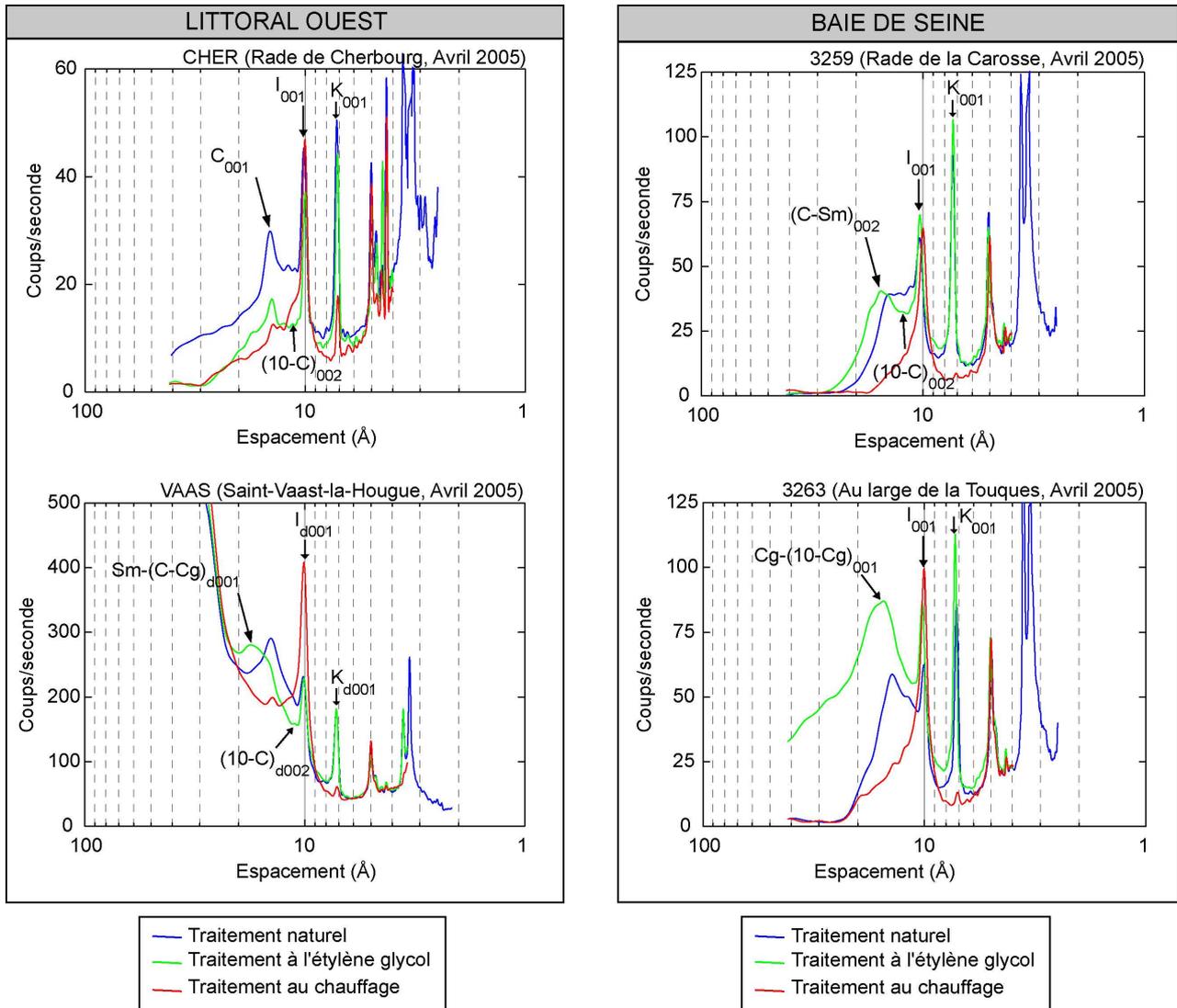


Figure 3.33. Exemples de diffractogrammes des sédiments actuels intertidaux du littoral bas-normand (littoral Ouest) et subtidaux de la baie de Seine orientale.

Les cortèges argileux des échantillons fossiles (holocène fossile et jurassique) sont présentés dans le tableau 3.3.. Ils diffèrent peu des cortèges identifiés sur le littoral normand ou dans la baie de Seine. Les cortèges des sédiments d'âge jurassique étudiés présentent des smectites dominantes, bien exprimées, de l'illite, de la kaolinite et un minéral interstratifié (10-C). Les cortèges des sédiments holocènes sont identiques aux cortèges des sédiments récents, à savoir, une smectite associée ou non à un minéral interstratifié (C-Sm), de l'illite, de la kaolinite et toujours la présence du minéral interstratifié (10-C).

Tableau 3.3. Détermination des cortèges minéralogiques argileux des sédiments fossiles de la baie de Seine (affleurements subtidaux d'argiles holocènes à l'érosion) et du littoral bas-normand (falaises vives jurassiques de Villerville).

	Noms d'échantillon	Cortèges argileux	Cortège						Indice cristallinité I	Indice cristallinité Sm		
			C	I	(10-C)	(C-Sm)	Sm	Sm-(C-Sm)			K	
HOLOCENE	FEVRIER 2000	HOL01	I, (10-C), Sm-(C-Sm), K		25	10			35	30	0,57	0,88
		HOL02	I, (10-C), (C-Sm), Sm, K		20	10	10	30		30	0,60	0,91
		HOL03	I, (10-C), Sm-(C-Sm), K	10	30	5			30	25	0,53	0,88
JURASSIQUE	JUN 2003	FAL01	I, (10-C), (C-Sm), Sm, K		15	5	5	70		5	0,42	0,96
		FAL02	I, (10-C), Sm, K		10	5		65		20	1,10	0,98
		FAL03	I, (10-C), Sm, K		20	5		70		5	0,53	0,99

La comparaison des diffractogrammes des sédiments fossiles permet de mettre en évidence dans les smectites (Fig.3.34.) des différences : les smectites des échantillons holocènes sont mal cristallisées, ouvertes et de faible amplitude, proches de celles déjà décrites sur le littoral bas-normand ou dans l'estuaire de la Seine, tandis que les smectites des échantillons d'âge jurassique sont bien cristallisées, peu ouvertes et de forte amplitude. Les diffractogrammes des échantillons holocènes fossiles montrent que la réflexion d001 de la kaolinite forme un pic étroit de forte amplitude bien cristallisé contrairement aux échantillons des falaises fossiles littorales jurassiques où le pic est petit (quasi absent).

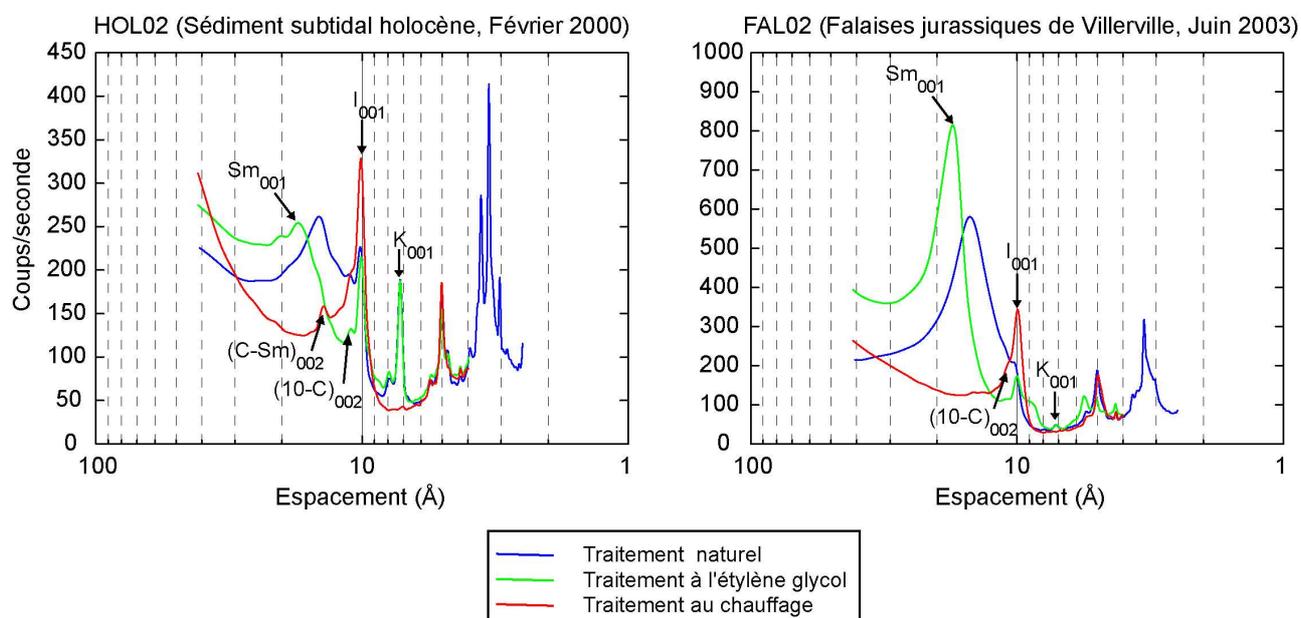


Figure 3.34. Diffractogrammes types des sédiments d'âge holocène fossile (HOL02) et jurassique (FAL02).

Ainsi, la caractérisation des minéraux argileux des sédiments actuels, en baie de Seine et sur le littoral bas-normand, montre que les cortèges minéralogiques des argiles sont différents et se présentent sous la forme :

- d'un cortège à smectites dominantes de (ouvertes et faibles en amplitude) sur le littoral bas-normand oriental et sud-occidental,
- d'un cortège dominé par la chlorite sur le littoral du Nord Cotentin,

La comparaison de ces cortèges avec ceux des sédiments holocènes fossiles ne permet pas de les distinguer du matériel actuel. En revanche, les sédiments fossiles jurassiques s'identifient et se singularisent par de belles smectites peu ouvertes et de forte amplitude.

- Indices de cristallinité

Les indices de cristallinité de l'illite pour les sédiments du littoral normand sont dispersés, variant entre 0,3 et 0,9 $^{\circ}2\theta$, avec une moyenne de 0,55 $^{\circ}2\theta$ (Fig.3.35.). L'ensemble des données ne fait pas apparaître de variations entre l'est et l'ouest du littoral bas-normand. Seuls les indices de cristallinité des illites des prélèvements effectués en 2005 sur le littoral est sont plus élevés que ceux du littoral ouest. Les indices de cristallinité de l'illite des sédiments subtidaux de la baie de Seine varient entre 0,46 $^{\circ}2\theta$ et 0,66 $^{\circ}2\theta$ (avec une moyenne de 0,56 $^{\circ}2\theta$).

Les indices de cristallinité de l'illite des sédiments fossiles (holocènes et jurassiques) ne sont pas discriminants, ils sont similaires à ceux des sédiments récents du littoral normand et de la baie de Seine.

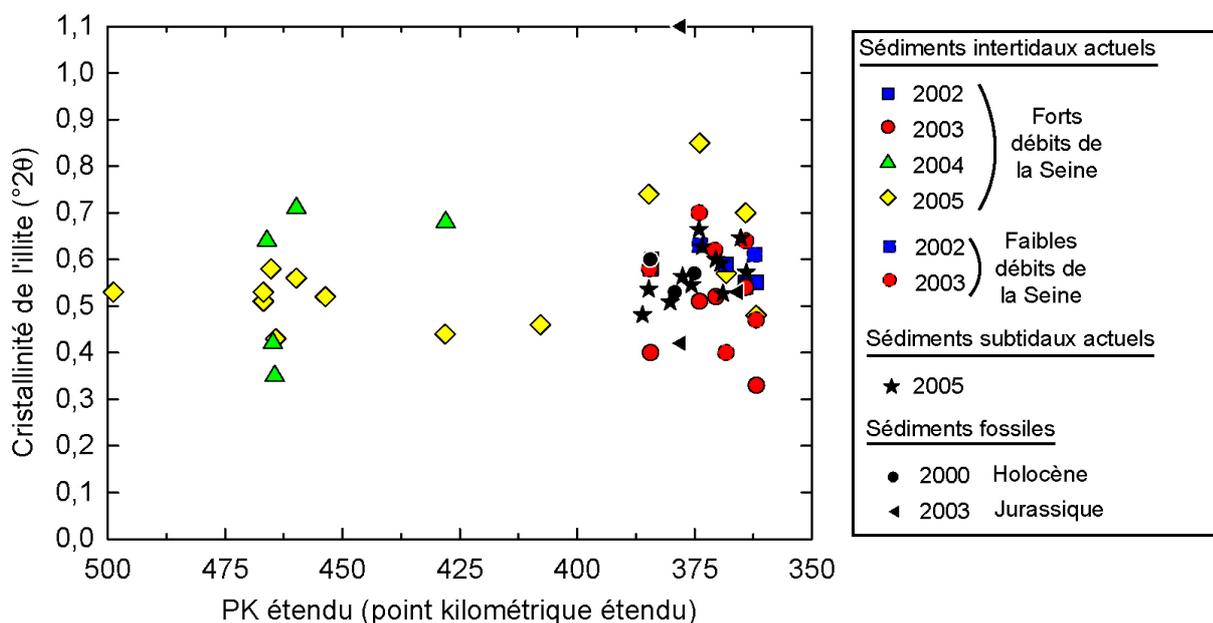


Figure 3.35. Relation entre l'indice de cristallinité de l'illite (en $^{\circ}2\theta$) et la distance (PK étendu) le long du littoral bas-normand (sédiments intertidaux) et de la baie de Seine (sédiments subtidaux).

Contrairement, à ce qui a été observé dans l'estuaire de la Seine, les indices de cristallinité de la smectite sont plus dispersés le long du littoral normand. Les valeurs varient de 0,70 à 0,95 pour le littoral est, de 0,57 à 0,89 pour le littoral ouest, de 0,70 à 0,86 pour la baie de Seine (Fig.3.36.). Les indices de cristallinité pour les sédiments holocènes fossiles sont similaires à ceux des sédiments actuels. Par contre, les sédiments fossiles jurassiques présentent les indices de

crystallinité élevés compris entre 0,96 et 0,99, ici la diagenèse étant plus évoluée et les smectites sont très bien cristallisées.

Il est donc possible de distinguer des différences dans la cristallinité des smectites du littoral ouest entre 2004 et 2005 : celles de 2005 sont mieux cristallisées que celles de 2004. Sur le littoral est, aucune variation n'apparaît entre les deux périodes hydrologiques de la Seine. Les prélèvements à proximité des falaises littorales, où affleurent des smectites bien cristallisées, présentent des indices de cristallinité légèrement plus élevés à certaines périodes de l'année, notamment l'hiver. La présence de telles smectites pourrait s'expliquer par un apport terrigène de ces affleurements (préférentiellement en hiver), lors de périodes de tempêtes ou par des ruissellements importants des versants argileux (Dubrulle *et al.*, 2007).

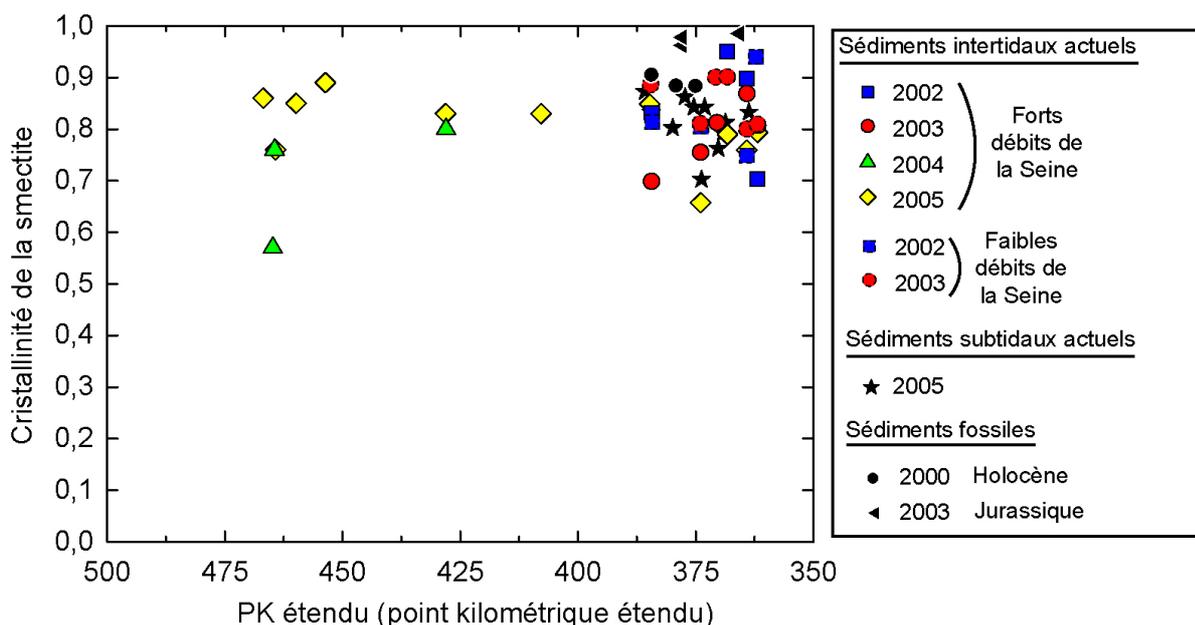


Figure 3.36. Relation entre l'indice de cristallinité des smectites et la distance (PK étendu) le long du littoral bas-normand (sédiments intertidaux) et de la baie de Seine (sédiments subtidaux).

- Semi-quantification des cortèges de minéraux argileux

Le cortège argileux du littoral ouest est composé, en moyenne, de 30 % de smectites (seules ou associées à un minéral interstratifié), avec une valeur maximum de 50 % à Courseulles-sur-Mer, de 30 à 40 % de kaolinite et de 30 % d'illite, auxquels s'ajoutent 5 à 10 % du minéral interstratifié (10-C). Les autres minéraux interstratifiés sont présents individuellement à hauteur de 15 %. Dans le nord du Cotentin, les smectites sont absentes, tandis que la chlorite a les mêmes proportions que les smectites (Fig.3.37.).

Aucune variation significative n'apparaît entre les deux années de prélèvement. Il est à noter une légère augmentation de la proportion en kaolinite et en illite de 5 %, dans la zone du nord Cotentin par rapport au reste du littoral.

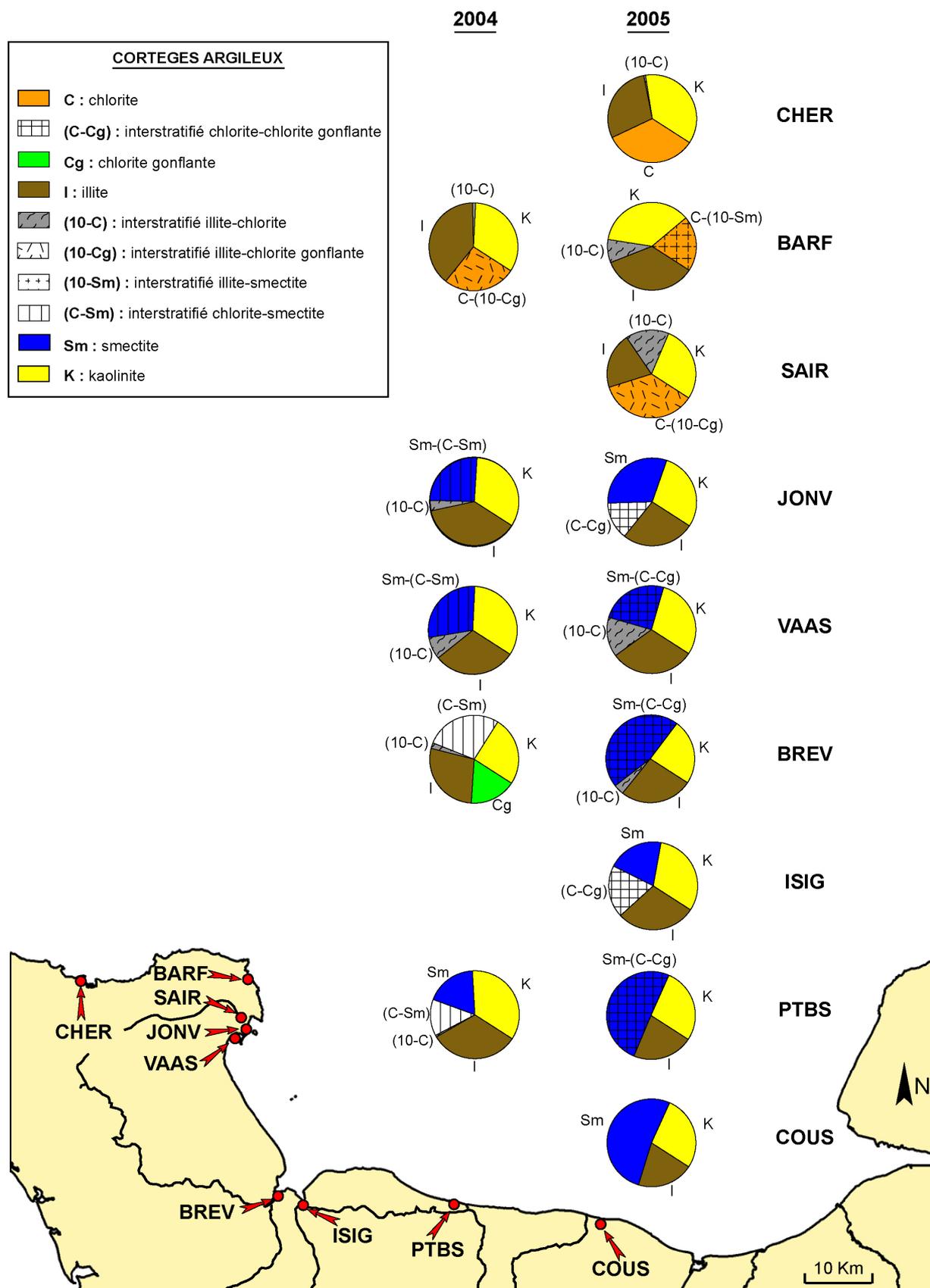


Figure 3.37. Semi-quantifications des cortèges argileux du littoral bas-normand occidental, pour les sédiments intertidaux (plages et embouchures).

Les sédiments fins étant généralement quasi absents sur les plages ouvertes, peu de données bibliographiques existent sur les cortèges argileux des dépôts vaseux du littoral bas-normand occidental. Caplat (2001) en décrit sur quelques échantillons en baie des Veys et à Port-en-Bessin, similaires à ceux déterminés dans la présente étude. En baie des Veys, le cortège est composé de 37 % de smectites, 28 % de kaolinite, 19 % d'illite et 16 % de chlorite. À Port-en-Bessin, la proportion en smectites atteint 46 %, l'illite, la kaolinite et la chlorite restent stables avec respectivement 15 %, 22 % et 17 %.

Dans la partie est du littoral bas-normand (Fig.3.38.), le cortège argileux reste homogène sur l'ensemble des stations : 30 à 40 % de smectites seules (35 % lorsqu'elles sont associées avec des minéraux interstratifiés), 30 % de kaolinite, 20 % d'illite, et 10 % du minéral interstratifié (10-C). La présence de chlorite à Cabourg et à Pennedepie est de 10 %. La comparaison des deux périodes hydrologiques de la Seine ne fait pas apparaître de variation latérale significative selon une direction est-ouest, ni temporellement. Le cortège argileux reste stable et ne semble pas être influencé par les débits saisonniers de la Seine.

Les semi-quantifications des cortèges argileux de la baie de Seine montrent une dominance (60 %) des smectites ou de la chlorite, ou chlorite gonflante (Fig.3.39.). L'illite (15 à 20 %) et la kaolinite (25 %) sont toujours présentes. Le minéral interstratifié (10-C) est présent à hauteur de 15 % dans le cortège argileux. Quand le cortège comporte d'autres minéraux interstratifiés que le minéral (10-C), les proportions sont de l'ordre de 20 à 30 %. Il n'apparaît pas de variation longitudinale est-ouest, entre l'embouchure et dans la partie orientale de la baie de Seine.

Les proportions de minéraux argileux obtenues dans cette étude sont similaires à celles qui avaient été définies par Avoine (1981) dans l'embouchure de la Seine. Cet auteur a néanmoins sous-estimé les proportions en smectites avec seulement 25 %, et surestimé l'illite avec 45 %. Il note également la présence de 5 % de chlorite. La vasière Nord de l'embouchure s'enrichit en illite (45 à 50 %) et en chlorite (5 à 10 %). Près d'Octeville-sur-Mer, les proportions des différents minéraux argileux varient aussi : 30 à 35 % de smectites, 20 % de kaolinite, 40 à 45 % d'illite et 5 % de chlorite. Larsonneur (1971) indiquait un cortège argileux dans la baie de Seine, constitué de 25 % de smectites, 40 % de kaolinite et 35 % d'illite. Dans la partie sud-orientale de la baie de Seine, les dernières données (Garnaud, 2003) montrent un cortège argileux composé de 30 % de smectites, 30 % de kaolinite, 40 % d'illite pour les échantillons de vases fluides, auquel s'ajoutent de faibles quantités de chlorite et de rares interstratifiés pour les sables envasés.

Les différences entre ces données peuvent être imputées tout simplement à la différence de méthode employée pour déterminer les semi-quantifications des cortèges argileux, mais aussi à l'amélioration depuis les dernières années des techniques de mesures par diffractométrie RX (Moore et Reynolds, 1989).

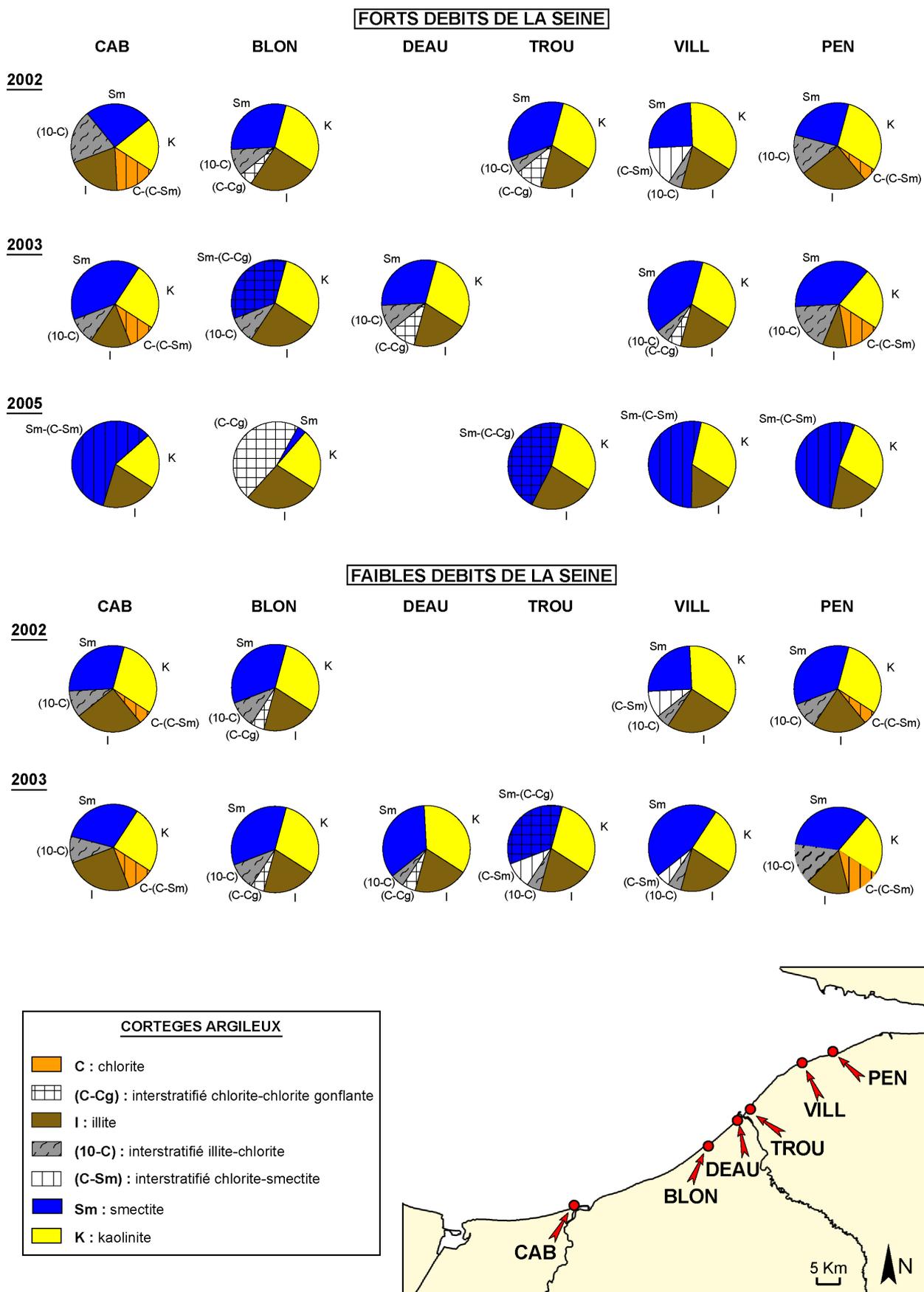


Figure 3.38. Semi-quantifications des cortèges argileux des sédiments intertidaux des plages de référence du littoral bas-normand oriental, à différentes périodes hydrologiques de la Seine.

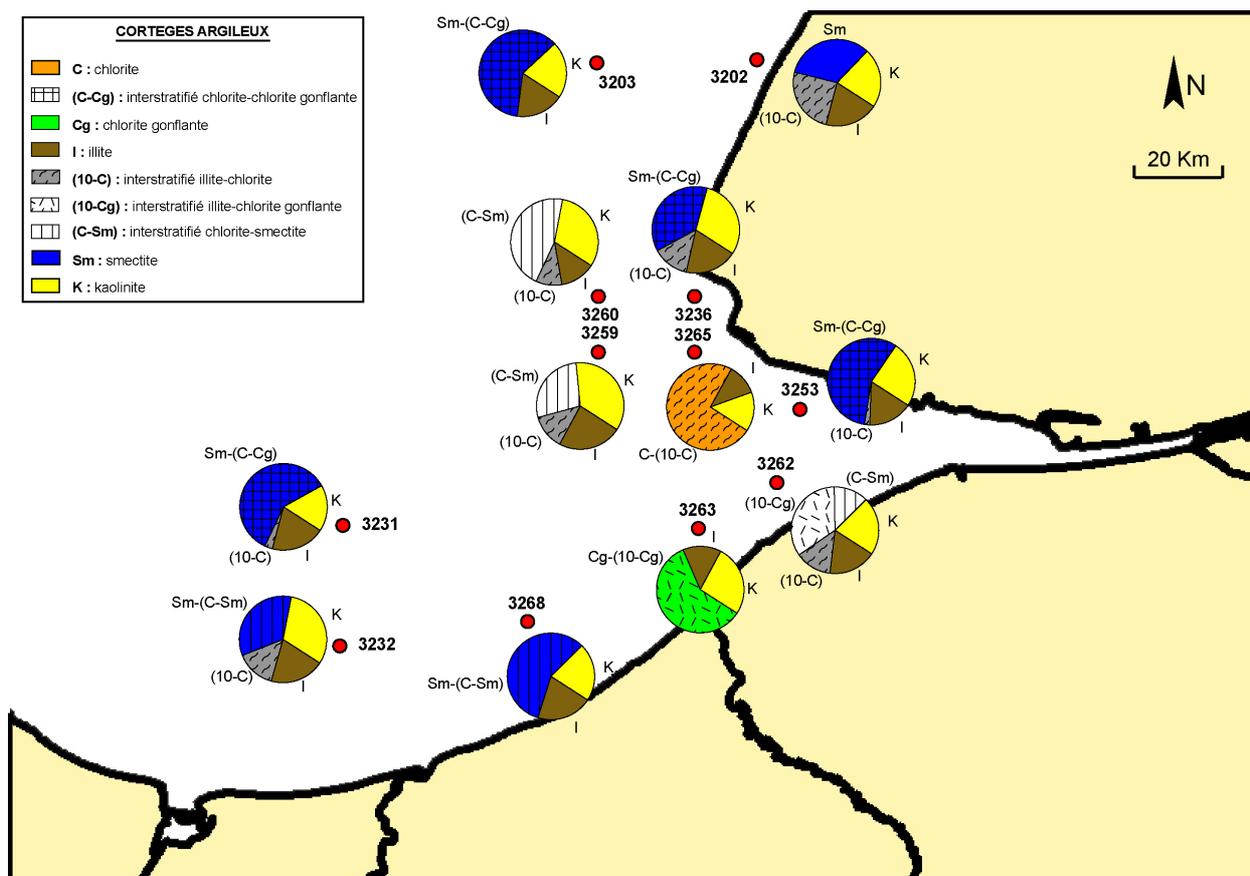


Figure 3.39. Semi-quantifications des cortèges argileux des sédiments superficiels subtidaux actuels de la baie de Seine.

La semi-quantification des cortèges des sédiments fossiles (Fig.3.40.), argiles à l'érosion sur les fonds, montre pour les sédiments holocènes fossiles (HOL), 30-35 % de smectites (30 % seule et 10 % de minéraux interstratifiés seuls), 25 à 30 % de kaolinite, 20 à 30 % d'illite et 10 % de l'interstratifié (10-C).

Ces valeurs sont légèrement supérieures à celles définies par Garnaud (2003) pour ses échantillons fossiles subtidaux, excepté pour l'illite (20 % de smectites, 22 % de kaolinite, 45 % d'illite, 12 % de chlorite et la présence d'interstratifiés).

Les cortèges des falaises littorales jurassiques (Fig.3.40.) sont composés de 70 % de smectites, 10 à 20 % d'illite, 5 à 20 % de kaolinite et 5 % de l'interstratifié (10-C). Le long des falaises littorales entre Villers-sur-Mer et Villerville et dans les formations de l'Oxfordien moyen, Dugué (1989) a montré des variations latérales des cortèges de minéraux argileux, composés d'illite, de smectites et de kaolinite, à savoir :

- une diminution en kaolinite d'ouest en est
- une augmentation en smectites d'ouest en est avec une meilleure cristallinité.

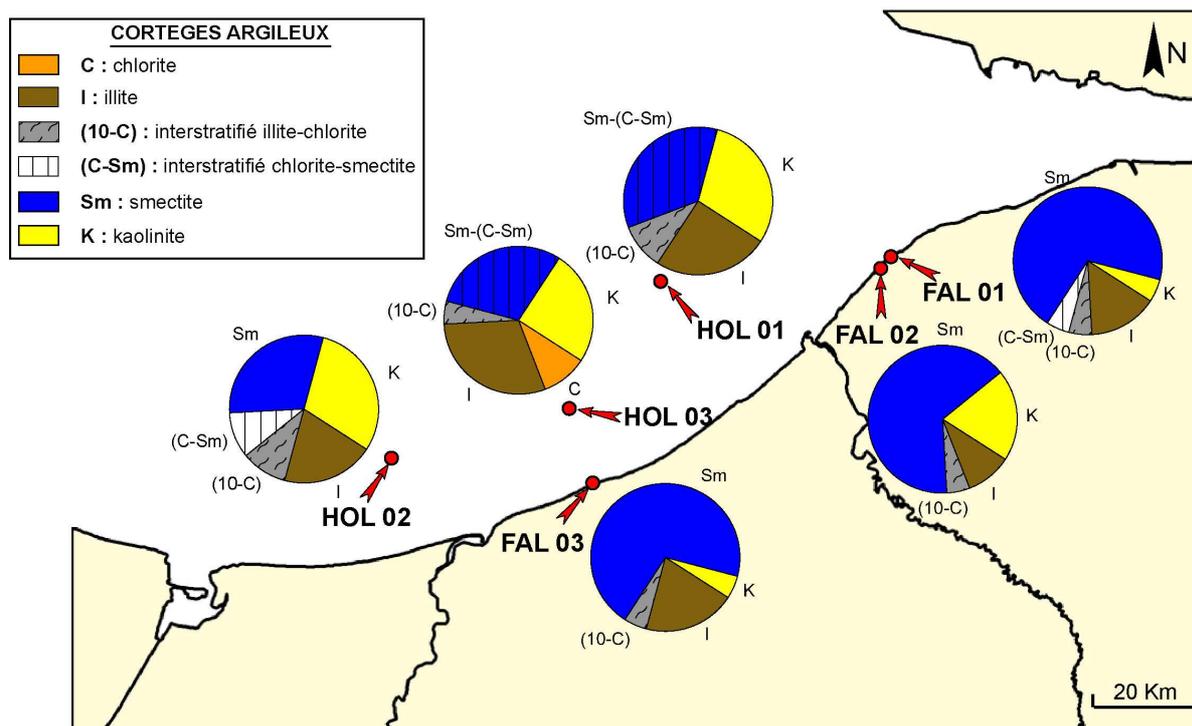


Figure 3.40. Semi-quantifications des cortèges argileux des sédiments fossiles intertidaux (falaises littorales d'âge jurassique) et subtidaux holocènes fossiles.

II.2.2. Discussion sur l'origine des minéraux argileux de la baie de Seine et du littoral bas-normand adjacent

La baie de Seine et le littoral normand présentent des cortèges de minéraux argileux différents (diversité des bassins versants qui bordent la baie de Seine). La figure 3.41. présente les principales formations géologiques et superficielles susceptibles d'apporter, par érosion et ruissellement du matériel fin terrigène dans les dépôts récents du littoral bas-normand et de la baie de Seine.

Larsonneur (1971) est l'un des premiers à inventorier les principaux cortèges des minéraux argileux des formations géologiques du bassin versant méridional de la mer de la Manche. Les séries briovériennes (granite de Barfleur et schistes altérés), analysées en rade de Cherbourg sont composées d'illite et de chlorite. Ces résultats sont cohérents avec la composition minéralogique des dépôts fins décrits sur le littoral. Dans le département de la Manche, le cortège argileux des dépôts triasiques est dominé par la kaolinite et l'illite (Aubry, 1982). Cela expliquerait l'augmentation des proportions de ces deux minéraux observés sur les sédiments argileux des plages du littoral du nord Cotentin.

Les terrains triasiques présentent un cortège argileux composé d'illite dominante et de kaolinite en baie des Veys et uniquement d'illite au large de Saint Vaast-la-Hougue. Dans les bassins plio-pléistocènes de Lessay et de Sainteny-Marchésieux (baie des Veys), les séries sédimentaires du socle briovérien sont constituées de 60 % d'illite et 40 % de chlorite (Doré et Poncet, 1978) ; les sables triasiques sont presque exclusivement composé d'illites avec près de 95 % (Aubry, 1982) ; Baize (1998) précise que les cortèges des principales formations plio-pléistocènes sont à smectites dominantes avec la présence d'illite et de kaolinite.

L'ensemble de ces données bibliographiques, dans la baie des Veys, justifie la présence des smectites dans les dépôts récents du littoral ouest bas-normand.

Dans la partie est du littoral bas-normand, les minéraux argileux de la bordure occidentale callovo-oxfordienne (Dugué, 1989) sont :

- l'illite toujours présente quelque soit la lithologie des dépôts,
- la kaolinite, en moindre quantité. Sa présence est inversement proportionnelle à celle des smectites dans les cortèges argileux,
- la chlorite présente en faible quantité dans ces séries, et de manière générale dans les dépôts jurassiques du nord-ouest de l'Europe (Hallam, 1975),
- les smectites apparaissent progressivement dans l'Oxfordien inférieur et moyen, évoluant conjointement avec la kaolinite, en relation avec une meilleure cristallinité.

Dans cette partie du littoral bas-normand, les minéraux argileux (smectites et des minéraux interstratifiés (chlorite-smectite) ou (chlorite-chlorite gonflante)) des sédiments récents ont donc pour origine principale l'érosion des bassins versants où affleurent les séries terrigènes callovo-oxfordiennes.

Dans la partie orientale de la baie de Seine où le Crétacé affleure, Laignel (1997) livre des cortèges argileux de la craie et des argiles silex composés de 85 % de smectites, 10 % d'illite et 5 % de kaolinite pour la craie et de 60 % de smectites, 35 % de kaolinite et 5 % d'illite pour les argiles à silex (Laignel *et al.*, 1998).

Se superposant aux formations géologiques définies jusqu'à présent, il faut aussi prendre en compte l'apport argileux de la couverture des loess. La carte des loess établie par Lautridou (1985) a été reportée sur la figure 3.41. ci-dessous. Les loess constituent la principale source de la smectite, surtout sur le littoral normand. Lautridou (1985) et Camuzard (2000) ont caractérisé le cortège argileux des loess pléistocènes par 50 % de smectites, 22 % d'illite, 20 % de kaolinite, 8 % de chlorite et des petites quantités de vermiculite. Dans le département de la Manche, les loess non dessinés apparaissent tout autant. Coutard (2003) signale la présence de loess dans le Val de Saire et Lautridou (com. perso.) estime que les loess beaucoup moins épais qu'en Haute Normandie recouvrent l'ensemble du département de la Manche.

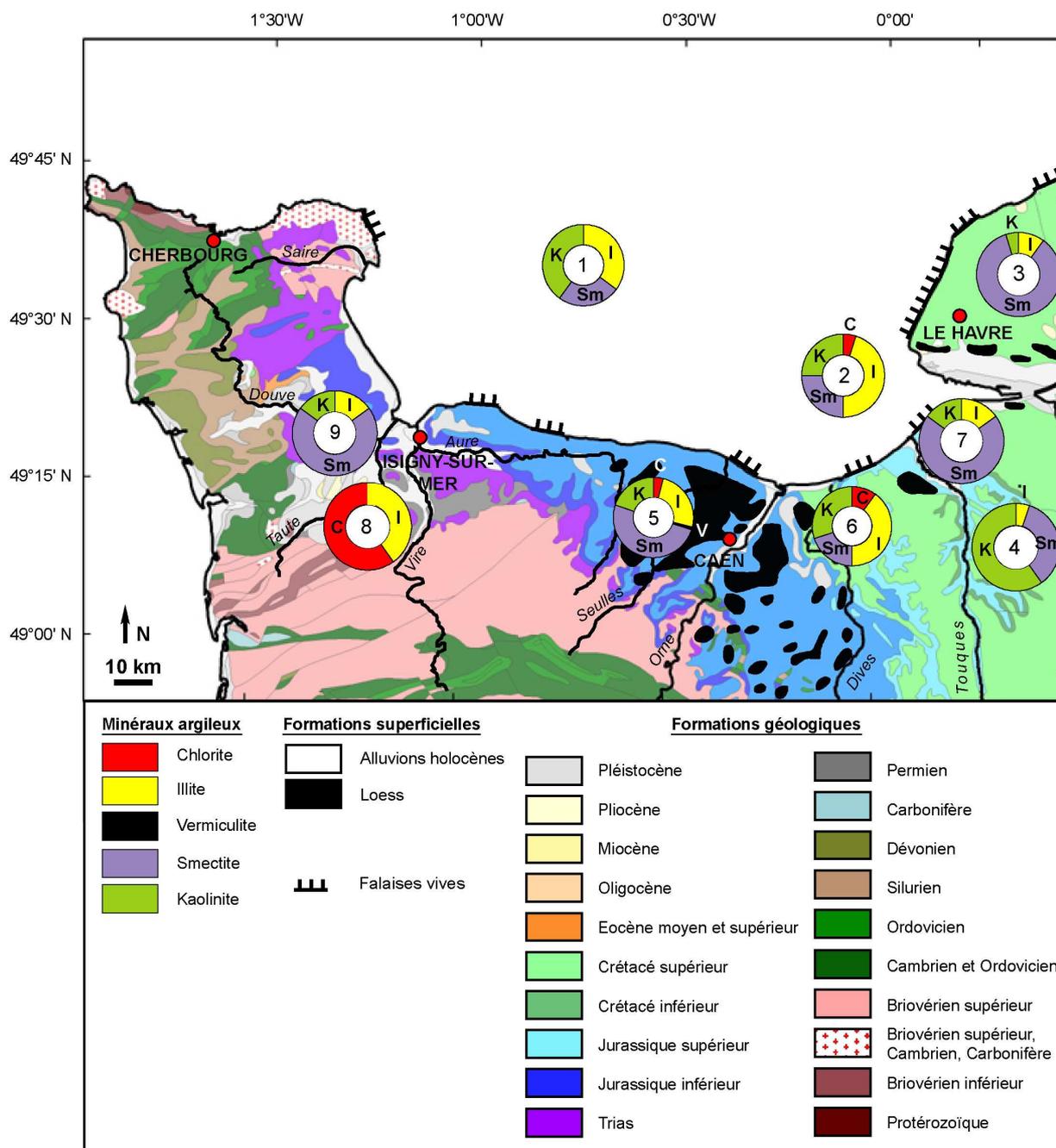


Figure 3.41. Carte géologique (extrait de la carte géologique de la Normandie au 1/50000, BRGM) et minéraux argileux associés du littoral normand. 1 : Sédiments superficiels de la baie de Seine (Larsonneur, 1971) ; 2 : Sédiments superficiels de l'embouchure (Avoine, 1981) ; 3 : Craie (Laignel, 1997) ; 4 : Argiles à silex (Laignel *et al.*, 1998) ; 5 : Loess pléistocènes (Lautridou, 1985 ; Camuzard, 2000) ; 6 : Marnes, calcaires et argiles callovo-oxfordiennes (Dugué, 1989) ; 7 : Falaises argileuses jurassiques (Ce travail) ; 8 : Socle briovérien (Doré et Poncet, 1978) ; 9 : Sédiments plio-pléistocènes (Baize, 1998).

II.3. Distribution des éléments majeurs-mineurs-traces des sédiments et des matières en suspension de la baie de Seine et du littoral bas-normand

Il est indispensable, quoique redondant d'une partie à l'autre, de présenter successivement les résultats sur les éléments chimiques de chaque zone géographique en suivant toujours la même démarche d'analyse et de réflexion, pour comprendre l'organisation et la répartition de chaque élément au sein de chaque zone du système estuarien de la Seine.

Chaque élément d'analyse permet ou non de conforter l'hypothèse qui suppose que certains éléments traces (cités précédemment) permettent de caractériser au mieux la source fluviale qu'est l'estuaire de Seine.

II.3.1. Facteurs d'enrichissement

De la même manière que pour les échantillons de l'estuaire de la Seine, les facteurs d'enrichissements (FE) ont été calculés pour les échantillons du littoral bas-normand et de la baie de Seine. Volontairement et pour une meilleure lisibilité, les représentations graphiques des FE ont été distinguées par littoral bas-normand ouest, littoral bas-normand est, échantillons fossiles, échantillons de sédiments subtidaux de la baie de Seine et des matières en suspension en baie et estuaire de Seine. Chaque série d'éléments chimiques sera détaillée, dans le but de rechercher des marqueurs particuliers discriminants et donc pertinents.

- Sédiments du littoral bas-normand

Les figures 3.42., 3.43. et 3.44. présentent les FE des différents échantillons prélevés sur le littoral bas-normand entre 2000 (pour quelques sédiments fossiles, sédiments datés holocène et bathonien) et 2005 (pour les sédiments récents). Les résultats sur les éléments chimiques restent identiques pour une même station, quelle que soit la période de prélèvements.

- Série Na à Fe

Les éléments fer, potassium et magnésium ont des FE proches de 1, leur signature de type shales est particulièrement homogène pour l'ensemble des échantillons du littoral ouest, est et fossiles. Seuls quelques échantillons ont des FE déficitaires en fer et en magnésium. Les FE du manganèse sont par contre en déficit pour les échantillons du littoral ouest et proches de 1 pour les autres. Sur le littoral, les échantillons présentent les mêmes caractéristiques que les échantillons de l'estuaire : les FE du titane sont proches et très légèrement supérieurs à 1 ; les FE du silicium sont très variables (silicium des aluminosilicates et de la silice pure). Les FE du calcium montrent des excès importants, dus à l'abondance des carbonates dans tous les échantillons. Le sodium reste en excès pour les échantillons du littoral ouest, est et des échantillons fossiles. Quelques échantillons du littoral est et des sédiments fossiles sont néanmoins déficitaires en cet élément. Associé à des particularités locales, le phosphore est en excès par rapport aux shales pour l'ensemble des échantillons du littoral.

- Série Be à As

Les FE du béryllium, vanadium, nickel et gallium sont voisins de 1 et peu dispersés. Leur signature, de type shales, est relativement homogène, excepté pour quelques échantillons en excès ou en déficit. Le zinc, chrome, arsenic et germanium présentent les FE les plus élevés, de

teneurs néanmoins plus faibles que celles trouvées en estuaire de Seine. Seuls les FE du cuivre sont proches de 1 et ne sont plus en très fort excès par rapport à ceux de l'estuaire. Les grandes différences entre tous ces échantillons sont les FE des sédiments fossiles qui ne présentent pas de fort excès en zinc, nickel, germanium et arsenic. Il semble donc, que quelques marqueurs géochimiques puissent être relevés comme marqueurs discriminants entre un stock sédimentaire récent et un stock sédimentaire fossile.

- Série Rb à Sb

Dans le cas de tous les échantillons, les FE sont pratiquement tous élevés et dispersés pour un élément donné. Les FE du rubidium, l'indium, et l'antimoine dans une moindre mesure, sont proches de 1 et sont peu dispersés. Les FE du molybdène sont également proches de 1 mais une part importante des FE des échantillons est inférieure à 1. Le strontium se retrouve une fois de plus en excès mais beaucoup moins pour les échantillons fossiles. Les FE du cadmium sont très élevés avec un facteur égal ou supérieur à 10 au maximum quel que soit l'échantillon. Comme ceux de l'estuaire, les valeurs de FE du zirconium sont élevées et très dispersées ce qui est probablement imputable à la présence de minéraux lourds. Les FE de l'antimoine sont en excès par rapport aux shales pour les sédiments actuels mais en dessous de la référence pour les sédiments fossiles jurassiques.

- Série Cs à U

Comme pour les échantillons de l'estuaire, presque tous les éléments (Cs, Ta, W, Pb, Bi) de la série présentent des FE en excès par rapport aux shales, mais généralement les valeurs restent très homogènes et moins élevées que les premières citées. Les FE de l'hafnium, thorium, baryum et uranium sont proches de 1 voire légèrement supérieurs ou inférieurs. Les FE du bismuth présentent quelques valeurs proches de 1 ou très légèrement supérieures ou inférieures à 1 pour les échantillons fossiles jurassiques, par exemple.

En résumé, il semble à la suite de ces différentes analyses sur tous les éléments et tous les échantillons du littoral bas-normand que quelques éléments puissent se dégager comme marqueurs particuliers, discriminant différentes sources, divers pôles ou stocks sédimentaires. Les éléments qui ressortent et peuvent être sélectionnés sont : Zn, Cr, Cd, Pb, Bi, Sb et dans une moindre mesure Sn.

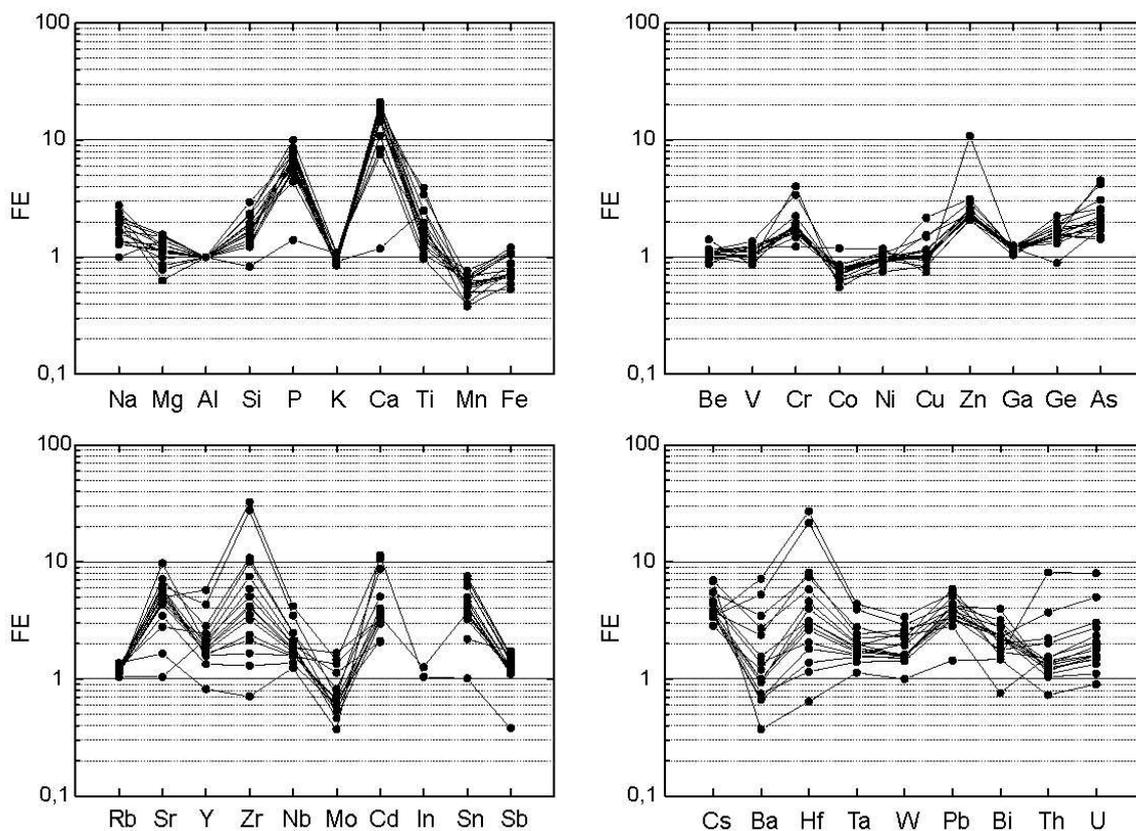


Figure 3.42. Facteurs d'enrichissement (FE) des échantillons prélevés sur le littoral bas-normand ouest (juin 2004 et avril 2005).

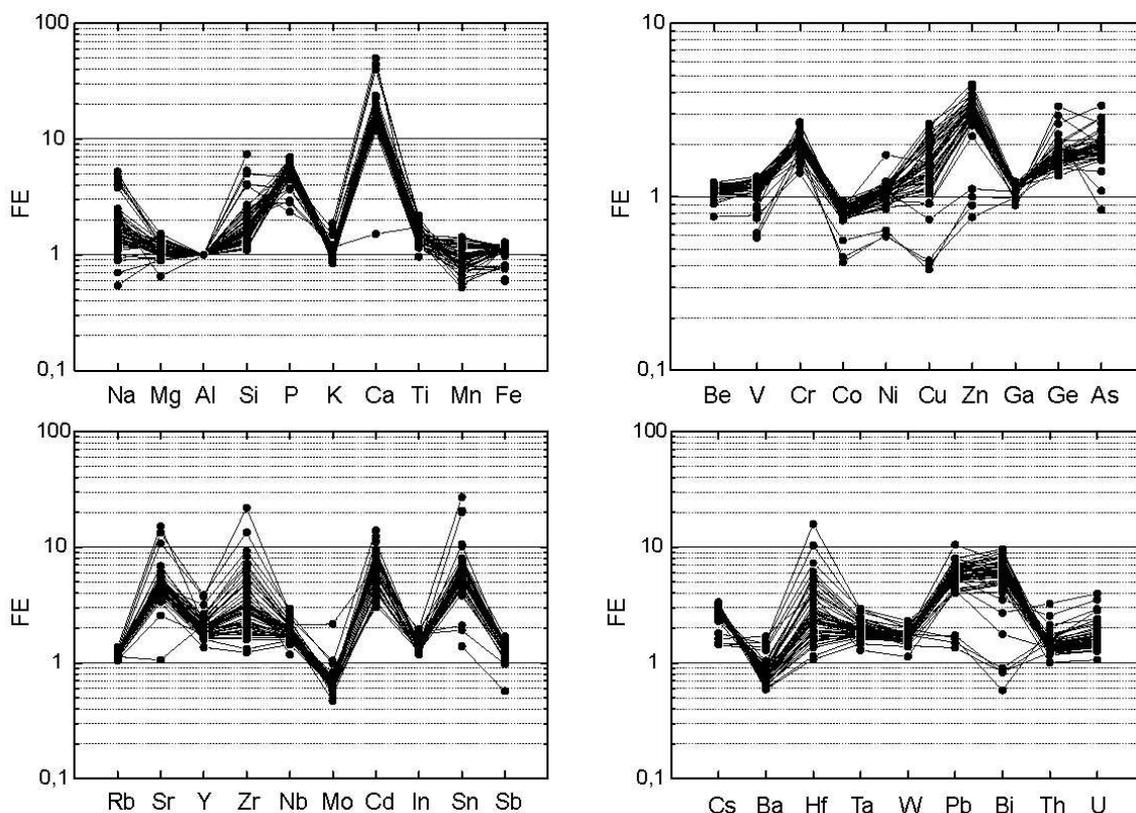


Figure 3.43. Facteurs d'enrichissement (FE) des échantillons prélevés sur le littoral bas-normand est (mars 2002 à février 2003, et avril 2005).

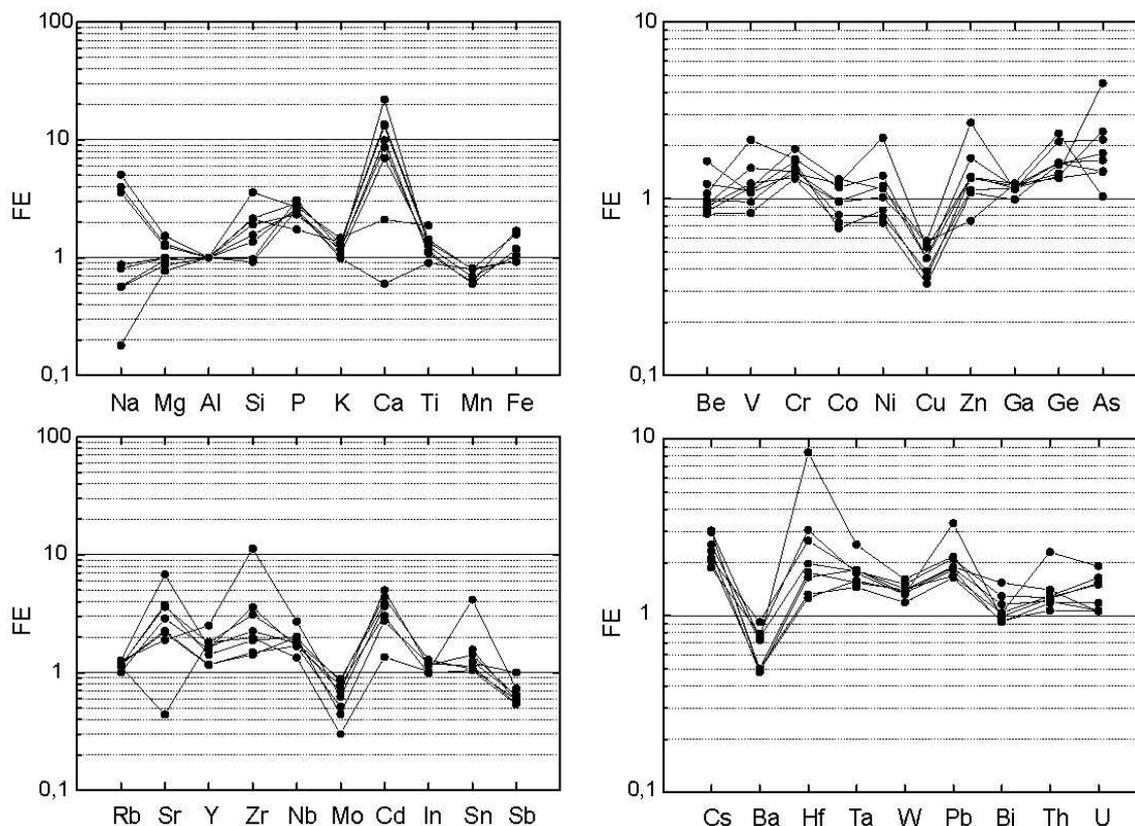


Figure 3.44. Facteurs d'enrichissement (FE) des échantillons fossiles (Jurassique) prélevés sur le littoral bas-normand Est (2000, 2003 et 2004).

- Sédiments et matières en suspension de la baie de Seine, et matières en suspension de l'estuaire de la Seine

Les figures 3.45. et 3.46. présentent les FE des différents échantillons de sédiments superficiels prélevés en domaine subtidal et des matières en suspension. À noter que ces dernières ont été prélevées dans la baie et dans l'estuaire de Seine, afin d'intégrer l'ensemble des données géochimiques dans le continuum Seine-baie de Seine.

En comparant l'intégralité des données sur les FE, il apparaît que les sédiments subtidaux et les matières en suspension possèdent des caractéristiques géochimiques analogues.

- Série Na à Fe

Les éléments fer, magnésium, potassium ont des FE proches de 1, leur signature homogène est de type shales pour l'ensemble des sédiments et des MES de la baie de Seine. Les FE du manganèse proches également de 1 sont très dispersés. Les FE du calcium sont toujours aussi élevés, ainsi que dans une moindre mesure ceux du sodium. Les FE du titane Ti sont légèrement supérieurs à 1. Les FE du silicium Si sont variables, proches de 1 ou en excès, variabilité qui peut s'expliquer par une double origine du silicium, de la silice pure et des aluminosilicates. Les FE du phosphore restent excédentaires par rapport aux shales pour les mêmes raisons évoquées précédemment dans le cas de l'estuaire.

- Série Be à As

Dans cette série, un bon nombre d'éléments ont des FE proches de 1, voire légèrement en excès. Ils regroupent béryllium, vanadium, cobalt avec quelques échantillons en déficit, nickel avec quelques échantillons en excès, cuivre avec des FE très dispersés et gallium. Seuls les FE du chrome, du zinc sont en fort excès aussi bien pour le sédiment que pour les MES. Les FE du germanium et de l'arsenic sont supérieurs à 1, les valeurs étant beaucoup moins dispersées que pour le zinc.

- Série Rb à Sb

Dans cette série, tous les éléments présentent des FE en excès par rapport à la référence shales. Seuls le rubidium et le molybdène sont proches de 1 avec les FE du molybdène très dispersés autour de 1. Comme auparavant, les valeurs de FE élevées et dispersées du zirconium peuvent s'expliquer par la présence des minéraux lourds.

- Série Cs à U

Comme cité précédemment dans le reste de la baie de Seine, tous les éléments présentent des FE en excès aussi bien pour les sédiments subtidiaux que les MES. La seule exception est le baryum pour les sédiments subtidiaux dont les FE sont proches de 1, mais très dispersés.

De la même manière que le zirconium, les FE de l'hafnium sont en excès mais avec des valeurs très dispersées. Cela est tout à fait normal, puisque les deux éléments se comportent de la même manière (voir page 182).

En comparant les résultats obtenus en domaine intertidal et subtidal de la baie de Seine, il apparaît de nombreuses analogies dans les caractéristiques géochimiques. Il en est de même pour les matières en suspension de la baie de Seine et de l'estuaire de la Seine dont les caractéristiques géochimiques sont analogues mais où les teneurs sont plus importantes dans l'estuaire que dans la baie de Seine.

Donc seuls quelques éléments chimiques peuvent être utiles comme marqueurs particuliers d'un ou deux pôles sédimentaires. Les éléments chimiques qui se présentent comme de bons " candidats " sont les suivants : Zn, Cr, Cd, Pb, Bi, Sb et Sn.

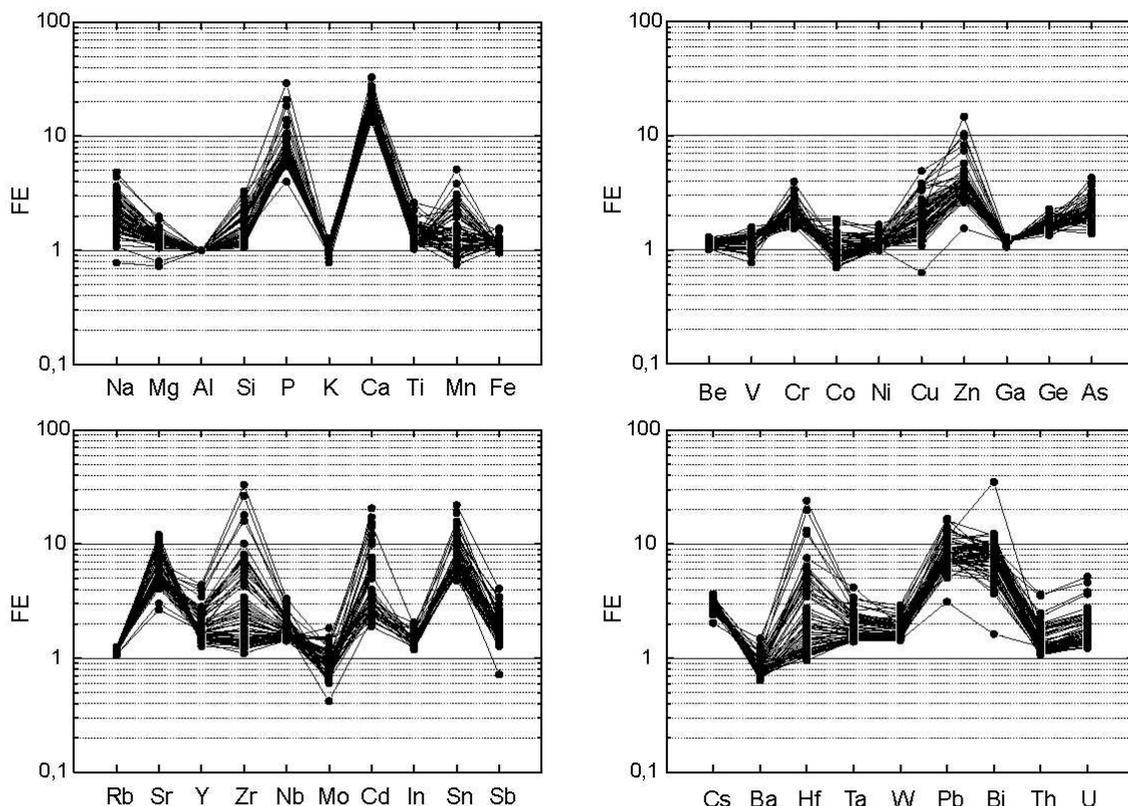


Figure 3.45. Facteurs d'enrichissement (FE) des échantillons subtidaux de sédiments superficiels de la baie de Seine (avril 2005).

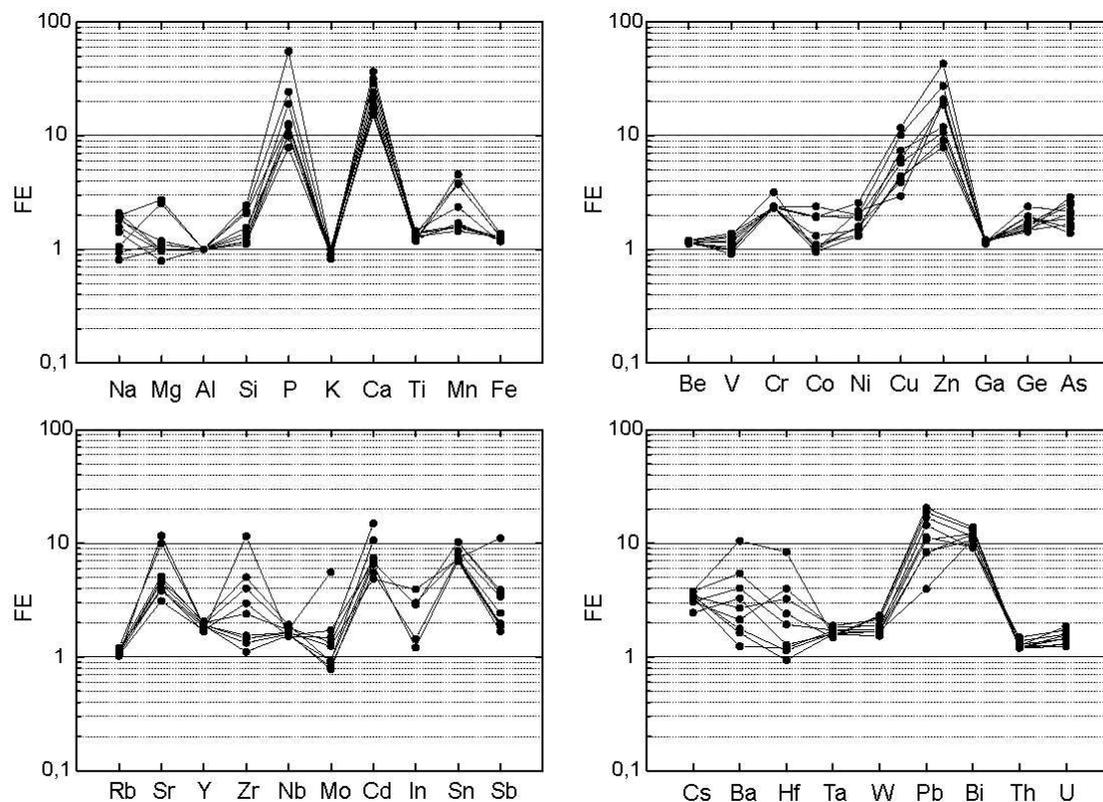


Figure 3.46. Facteurs d'enrichissement (FE) des matières en suspension prélevées dans l'estuaire de la Seine et dans la baie de Seine (avril 2005).

En résumé, au vu de ces différents résultats, il apparaît que les éléments définis dans l'estuaire de la Seine comme pouvant être de bons marqueurs particuliers du domaine fluviatile, se retrouve également en baie de Seine et sur le littoral bas-normand. Il reste maintenant à savoir quel est ou quels sont les éléments les plus appropriés et les discriminants parmi les suivants : Zn, Cd, Cu, Bi, Pb, Sn, Cr et Sb.

II.3.2. Constituants majoritaires du mélange sédimentaire

- Le système Ca-Al-Si des sédiments actuels et fossiles

La figure ci-dessous représente la corrélation $Si_{CFB}-Al_{CFB}$; la droite représentative du matériel de type shales a été tracée sur la base d'un rapport Si/Al de 3,125 (Fig.3.47.). La droite de corrélation représentative des sédiments de la baie de Seine en domaines intertidal et subtidal a une valeur à l'origine forcée à Si = 46,7 % qui correspond à la teneur en Si dans le quartz ($Si/SiO_2 = 0,467$). De la même manière que pour les échantillons de l'estuaire, les concentrations en Si sont seulement dues aux aluminosilicates, pour les plus fortes concentrations en aluminium. Si l'on soustrait les quantités de silicium liées aux aluminosilicates, aux teneurs en silicium, on obtient le Si lié au quartz dont il est possible d'évaluer l'abondance relative. On suppose alors que l'excès de Si est essentiellement lié au quartz, voire à la silice biogène.

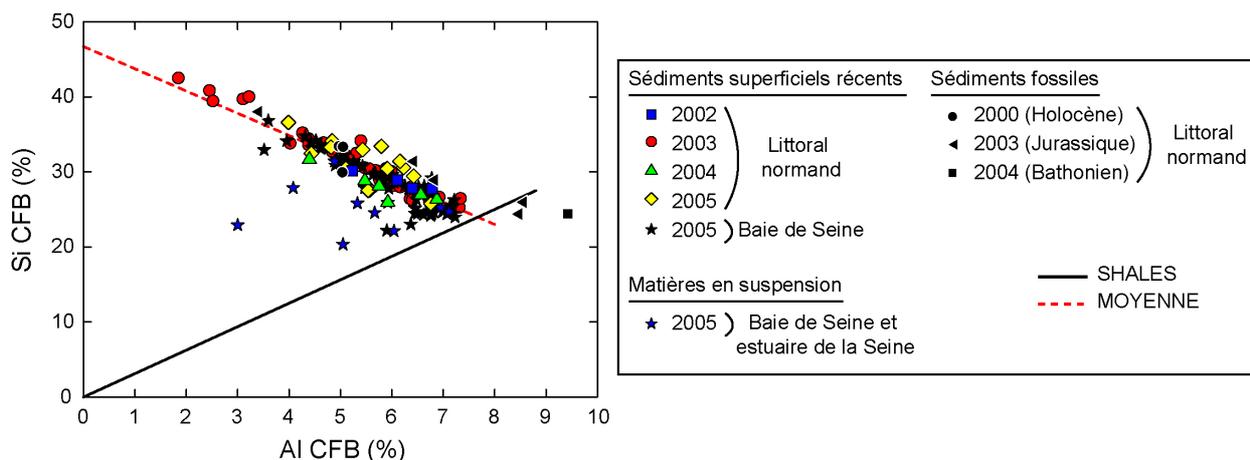


Figure 3.47. Relation entre les teneurs en Si et Al calculées sur la base d'un sédiment décarbonaté (CFB) pour les sédiments intertidaux, subtidaux et des matières en suspension de la baie de Seine et du littoral bas-normand.

Comme expliqué pour l'estuaire de la Seine, il est possible de résoudre le mélange sédimentaire avec trois constituants majeurs : les aluminosilicates, les carbonates et la silice.

Le mélange sédimentaire peut alors être résolu en ces trois constituants majoritaires : les carbonates, le quartz et les aluminosilicates. La figure 3.48. présente les diagrammes ternaires pour chaque type de sédiments (littoral ouest, littoral est, sédiments subtidaux de la baie, MES de la baie). Le diagramme central regroupe l'ensemble des données, ce qui permet de comparer plus aisément les échantillons entre eux.

Si l'on compare les échantillons du littoral ouest avec ceux du littoral est, on s'aperçoit que :

- un échantillon du littoral ouest est dépourvu de carbonates : il s'agit de l'échantillon à l'embouchure de la Saire,

- quelques échantillons sont caractérisés par un appauvrissement en aluminosilicates et un enrichissement en silice. Deux d'entre eux (PEN04 et PEN06) correspondent à des argiles (probablement fossiles) compactes, en érosion sur la plage de Pennedepie. Un échantillon de tourbe récolté sur la même plage est dépourvu en carbonates. Les trois derniers échantillons ont des faciès totalement différents : le premier est un sédiment vaseux (VILL04), l'autre est un sédiment sableux à peine envasé (DEAU04) et le dernier est un mince placage de vase (DEAU03).

Par contre, les sédiments subtidiaux ont un mélange sédimentaire très analogues avec un nuage de points très regroupé. Les MES, quant à elles, diffèrent, ayant des caractéristiques semblables à celles des échantillons prélevés sur le littoral est. Ceci est logique puisqu'elles ont été pour la plupart récoltées dans la partie orientale de la baie, proche des zones de dépôts vaseux des plages du Calvados.

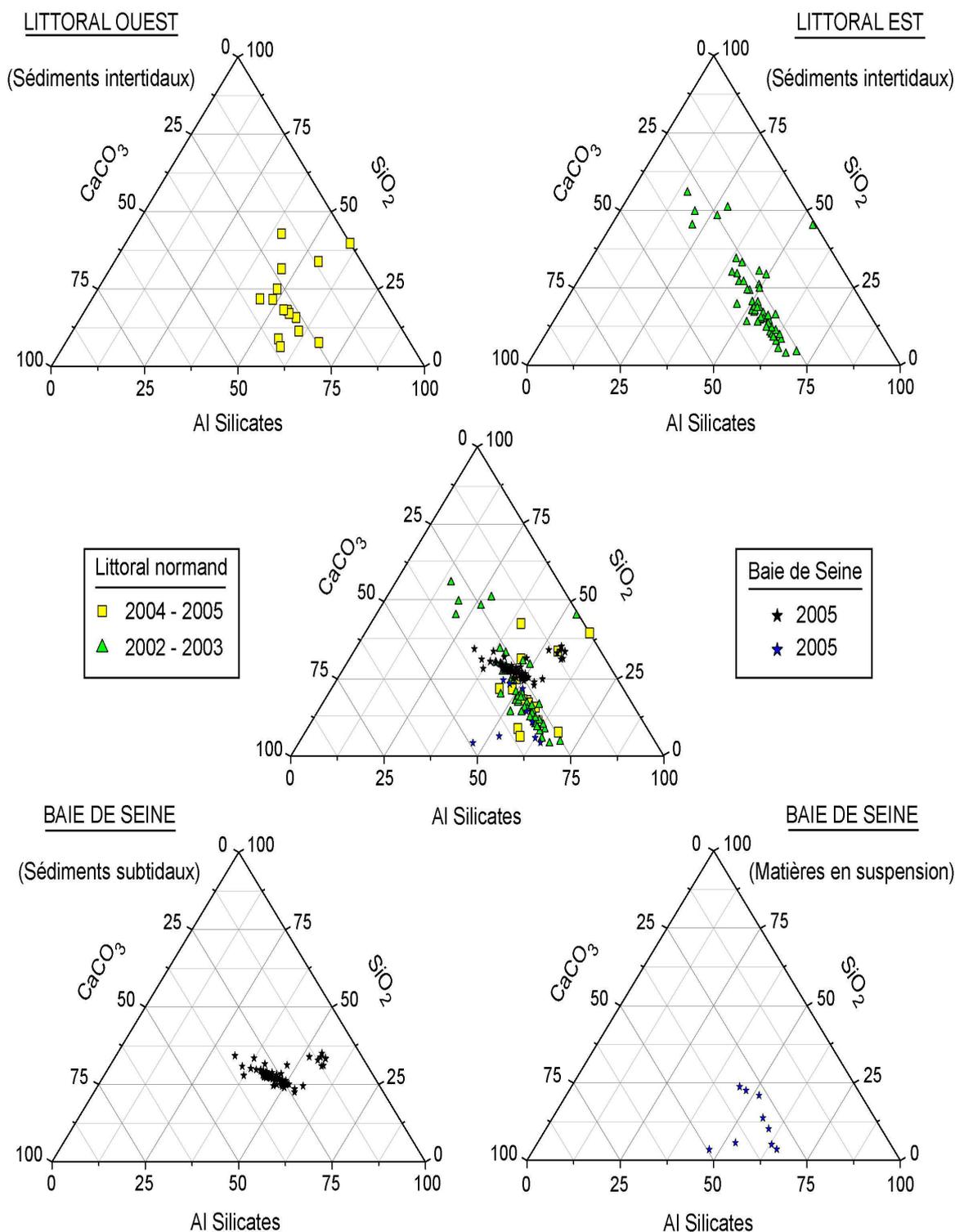


Figure 3.48. Diagrammes ternaires représentant la proportion en carbonates, quartz et aluminosilicates pour les échantillons intertidaux du littoral ouest (carrés jaunes) et du littoral est (triangles verts) de la baie de Seine, ainsi que les échantillons subtidaux (étoiles noires) et les matières en suspension (étoiles bleues) en baie de Seine. Le diagramme central est une compilation de tous les échantillons prélevés en baie de Seine et sur le littoral bas-normand.

La grande différence existe avec les sédiments fossiles d'âge jurassique qui sont enrichis en aluminosilicates, et appauvris, voir dépourvus de silice et/ou de carbonates. Par contre les sédiments holocènes fossiles présentent des caractéristiques comparables à celles trouvées dans les sédiments intertidaux et subtidaux actuels (Fig.3.49.).

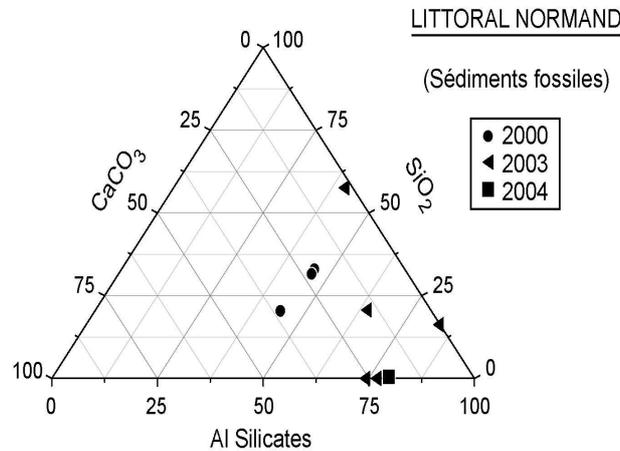


Figure 3.49. Diagramme ternaire représentant la proportion en carbonates, quartz et aluminosilicates pour les échantillons fossiles du littoral normand (rond noir : Holocène, triangle noir : Jurassique, carré noir : Mésozoïque (Bathonien)).

- Les éléments majeurs (Fe, Mg, K, P et Ti)

Ces éléments ont des comportements similaires à ceux observés dans l'estuaire de la Seine.

Le fer est très bien corrélé à l'aluminium, excepté pour les échantillons du littoral prélevés en 2005, où les teneurs sont légèrement en dessous de la référence, avec un rapport Fe/Al de 0,40 (Fig.3.50.). Cela reste néanmoins cohérent avec le rapport calculé pour les échantillons intertidaux de l'estuaire de la Seine. Les échantillons jurassiques sont, en revanche, quelque peu éloignés de la droite des shales avec des teneurs en aluminium élevées.

Le magnésium est relativement bien corrélé à l'aluminium avec néanmoins des valeurs soit légèrement supérieures ou inférieures à la droite des shales (Fig.3.50.). C'est le cas pour quelques échantillons fossiles qui sont en dessous de la référence. Les écarts, par contre, ne sont pas liés à leur teneur en carbonates.

La corrélation K-Al est relativement bonne, puisqu'elle se situe sur la droite des shales (Fig.3.50.). Cela signifie donc que pour la plupart des échantillons intertidaux et subtidaux de la baie de Seine, le potassium est pratiquement lié à sa présence dans les argiles. Pour les échantillons en excès ou en déficit (quelques échantillons fossiles et des échantillons du littoral est de la baie), le potassium ne provient pas uniquement des argiles mais peut aussi être contenu dans les feldspaths potassiques. Leur présence n'est pas indiquée, dans la littérature, dans la fraction pélitique. La seule information qui existe est celle décrite par Larssonneur (1971). Il estime la teneur en feldspaths entre 10 à 15 %, voire 20 % dans la partie occidentale de la baie de Seine.

Plus généralement, en Manche, la fraction sableuse des cailloutis est relativement pauvre en feldspaths (2 à 8 %). Les zones les plus enrichies sont celles des sables de la région de Barfleur, en particulier au nord du massif granitique où les teneurs dépassent 25 %. De l'Anse du Brick (est de Cherbourg) à Saint-Vaast-la-Hougue, les sables des plages sont également riches en feldspaths grâce au remaniement d'arènes fraîches (Hommeril, 1967) ; le massif granitique exerce

une influence sur la composition des sables bordant la côte orientale du Cotentin car les feldspaths potassiques sont dominants et plus nombreux qu'ailleurs en baie de Seine.

Les cas du titane et du phosphore sont différents des trois éléments présentés précédemment. Ces deux éléments sont en excès, voire en très fort excès par rapport à la droite des shales (Fig.3.50.). Ceci a déjà été observé dans l'estuaire de la Seine, et cela permet donc de conclure que les sédiments prélevés en baie de Seine ont une signature chimique presque identique à celle des échantillons de l'estuaire. Seuls les échantillons fossiles sont proches de la référence shales, n'étant pas liés aux rejets de phosphogypses et de titane en estuaire de Seine (Chiffolleau et al., 2001).

Pour ces éléments, il est important de noter que les échantillons datés de l'Holocène ont des caractéristiques géochimiques similaires aux échantillons intertidaux et subtidaux de la baie de Seine. Il n'est pas possible pour l'instant de les différencier. Seuls les échantillons jurassiques ont une signature géochimique différente.

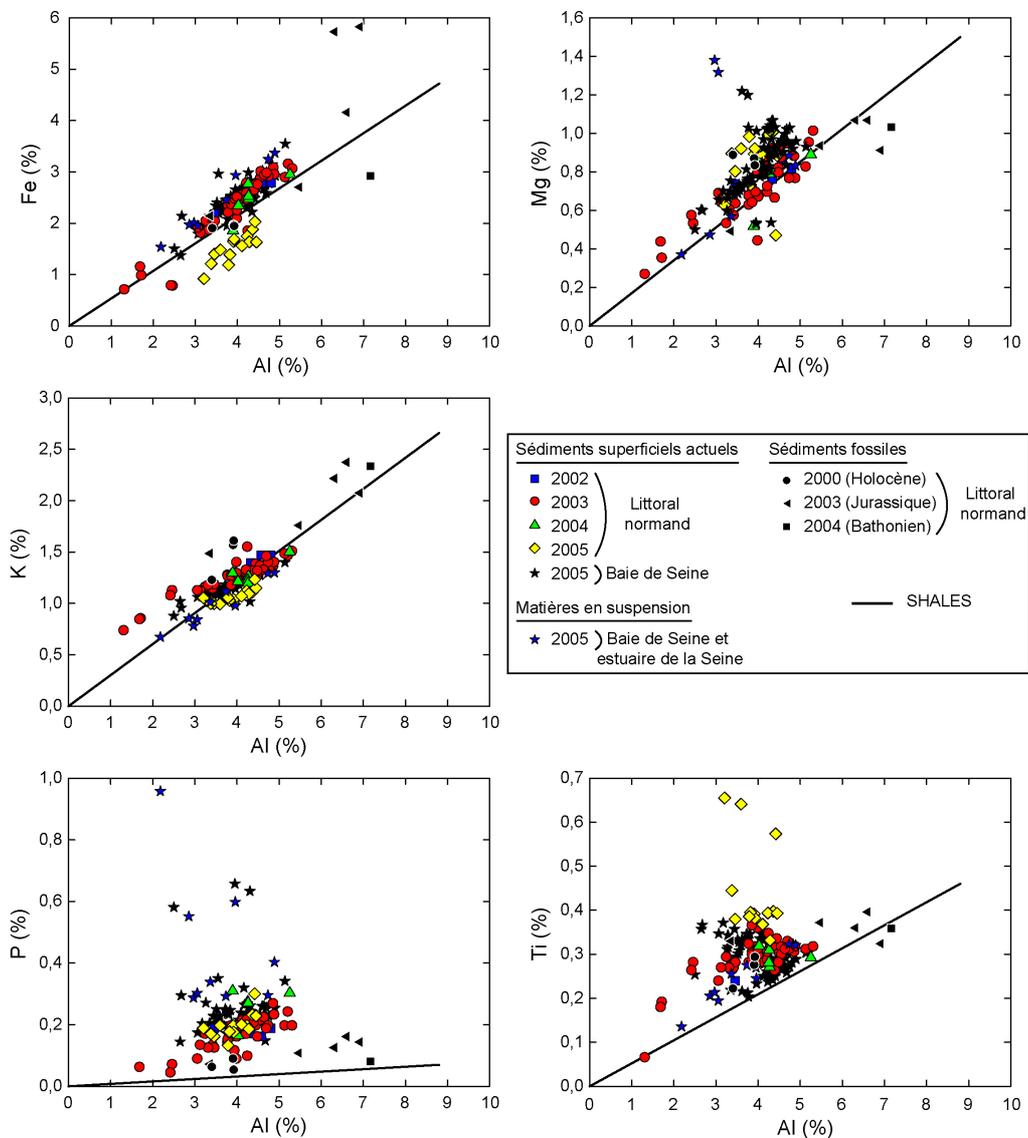


Figure 3.50. Relation entre les teneurs en Fe, Mg, K, Ti, P et Al dans les sédiments intertidaux et subtidaux de la baie de Seine et du littoral bas-normand, ainsi que des matières en suspension prélevées en baie de Seine.

II.3.3. Les carbonates dans les sédiments et le strontium associé

- Les carbonates dans les sédiments fins de la baie de Seine et du littoral normand

Pour représenter lisiblement les résultats qui ont trait au littoral bas-normand, un PK étendu a été défini (annexe) et sera utilisé dans les résultats présentés ci-après.

La figure 3.51. représente la teneur en carbonates dans les échantillons du littoral bas-normand. Les teneurs sont comprises entre 20 et 30 %. Un échantillon (un losange jaune) du littoral normand ouest, prélevé en 2005 correspond à la rivière Saire présente une valeur de 0 %. Deux échantillons fossiles datés jurassiques, prélevés au pied des falaises de Villerville, sont aussi dépourvus de carbonates.

En baie de Seine, les teneurs en carbonates sont beaucoup plus variées. La carte des pourcentages en carbonates fait apparaître des teneurs croissantes depuis l'embouchure de la Seine vers la Manche ouest. Les taux de carbonates varient de 20 % environ à l'embouchure à plus de 50 % au nord de la baie de Seine occidentale.

Larsonneur (1971) estime la teneur en carbonates des sédiments de la baie de Seine entre 18 et 42 %, et Avoine (1981) entre 24 et 39 % pour la fraction pélitique ; ce qui est tout à fait cohérent avec les résultats présentés dans ce manuscrit. Dans la partie sud-orientale, Garnaud (2003) précise que les taux en carbonates peuvent atteindre près de 90 %, dans des silts correspondant à des sillons coquilliers situés au large d'Houlgate.

Ces carbonates sont le résultat d'une fine mouture de débris zoogènes et phycogènes ajouté à la fraction détritique (Rajcevic, 1957; Vigarié, 1964; Germaneau, 1969).

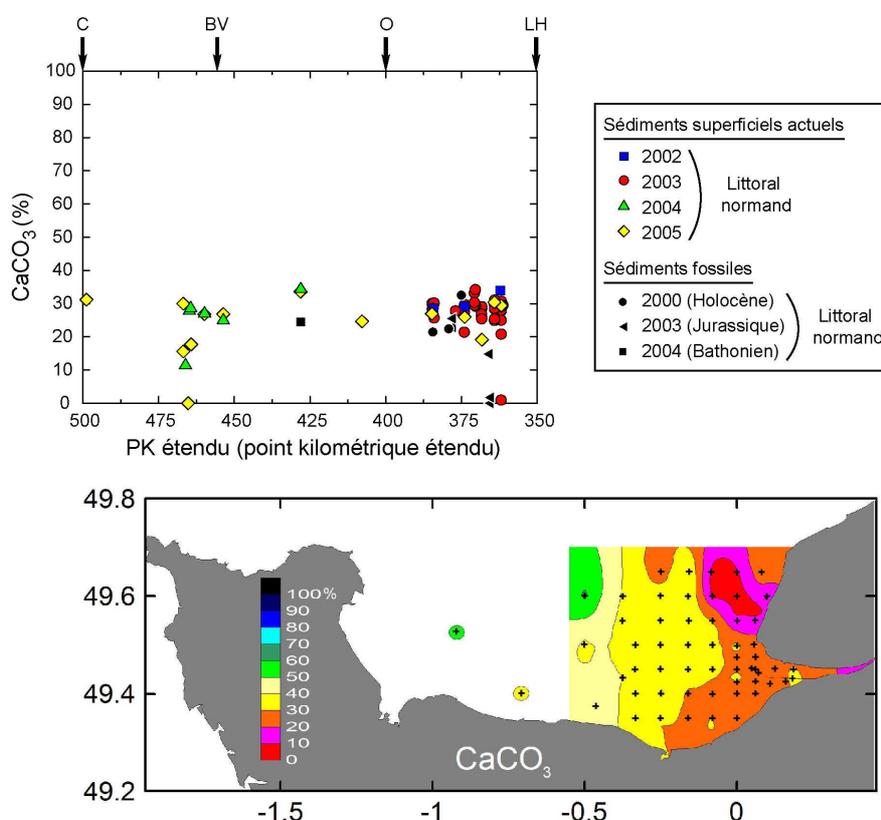


Figure 3.51. Répartition de la teneur en carbonates selon la distance pour les sédiments intertidaux du littoral normand et cartographie du taux de carbonates dans la baie de Seine pour les sédiments subtidaux de la baie de Seine. C : Cherbourg, BV : Baie des Veys, O : Embouchure de l'Orne, LH : Le Havre.

- Le strontium associé aux carbonates dans les sédiments

La corrélation Sr-Al présente un nuage de points très dispersé avec des teneurs en excès par rapport à la droite des shales, pour l'ensemble des échantillons de la baie de Seine et du littoral normand (Fig.3.52.). De la même manière que pour l'excès de silicium, un excès de strontium par rapport aux shales peut être calculé. L'excès ainsi obtenu n'est pas réellement corrélé aux taux de carbonates pour les sédiments intertidaux et subtidaux de la baie de Seine et du littoral bas-normand, ainsi que les matières en suspension.

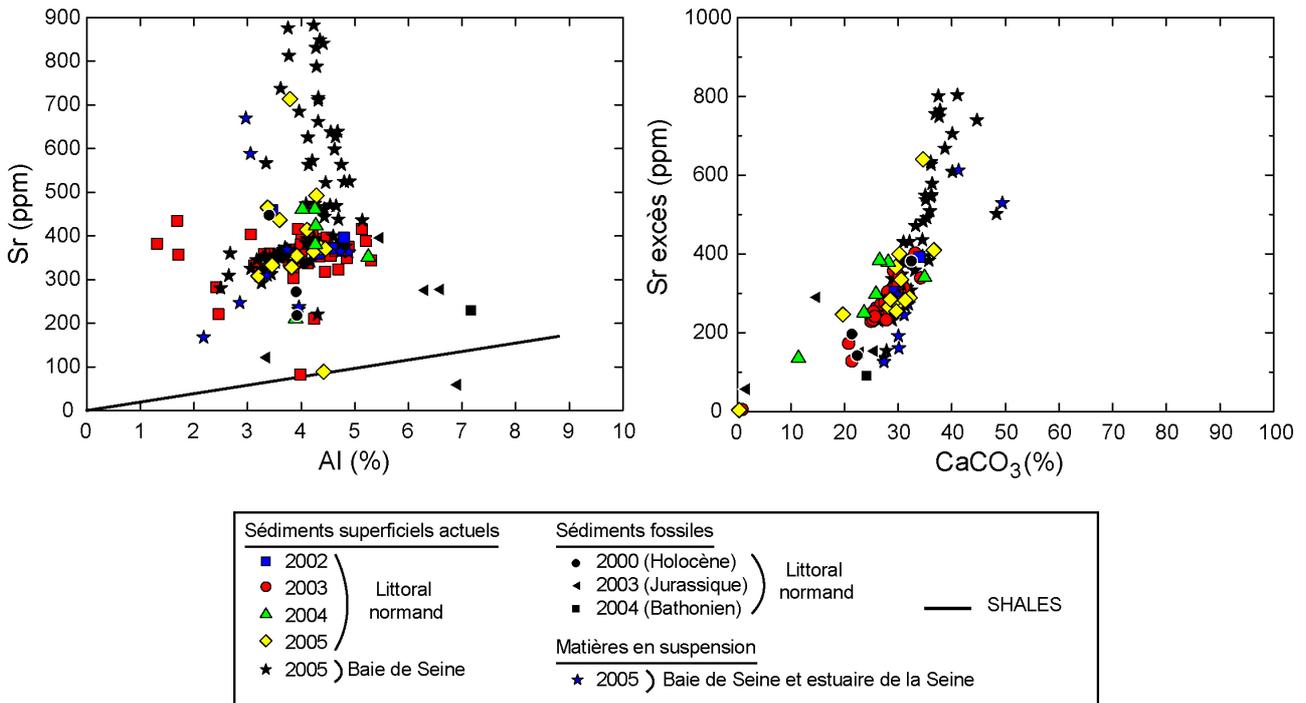


Figure 3.52. Relation entre les teneurs en Sr et Al et corrélation entre l'excès de Sr et le taux de carbonates pour les sédiments intertidaux, subtidaux et des matières en suspension de la baie de Seine et du littoral normand.

II.3.4. Éléments en traces corrélés à l'aluminium dans les sédiments

Les éléments présentés dans cette partie ont en commun d'être très bien corrélés avec l'aluminium. Il s'agit du Be, Ge, Ni, Cs, Ga, Rb et Ba. Dans les quatre exemples présentés, le Rb et le Ga ont de surcroît une grande analogie avec les shales (Fig.3.53.). Le germanium (Ge), par contre, est corrélé à l'aluminium selon une droite qui ne passe pas par l'origine. Cela suggère donc, comme cela a déjà été évoqué pour l'estuaire de la Seine, que les argiles ne sont pas les seules phases porteuses, et que le quartz peut être lui aussi une phase porteuse.

Le césium est, quant à lui, corrélé à l'aluminium mais en excès par rapport à la référence shales. Les échantillons fossiles datés Cénozoïque-Mésozoïque ont des teneurs en aluminium en excès mais restent néanmoins, pour ces quelques éléments, bien corrélés à l'aluminium. Les échantillons datés de l'Holocène sont quant à eux encore une fois confondus avec les échantillons récents intertidaux et subtidaux.

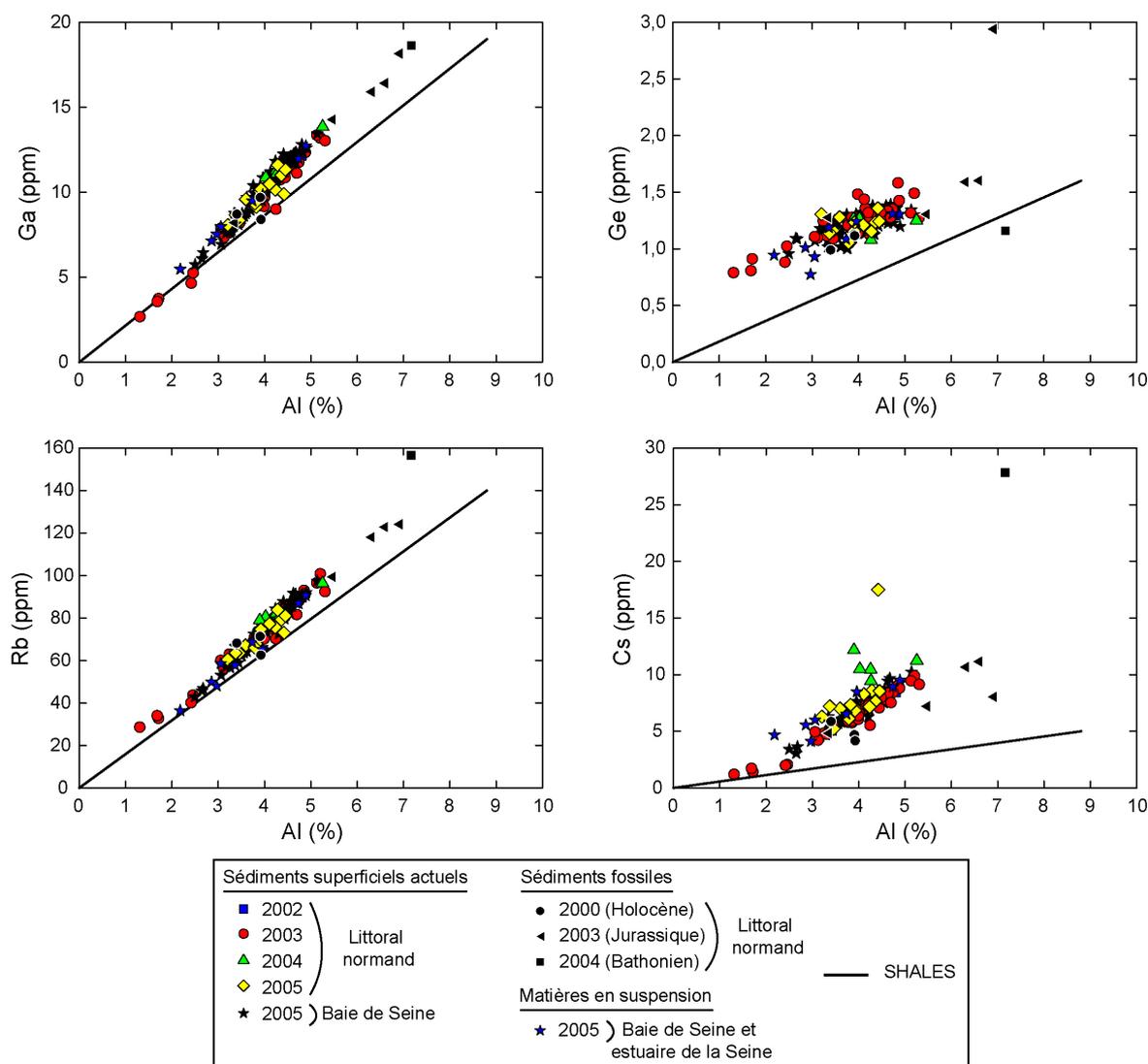


Figure 3.53. Relation entre les teneurs en Ga, Ge, Rb, Cs et Al dans les sédiments intertidaux et subtidaux de la baie de Seine et du littoral normand, ainsi que des matières en suspension prélevées en baie de Seine.

II.3.5. Éléments dont la concentration est modulée par la présence de minéraux lourds

Comme nous l'avons vu dans l'estuaire de la Seine, certains éléments des échantillons de la baie de Seine ont leur concentration modulée par la présence de minéraux lourds. Les zircons sont toujours les principaux candidats comme phases porteuses de ces éléments (Fig.3.54.).

En effet, l'excès de zirconium reste bien corrélé à l'excès de titane, qui lui peut être porté par des ilménites (TiO_2 , FeO , Fe_2O_3) ou des rutilés (TiO_2) souvent enrichis en terres rares (Fig.3.55.). En définitive, les concentrations en terres rares, tantale, thorium, uranium et, dans une moindre mesure, niobium, tungstène et yttrium sont essentiellement modulées par l'abondance des minéraux lourds.

Ces minéraux lourds font probablement partie de la fraction silteuse la plus enrichie en quartz des différents échantillons de la baie de Seine, ainsi que de l'estuaire de la Seine. C'est en tout cas ce qui a été observé par Larsonneur (1971). La répartition des minéraux ubiquistes (tourmaline,

zircon et rutile) est pauvre au nord-ouest du Cotentin et dans les secteurs à sédimentation sablo-vaseuse de la baie de Seine. Par contre, elle est élevée sur les plages cauchoises (Billy, 1964), dans les sables sous-marins adjacents en raison du démantèlement de formations albiennes (Juignet, 1965 ; Rioult *et al.*, 1966) et du remaniement d'alluvions fluviales d'origine granitique (Brajnikov, 1942 et 1947), et dans les sables de certaines plages du nord-est du Cotentin, due à l'érosion des limons côtiers, riches en zircon et en tourmaline (Lautridou, 1968a et 1968b, Pellerin, 1968 ; Giresse, 1969).

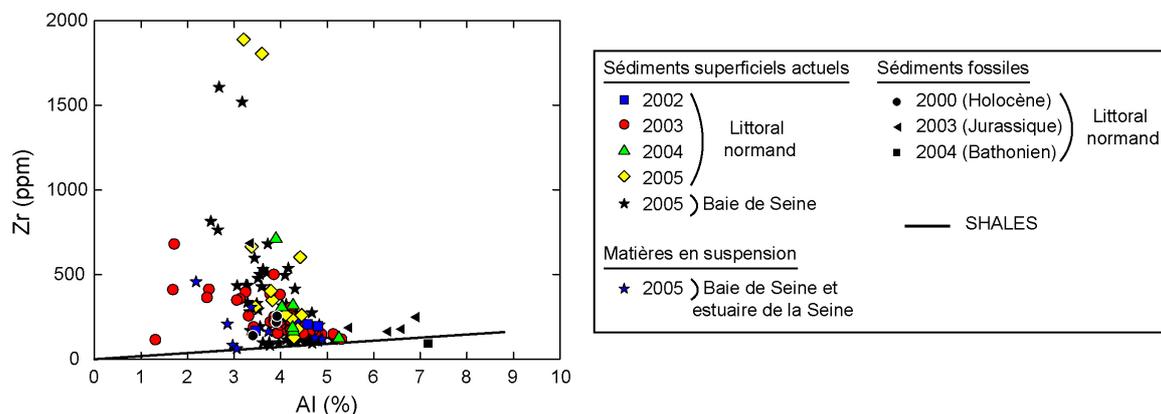


Figure 3.54. Corrélation entre Zr et Al pour les sédiments intertidaux, subtidaux et des matières en suspension de la baie de Seine et du littoral normand.

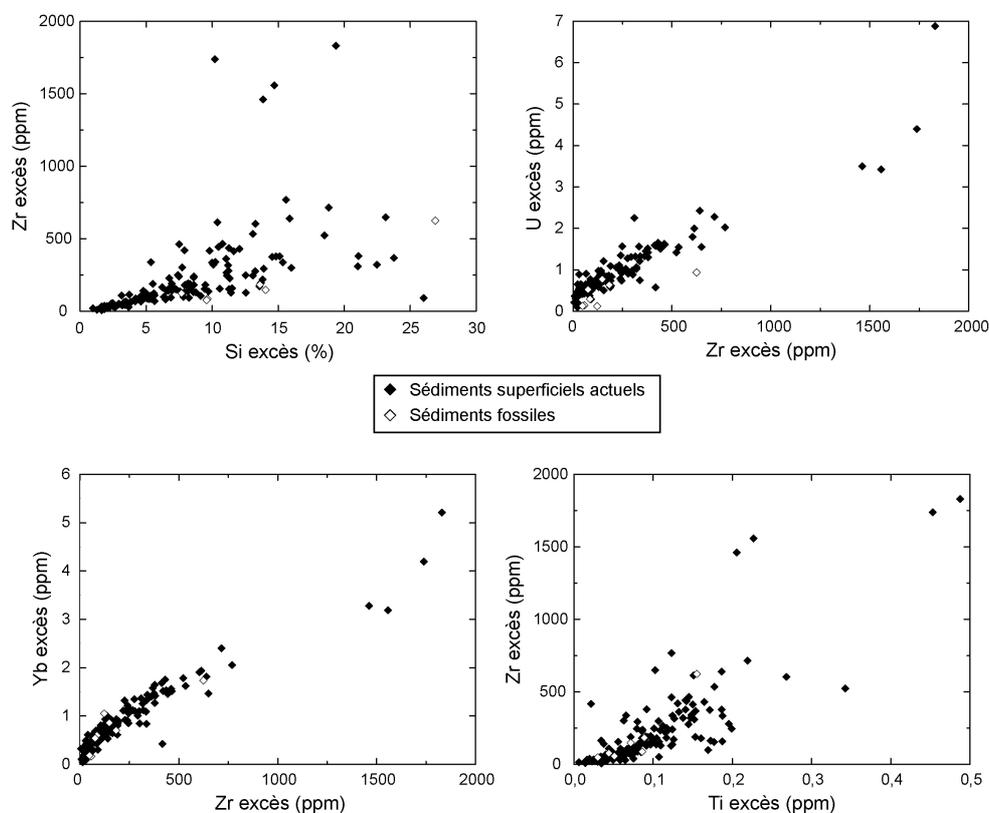


Figure 3.55. Relation entre les excès de Zr, Yb, Ti et U pour les sédiments superficiels récents (intertidaux, subtidaux et des matières en suspension) et fossiles de la baie de Seine et du littoral bas-normand.

II.3.6. Éléments en traces très excédentaires par rapport aux shales

Ces éléments, comme nous l'avons vu dans l'estuaire de la Seine, sont enrichis voire, très enrichis par rapport à la référence shales. La corrélation de ces éléments à l'aluminium est d'autant moins bonne que l'excès par rapport aux shales est important. C'est le cas pour les éléments déterminés lors de l'analyse des facteurs d'enrichissements, soit Zn, Cr, Cd, Pb, Bi, Sb et Sn. Il s'agit des mêmes éléments que pour l'estuaire de la Seine, qui semblent être de bons candidats pour le marquage du stock sédimentaire fluvial (Fig.3.56.).

Dans le nuage de points de ces éléments, les échantillons fossiles d'âge Jurassique se distinguent, avec des teneurs proches de la droite de référence. Ces éléments très excédentaires permettent à la fois de suivre le matériel d'origine fluvial et de différencier les échantillons fossiles. Les échantillons en très forts excès correspondent quant à eux aux sédiments subtidiaux de l'embouchure de la Seine et aux matières en suspension.

Parmi les sept échantillons excédentaires par rapport aux shales, seuls quatre apparaissent comme de bons marqueurs du domaine fluvial. Il s'agit de Cu, Sb, Sn et Zn.

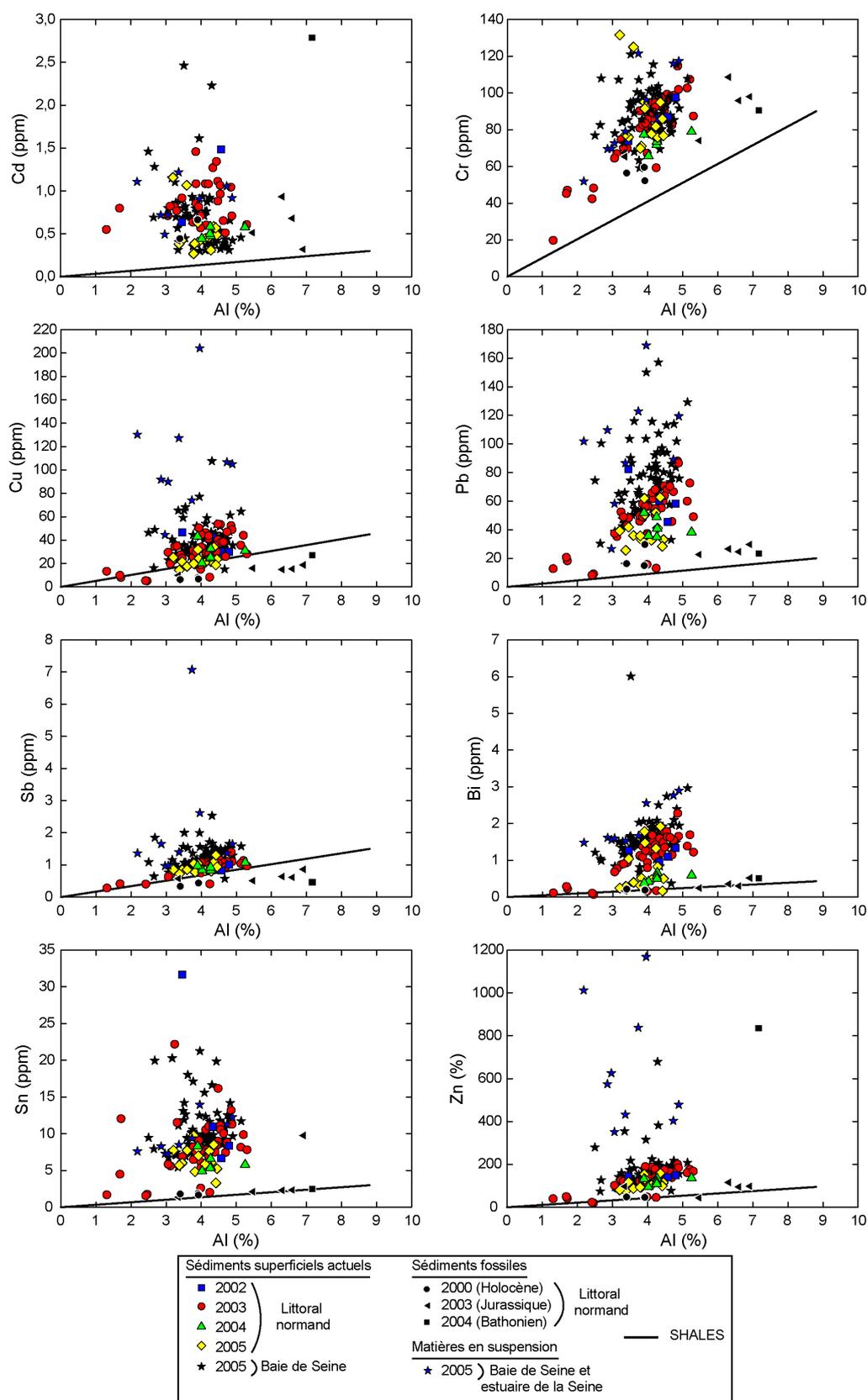


Figure 3.56. Relation entre les teneurs en Cu, Cr, Cd, Pb, Bi, Zn, Sn et Sb et Al dans les sédiments intertidaux et subtidaux de la baie de Seine et du littoral bas-normand, ainsi que des matières en suspension prélevées en baie de Seine.

II.3.7. Synthèse : candidats aux marquages particuliers du domaine fluvial

La discrimination de différents stocks nécessite d'inscrire les résultats acquis sur le littoral bas-normand dans un continuum fleuve Seine-baie de Seine. La figure 3.57. présente les facteurs d'enrichissement (FE) de ces quatre éléments en fonction de la distance exprimée en PK et PK étendu.

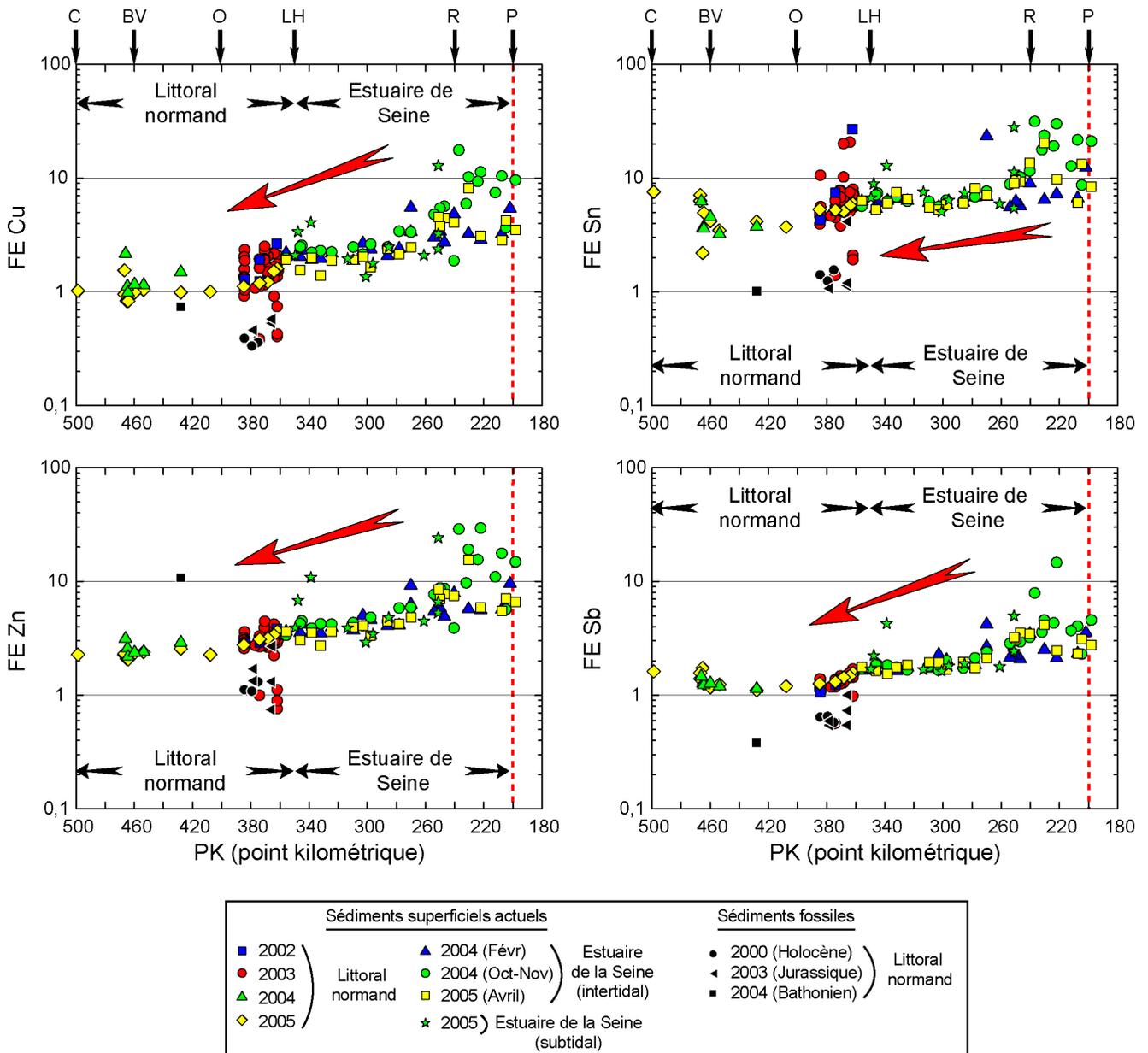


Figure 3.57. Facteurs d'enrichissement (FE) du Cu, Sn, Zn et Sb en fonction de la distance (PK et PK étendu) pour les sédiments superficiels récents et fossiles en estuaire de Seine et sur le littoral bas-normand. C : Cherbourg, BV : Baie des Veys, O : Embouchure de l'Orne, LH : Le Havre, R : Rouen, P : Barrage de Poses. La ligne pointillée rouge représente la position du barrage de Poses.

Dans tous les cas, il apparaît un gradient décroissant très net depuis l'estuaire de la Seine vers le littoral bas-normand, souligné par l'échelle logarithmique des ordonnées des graphiques. De plus,

les échantillons fossiles se détachent clairement des sédiments actuels et plus particulièrement avec l'antimoine et le zinc.

Dans la baie de Seine, il est plus difficile de mettre en valeur un gradient, mais il est néanmoins identifiable pour le cuivre et l'antimoine. Pour le zinc, il apparaît dans la baie une deuxième zone source au large de Port-en-Bessin (PK428), très fortement enrichie par rapport aux shales (Fig.3.58.).

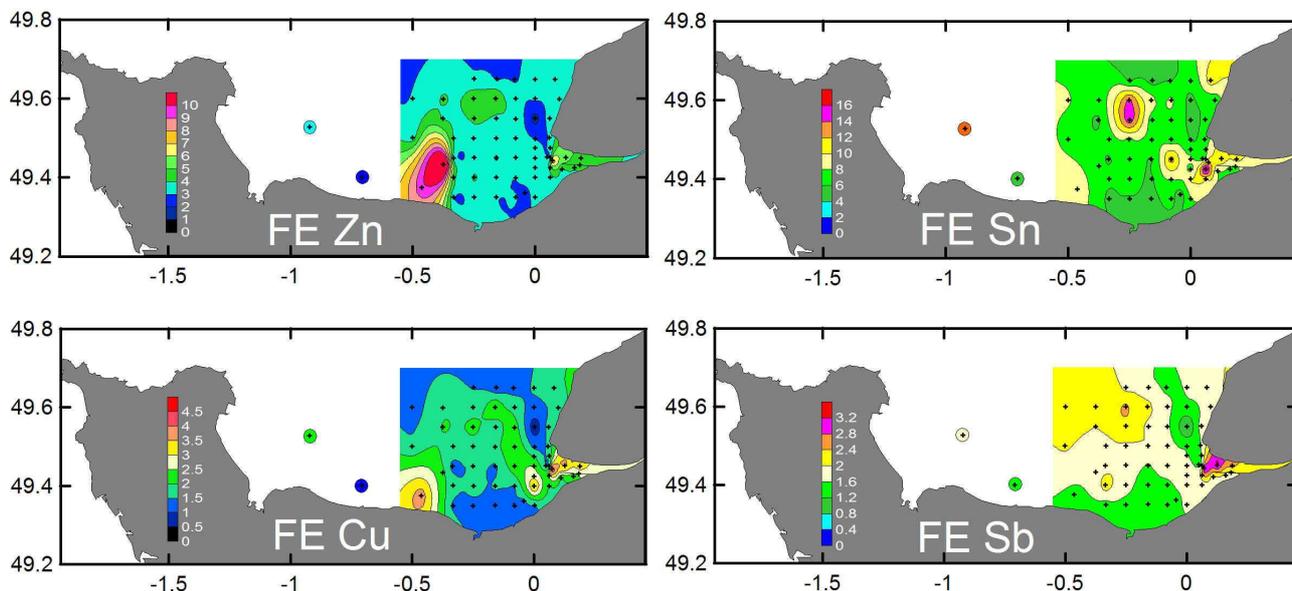


Figure 3.58. Cartographies des facteurs d'enrichissement (FE) du Cu, Sn, Zn et Sb pour les échantillons de la baie de Seine. Les points noirs correspondent aux sites d'échantillonnages.

En combinant à la fois les résultats acquis en estuaire de Seine et en baie de Seine, il ressort que l'utilisation des éléments chimiques, tels le zinc, l'antimoine, le cuivre et l'étain, puissent être utilisés comme de bons marqueurs du stock sédimentaire fluvial, suffisamment discriminants par rapport aux autres stocks potentiels.

II.4. Distribution des radionucléides des sédiments de la baie de Seine et du littoral bas-normand

II.4.1. Caractéristiques des radionucléides

- Le littoral bas-normand

La figure 3.59. montre les activités de quelques radionucléides artificiels et naturels en fonction de la distance (PK étendu) sur le littoral normand.

Le long du littoral, les activités en américium 241 sont quelque peu différentes : sur le littoral ouest, elles sont de l'ordre de 3 Bq.kg^{-1} , alors que sur le littoral est où les activités sont très dispersées les valeurs sont comprises entre la limite de détection et $2,5 - 3 \text{ Bq.kg}^{-1}$. L'activité la plus élevée (7 Bq.kg^{-1}) se situe dans la rade de Cherbourg (PK500).

Cette tendance est confirmée par le cobalt 60, l'activité la plus forte se situant dans la rade de Cherbourg ($\approx 30 \text{ Bq.kg}^{-1}$). Les activités du littoral bas-normand décroissent de l'ouest (5 Bq.kg^{-1}) vers l'est ($2,5 - 3 \text{ Bq.kg}^{-1}$). En revanche, aucune variation n'est observée entre les activités mesurées sur les échantillons prélevés au cours des années 2002, 2003, 2004 et 2005.

Les activités très élevées en ^{60}Co et ^{241}Am dans la rade de Cherbourg s'expliquent par la proximité de cette station d'échantillonnage par rapport à la source de ces radionucléides : l'usine de retraitement des combustibles usés AREVA, au Cap de la Hague.

Les activités du césium 137 sont quant à elles très dispersées, aussi bien à l'est qu'à l'ouest de la baie de Seine. Les valeurs varient entre la limite de détection et 11 Bq.kg^{-1} . Elles sont très dispersées y compris sur une même plage et pour une même période d'échantillonnage (années 2002 et/ou 2003), bien qu'aucune variation n'apparaisse entre ces deux années. Par contre, sur le littoral ouest, les activités en ^{137}Cs sont légèrement plus élevées en 2004 par rapport à 2005, d'1 ou 2 Bq.kg^{-1} . Cette grande disparité dans les activités en ^{137}Cs suggère qu'une partie des sédiments fins est soit d'origine marine, ou d'origine continentale, voire d'un mélange des deux sources. Pour rappel, le ^{137}Cs est issu tant des rejets de l'usine de retraitements des combustibles usés AREVA, au Cap de la Hague (soit ici d'une origine marine), qu'originaires des retombées atmosphériques d'essais nucléaires sur le continent (soit ici d'une origine continentale).

Les activités en ^{40}K sont moins dispersées avec des valeurs comprises entre 200-250 et 500 Bq.kg^{-1} . Un seul échantillon présente une activité élevée : il s'agit de l'échantillon PTBSM (760 Bq.kg^{-1}), qui correspond aux Marnes de Port-en-Bessin.

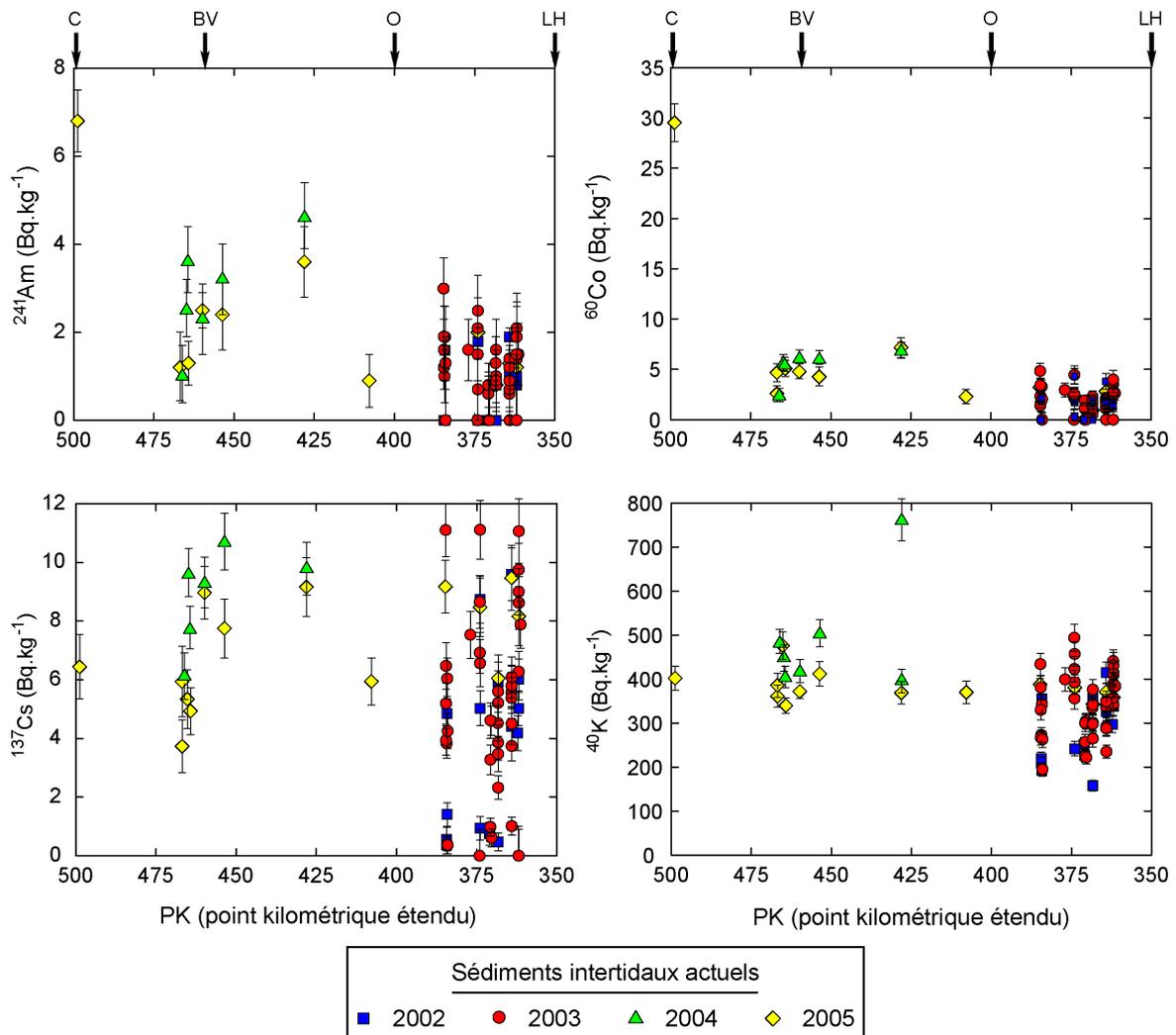


Figure 3.59. Activités du ^{241}Am , du ^{60}Co , du ^{137}Cs et du ^{40}K mesurées dans les sédiments prélevés sur le littoral normand en 2002, 2003, 2004 et 2005 (toutes les activités ont été référencées au 1^{er} janvier 2005).

- La baie de Seine

La figure 3.60. est une cartographie représentant les activités de ^{241}Am , ^{60}Co , ^{137}Cs et ^{40}K dans le domaine subtidal de la baie de Seine. La partie est de la baie de Seine a été relativement densément échantillonnée et la représentation des données (logiciel Surfer) rend compte d'une répartition assez fiable des activités des quatre radionucléides en domaine subtidal. Par contre pour la partie ouest de la baie, les résultats obtenus et les interprétations qui en découlent sont à prendre avec précaution car ils ne sont que l'extrapolation des données obtenues dans la partie est de la baie.

Les cartes de distributions de ^{241}Am et du ^{60}Co sont comparables. Les activités les plus faibles se situent au niveau de l'embouchure de l'estuaire de la Seine et les valeurs les plus fortes au nord-ouest de la zone échantillonnée. Les activités en ^{241}Am varient de 1 (voire sous la limite de détection) à 10 Bq.kg^{-1} et les activités en ^{60}Co de 2 à 25 Bq.kg^{-1} . Dans les deux cas, un gradient décroissant est observé depuis la Manche vers l'embouchure de la Seine.

Les activités en ^{137}Cs sont relativement homogènes, varient peu, et sont comprises entre 8 et 12 Bq.kg^{-1} . Deux zones se distinguent : une au niveau de l'embouchure de la Seine et une autre au nord-ouest du Havre (fonds proches des dépôts de dragages d'Octeville-sur-Mer), avec des activités plus faibles, autour de $2 \text{ à } 6 \text{ Bq.kg}^{-1}$.

Les activités en ^{40}K sont quant à elles très variées mais comprises comme sur le littoral entre $300 \text{ et } 500 \text{ Bq.kg}^{-1}$. Comme pour le ^{137}Cs , les plus faibles activités sont mesurées à l'embouchure de la Seine.

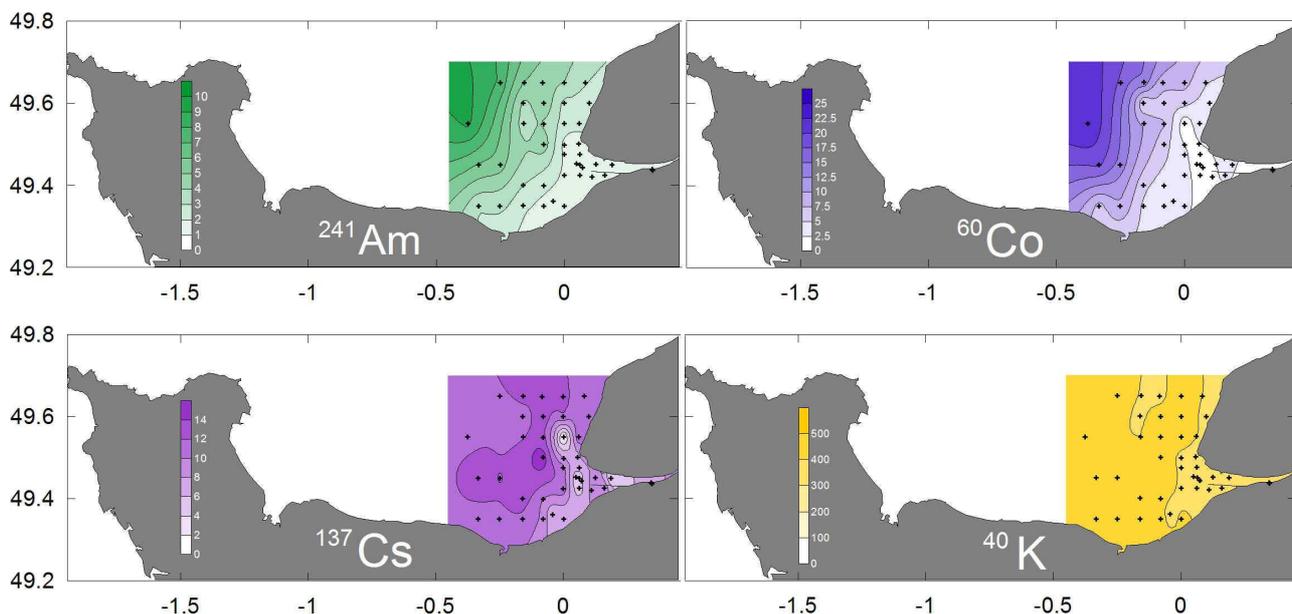


Figure 3.60. Activités du ^{241}Am , du ^{60}Co , du ^{137}Cs et du ^{40}K (en Bq.kg^{-1}) mesurées dans les sédiments prélevés en baie de Seine en 2005 (les croix noires correspondent aux stations de prélèvements en domaine subtidal).

II.4.2. Corrélations entre radionucléides

La figure 3.61. présente les corrélations entre les différents radionucléides mesurés. Pour l'ensemble des échantillons prélevés en domaines intertidal et subtidal, la corrélation $^{137}\text{Cs}/^{40}\text{K}$ est relativement bonne. Comme cité précédemment, la présence de ^{40}K n'est pas seulement liée à la fixation du ^{137}Cs ; lorsque l'activité en ^{137}Cs est nulle, l'activité en ^{40}K est d'environ 225 Bq.kg^{-1} . Le ^{40}K n'est pas uniquement lié à la fraction fine mais peut également être présent dans d'autres minéraux. La même tendance est observée pour le ^{60}Co mais avec des activités de ^{40}K de l'ordre de $250\text{-}260 \text{ Bq.kg}^{-1}$ quand l'activité en ^{60}Co est nulle. La corrélation devient par ailleurs nettement moins marquée pour les plus fortes valeurs de ^{60}Co : ces fortes valeurs sont le reflet de l'activité de ce radionucléide près de la zone source, à savoir l'usine de retraitement des combustibles usés AREVA au Cap de la Hague.

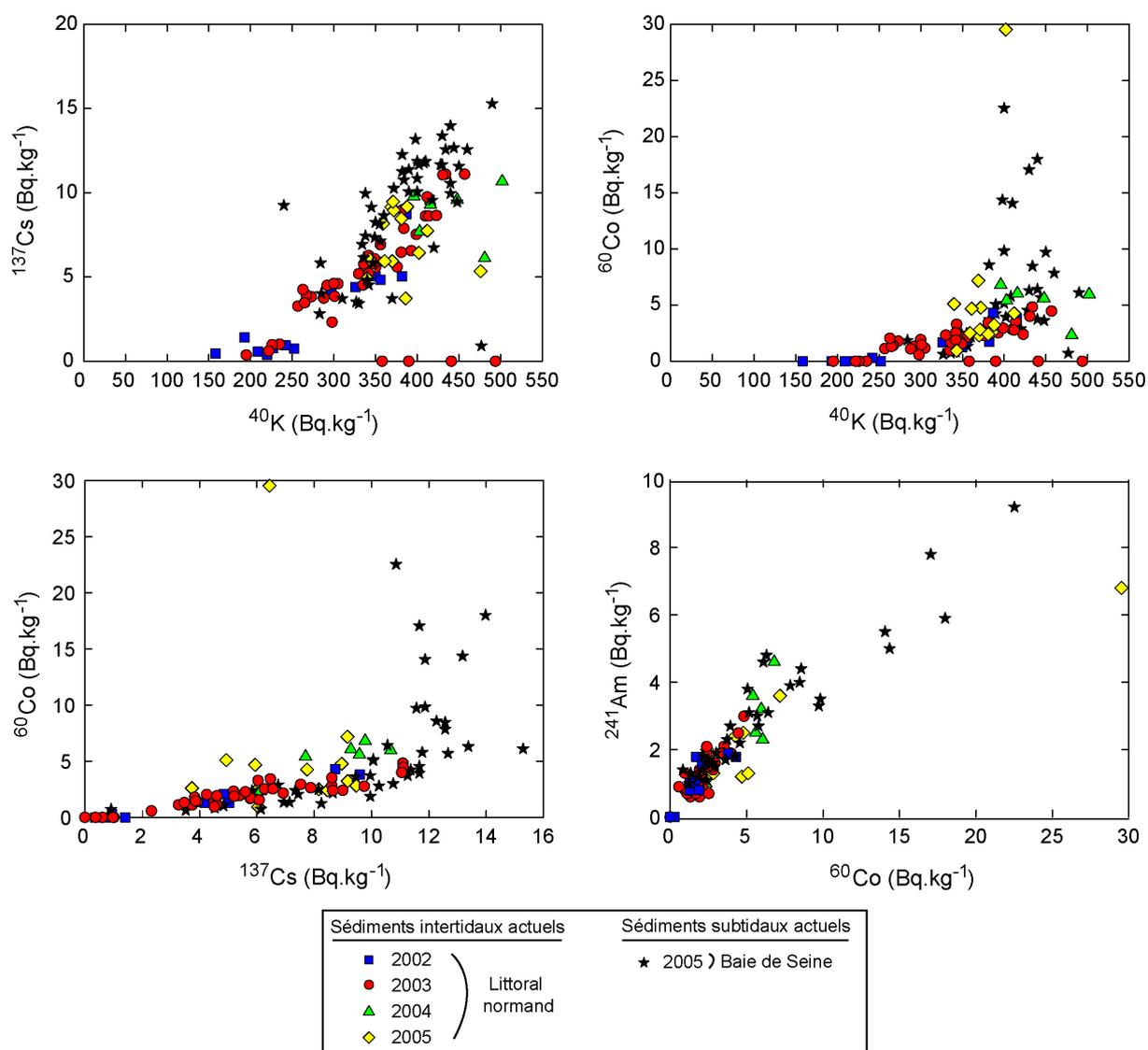


Figure 3.61. Quelques corrélations entre des radionucléides naturels (^{40}K) et artificiels (^{60}Co , ^{137}Cs et ^{241}Am) dans les fractions fines des sédiments prélevés sur le littoral bas-normand et dans la baie de Seine en 2002, 2003, 2004 et 2005.

La très bonne corrélation $^{241}\text{Am}/^{60}\text{Co}$ indique un stock particulaire très homogène, aussi bien pour les sédiments intertidaux et subtidaux de la baie de Seine que ceux du littoral bas-normand. Ces deux radionucléides se comportent de la même manière, puisqu'ils proviennent de la même source (rejets de l'usine de retraitement des combustibles usés AREVA, au Cap de la Hague). La corrélation $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ est relativement bonne, excepté pour les très fortes valeurs en ^{60}Co , qui correspondent aux échantillons de la zone nord-ouest de la baie de Seine et à celui de la rade de Cherbourg.

I.4.3. Corrélations des radionucléides à l'aluminium

La représentation des activités en ^{137}Cs avec l'aluminium montre une belle corrélation avec les échantillons subtidaux de la baie de Seine et les échantillons intertidaux du littoral ouest bas-normand (Fig.3.62.). En revanche, la corrélation ne se distingue pas réellement pour les sédiments du littoral est. Les activités en ^{60}Co présentent une bonne corrélation avec l'aluminium pour les échantillons intertidaux du littoral bas-normand. Les sédiments subtidaux de la baie de Seine ont des activités plus dispersées ; cela s'explique par des activités en ^{60}Co plus élevées. En effet, la plupart des échantillons subtidaux du nord la baie de Seine ont des activités en ^{60}Co similaires à celles mesurées près de la zone source (l'usine de retraitement des combustibles usés AREVA, au Cap de la Hague).

Ainsi, dans les cas du ^{137}Cs et du ^{60}Co , cela signifie que pour une même fraction fine, le sédiment peut contenir des activités dans une gamme assez large, mais également que les phases porteuses de ce radionucléide, essentiellement les argiles, sont bien contenues dans la fraction fine. Les activités en ^{137}Cs et en ^{60}Co varient alors en réponse à la nature minéralogique et/ou granulométrique mais également en fonction de leur proximité à la source de ces radionucléides artificiels.

L'évolution longitudinale des rapports $^{137}\text{Cs}/\text{Al}$ et $^{60}\text{Co}/\text{Al}$ confirment les tendances décrites pour les activités brutes (Fig.3.62.) :

- pour le ^{137}Cs , le rapport décroît depuis Cherbourg jusqu'à l'embouchure de l'estuaire de la Seine. Les valeurs restent néanmoins très dispersées pour les échantillons du littoral est ;
- pour le ^{60}Co , deux gradients se dessinent : (1) la représentation du rapport $^{60}\text{Co}/\text{Al}$ des sédiments intertidaux montre une décroissance des valeurs selon une pente faible, identique à celle citée avec le rapport $^{137}\text{Cs}/\text{Al}$, (2) la représentation du rapport $^{60}\text{Co}/\text{Al}$ des sédiments subtidaux montre une décroissance des valeurs mais selon une pente beaucoup plus forte, rendant compte ainsi des activités plus élevées en ^{60}Co des échantillons proches de la source en radionucléides artificiels.

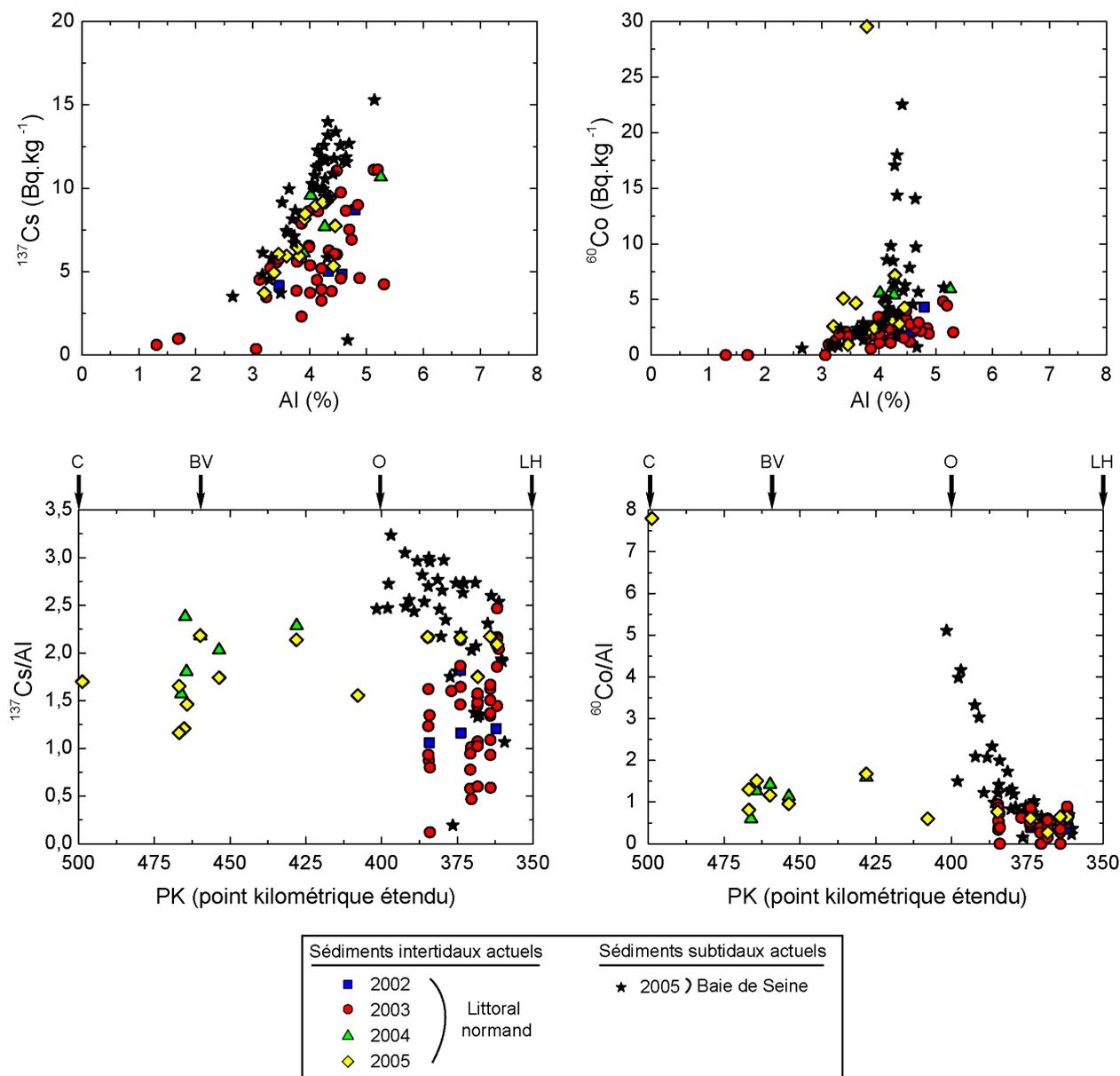


Figure 3.62. Corrélations $^{137}\text{Cs}\text{-Al}$ et $^{60}\text{Co}\text{-Al}$, et représentations des rapports $^{137}\text{Cs}/\text{Al}$ et $^{60}\text{Co}/\text{Al}$ selon le PK étendu (point kilométrique étendu) pour les sédiments intertidaux et subtidaux de la baie de Seine et du littoral bas-normand entre 2002 et 2005. C : Cherbourg, BV : Baie des Veys, O : Embouchure de l'Orne, LH : Le Havre.

II.4.4. Rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$

Pour les raisons évoquées dans le chapitre 3.I., seul le rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ est ensuite considéré.

- Le littoral normand

La figure 3.63. montre l'évolution du rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ en fonction de la distance (PK étendu) sur le littoral normand en 2002, 2003, 2004 et 2005.

Les valeurs les plus importantes correspondent au sédiment prélevé dans la rade de Cherbourg. Cette forte valeur (rapport autour de 4,5) s'explique par la proximité à la source en cobalt et en césium. Les teneurs les plus faibles se situent au niveau des plages proches de l'embouchure de

la Seine, à Pennedepie (PEN) et Villerville (VILL)). Le rapport varie entre 0,25 et 0,4 au plus proche de l'embouchure, soit quasiment en continuité avec le rapport calculé dans l'estuaire de la Seine (rapport de 0,2).

Dans la continuité baie de Seine-estuaire de la Seine (depuis la pointe du Cotentin jusqu'à l'embouchure de la Seine), le rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ diminue progressivement. Il apparaît donc un gradient décroissant depuis le littoral de la Manche vers le littoral proche de l'estuaire de la Seine. Ces différentes observations montrent ainsi que :

(1) les sédiments vaseux du littoral de la baie de Seine sont constitués de matériel fin originaire du domaine marin, marqué en cobalt 60 ;

(2) les valeurs décroissantes sur le littoral bas-normand suggèrent un transport du matériel fin marin vers l'est depuis la zone source (le Cap de la Hague).

En comparant les années de prélèvement les unes aux autres, le gradient décroissant reste visible : il est seulement plus ou moins prononcé suivant les années. En 2002 et 2003, les résultats ne concernant que les plages de l'est du Calvados montrent, néanmoins, une légère décroissance de Cabourg (PK384) à Pennedepie (PK362). Par contre, sur une même plage les activités peuvent être légèrement différentes, suggérant soit un apport en matériel fin d'origine marine dépourvu ou enrichi en ^{60}Co , soit d'un matériel fin plus ancien d'activités en ^{60}Co plus faibles. En 2004 et 2005, la zone des prélèvements des sédiments a été élargie à l'ensemble du littoral bas-normand. Les activités des échantillons de l'année 2004 sont sensiblement plus faibles que celles de l'année 2005, notamment sur le littoral est Cotentin, qui s'explique soit par un moindre apport en matériel fin d'origine marine, soit un apport en matériel fin d'origine tellurique plus important, riche en ^{137}Cs .

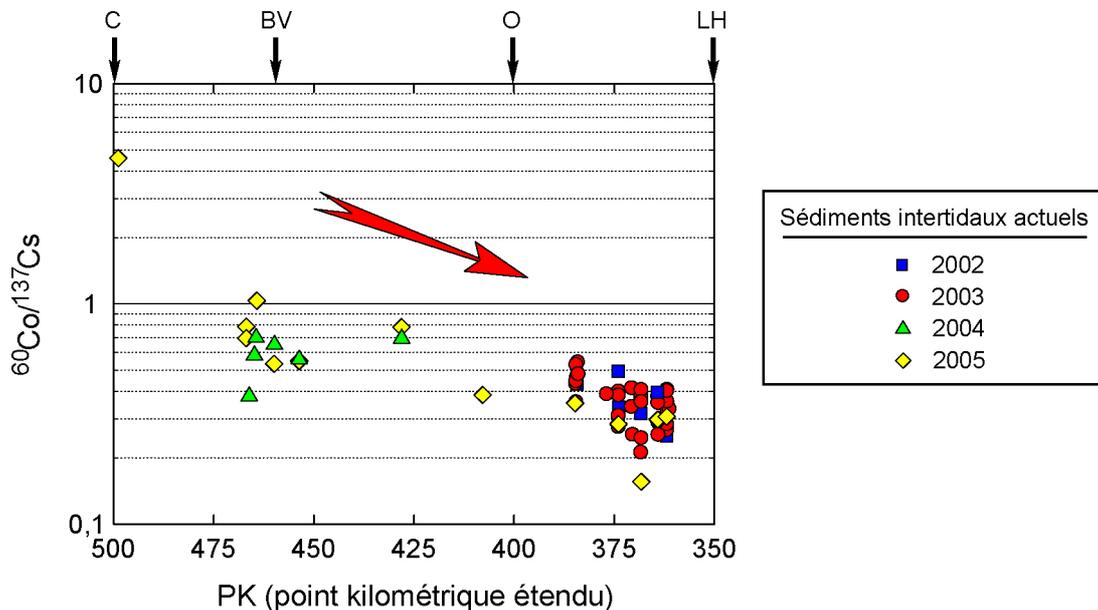


Figure 3.63. Evolution du rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ dans les fractions fines des sédiments prélevés sur le littoral bas-normand en 2002, 2003, 2004 et 2005 (toutes les activités sont référencées au 1^{er} janvier 2005) en fonction de la distance (PK étendu).

- La baie de Seine

La figure 3.64. présente la cartographie du rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ dans la baie de Seine en avril 2005. De la même manière que pour le littoral bas-normand, les plus faibles rapports se situent à l'embouchure de la Seine, avec un rapport autour de 0,2 (rapport identique à celui calculé dans

l'embouchure de l'estuaire de la Seine). Progressivement, le rapport augmente pour atteindre 2 dans la partie centrale de la baie de Seine ; ce qui confirme l'hypothèse d'une contribution marine aux sédiments fins de la baie de Seine.

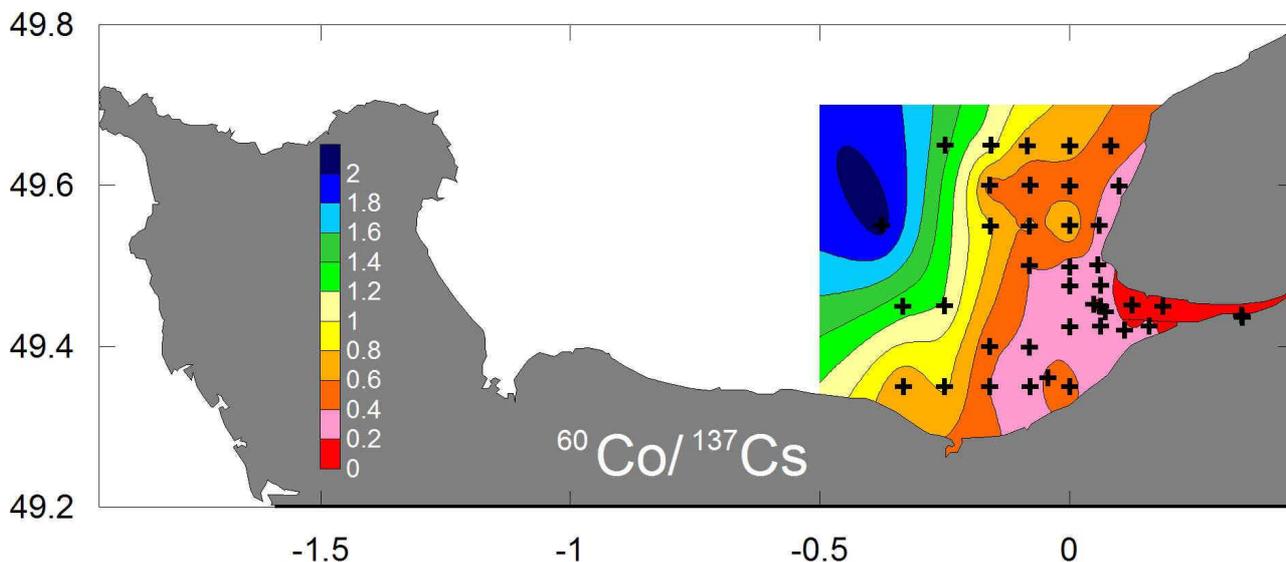


Figure 3.64. Évolution du rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ dans les fractions fines des sédiments prélevés dans la baie de Seine en 2005 (les croix noires correspondent aux stations de prélèvements en domaine subtidal).

Cette cartographie des radionucléides dans la baie de Seine n'est pas la première. Garnaud (2003) avait déjà cartographié avec les mêmes radionucléides la partie sud-est de la baie de Seine des sédiments superficiels prélevés en 1994 (mission SEDIBAIE) et en 2000 (mission VASTEDEBA). Les résultats obtenus montrent une diminution du rapport de Ouistreham (embouchure de l'Orne) vers l'estuaire de la Seine. Les activités mesurées sont analogues à celles détectées dans la présente étude (en considérant bien entendu la décroissance radioactive du ^{60}Co et ^{137}Cs).

À l'échelle de la baie de Seine et de la Manche, les résultats obtenus en 2005 sont aussi comparables à ceux qui ont été observés par Bertran (2001), Boust (1999), Boust *et al.* (2002) et Spineanu (1998). Les rapports les plus forts, calculés par Bertran (2001), se situent près des sources : la Hague pour la France et Winfrith pour la Grande Bretagne. Les résultats montrent une diminution dissymétrique du rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ de part et d'autre de la ligne Cherbourg-Ile de Wight (Fig.3.65.) :

(1) en Manche occidentale, le rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ décroît plus rapidement vers le sud que vers le sud-ouest ;

(2) en Manche orientale, le rapport isotopique diminue plus rapidement vers le sud-est que vers l'est.

Cette dissymétrie, observée à partir de Cherbourg est le résultat d'une dispersion préférentielle des sédiments en direction de la Mer du Nord, sous le forçage hydrodynamique tidal.

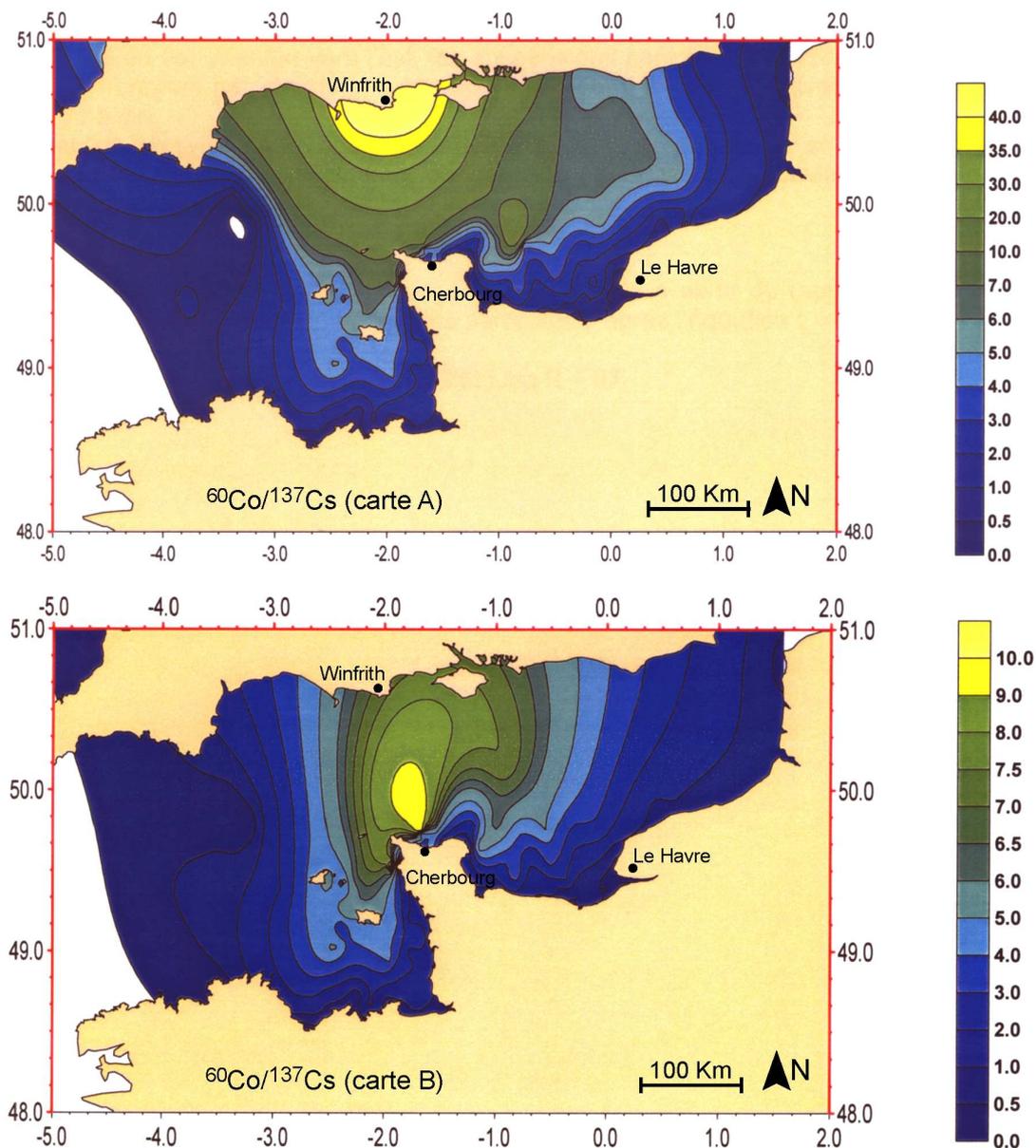


Figure 3.65. Cartographie du rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ dans les sédiments de la Manche (d'après Bertran, 2001 modifié). *Carte A* : rapport isotopique de l'usine de retraitements des combustibles usés AREVA du Cap de la Hague et des rejets de la centrale nucléaire de Winfrith. *Carte B* : rapports isotopiques de l'usine de retraitements des combustibles usés AREVA du Cap de la Hague.

La baie de Seine et le littoral bas-normand

Granulométrie de la fraction fine des sédiments intertidaux et subtidaux

La granulométrie sur le littoral bas-normand distingue différentes populations granulométriques :

- sur le littoral est, la fraction fine est composée d'une dominance de silts fins, de silts moyens à grossiers, avec la présence d'argile.

- sur le littoral ouest, les populations granulométriques de la fraction fine évoluent sur ce tronçon côtier : au sud-ouest de la baie, trois modes prédominent (argiles, silts fins et silts grossiers), puis progressivement au nord Cotentin, la fraction fine ne se compose plus que de deux modes (silts fins et silts grossiers), pour ne constituer qu'un seul mode à la Pointe du Cotentin (silts grossiers).

Sur le littoral bas-normand, il n'existe cependant aucune variation annuelle, ni saisonnière, ni de gradient d'est en ouest dans la partie sud.

La représentation de la fraction pélitique dans la baie de Seine confirme les observations antérieures sur le matériel fin et distingue une zone de dépôt préférentielle, à l'embouchure de l'estuaire de la Seine, près de la zone des dépôts de dragage du Kannik ; et une zone appauvrie, proche des dépôts de dragage d'Octeville-sur-Mer.

L'étude détaillée des populations granulométriques de la fraction fine conduit à estimer des proportions comprises entre :

- 15 à 35 % d'argiles
- 15 à 25 % de silts très fins
- 15 à 30 % de silts fins
- 15 à 20 % de silts moyens
- 5 à 15 % de silts grossiers, dont la limite supérieure est tronquée.

Minéralogie argileuse de la fraction fine des sédiments intertidaux et subtidaux

L'identification et la semi-quantification des minéraux argileux des sédiments intertidaux et subtidaux de la baie de Seine et du littoral bas-normand montrent un cortège homogène sur l'ensemble du système (Tab.3.4.) : les smectites seules ou associées à des minéraux interstratifiés prédominent, l'illite, la kaolinite et le minéral interstratifié (10-C) sont toujours présents. Selon les sites échantillonnés, d'autres minéraux interstratifiés apparaissent dans le cortège.

Les sédiments fossiles holocènes ont des cortèges des minéraux argileux analogues aux sédiments actuels. Les échantillons jurassiques ont, quant à eux des cortèges plus simples composés uniquement de smectites, d'illite, de kaolinite et du minéral interstratifié (10-C).

Si les indices de cristallinité de l'illite ne permettent pas de distinguer les sédiments entre eux, en revanche, les indices de cristallinité des smectites différencient les smectites des sédiments actuels, des smectites des sédiments fossiles jurassiques, dont les cristallinités sont proches de 1.

Ainsi, parmi tous les échantillons, seuls les sédiments fossiles jurassiques se distinguent : leur cortège est prédominé par les smectites, qui de surcroît, sont bien mieux cristallisées que celles du reste du système.

Tableau 3.4. : Semi-quantifications moyennes des sédiments intertidaux et subtidaux (actuels et fossiles) de la baie de Seine et du littoral bas-normand.

Littoral ouest bas-normand	Littoral est bas-normand	Baie de Seine	Sédiments holocènes fossiles	Sédiments fossiles jurassiques
30 % Sm 30 % C (nord Cotentin)	30-40 % Sm	60 % Sm ou C ou Cg	30-35 % Sm	70 % Sm
30-40 % K	30 % K	25 % K	25-30 % K	5-20 % K
30 % I	20 % I	15-20 % I	20-30 % I	10-20 % I
5-10 % (10-C)	10 % (10-C)	15 % (10-C)	10 % (10-C)	5 % (10-C)
15 % autres minéraux interstratifiés seuls	présence d'autres minéraux interstratifiés	20-30 % autres minéraux interstratifiés seuls	aucun	aucun

Le cortège moyen des minéraux argileux des sédiments actuels de la baie de Seine et du littoral bas-normand est conforme à ceux des formations géologiques et superficielles des différents bassins versants érodés. Malheureusement, peu de distinction est possible sur les sédiments superficiels actuels du littoral bas-normand, où le cortège des minéraux argileux reste constant. Seuls les sédiments actuels du nord Cotentin, se distinguent et offrent une mince possibilité de marquage particulière pour le reste du système.

Les éléments majeurs-mineurs-traces dans la fraction fine des sédiments intertidaux et subtidaux et des matières en suspension

Les éléments majeurs-mineurs-traces permettent de caractériser d'un point de vue géochimique tous les sédiments superficiels intertidaux et subtidaux actuels de la baie de Seine et du littoral bas-normand, ainsi que les sédiments fossiles (Holocène, Bathonien et Jurassique). Ils permettent ainsi :

- d'établir une " carte d'identité chimique " de la fraction fine ;
- de montrer l'homogénéité des caractéristiques géochimiques entre les sédiments subtidaux et intertidaux de la baie de Seine et du littoral bas-normand avec les matières en suspension ;
- de distinguer les sédiments superficiels actuels des sédiments fossiles jurassiques et bathoniens, dont les caractéristiques géochimiques sont proches de la référence shales ;

Enfin, le choix des marqueurs particuliers potentiels du domaine fluviatile, définis pour l'estuaire de la Seine, est conforté. Ces éléments en forts excès par rapport à la référence shales montrent, aussi bien sur le littoral bas-normand qu'en baie de Seine, la décroissance des teneurs depuis le site amont de l'estuaire de la Seine jusqu'à Cherbourg. Par ailleurs, ils distinguent une zone à l'embouchure de la Seine, dont les propriétés géochimiques sont similaires à celles définies pour les sédiments de la zone industrielle voisine de Rouen dans l'estuaire de la Seine.

Quatre éléments en excès sont de bons marqueurs particuliers du domaine fluviatile : Zn, Sb, Sn et Cu.

Les radionucléides dans la fraction fine des sédiments intertidaux et subtidaux

Comme déjà évoqué pour l'estuaire de la Seine, la recherche de marqueurs particuliers parmi les radionucléides semble acquise. En effet, les origines des radionucléides artificiels (^{60}Co , ^{137}Cs et ^{241}Am) sont déjà connues (rejets de l'usine de retraits des combustibles usés AREVA au Cap de la Hague, dans le nord Cotentin). Ils sont d'excellents traceurs du domaine marin.

Les études des radionucléides naturels et artificiels dans les sédiments montrent, encore une fois, l'existence d'une affinité entre la fraction argileuse et les radionucléides.

Les données des radionucléides artificielles (^{60}Co , ^{137}Cs et ^{241}Am) mettent, également, en évidence :

- la présence de matériel fin d'origine marine sur l'ensemble des sédiments intertidaux et subtidaux de la baie de Seine et du littoral bas-normand ;
- des activités qui décroissent depuis la Manche vers l'embouchure de la Seine.

Enfin, le rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ montre que les particules fines d'origine marine pénètrent dans la baie de Seine selon, d'abord, une direction sud-est, puis, une direction est. Il s'intègre, alors, dans la continuité des données précédemment acquises dans l'estuaire de la Seine.

III – Les cours d'eau côtiers du Calvados : l'Orne, la Dives et la Touques

Les deux premières parties du chapitre 3 concernent l'ensemble du système estuarien de la Seine et ses extensions marines. D'autres sources en matériel fin dans ce système jouent un rôle non négligeable : les cours d'eau côtiers du Calvados. Notre intérêt s'est porté sur trois d'entre eux : l'Orne, la Dives et la Touques.

III.1. Présentation générale des trois cours d'eau côtiers

III.1.1. L'Orne

- Caractéristiques géologiques et géomorphologiques

L'Orne est le principal cours d'eau de la Basse-Normandie. Long de 175 Km, il prend sa source à Aunou-sur-Orne, à 218 m d'altitude et traverse les départements de l'Orne et du Calvados. La surface totale de son bassin versant est de 2 927 Km² et sa pente moyenne est de 1,36 ‰ (Données, D.I.R.E.N.).

Depuis sa source, l'Orne et ses affluents traversent une multitude de terrains géologiques très variés (Fig.3.66.) : tout d'abord les calcaires jurassiques de la campagne d'Argentan (bordure ouest du Bassin Parisien), puis pénètre l'extrémité du massif Armoricaïn dans le batholithe granitique d'Athis et son auréole de métamorphisme. Il parcourt ensuite les horizons gréseux et pélitiques du Précambrien, les bancs de grès et de schistes antécambriens, sur lesquels reposent en discordance les poudingues et arkoses du Cambrien, ou les séries ordoviciennes gréseuses et schisteuses. À Caen, l'Orne entaille les calcaires bathoniens recouverts de marnes calloviennes et de limons weichséliens (Elhai, 1963 ; Dubrulle, 1982). Toutes ces formations sont recouvertes par des épaisseurs plus ou moins importantes de limons et de loess pléistocènes (Lautridou, 1985).

L'Orne coule dans une vallée très étroite due à la dureté du substrat comblée par des dépôts marins et fluvio-marins flandriens sablo-argileux ou sablo-limoneux. Des alluvions quaternaires forment des terrasses sur la rive gauche de l'Orne. Très sinueux en amont de Caen, le lit jusqu'à son embouchure, à la suite du creusement du canal de Caen à la mer a été modifié pour lui donner cet aspect rectiligne actuel. Les deux versants de l'Orne sont fortement dissymétriques : la rive droite est bordée par des falaises, tandis que la rive gauche s'abaisse progressivement jusqu'aux marais de Ouistreham. Dans la baie de Sallenelles, l'Orne décrit deux grands méandres, conséquence de la progression d'une flèche sableuse sur le littoral, à la Pointe de Merville-Franceville.

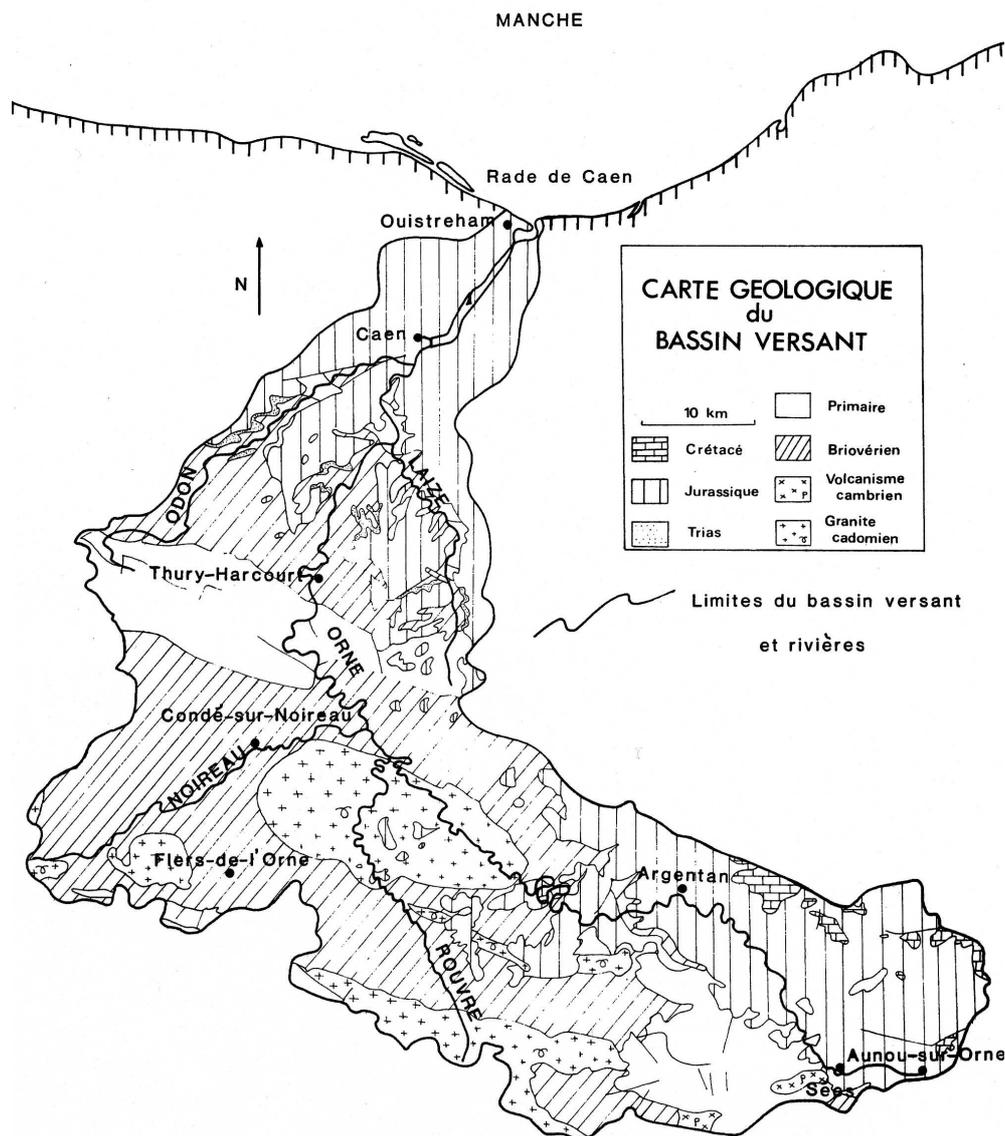


Figure 3.66. Carte géologique d'un cours d'eau côtier, l'Orne (d'après Dubrulle, 1982, modifié).

- Caractéristiques hydrologiques et hydrodynamiques

Le débit de l'Orne varie de $3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en basses eaux saisonnières (d'août à septembre) à $160 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en hautes eaux saisonnières (novembre à avril), avec une moyenne pour 2004 de $24 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Données, D.I.R.E.N.). La limite de la marée dynamique se situe artificiellement au barrage de Caen. En revanche, la limite de l'intrusion saline varie beaucoup en fonction du débit fluvial :

- en hautes eaux saisonnières, la totalité de l'estuaire de l'Orne peut contenir de l'eau douce, seul un coin salé existe dans l'estuaire aval,
- en basses eaux saisonnières, les eaux salées peuvent remonter à proximité du barrage de Caen, et les mélanges verticaux sont très développés.

Selon un profil vertical, les eaux très salées restent confinées sur le fond en mortes eaux alors qu'en vives eaux, le brassage est important (Dubrulle, 1982).

Les courants de marée jouent un rôle important dans l'Orne. En hautes eaux saisonnières, les courants de flot n'atteignent pas la partie amont à cause du débit fluvial important ; en revanche, en basses eaux saisonnières, le flot est sensible jusqu'au barrage de Caen. D'une manière générale, les vitesses de jusant sont toujours plus importantes (maximales au niveau de la baie de Sallenelles) que les vitesses du flot. Ceci s'explique par les hauts enrochements de Merville qui canalisent le cours de l'Orne lors du jusant, alors que le flot pénètre, en partie, par-dessus les enrochements, en provenance des bancs.

Ces forts courants de marée impliquent un volume oscillant conséquent dans l'estuaire de l'Orne variant de 2 à 3 x 10⁶ m³, tandis que le débit de pénétration peut atteindre dix fois le débit fluvial.

De son côté, le volume d'eau douce stocké dans l'estuaire varie entre 1,3 et 2,7 x 10⁶ m³ selon le débit et le coefficient de marée. Le temps de renouvellement des eaux douces dans l'estuaire de l'Orne est de 2 à 3 cycles de marée en hautes eaux saisonnières et de quelques jours en basses eaux saisonnières (Dubrulle, 1982).

- Détermination d'un point kilométrique dans l'Orne

Comme pour l'estuaire de la Seine, un PK (linéaire) a été déterminé et calculé pour l'Orne. Ici, le PK0 correspond au barrage à Caen sur l'Orne, marquant la limite extrême amont de toute influence de la marée dynamique. Le tableau 3.5. ci-dessous reprend l'ensemble des coordonnées des stations de prélèvements dans l'Orne et les PK associés.

Tableau 3.5. Coordonnées géographiques des stations de prélèvements sur l'Orne (en 2004 et 2005) ainsi que les PK calculés à partir du PK0 correspondant au barrage présent sur l'Orne à Caen. Un PK négatif correspond à une station située à l'amont du barrage.

Stations	Date	Longitude	Latitude	PK calculé (Km)
Barrage de l'Orne	-	-0,3351	49,1777	0
ORNE06	17/07/2004	-0,3647	49,1717	-2,30
ORNE05	03/06/2004	-0,3418	49,1811	0,60
ORNE04	03/06/2004	-0,3418	49,1811	0,60
ORNE03	03/06/2004	-0,3083	49,2052	3,60
ORNE02	03/06/2004	-0,2626	49,2462	9,30
ORNE01	03/06/2004	-0,2251	49,2812	14,00
MERV01	03/06/2004	-0,2066	49,2914	15,70
ORNE11	18/01/2005	-0,4014	49,1333	-6,90
ORNE12	18/01/2005	-0,3413	49,1811	0,60
ORNE13	18/01/2005	-0,2628	49,2461	9,30
ORNE14	18/01/2005	-0,2237	49,2795	13,90
MERV11	18/01/2005	-0,2234	49,2869	14,60

III.1.2. La Dives

- Caractéristiques géologiques et géomorphologiques

La Dives prend sa source près d'Exmes dans le département de l'Orne, à une altitude de 230 m. Son bassin versant s'étend sur une surface de 1 800 Km² environ. Son cours méandriforme long de 100 Km prend une direction nord-ouest avant de s'orienter nord vers l'embouchure.

Le bassin versant de la Dives est très diversifié sur le plan géologique (Fig.3.67.) et comprend des formations s'étageant du Paléozoïque au Quaternaire (Germain, 1970). Le cours d'eau traverse d'abord la craie glauconieuse du Cénomaniens, puis les calcaires à Bryozoaires du Bathonien supérieur (campagne de Falaise) ; à partir d'Ouville, la Dives entaille les argiles calloviennes. La vallée s'élargit enfin dans la large dépression de la vallée d'Auge.

Du fait de la nature tendre des formations du bassin versant, la Dives a créé une vaste plaine marécageuse où elle serpente. La vallée de la Dives, dont le comblement est identique à celui de l'Orne est formée de dépôts marins et fluvio-marins flandriens (sablo-argileux ou sablo-limoneux). Des alluvions quaternaires constituent également des terrasses, témoins des niveaux passés des rivières. Quelques placages de limons et de loess weichséliens recouvrent les plateaux avoisinants (Lautridou, 1985).

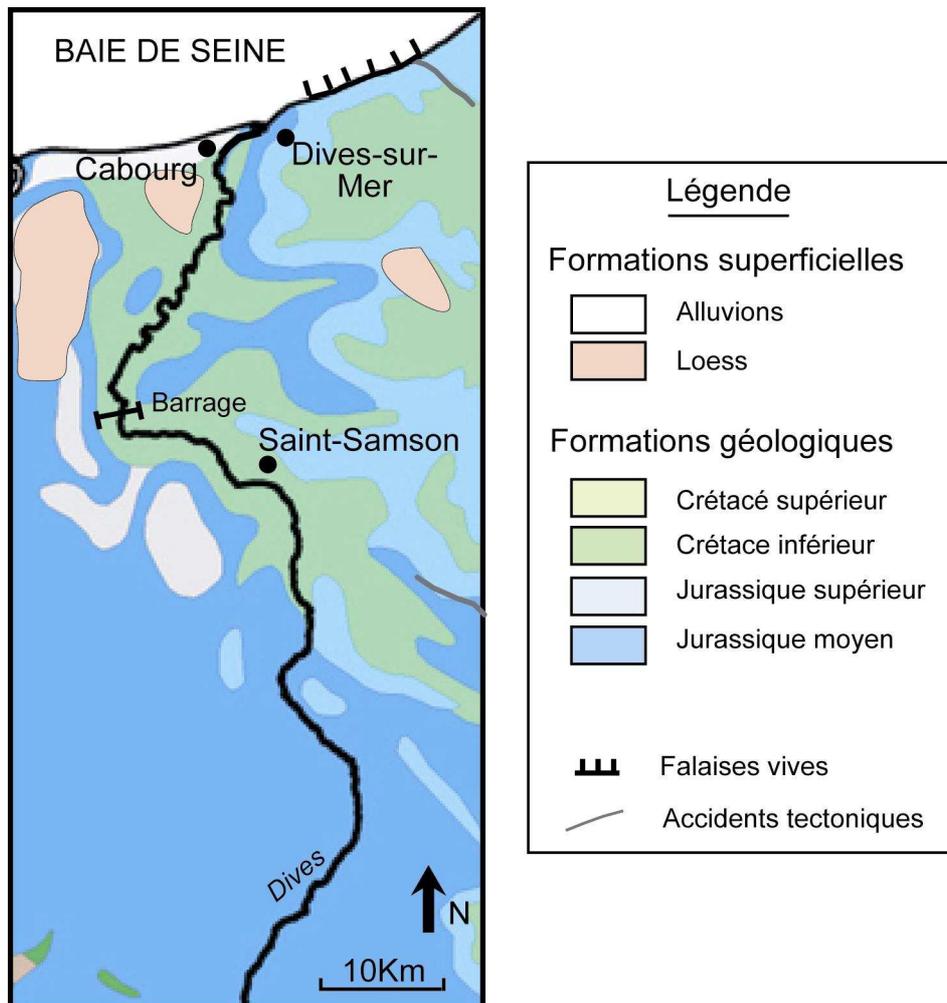


Figure 3.67. Carte géologique simplifiée du cours aval de la Dives (extrait de la carte géologique de la Normandie au 1/50000, BRGM, modifié).

- Caractéristiques hydrologiques et hydrodynamiques

La Dives est une rivière à faible débit. Son débit moyen annuel est de $15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, et peut atteindre $40 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en hautes eaux saisonnières (hiver). Musset (1961) précise qu'il existe une crue "exceptionnelle" tous les quatre ans.

Ici, la limite de la marée dynamique se situe très en amont. Avant la construction du barrage seuil, en vives eaux, la marée dynamique était sensible jusqu'à Saint-Samson, distant de la baie de Seine de 18 Km et peut atteindre Anneray, à 27 Km de l'embouchure (Germain, 1970). Le barrage a ensuite imposé la limite amont de la marée dynamique. En revanche, la limite de l'intrusion saline est à environ 6 Km de la baie de Seine et sa position varie selon les conditions hydrologiques et hydrodynamiques (Germain, 1970).

L'influence de la marée est importante dans ce petit système. En effet, les courants de marée deviennent violents dans l'estuaire de la Dives : la marée canalisée provoque une accélération des vitesses. Le Service Hydrographique de la Marine (1953-1957) précise que le flot peut atteindre 4 à 5 nœuds à l'embouchure de la Dives et que le jusant peut atteindre 3 nœuds (Germain, 1970).

- Détermination d'un point kilométrique dans la Dives

De la même manière que l'Orne, un PK (linéaire) a été déterminé et calculé pour la Dives. Ici, le PK0 correspond au barrage seuil près de Saint-Samson marquant la limite extrême amont de toute influence de la marée dynamique. Le tableau 3.6. ci-dessous reprend l'ensemble des coordonnées des stations de prélèvements dans la Dives ainsi que les PK correspondants.

Tableau 3.6. Coordonnées géographiques des stations de prélèvements sur la Dives (en 2005) ainsi que les PK calculés à partir du PK0 correspondant au barrage près de Saint-Samson. Un PK négatif correspond à une station située à l'amont du barrage.

Stations	Date	Longitude	Latitude	PK calculé (Km)
Barrage de la Dives	-	-0,1639	49,1848	0
DIVE Amont	17/01/2005	-0,1639	49,1850	-0,02
DIVE00	17/01/2005	-0,1639	49,1853	0,05
DIVE01	17/01/2005	-0,1428	49,2325	5,50
DIVE02	17/01/2005	-0,1109	49,2582	9,00
DIVE03	17/01/2005	-0,1043	49,2702	10,50
DIVE04	17/01/2005	-0,1025	49,2965	13,20

III.1.3. La Touques

- Caractéristiques géologiques et géomorphologiques

D'un bassin versant de 1 290 Km², la Touques est un cours d'eau côtier de 108 Km de long qui prend sa source dans les collines du Perche, dans le département de l'Orne. Son cours de direction nord jusqu'à Pont-l'Évêque s'oriente au nord-ouest et débouche dans la baie de Seine.

La Touques incise des formations sédimentaires d'âge secondaire de l'ouest du Bassin Parisien affectées par un pendage faible (0,4°) vers le nord-est (Delcaillau *et al.*, 1998). Son bassin versant draine des calcaires à glauconie, des marnes et des sables oxfordiens, de la craie glauconieuse crétacée, des argiles à silex et des loess (Elhai, 1963 ; Lautridou, 1985). Vers l'embouchure, la Touques entaille les formations mésozoïques jusqu'aux marnes et argiles callovo-oxfordiennes (Fig.3.68.).

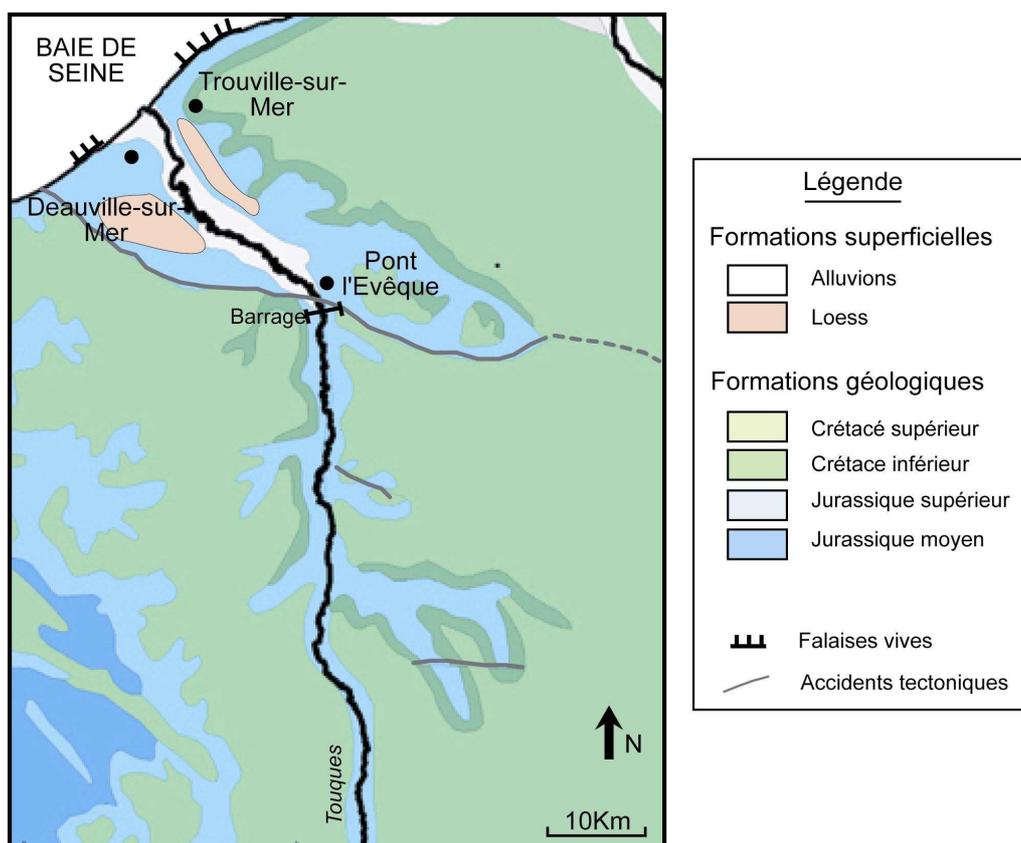


Figure 3.68. Carte géologique simplifiée du cours aval de la Touques (extrait de la carte géologique de la Normandie au 1/50000, BRGM, modifié).

- Caractéristiques hydrologiques et hydrodynamiques

Aucune étude ne s'est intéressée aux caractéristiques hydrologiques et hydrodynamiques de la Touques. Seul un débit moyen annuel est connu : il est en moyenne de $10,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et peut atteindre 12 à $13 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Données D.I.R.E.N.).

- Détermination d'un point kilométrique dans la Touques

Un PK (linéaire) a également été déterminé et calculé pour la Touques. Le PK0 correspond au barrage seuil présent sur le cours d'eau et marque la limite extrême amont de toute influence de la marée dynamique. Le tableau 3.7. ci-dessous reprend l'ensemble des coordonnées des stations de prélèvements dans la Touques, ainsi que les PK correspondants.

Tableau 3.7. Coordonnées géographiques des stations de prélèvements sur la Touques (en 2005) ainsi que les PK calculés à partir du PK0 correspondant au barrage. Un PK négatif correspond à une station située à l'amont du barrage.

Stations	Date	Longitude	Latitude	PK calculé (Km)
Barrage de la Touques	-	0,20974	49,2610	0
TOUQ_01	17/01/2005	0,20974	49,2605	-0,05
TOUQ_02	17/01/2005	0,14834	49,3049	6,60
TOUQ_03	17/01/2005	0,10305	49,3410	11,80
TOUQ_04	17/01/2005	0,09088	49,3577	13,80
TROU	17/01/2005	0,07391	49,3700	15,60

III.2. Caractéristiques granulométriques des sédiments des berges de l'Orne, la Dives et la Touques

Comme pour les autres sites d'échantillonnage, seul l'intervalle granulométrique des particules < 50 µm des sédiments superficiels a été détaillée pour chaque cours d'eau. Les courbes granulométriques de la fraction fine sont représentées pour l'Orne la Dives et la Touques en janvier 2005 et pour l'Orne en juin 2004 (Fig.3.69.). Les données chiffrées pour chaque classe granulométrique sont données en annexe.

Les données granulométriques de la Dives et de la Touques présentent des caractéristiques similaires. Les courbes sont bimodales avec un pic prédominant dans les silts grossiers (32-50 µm) et un pic plus ou moins prononcé dans les silts fins (8-16 µm) à très fins (4-8 µm). Dans leur partie aval, entre l'embouchure et le barrage, un autre pic granulométrique apparaît : celui des argiles, visible pour les stations TROU et TOUQ04 sur la Touques et pour les stations DIVE03 et DIVE04 sur la Dives.

Dans le cas de l'Orne, les sédiments échantillonnés en janvier 2005 présentent des caractéristiques granulométriques similaires à celles de la Dives et de la Touques. Dans la partie aval du cours d'eau, soit entre l'embouchure et le barrage de Caen, deux modes dominant : les silts grossiers et les silts fins à très fins. En revanche, en amont du cours d'eau, les silts grossiers sont seuls dominants.

Les sédiments de l'année 2004 diffèrent que peu de l'année 2005. La fraction fine des sédiments des berges dans la partie aval se caractérise toujours par des silts grossiers et des silts fins à très fins. La station amont, en amont du barrage, se distingue avec trois modes : les argiles, les silts fins à très fins et les silts moyens à grossiers.

En comparant la fraction fine des échantillons prélevés les caractéristiques granulométriques sont les mêmes sur les berges des trois cours d'eau côtiers du Calvados, avec principalement deux populations granulométriques : les silts fins à très fins et les silts grossiers. La fraction fine des sédiments en amont des barrages de la Dives et de la Touques est identique à celle de la partie aval. En revanche, à l'embouchure des deux cours d'eau une nouvelle population granulométrique apparaît : les argiles.

Seule l'Orne se différencie de la Dives et de la Touques. Les argiles sont absentes de l'embouchure et les sédiments des berges en amont du barrage de Caen présentent des populations granulométriques différentes avec un seul ou trois modes granulométriques.

La présence de pélites dans ces fleuves côtiers a déjà été observée par Fily (1967) et Dubrulle (1982) pour l'Orne et par Germain (1970) pour la Dives. Aucune information ne vient étayer la présence de vases dans la Touques. Fily (1967) précise que le pourcentage de pélites est toujours supérieur dans les sédiments de haute slikke que ceux de basse slikke, mais qu'il est impossible de distinguer une évolution dans les hautes slikkes, le long de l'estuaire de l'Orne. Sur les basses slikkes, la teneur en pélites varie d'aval en amont. Au delà de Colombelles, les valeurs sont supérieures à 50 % et s'accroissent très rapidement jusqu'au barrage. À 300 m en amont du barrage, les pélites forment 96 % du sédiment total.

Germain (1970) met en évidence un affinement dans la population granulométrique avec un gradient longitudinal de l'aval vers l'amont et un gradient transversal du chenal vers la haute slikke pour la Dives.

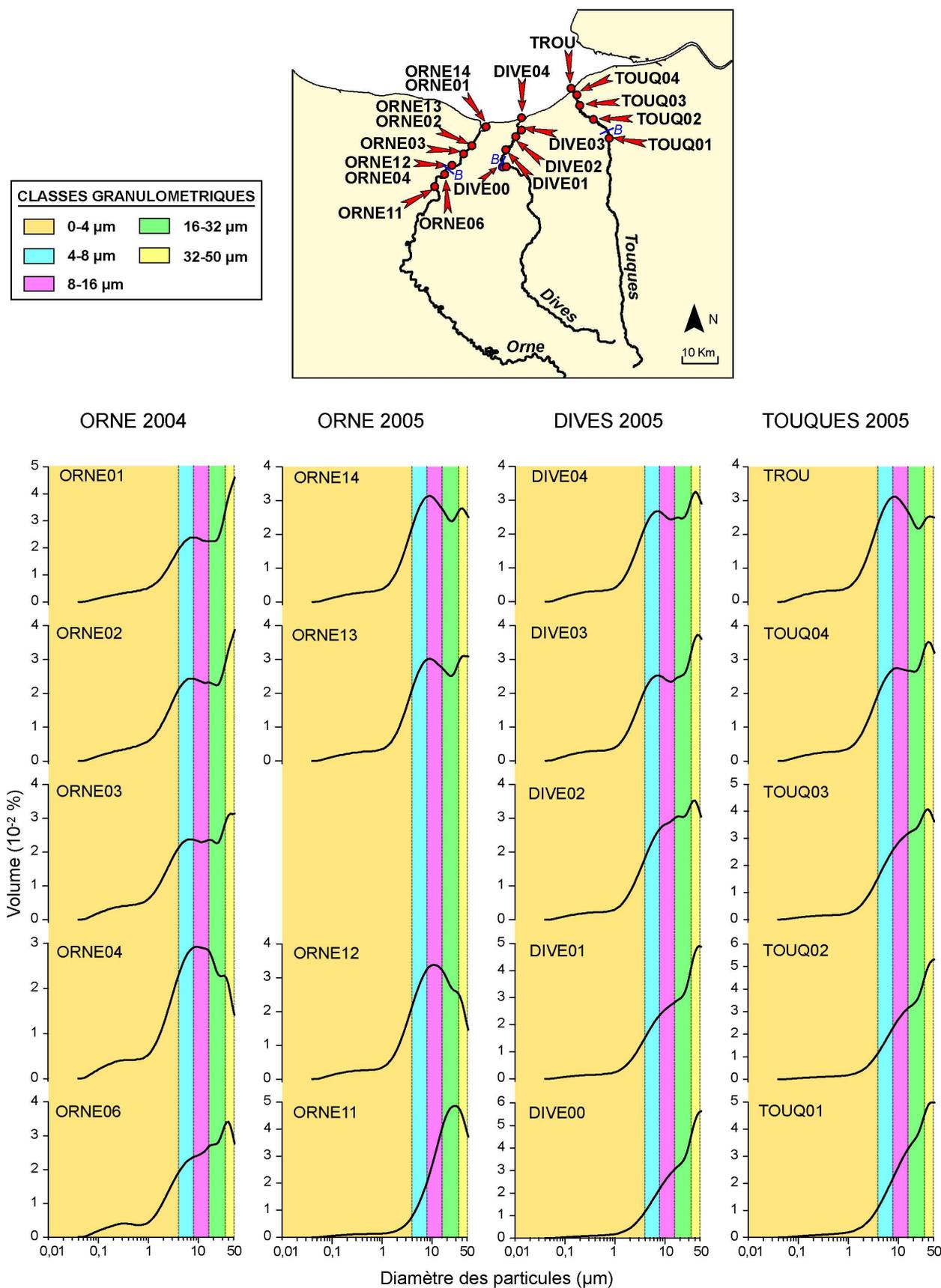


Figure 3.69. Courbes granulométriques de la fraction < 50 μm de l'ensemble des sédiments récoltés sur les berges des bas cours de l'Orne (en 2004 et 2005), de la Dives (en 2005) et de la Touques (en 2005).

III.3. Cortèges minéralogiques argileux des sédiments des berges des bas cours de l'Orne, la Dives et la Touques

III.3.1. Caractérisation des cortèges des minéraux argileux

- Identification des cortèges des minéraux argileux

Dans les cours d'eau côtiers du Calvados, au cortège décrit dans le système estuarien de la Seine s'ajoute un nouveau minéral argileux : la vermiculite (notée V). Autre particularité des cours d'eau côtiers, le cortège argileux de la Dives et de la Touques est identique (Tab.3.8.). Il est composé de smectites associées à un interstratifié (V-Sm), d'illite, de kaolinite et d'un interstratifié (10-C). Le cortège argileux est sensiblement le même entre l'embouchure et le barrage amont.

Dans l'estuaire de l'Orne, le cortège argileux est beaucoup plus variable. En amont du barrage de Caen, il est constitué de vermiculite, de kaolinite, d'illite et de l'interstratifié (10-C). Entre l'embouchure et le barrage, les cortèges argileux sont très variables et différent d'une année à l'autre. En 2004, il est composé de smectites associées à l'interstratifié (C-Sm) ou (C-Cg), comme celui qui est observé sur le littoral est bas-normand. D'autres échantillons sont constitués de l'association de vermiculite et de l'interstratifié (V-Sm). En 2005, le cortège est formé de smectites associées ou non au minéral interstratifié (V-Sm).

Tableau 3.8. Identifications, semi-quantifications (%) et détermination des indices de cristallinité de l'illite (2θ) et des smectites des cortèges des minéraux argileux des sédiments intertidaux des berges de l'Orne, de la Dives et de la Touques.

COURS D'EAU COTIERS	Périodes de prélèvement	Numéro d'échantillon	Cortèges argileux														Indice cristallinité I	Indice cristallinité Sm					
				I	K	Sm	10-C	V	V-Sm	C-(10-C)	V-(V-Sm)	Sm-(C-Cg)	C-Sm	C-(V)	Sm-(V-C)	Sm-(V-Sm)			(V-C)	Sm-(10-C)			
ORNE	JUN 2004	MERV	(C-V), I, Sm-(10-C), K	17	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	0	0	0	31	0,29	0,68	
		ORNE01	I, V-(V-Sm), K	26	36	0	0	0	0	0	0	38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,33	--
		ORNE02	C-(10-C), I, K	16	27	0	0	0	0	56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,35	--
		ORNE03	I, (10-C), Sm, (C-Sm), K	21	36	26	5	0	0	0	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0,37	0,70
		ORNE04	I, (10-C), Sm-(C-Cg), K	27	34	0	15	0	0	0	0	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,35	0,67
		ORNE05	C-(10-C), I, V-(V-Sm), K	27	39	0	0	0	0	14	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,42	--
	ORNE06	I, (10-C), V, K	11	30	0	18	41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,42	--	
	JANVIER 2005	MERV11	I, (10-C), (Sm-V), Sm, K	24	30	30	7	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,54	0,68
		ORNE14	I, (10-C), Sm-(V-Sm), K	20	31	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	47	0	0	0	0	0,51	0,79
		ORNE13	I, (10-C), (Sm-V), Sm, K	26	36	16	7	0	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,54	0,76
		ORNE12	I, (10-C), Sm-(V-Sm), K	22	31	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	40	0	0	0	0	0	0,58	0,82
ORNE11		I, (10-C), V, K	30	47	0	2	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,44	--	
DIVES	JANVIER 2005	DIVE Amont	I, (10-C), Sm-(C-V), K	21	25	0	21	0	0	0	0	0	0	0	0	33	0	0	0	0	0,68	0,87	
		DIVE00	I, (10-C), Sm-(C-V), K	22	22	0	17	0	0	0	0	0	0	0	0	38	0	0	0	0	0,87	0,82	
		DIVE01	I, (10-C), Sm-(C-V), K	11	12	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	75	0	0	0	0	0,56	0,88	
		DIVE02	I, (10-C), Sm-(C-V), K	20	25	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	45	0	0	0	0	0,55	0,86	
		DIVE03	I, (10-C), Sm-(C-V), K	22	34	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	37	0	0	0	0	0,53	0,77	
		DIVE04	I, (10-C), Sm-(C-V), K	23	36	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	31	0	0	0	0	0,51	0,79	
TOUQUES	JANVIER 2005	TOUQ_01	I, (10-C), Sm-(C-V), K	10	18	0	2	0	0	0	0	0	0	0	70	0	0	0	0	0	0,42	0,87	
		TOUQ_02	I, (10-C), Sm-(C-V), K	11	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	76	0	0	0	0	0	0,52	0,93	
		TOUQ_03	I, (10-C), Sm-(C-V), K	18	26	0	4	0	0	0	0	0	0	0	52	0	0	0	0	0	0,61	0,78	
		TOUQ_04	I, (10-C), Sm-(C-V), K	23	32	0	11	0	0	0	0	0	0	0	33	0	0	0	0	0	0,53	0,85	
		TROU	I, (10-C), Sm-(C-V), K	26	33	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0,56	0,89	

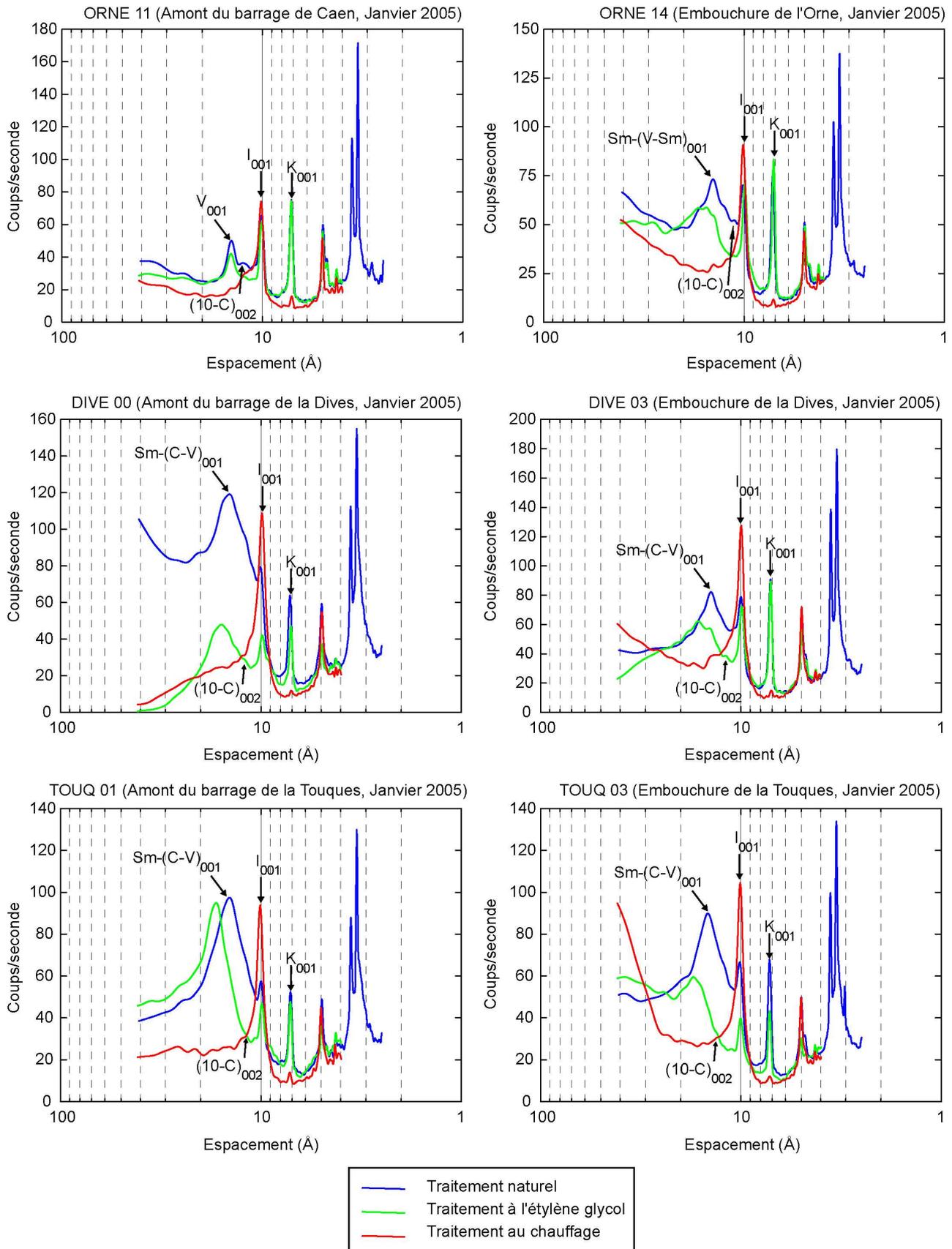


Figure 3.70. Diffractogrammes de quelques échantillons des berges de l'Orne, de la Dives et de la Touques (échantillon amont à gauche et aval à droite).

L'analyse des diffractogrammes montre le comportement de la vermiculite aux différents traitements subis : elle est marquée par un pic à 14 Å au naturel, qui reste stable à 14 Å à l'éthylène glycol, puis gonfle à 10 Å au chauffage. Elle se distingue de la smectite qui elle gonfle à l'éthylène glycol. Dans les échantillons présentés ci-dessus (Fig. 3.70), la réflexion d001 apparaît peu ouverte et de faible amplitude. Dans la partie aval de l'Orne, la smectite est ouverte et le minéral interstratifié (V-Sm) a la particularité de montrer un pic au chauffage.

Dans les parties amont de la Dives et de la Touques, les smectites sont ouvertes mais ont des amplitudes plus importantes que celles observées dans la partie aval des cours d'eau.

- Indices de cristallinité

Les indices de cristallinités de l'illite ont été détaillés pour chaque cours d'eau côtier (Fig.3.71.). Dans l'Orne (en 2004) et la Dives, il apparaît une très légère décroissance de l'amont vers l'aval, avec des valeurs variant de 0,29 à 0,42 $^{\circ}2\theta$ pour l'Orne, et de 0,51 à 0,87 $^{\circ}2\theta$ pour la Dives. Cela signifie que les illites de l'amont sont moins bien cristallisées que celles de l'aval. En 2005, pour l'Orne, cette particularité ne se retrouve pas : l'indice de cristallinité se situe autour de 0,52 $^{\circ}2\theta$. Dans la Touques, l'indice de cristallinité semble augmenter légèrement de l'amont vers l'aval. Cela signifie donc que les illites en amont sont un peu mieux cristallisées que celles de la partie aval du cours d'eau.

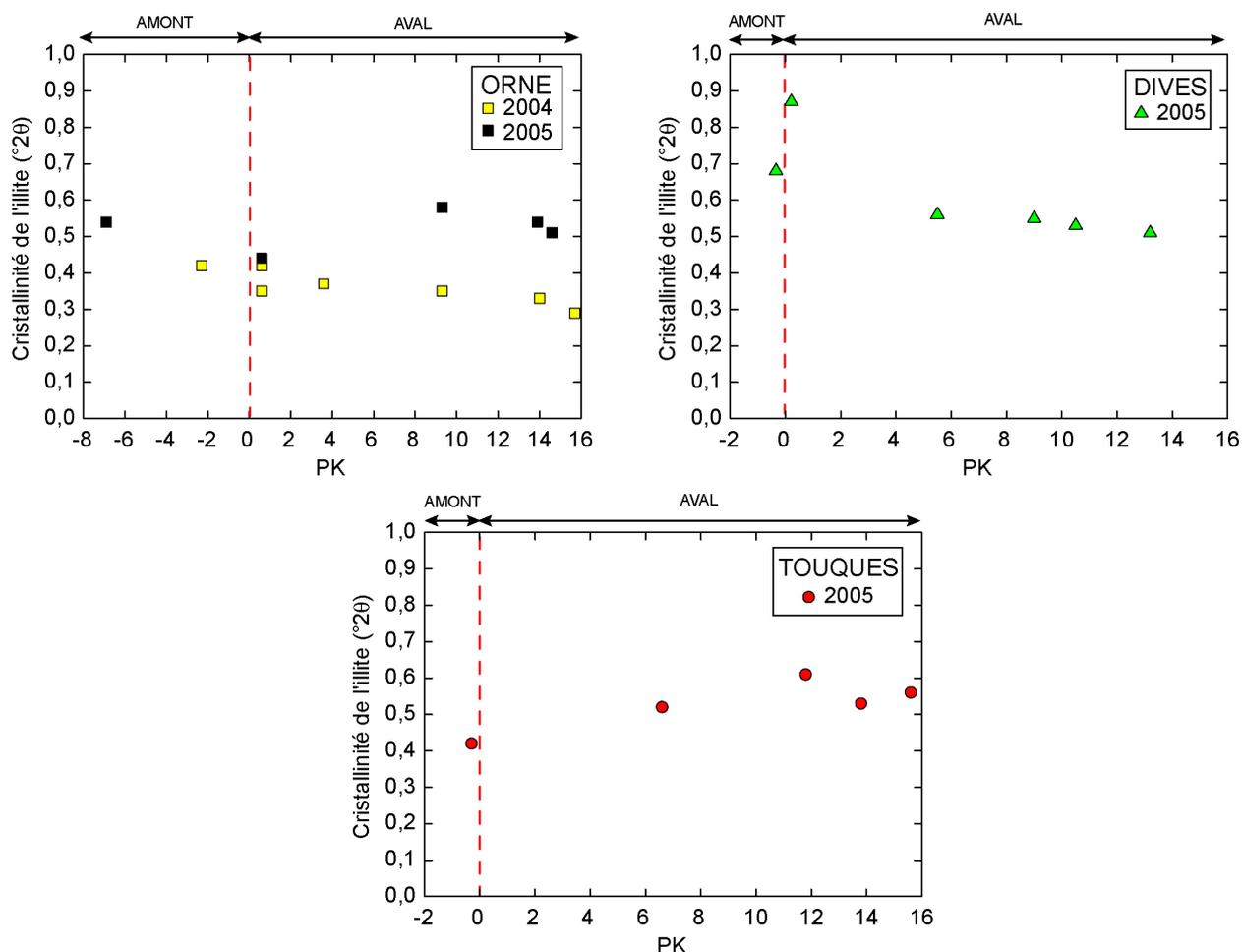


Figure 3.71. Indices de cristallinité de l'illite ($^{\circ}2\theta$) selon la distance (PK défini dans chaque cours d'eau) pour les sédiments intertidaux de l'Orne, de la Dives et de la Touques.

L'indice de cristallinité de la smectite varie si peu au sein de chaque cours d'eau côtier du Calvados qu'il est impossible de s'en servir pour émettre quelques hypothèses (Fig.3.72.). Dans l'Orne, juste à l'aval du barrage, les valeurs sont autour de 0,7, près de l'embouchure de 0,8. Il est difficile de voir une quelconque évolution.

Dans la Dives, les indices de cristallinité des smectites ont des valeurs autour de 0,8. Dans la Touques, les valeurs sont autour de 0,85 et il semble y avoir une légère croissance vers l'embouchure de la Touques. Les smectites à l'embouchure y seraient donc mieux cristallisées.

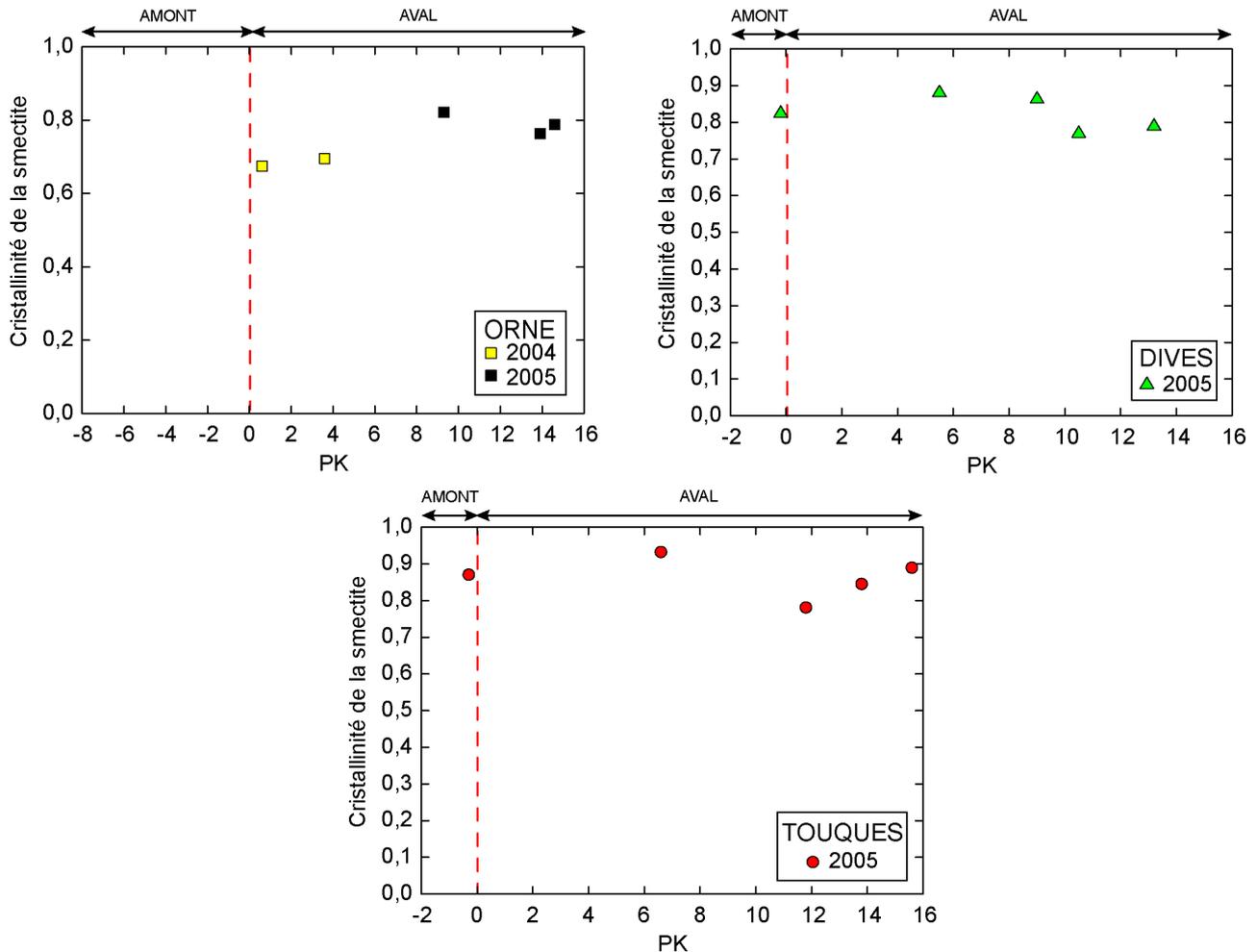


Figure 3.72. Indices de cristallinité des smectites selon la distance (PK défini dans chaque cours d'eau) pour les sédiments intertidaux des cours d'eau (Orne, Dives et Touques).

- Semi-quantification des cortèges des minéraux argileux

La figure 3.73. présente les semi-quantifications des cortèges argileux dans les sédiments de l'estuaire de l'Orne en 2004 et 2005, de la Dives et de la Touques en 2005.

Dans l'Orne, à l'amont du barrage, le cortège argileux est composé de 20 à 40 % de vermiculite, de 20 à 25 % d'illite, de 35 % de kaolinite et de 5 à 10 % du minéral interstratifié (10-C). Dans la zone comprise entre l'embouchure et le barrage, la vermiculite n'existe plus au profit de smectites (40 à 50 %) ou de vermiculite associée à un minéral interstratifié (30 %). Il n'est pas possible de montrer de changements significatifs entre les deux périodes d'échantillonnage. Le suivi amont-

aval ne permet pas non plus de montrer une quelconque tendance. Le fait majeur est la présence de la vermiculite en amont du barrage de l'Orne.

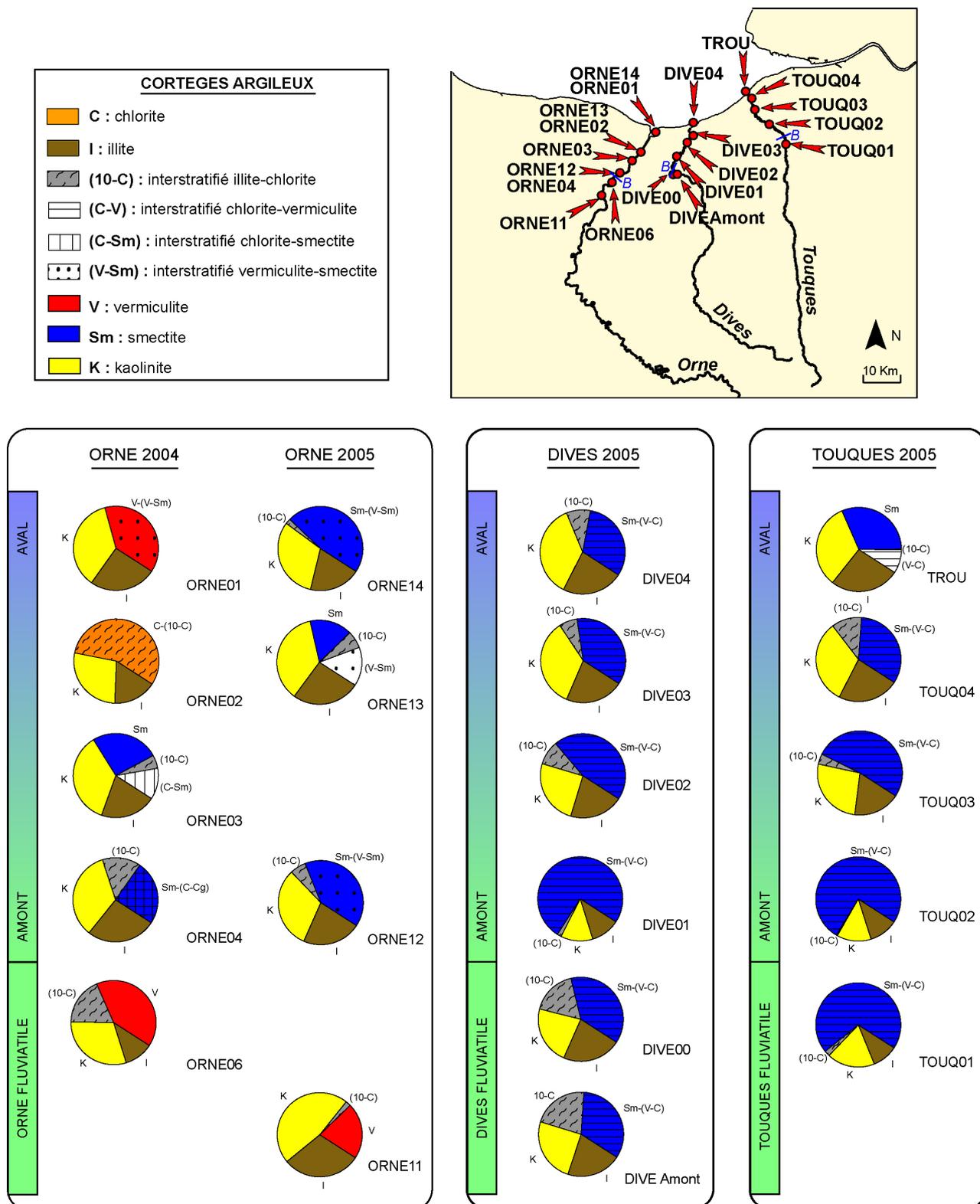


Figure 3.73. Semi-quantifications des cortèges argileux pour les sédiments intertidaux de l'Orne, de la Dives et de la Touques. *B* : Barrage de chaque cours d'eau.

Les résultats obtenus dans l'estuaire l'Orne rejoignent les travaux d'Avoine (1981), à l'embouchure de ce fleuve avec 25 % de smectites, 20 à 25 % de kaolinite, 45 % d'illite, et 5 % de chlorite. Dubrulle (1982) précise le cortège argileux des berges de l'Orne : dominance en illite et kaolinite, et présence de chlorite, smectites et de quelques minéraux interstratifiés. Ces minéraux étaient déjà identifiés par Fily (1967) dans les sédiments des slikkes de l'estuaire.

Dans la Dives, le cortège argileux est composé de 30 à 40 % de smectites (Sm-(V-C)), de 25 % de kaolinite, de 20 % d'illite et de 5 à 10 % du minéral interstratifié (10-C). Dans un échantillon, les smectites atteignent même 75 %. Sur l'ensemble du tracé de la Dives, le cortège argileux reste constant, aucune tendance n'apparaît.

Dans la Touques, le cortège argileux est constitué de 30 à 70 % de smectites (Sm-(V-C)), de 25 % de kaolinite, de 20 % d'illite et de 5 à 10 % du minéral interstratifié (10-C). Ici, il apparaît un gradient au niveau des smectites avec une augmentation des teneurs de l'amont vers l'aval. Aucune donnée bibliographique n'a permis de confirmer ou non les proportions et les différents types d'argiles présents dans les sédiments intertidaux de la Touques.

Comparés aux résultats obtenus sur l'ensemble du système estuarien de la Seine, il apparaît une nette particularité des cortèges argileux des cours d'eau de l'est du Calvados.

III.3.2. Discussion sur l'origine des minéraux argileux des trois cours d'eau côtiers du Calvados

L'ensemble des données acquises sur les minéraux argileux a montré des particularités, notamment la présence de vermiculite. Il est alors nécessaire de s'intéresser à la minéralogie des argiles des bassins versants et des formations superficielles qui bordent les trois cours d'eau.

Le bassin versant de la Touques est installé sur des formations crayeuses créacées recouvertes plus ou moins d'argiles à silex (Fig.3.74.). La présence de smectites dans les sédiments intertidaux de la Touques provient de ces formations qui en contiennent (35 % dans les argiles à silex (Laignel *et al.*, 1998) et 85 % dans la craie (Laignel, 1997)). À cela s'ajoutent quelques niveaux de marnes callovo-oxfordiennes dans la partie aval du fleuve, qui doivent également alimenter les sédiments fins en chlorite et smectites (Dugué, 1989 et 1991).

Les bassins versants de la Dives et l'Orne ne drainent pas, en revanche les terrains créacés mais des formations jurassiques. La Dives est principalement entourée de formations marneuses callovo-oxfordiennes et bathoniennes. Cela justifie la présence des smectites, de la kaolinite, de l'illite et dans une moindre mesure de la chlorite. Par contre, la vermiculite absente des formations jurassiques s'expliquerait par l'érosion des couvertures loessiques, notamment sur l'Orne. Le cortège argileux des loess pléistocènes présente des petites quantités de vermiculite (Lautridou, 1985 ; Camuzard, 2000). Les dépôts importants de loess qui bordent l'Orne, sont la source en vermiculite dans l'Orne fluviale. La vermiculite est toujours présente dans la partie estuarienne, mais associée en minéraux interstratifiés et apparaît moins bien cristallisée. Les dépôts de loess bordant la Dives et la Touques, moins étendus que pour l'Orne, justifient la présence de vermiculite dans les cortèges argileux des sédiments intertidaux, sous la forme de minéraux interstratifiés.

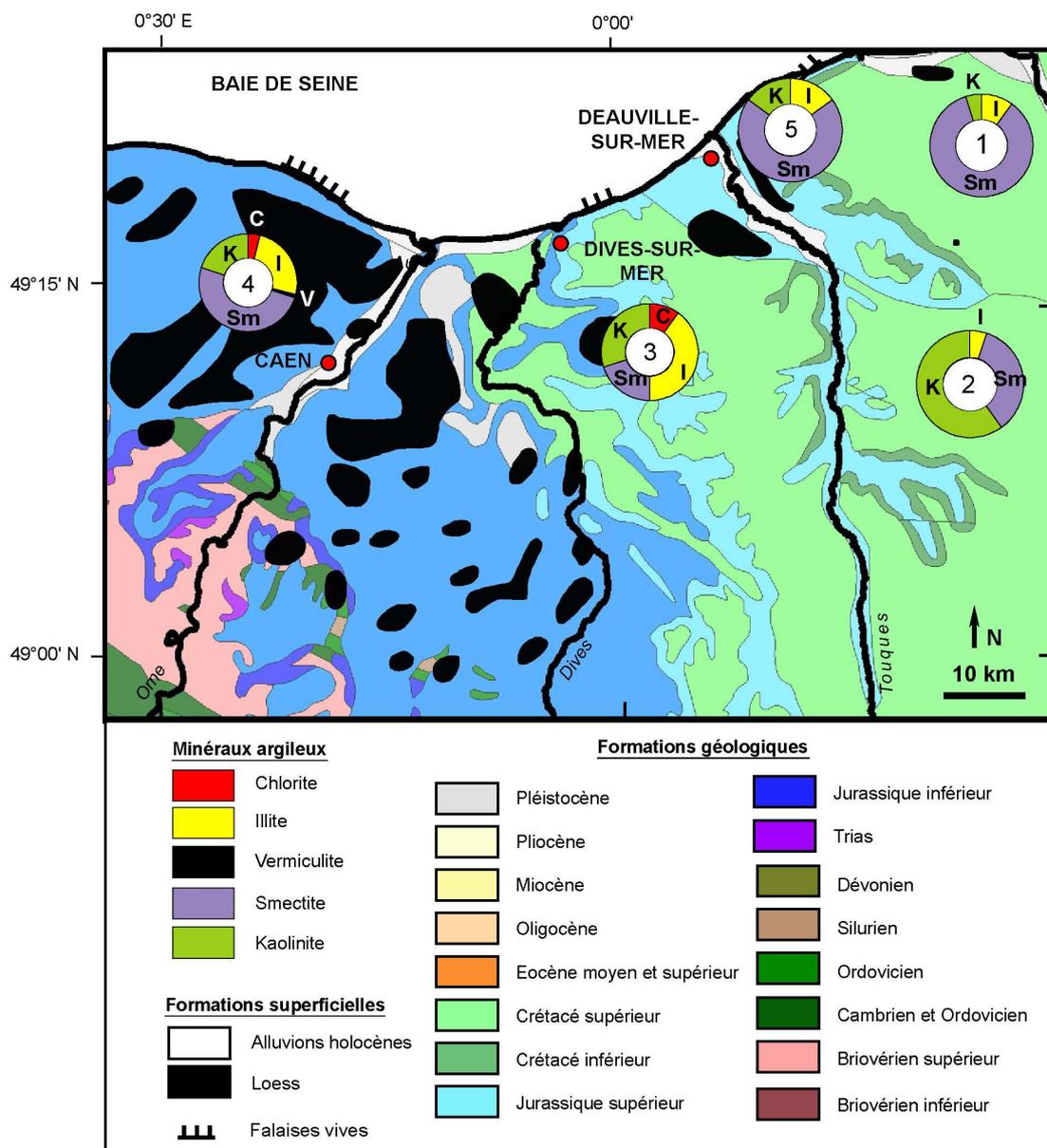


Figure 3.74. Carte géologique (extrait de la carte géologique de la Normandie au 1/50000, BRGM) et minéraux argileux associés des cours d'eau côtiers bas-normands. 1 : Craie (Laignel, 1997) ; 2 : Argiles à silex (Laignel *et al.*, 1998) ; 3 : Marnes, calcaires et argiles callovo-oxfordiennes (Dugué, 1989) ; 4 : Loess pléistocènes (Lautridou, 1985) ; 5 : Falaises argileuses jurassiques (Ce travail).

III.4. Distribution des éléments majeurs-mineurs-traces des sédiments des berges de l'Orne, la Dives et la Touques

La démarche retenue précédemment pour les sédiments fins de l'estuaire et sur le littoral bas-normand et la baie de Seine, est conservée pour les cours d'eau côtiers : les facteurs d'enrichissement calculés sont décrits successivement puis la distribution de quelques éléments chimiques est donnée. Le tout permet de caractériser le mélange sédimentaire et de distinguer des marqueurs particuliers potentiels pour la fraction fine.

III.4.1. Facteurs d'enrichissement

Les figures 3.75., 3.76. et 3.77. présentent les FE des différents échantillons prélevés respectivement sur les berges de l'Orne, de la Dives et de la Touques, toutes périodes de prélèvements confondues.

- Série Na à Fe

Les FE de l'ensemble des échantillons de cette première série d'éléments sont très proches d'un cours d'eau à l'autre. Le magnésium avec des valeurs dispersées, le potassium et le fer ont des FE proches ou égales à 1, leur signature chimique est de type shales. Les FE du manganèse sont eux aussi proches de 1 pour la Dives et la Touques mais très dispersés et autour de 1 pour l'Orne. Les FE du titane, du calcium, du sodium, du phosphore et du silicium sont en excès, tout comme le sont ceux des échantillons de l'estuaire, du littoral et de la baie de Seine. L'explication de tous ces excès identiques à ce qui a été développé précédemment, est : la présence de carbonates et de quartz dans le système et les rejets de titane et de phosphogypses effectués dans l'estuaire de la Seine dans les années 1970.

Une exception : deux échantillons sont appauvris en calcium par rapport à la référence shales. Il s'agit des échantillons prélevés dans l'Orne, en amont du barrage de Caen, qui montrent une signature du matériel fin d'origine fluviale.

- Série Be à As

Les FE du béryllium, du vanadium, du nickel et du gallium sont voisins de 1 avec néanmoins quelques valeurs en léger excès. Leur signature est de type shales et reste homogène d'un cours d'eau à l'autre. Les FE du cobalt sont proches de 1 pour la Dives mais en léger déficit pour l'Orne et la Touques. De la même manière que pour le reste des échantillons du système estuarien de la Seine, les FE du chrome, du cuivre, du germanium et de l'arsenic sont en excès par rapport aux shales, un excès toutefois moindre par rapport aux échantillons de l'estuaire de la Seine. Les FE du cuivre et du zinc sont les plus élevés, comme cela a déjà été remarqué précédemment. Particularité des échantillons de la Touques : les FE du germanium et de l'arsenic sont en excès, mais relativement dispersés.

- Série Rb à Sb

Cette série ne présente pratiquement que des échantillons avec des FE en excès. Seuls les FE du rubidium sont proches de 1 et leur signature est de type shales. Les FE de l'indium sont proches de 1 également mais pour certains échantillons légèrement en excès par rapport à la référence shales. Les FE du molybdène, quant à eux, sont en déficit pour la Dives et la Touques et très dispersés autour de 1 pour l'Orne. D'une manière générale, les échantillons de la Touques présentent des FE pour cette série plus dispersés que pour les deux autres fleuves. Les FE du strontium, de l'yttrium, du zirconium, du niobium, du cadmium, de l'étain et de l'antimoine sont tous en excès, avec des valeurs très dispersées pour le zirconium. Cette dispersion est probablement conditionnée par la présence de minéraux lourds dans la fraction fine. Par contre, d'une manière générale, les FE en excès sont nettement moins importants que ceux des échantillons de l'estuaire de la Seine.

- Série Cs à U

Cette série présente des caractéristiques similaires à la précédente. Tous les échantillons présentent des FE en excès, excepté pour les FE du baryum qui sont proches de 1 et un peu dispersés pour l'Orne et la Touques.

Les autres éléments (césium, hafnium, tantale, tungstène, plomb, bismuth, thorium et uranium) présentent des FE en excès avec les plus fortes valeurs pour l'hafnium, le bismuth et le plomb, mais néanmoins moins importantes que celles évoquées en estuaire et en baie de Seine. Pour l'Orne, deux échantillons se distinguent, avec des FE en déficit pour le plomb et le bismuth. Ils correspondent aux échantillons de l'amont du barrage de Caen. Les échantillons de la Touques présentent des FE très dispersés pour pratiquement tous les éléments de cette série.

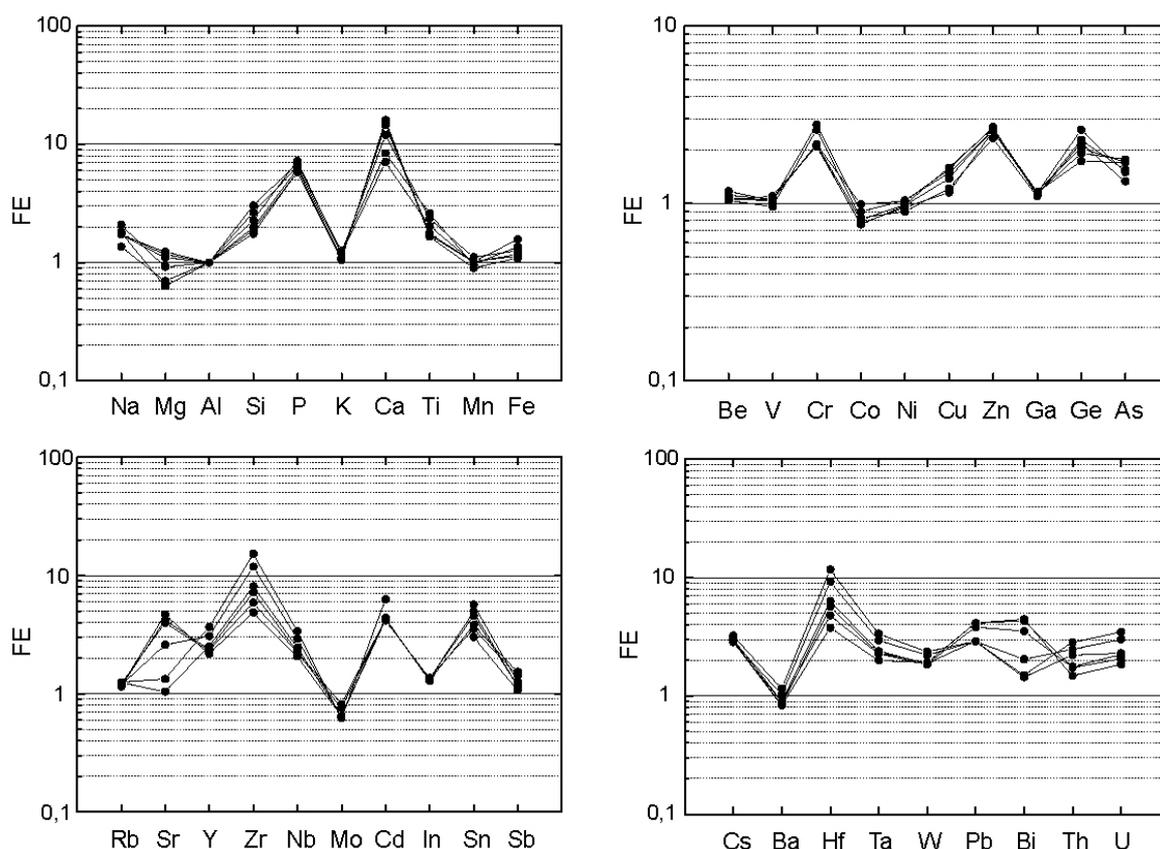


Figure 3.75. Facteurs d'enrichissement (FE) des échantillons prélevés sur les berges de la Dives en janvier 2005.

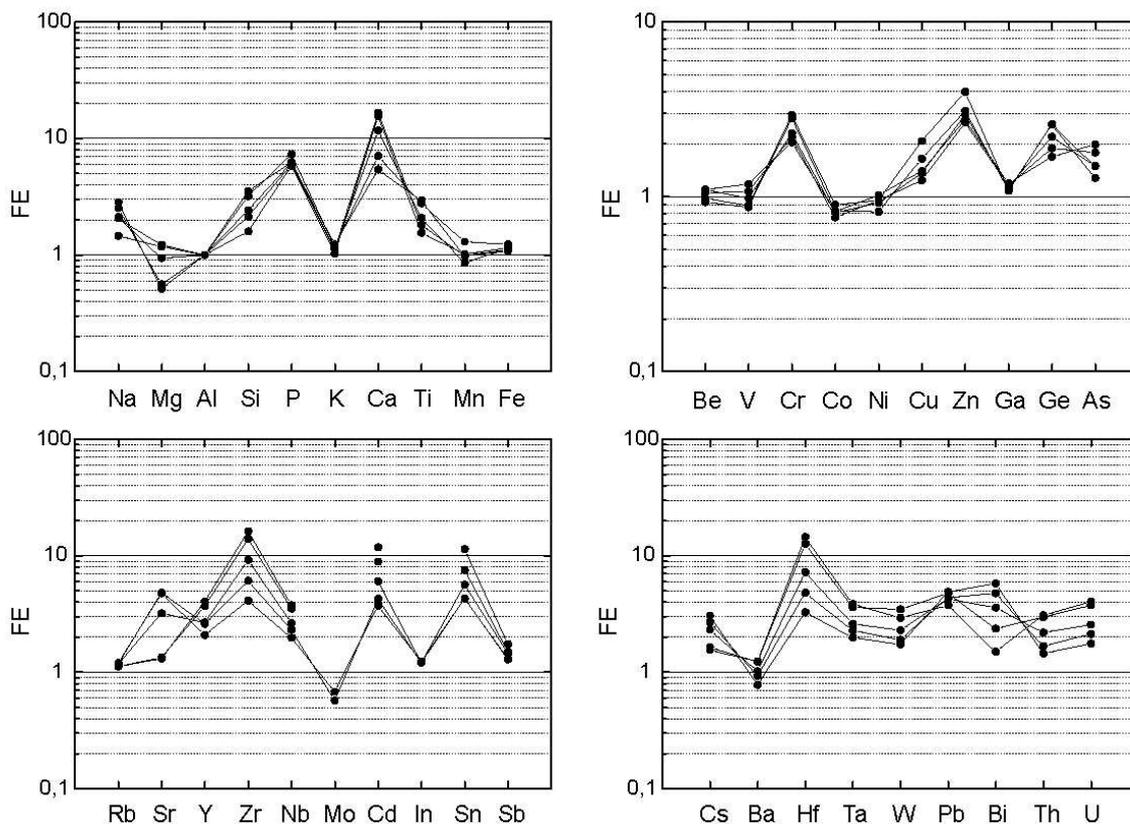


Figure 3.76. Facteurs d'enrichissement (FE) des échantillons prélevés sur les berges de la Touques en janvier 2005.

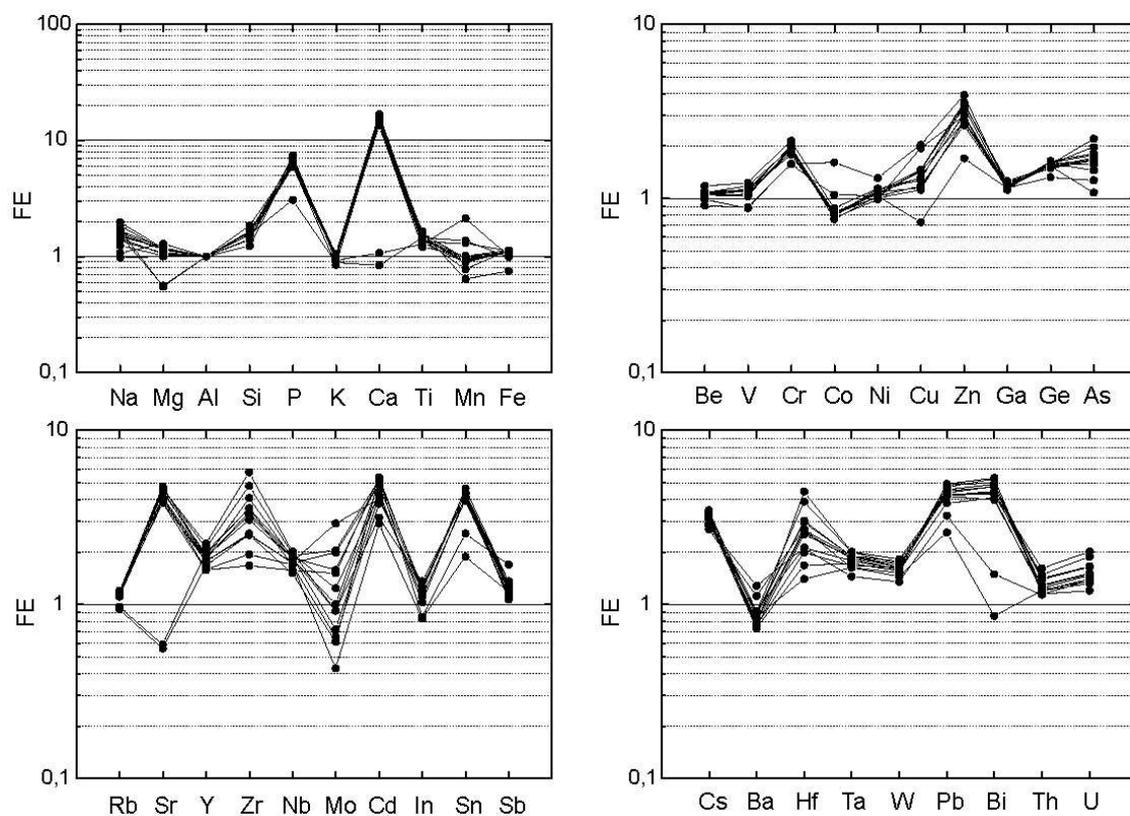


Figure 3.77. Facteurs d'enrichissement (FE) des échantillons prélevés sur les berges de l'Orne en juin 2004 et janvier 2005.

III.4.2. Constituants majoritaires du mélange sédimentaire

- Le système Ca-Al-Si

La corrélation $Si_{CFB}-Al_{CFB}$ est représentée sur la figure 3.78. ci-dessous. La droite noire correspond à la droite de référence des shales et celle pointillée rouge correspond à la droite de corrélation représentative des échantillons de l'Orne, de la Dives et de la Touques, avec une ordonnée à l'origine forcée à $Si = 46,7 \%$ (soit le teneur en Si dans le quartz).

De la même manière que pour les échantillons de l'estuaire et de la baie de Seine, les concentrations en Si sont seulement dues aux aluminosilicates, pour les plus fortes concentrations en aluminium. Le silicium lié au quartz correspond à la différence entre les teneurs en silicium et le silicium associé aux aluminosilicates. On suppose alors que l'excès de Si est essentiellement lié au quartz, voire à la silice biogène.

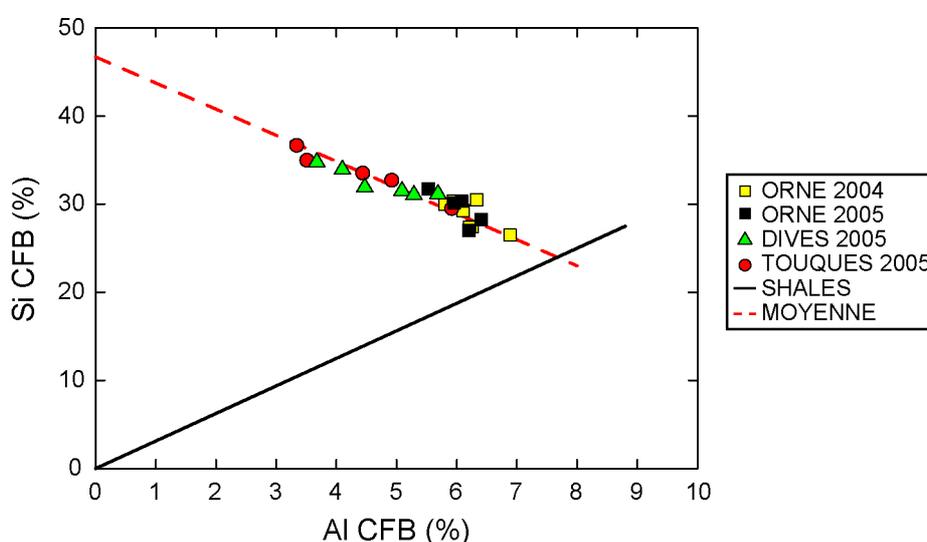


Figure 3.78. Relation entre les teneurs en Si et Al calculées sur la base d'un sédiment décarbonaté (CFB) pour les échantillons prélevés sur les berges de l'Orne (juin 2004 et janvier 2005), la Dives (janvier 2005) et la Touques (janvier 2005).

Le système Ca-Al-Si pour les sédiments intertidaux des fleuves côtiers est présenté dans la figure 3.79.. Le mélange sédimentaire Ca-Al-Si est calculé selon la méthode présentée dans le chapitre 3.I, (page 113) pour l'estuaire de la Seine. Les principales proportions des constituants Ca, Al et Si, de l'estuaire de l'Orne, sont semblables à celles étudiées en baie de Seine et sur le littoral bas-normand, avec en moyenne 50 % d'aluminosilicates, 25 % de carbonates et 25 % de silice. La seule distinction se situe au niveau de la Touques et de la Dives. Trois échantillons intertidaux de la Touques (TOUQ01, TOUQ02 et TOUQ03) sont nettement plus enrichis en silice (40 à 50 %), appauvris en aluminosilicates (40-45 %) et très peu carbonatés (moins de 10 %). Deux échantillons intertidaux de la Dives (DIVEA_{mont} et DIVE00) sont légèrement appauvris en carbonates (10-20 %) et en silice (10-25 %), et enrichis en aluminosilicates (60-75 %). Quant à l'Orne, seuls les sédiments prélevés en amont du barrage de Caen (ORNE06 et ORNE11) se distinguent et sont dépourvus de carbonates, pauvres en silice et très enrichis en aluminosilicates. Ainsi, il apparaît que les sédiments situés dans les parties amont des trois cours d'eau côtiers aient une composition du mélange sédimentaire différente du reste du cours d'eau.

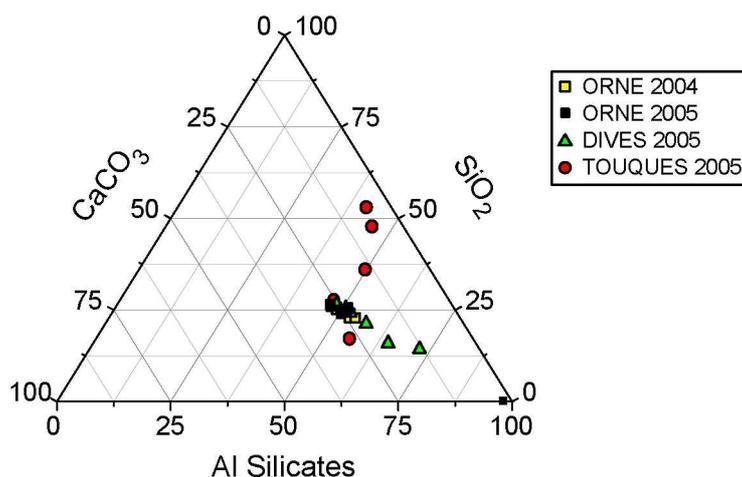


Figure 3.79. Diagramme ternaire représentant la proportion en carbonates, en quartz et aluminosilicates pour chaque échantillon prélevé sur les berges de l'Orne (juin 2004 et janvier 2005), la Dives (janvier 2005) et la Touques (janvier 2005).

- Le potassium K, le magnésium Mg, le fer Fe, le phosphore P et le titane Ti

Les comportements de ces éléments dans les cours d'eau du Calvados sont différents de ceux observés dans le reste du système (baie de Seine, estuaire de Seine et littoral bas-normand).

Le fer est relativement bien corrélé à l'aluminium pour les trois fleuves (Fig.3.80.). Le rapport Fe/Al (0,60) est légèrement supérieur à celui de la droite des shales (0,54), mais reste néanmoins similaire à celui calculé pour le littoral est bas-normand.

La corrélation Mg-Al montre des valeurs proches de la droite des shales (Fig.3.80.). Trois échantillons situés dans la partie amont de la Dives ont des valeurs en dessous de la droite référence, ainsi que l'échantillon en amont du barrage de l'Orne.

La corrélation K-Al présente des valeurs proches de la droite des shales pour l'Orne et légèrement au dessus pour la Dives et la Touques (Fig.3.80.). Seul l'échantillon en amont du barrage de l'Orne est en déficit. L'excès ou le déficit en potassium signifie que la phase porteuse n'est pas uniquement les argiles mais peut aussi être les feldspaths potassiques, par exemple. Fily (1967) a estimé, pour les sédiments envasés de l'estuaire de l'Orne, des teneurs en feldspaths potassiques compris entre 2 et 14 % et en feldspaths plagioclases entre 7 à 30 %.

Les teneurs du titane et du phosphore sont en excès par rapport aux shales mais restent similaires à ceux observés en baie de Seine et sur le littoral bas-normand. Il apparaît, néanmoins, une corrélation entre le phosphore et l'aluminium pour les sédiments des trois cours d'eau.

Dans le cas du titane, les teneurs des sédiments de la Dives et de la Touques montrent une anti-corrélation avec l'aluminium. Les teneurs les plus élevées correspondent, par ailleurs, aux échantillons prélevés dans la partie amont des bas cours. Les taux des sédiments de l'Orne restent en excès par rapport aux shales et présentent pour l'ensemble du cours d'eau (amont-aval) des valeurs analogues.

Pour les sédiments de l'estuaire et de la baie de Seine, les teneurs en excès ont été mises en relation avec les rejets de phosphogypses et de titane, dans les années 70 (Chiffolleau *et al.*, 2001). Dans le cas des cours d'eau côtiers, cette hypothèse ne pourrait expliquer que les fortes valeurs dans la partie aval des fleuves, et en aucun cas, les valeurs très élevées relevées en amont. Il existerait donc probablement un apport en titane et en phosphore par les sédiments d'origine fluviale.

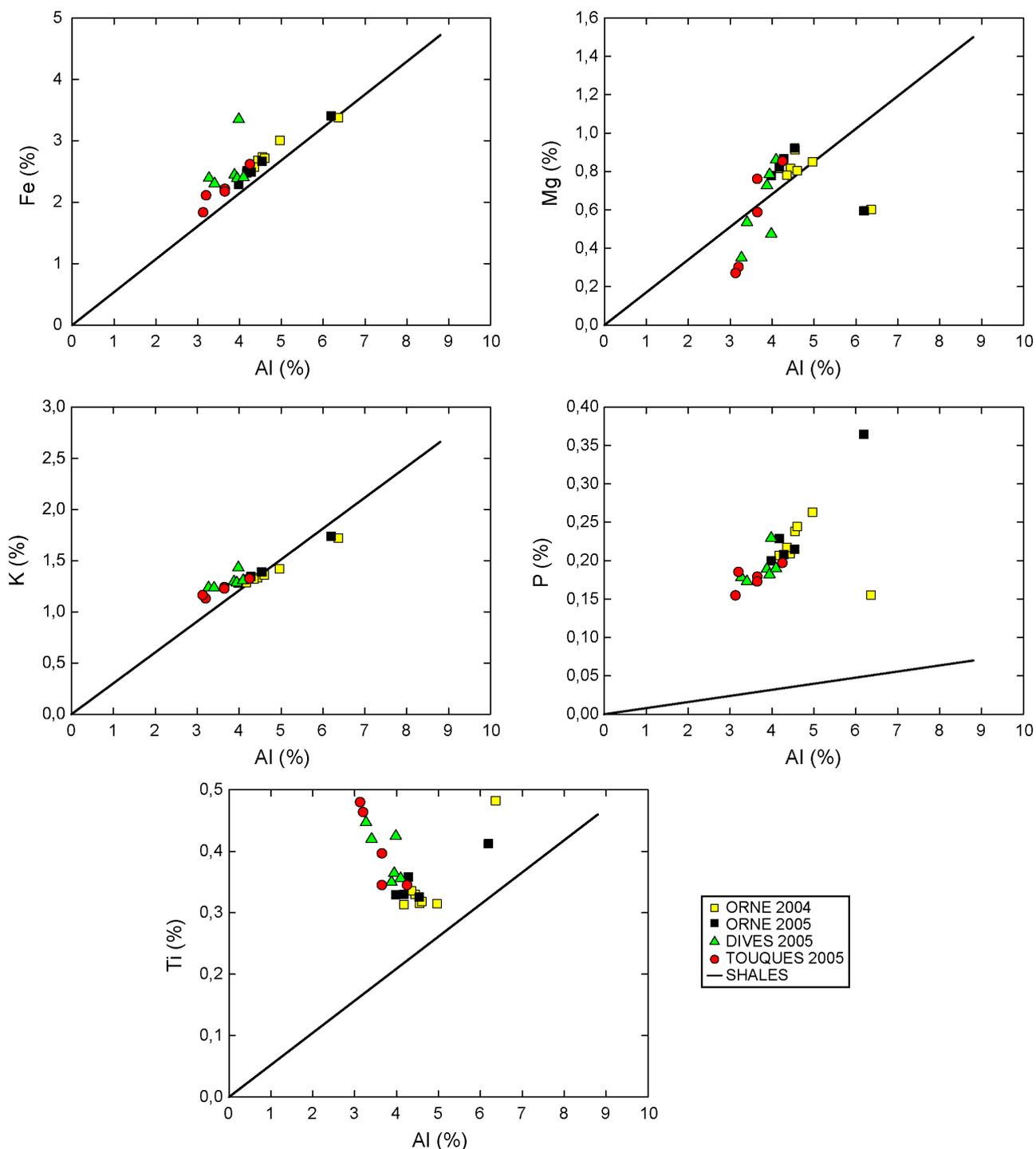


Figure 3.80. Relation entre les teneurs en Fe, Mg, K, Ti, P et Al dans les sédiments intertidaux de l'Orne, la Dives et la Touques.

III.4.3. Les carbonates et le strontium dans les sédiments

- Les carbonates dans les sédiments fins des cours d'eau côtiers

Dans l'Orne, la teneur en carbonates des sédiments reste constante autour de 30 % sur les 18 Km qui séparent l'embouchure du barrage, quelle que soit la période d'échantillonnage. Toutefois, en amont du barrage, la teneur en carbonates n'est plus que de 2 % (Fig.3.81.).

Ces résultats restent cohérents avec ceux de Fily (1967), pour qui les teneurs en carbonates dans la fraction péltique varient entre 24 et 31 %, entre le barrage à Caen et le littoral. Deux origines des carbonates ont été évoquées notamment pour le littoral adjacent à l'Orne : une origine détritique, résultat de l'érosion des falaises bathoniennes présentes sur l'ensemble du cours d'eau et une origine organogène, conséquence de la fragmentation des coquilles de mollusques et des tests d'échinodermes (essentiellement dans la partie la plus aval du cours d'eau).

Pour la Dives, la répartition des taux de carbonates laisse apparaître des teneurs croissantes depuis l'amont du barrage vers l'embouchure. Les valeurs varient entre moins de 10 % à près de 30 %. Germain (1970) a mis en revanche en évidence un gradient décroissant du barrage à l'embouchure avec des teneurs qui passent de 16 à 29 %, avant une augmentation significative à l'embouchure de la Dives et sur le littoral adjacent (27 à 30 %). Il suggère que le fleuve apporte des éléments carbonatés, qui se déposent le long des rives. Vers l'aval, l'augmentation de la teneur en carbonates indique, selon lui, un nouvel apport, d'origine marine ; un apport s'amenuisant vers l'amont avec l'affaiblissement de l'influence marine. Cette hypothèse de Germain (1970) explique probablement la teneur de 10 % en amont du barrage de la Dives.

Dans la Touques, les teneurs en carbonates croissent d'amont en aval, comme dans le cas de la Dives, mais l'augmentation est sensiblement plus ressentie vers l'aval, à 4 Km de l'embouchure. Les valeurs de l'ordre de 6 % à l'amont du barrage, atteignent plus de 25 % à l'embouchure.

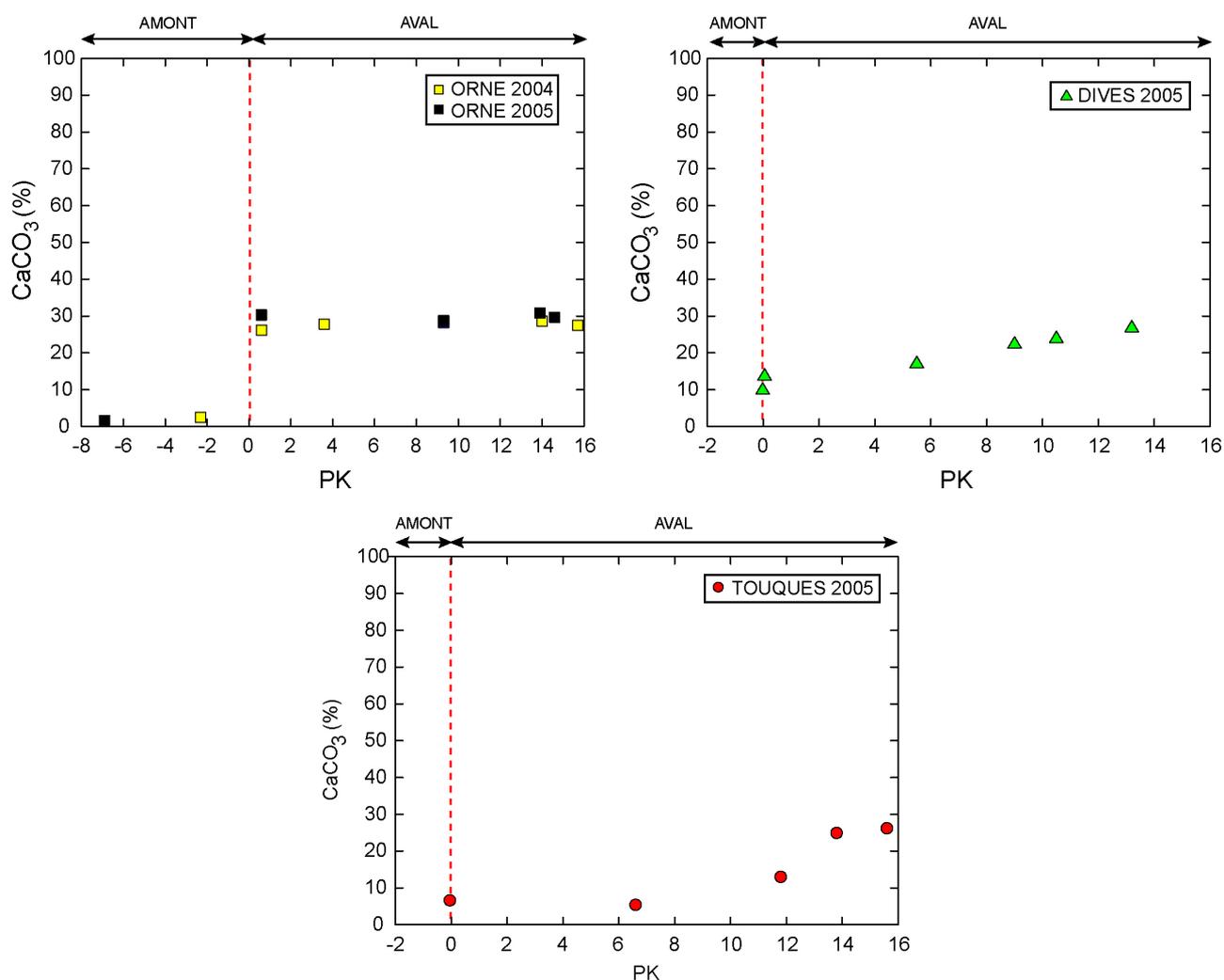


Figure 3.81. Répartition de la teneur en carbonates selon la distance (PK calculé respectivement) pour les sédiments intertidaux de l'Orne, la Dives et la Touques.

L'hypothèse d'une double origine des carbonates, évoquée par Germain (1970) pour la Dives et Fily (1967) pour l'Orne, est confirmée avec cette présente étude. Les carbonates sont à la fois détritiques, apportés par l'érosion des formations calcaires des bassins versants et d'origine marine, alimentées par un apport de la baie de Seine.

Pour l'Orne, il semble que seul l'apport marin soit présent, puisque les teneurs en amont sont très faibles. Mais pour la Dives et la Touques, les taux de carbonates diminuent rapidement d'aval en amont, ce qui signifie que les particules marines pénètrent moins en amont, voire très peu pour la Touques.

- Le strontium associé aux carbonates dans les sédiments

La corrélation Sr-Al est un peu différente dans les cours d'eau côtiers du Calvados, en comparaison de ce qui a été vu jusqu'à présent dans l'ensemble du système étudié (Fig.3.82.).

Le nuage de points pour la partie aval de l'Orne est peu dispersé et en très fort excès par rapport aux shales. Seuls les échantillons en amont du barrage de l'Orne (en 2004 et 2005) sont en déficit. Pour la Dives et la Touques, il apparaît une bonne corrélation entre le strontium et l'aluminium mais qui ne passe pas par l'origine. Les valeurs les plus faibles correspondent aux échantillons les

plus amont des cours d'eau et les teneurs élevées aux échantillons de la partie aval des cours d'eau.

L'excès de strontium est très bien corrélé aux carbonates ; ce qui montre qu'il existe une certaine affinité entre cet élément et les carbonates. L'excès lié à la fraction carbonatée est d'environ $970 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ de CaCO_3 .

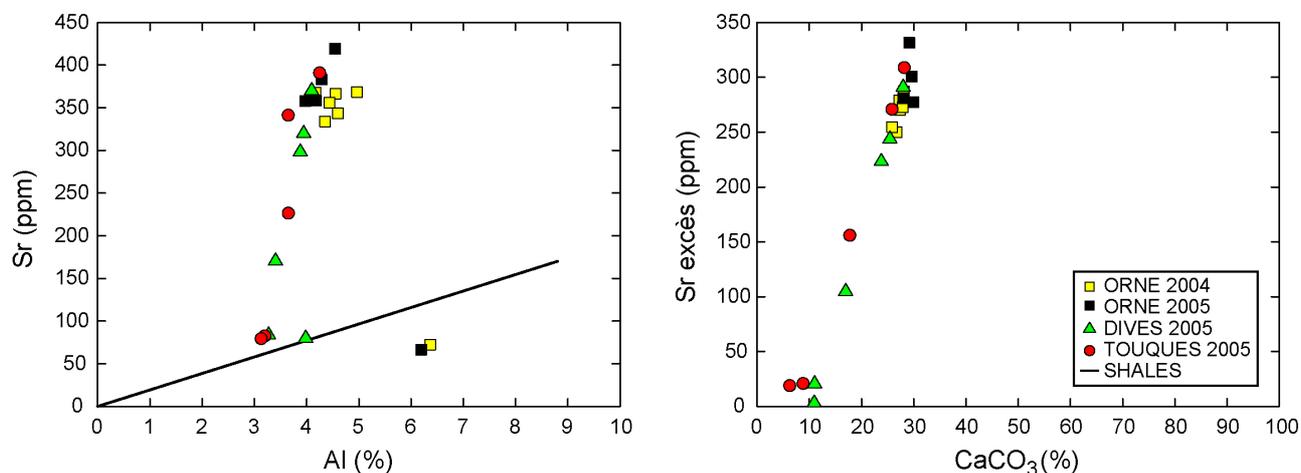


Figure 3.82. Relation entre les teneurs en Sr et Al et corrélation entre l'excès de Sr et le taux de carbonates pour les sédiments intertidaux de l'Orne, la Dives et la Touques.

III.4.4. Éléments en traces corrélés à l'aluminium dans les sédiments

Dans les analyses présentées pour le reste du système d'étude, les éléments en traces de cette catégorie avaient en commun d'être bien corrélés avec l'aluminium. Cela reste vrai pour Be, Ge, Ni, Cs, Ga, Rb et Ba, mentionnés pour les sédiments de la baie de Seine et du littoral bas-normand, mais d'autres s'ajoutent comme In, Sb, As et V (Fig.3.83.).

Les quatre exemples présentés montrent une bonne corrélation : Rb et Al et Ga et Al, avec des valeurs très légèrement au dessus de la droite des shales. Dans le cas du germanium, la corrélation n'est bonne que pour l'Orne. Pour la Dives et la Touques, cet élément est en excès par rapport à la droite référence, cela suggère que la phase porteuse principale n'est absolument pas la phase argileuse.

Le césium, quant à lui, est corrélé à l'aluminium mais la droite caractéristique ne passe pas par l'origine. Les teneurs sont par ailleurs en net excès par rapport à la droite des shales. Le césium n'est donc pas uniquement lié à la fraction aluminosilicatée.

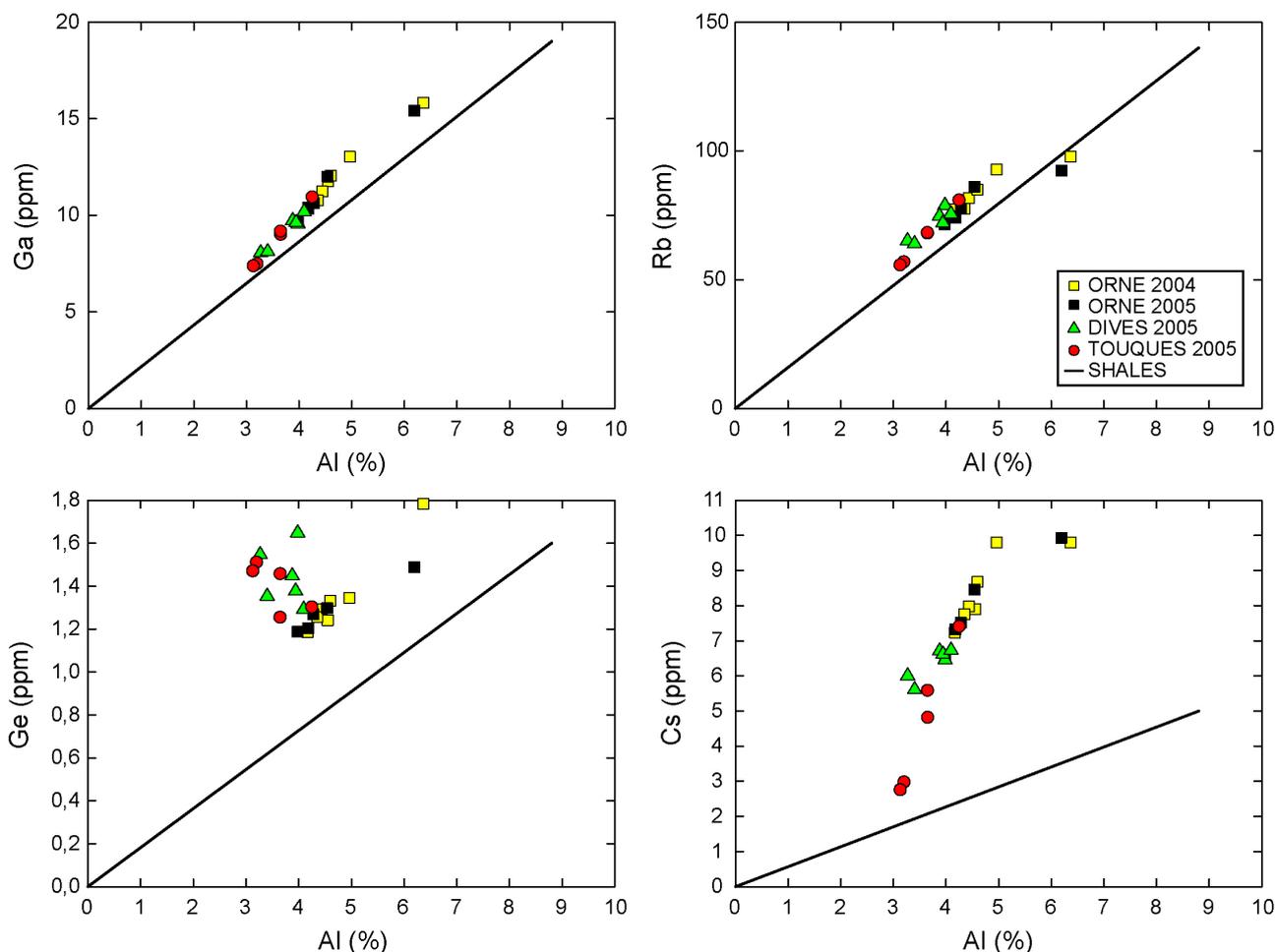


Figure 3.83. Relation entre les teneurs en Ga, Ge, Rb, Cs et Al dans les sédiments intertidaux de l'Orne, la Dives et la Touques.

III.4.5. Éléments dont la concentration est modulée par la présence de minéraux lourds

Cette catégorie rassemble l'ensemble des éléments dont la teneur est modulée par la présence de minéraux lourds. Une fois encore, on retrouve dans le cas des cours d'eau étudiés, les mêmes caractéristiques que les sédiments de la baie de Seine et du littoral bas-normand.

Les teneurs en Zr et Al sont en anti-corrélation (Fig.3.84.). Il semble qu'une fois encore, le zircon soit un des principaux candidats en tant que phase porteuse. L'excès de zirconium reste bien corrélé à l'excès de titane, quelque soit le cours d'eau. Cet excès de titane peut être porté par des ilménites ou des rutilés, souvent enrichis en terres rares (Fig.3.84.). Cela suggère donc que les concentrations en terres rares sont essentiellement modulées par l'abondance en minéraux lourds. La présence de ces minéraux a par ailleurs été observé par Fily (1967) dans l'Orne et par Germain (1970) à l'embouchure de la Dives. Cet apport en minéraux lourds peut être associé principalement à l'érosion des limons côtiers riches en tourmaline et zircon (argument déjà évoqué pour les sédiments de la baie de Seine et du littoral bas-normand), qui alimenteraient les fleuves (Lautridou, 1968a ; Pelerin, 1968 ; Giresse, 1969).

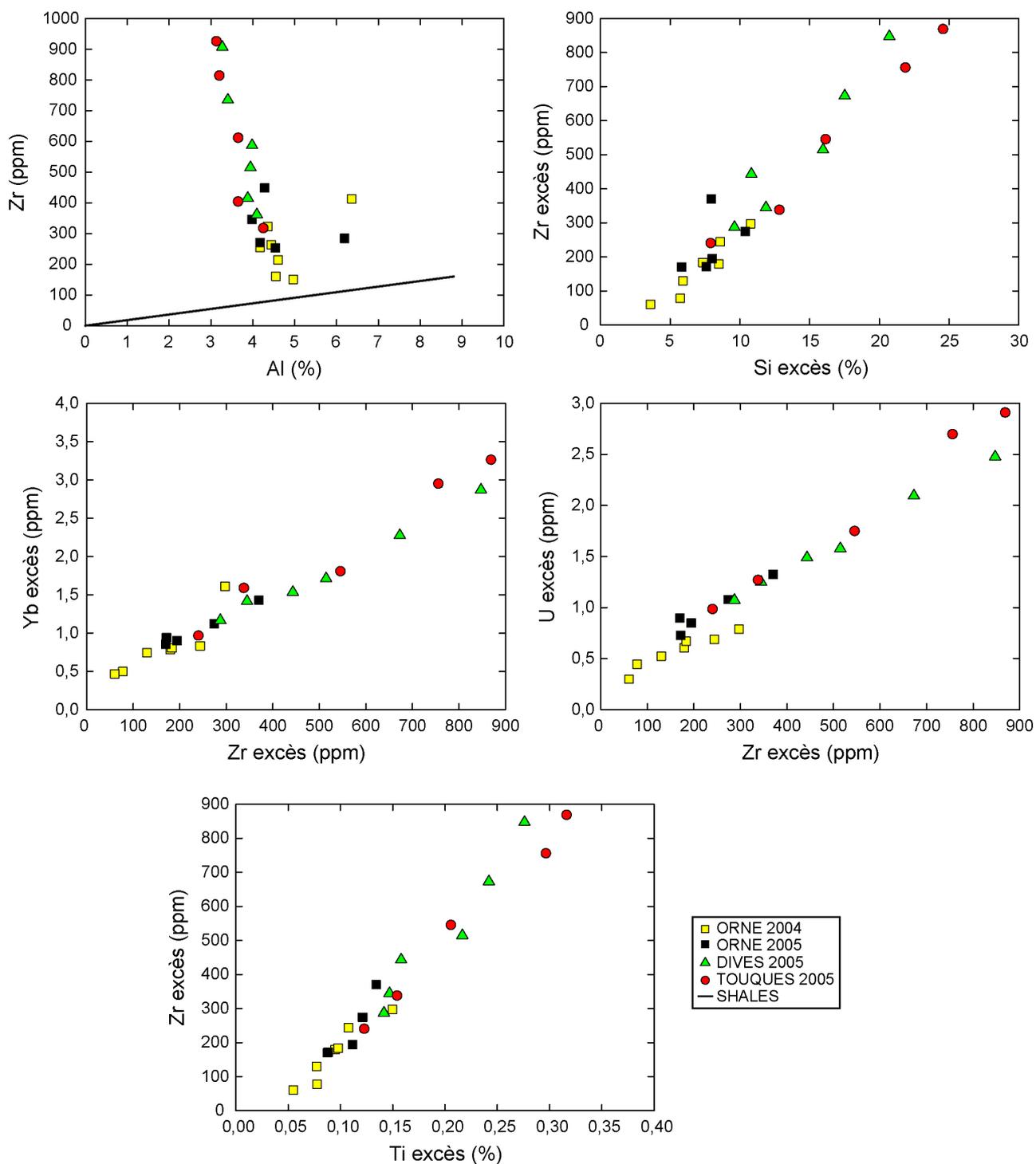


Figure 3.84. Relation entre Zr et Al ainsi que les excès de Zr, Yb, Ti et U pour les sédiments intertidaux de l'Orne, la Dives et la Touques.

III.4.6. Éléments en traces très excédentaires par rapport aux shales

Pour le moment, cette catégorie a permis de mettre en avant quelques éléments susceptibles de marquer et de suivre le devenir des particules fines fluviales de l'estuaire de la Seine, que ce soit en estuaire mais également dans la baie de Seine.

Pour les fleuves côtiers, cela va s'avérer plus compliqué. En effet, il faut à la fois tenir compte de l'influence de la baie de Seine, et de chaque source fluviale particulière à chaque estuaire.

La figure 3.85. ci-après présente les quelques éléments en excès, voire en très fort excès par rapport aux shales, issus de l'analyse des facteurs d'enrichissement. Il s'agit de Cr, Cu, Zn, Cd, Sn, Pb et Bi. D'une manière générale, les teneurs les plus élevées sont dans l'Orne. Les nuages de points de chaque cours d'eau sont plus ou moins dispersés selon l'élément.

Pour la recherche de bons marqueurs particuliers, il semble que le chrome ne soit pas un bon élément. Les teneurs sont peu dispersées et peu différenciées au sein de chaque cours d'eau. Il en va de même pour le cuivre, où le nuage de points est peu dispersé et trop proche de la droite des shales. Le zinc, le cadmium, l'étain et le plomb semblent en revanche présenter des nuages de points plus dispersés et montrer des distinctions entre les cours d'eau. Le bismuth, quant à lui, est l'un des meilleurs candidats : les valeurs des échantillons amont de chaque cours d'eau sont proches de la droite des shales, soit des caractéristiques analogues à la référence shales.

III.4.7. Éléments chimiques susceptibles de constituer des marqueurs discriminants de stocks particuliers

Dans le système estuarien de la Seine, élargi depuis Poses à la Pointe du Cotentin, le choix des marqueurs particuliers d'origine fluviale a été mis en évidence par la représentation des facteurs d'enrichissement de ces éléments en fonction de la distance à la source. La même démarche est reprise pour chaque fleuve côtier dans la figure 3.86. ci-après.

Pour le cadmium et l'étain, il apparaît, dans la Dives et dans la Touques, une légère décroissance de l'amont vers l'aval. Cela signifie que ces éléments sont plus en excès dans ces deux parties fluviales des cours d'eau. Ils ne peuvent être des éléments caractéristiques du stock sédimentaire de la baie de Seine. Pour le zinc, les teneurs dans les trois fleuves restent relativement constantes d'amont en aval. Cela suggère que, soit il y a un apport continu de zinc depuis la baie (signal qui est suivi depuis l'estuaire de Seine vers la baie de Seine), soit il existe une deuxième source en zinc, résultant d'un apport fluviale de chaque fleuve. Pour le plomb et le bismuth, les valeurs restent relativement constantes dans la partie aval de l'Orne. La partie amont, par contre, est appauvrie. Les sédiments de la partie aval de l'Orne semblent être le résultat d'un apport constant de la baie de Seine, riches en plomb et bismuth pour les deux marqueurs cités. Dans la Dives et la Touques, la situation est différente. Il apparaît une croissance progressive de l'amont vers l'aval jusqu'au barrage pour la Dives et beaucoup plus brutale pour la Touques (des valeurs qui diminuent progressivement sur 10 Km depuis l'embouchure).

Dubulle (1982) explique les teneurs élevées dans les sédiments de l'Orne en Pb, Cr, Fe, Zn et Mn, par des sources industrielles locales possibles (société des Ciments français, la société Renault Véhicules Industriels et la société Métallurgique de Normandie, qui n'existe plus actuellement). Cette remarque peut être généralisée à la Dives et à la Touques où de telles entreprises sont installées.

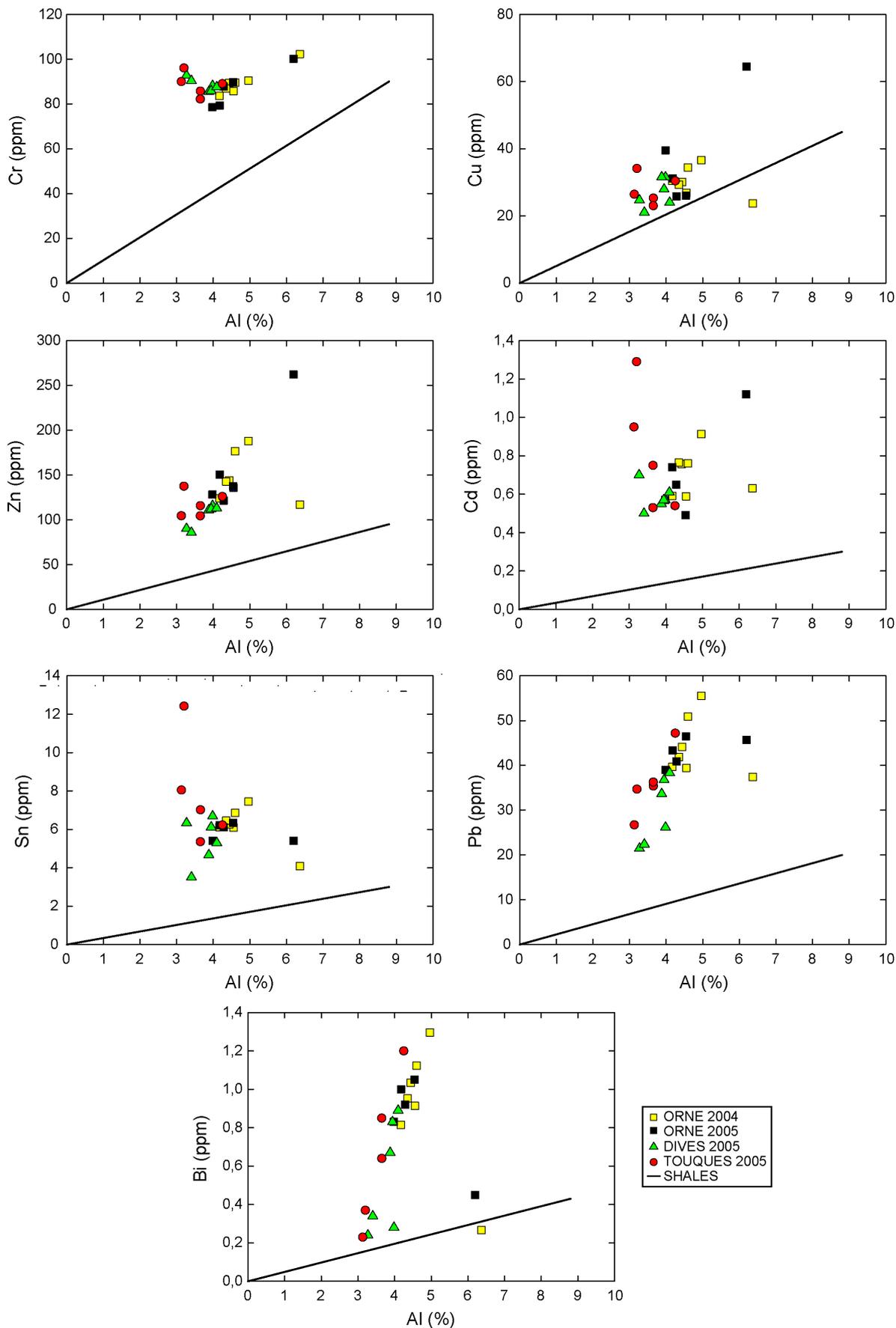


Figure 3.85. Relations entre les teneurs en Cu, Cr, Cd, Pb, Bi, Zn, Sn et Al dans les sédiments intertidaux de l'Orne, la Dives et la Touques.

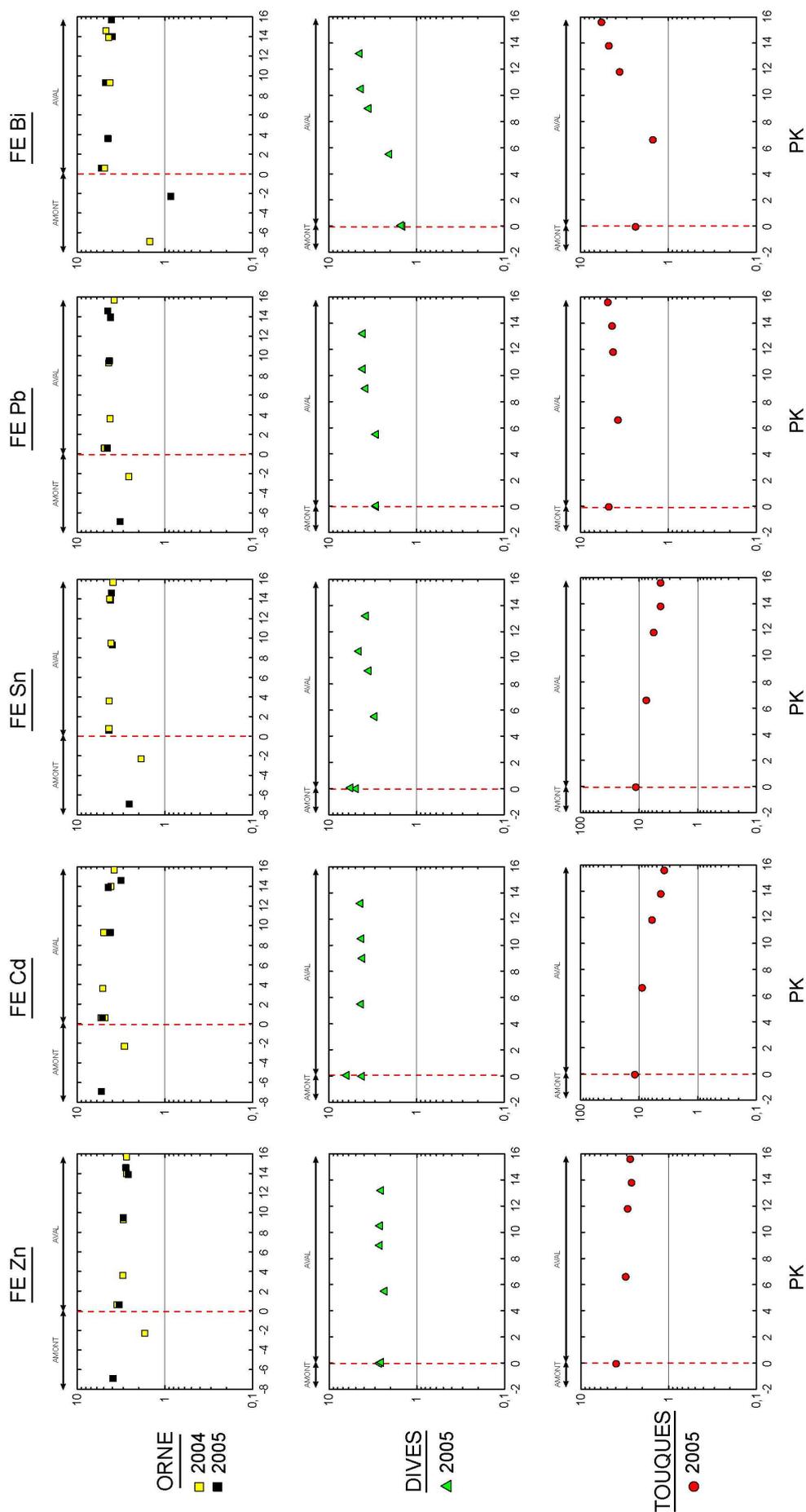


Figure 3.86. Facteurs d'enrichissement (FE) du Zn, Cd, Sn, Pb et Bi en fonction de la distance (PK) pour chaque cours d'eau côtier (Orne, Dives et Touques). La ligne pointillée rouge correspond à la position du barrage pour chacun d'entre eux.

L'ensemble des résultats sur les éléments majeurs-mineurs-traces a permis de sélectionner deux éléments discriminants, que sont le plomb et le bismuth, permettant de distinguer le signal chimique du stock sédimentaire au sein de chaque cours d'eau côtier du Calvados avec celui de la baie de Seine.

III.5. Distribution des radionucléides dans les sédiments des berges de l'Orne, la Dives et la Touques

III.5.1. Les radionucléides dans les cours d'eau côtiers du Calvados

La figure 3.87. montre les activités des principaux radionucléides détectés dans les fractions fines des sédiments des trois fleuves côtiers.

D'une manière générale, les activités en ^{40}K restent relativement constantes, aussi bien dans la partie amont que dans la partie aval. Les valeurs se situent entre 380 et 460 Bq.kg^{-1} pour l'Orne et la Dives et entre 360 et 440 Bq.kg^{-1} pour la Touques. Seule la partie amont de l'Orne se distingue avec des activités plus élevées autour de 550 Bq.kg^{-1} , quelle que soit l'année d'échantillonnage.

Les trois radionucléides artificiels (^{137}Cs , ^{60}Co et ^{241}Am) présentent, quant à eux des activités différentes sur l'ensemble de l'estuaire. Néanmoins, la Dives et la Touques conservent des caractéristiques communes. Pour les trois cours d'eau, l' ^{241}Am et le ^{60}Co n'ont pas été détectés en amont des barrages. Dans la partie aval, les activités restent assez constantes pour l'Orne, aussi bien en 2004 qu'en 2005, avec des valeurs comprises entre 1,5 et 3 Bq.kg^{-1} pour le ^{241}Am , et entre 3 et 5,5 Bq.kg^{-1} pour le ^{60}Co . Pour la Dives et la Touques, cela est différent : les activités diminuent progressivement depuis l'embouchure vers le barrage. Il existe donc une augmentation des activités de l'amont vers l'aval, avec des valeurs maximales à l'embouchure autour de 2 Bq.kg^{-1} pour ^{241}Am et 3 Bq.kg^{-1} pour le ^{60}Co . Ces deux radionucléides, originaires uniquement du domaine marin, montrent la présence de particules fines marines dans les trois cours d'eau côtiers depuis l'embouchure, jusqu'au barrage pour l'Orne, jusqu'au PK9, au moins, pour la Dives et jusqu'au PK12, au minimum pour la Touques.

Cette tendance est confortée pour les activités en ^{137}Cs . Pour la Dives et la Touques, le gradient croît du barrage vers l'embouchure, contrairement à l'Orne, dont les activités restent homogènes autour de 7 à 10 Bq.kg^{-1} . En amont du barrage de l'Orne, les activités sont plus faibles avec 5,5 Bq.kg^{-1} en 2005 et 1 Bq.kg^{-1} en 2004. Cette différence est en relation avec la nature même du sédiment récolté. En amont du barrage de l'Orne, il a été très difficile de prélever de la vase, ne sachant pas exactement si le sédiment vaseux provenait d'une berge effondrée (notamment pour l'année 2004), ou d'un mince dépôt de vase mélangé à des feuilles et des débris organiques de fond de chenal (échantillon de l'année 2005).

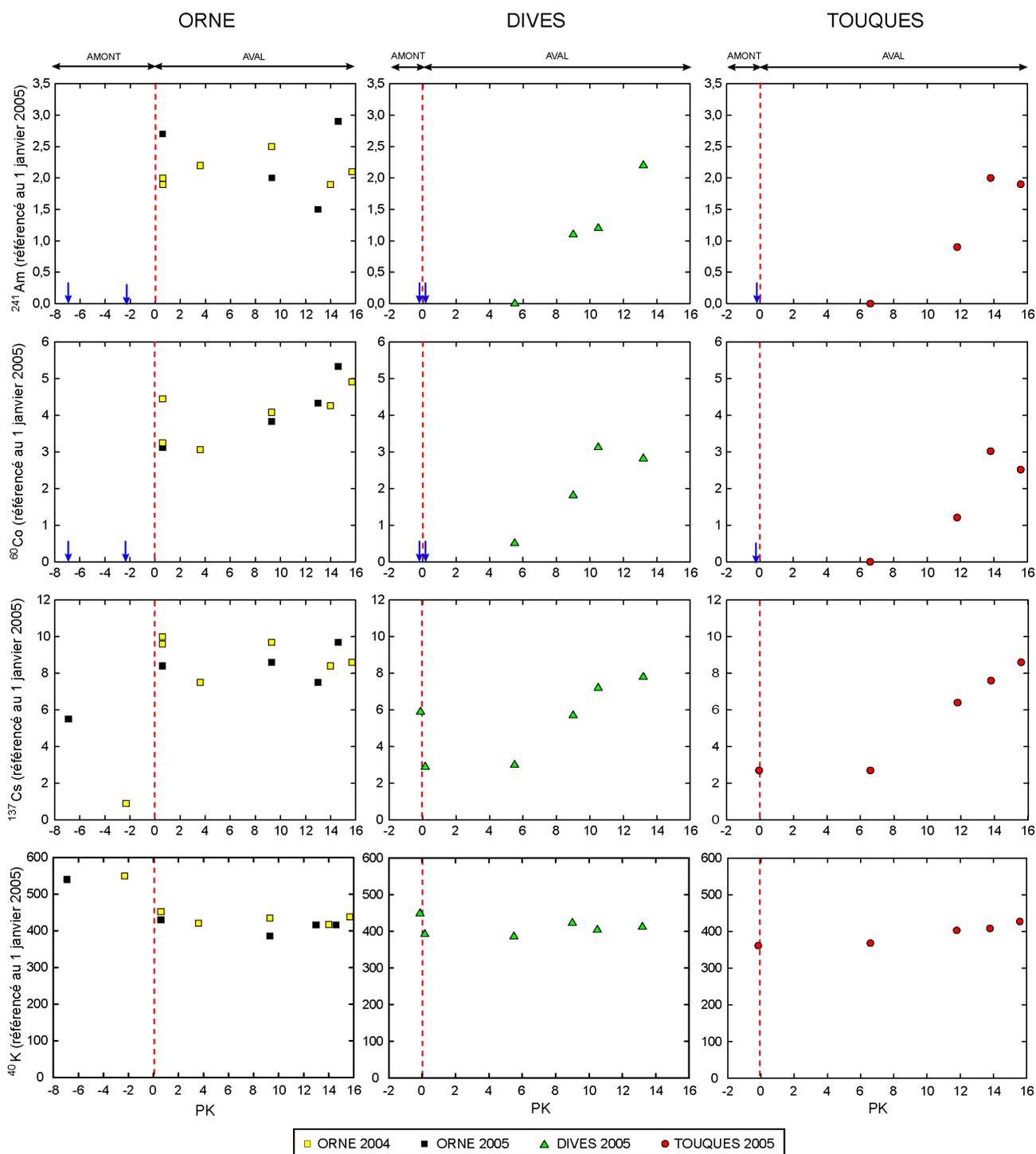


Figure 3.87. Activités du ^{241}Am , du ^{60}Co , du ^{137}Cs et du ^{40}K mesurées dans les sédiments des berges de des cours d'eau côtiers Orne, Dives et Touques selon le PK calculé pour chaque cours d'eau (toutes les activités des radionucléides ont été référencées au 1^{er} janvier 2005). Les lignes rouges pointillées correspondent à la position des barrages sur chaque cours.

III.5.2. Corrélations entre radionucléides

La corrélation $^{137}\text{Cs}/^{40}\text{K}$ (Fig.3.88.) montre une homogénéité du stock particulaire dans la partie aval de chaque cours d'eau. Quelques stations se différencient, notamment les stations en amont du barrage de l'Orne et les deux stations présentes juste après le barrage de la Dives et de la Touques avec des activités en ^{40}K et ^{137}Cs plus faibles. La corrélation indique, de la même

manière que pour les échantillons de l'estuaire de la Seine (chapitre 3, partie 1.4.2) que la présence de ^{40}K n'est pas seulement liée à la fixation du ^{137}Cs ; en effet, lorsque l'activité en ^{137}Cs est nulle, l'activité en ^{40}K est de l'ordre de 340 Bq.kg^{-1} . Le ^{40}K n'est donc pas uniquement lié à la fraction fine des échantillons.

Les mêmes observations peuvent être faites pour la corrélation $^{60}\text{Co}/^{40}\text{K}$, les échantillons de l'Orne sont tous regroupés, contrairement aux échantillons de la Dives et de la Touques qui font apparaître des activités plus contrastées, fonction de la détection du ^{60}Co dans les sédiments.

La corrélation $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ est relativement bonne. Les échantillons de l'Orne sont encore une fois très regroupés avec les plus fortes activités. Seuls les sédiments de la Dives et de la Touques montrent des activités plus faibles avec des échantillons sous la limite de détection de ces deux radionucléides.

La corrélation $^{241}\text{Am}/^{60}\text{Co}$ indique un stock particulaire homogène pour les trois cours d'eau, ce qui est logique, ces deux radionucléides étant originaires du domaine marin.

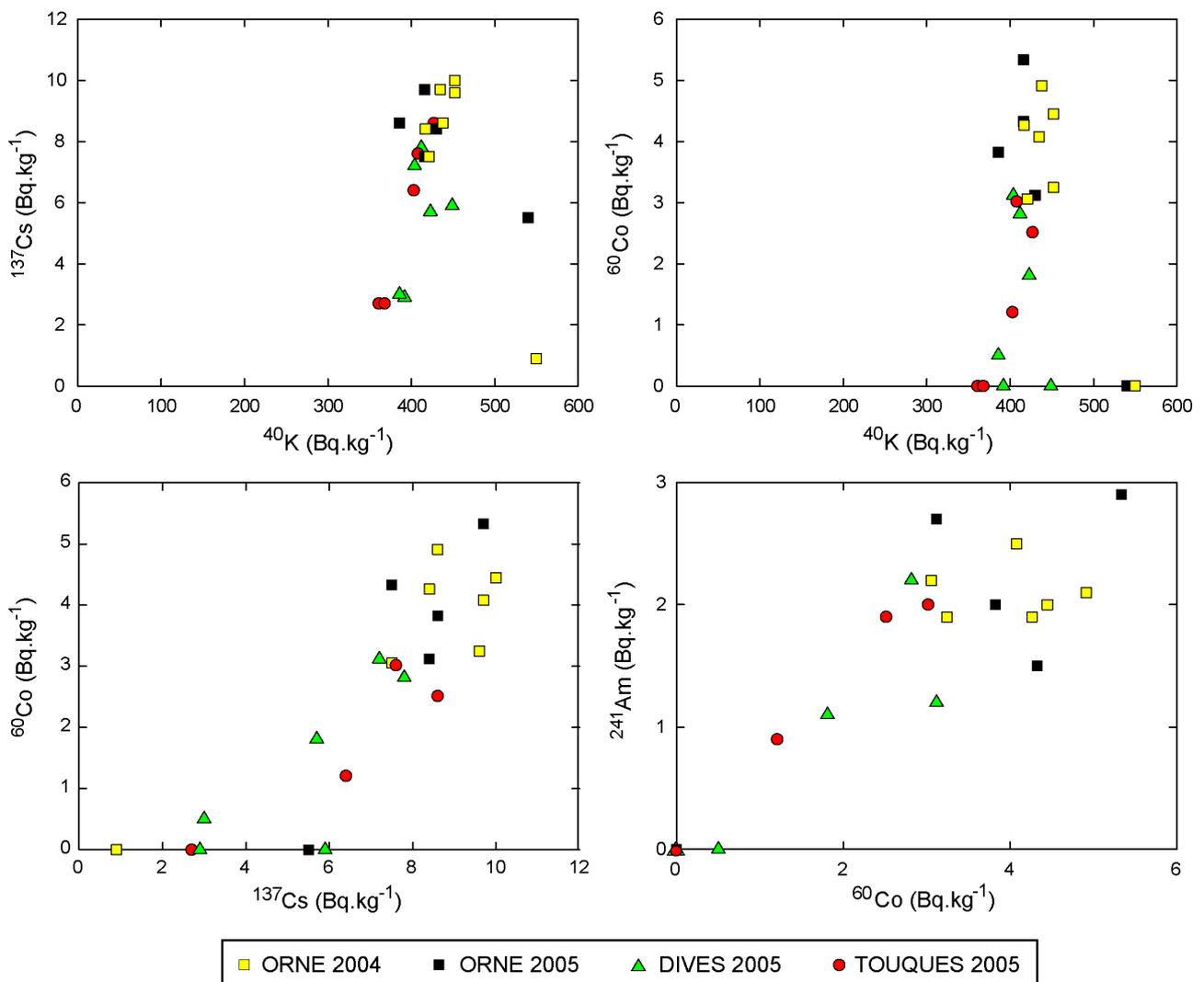


Figure 3.88. Quelques corrélations entre des radionucléides naturels (^{40}K) et artificielles (^{60}Co , ^{137}Cs et ^{241}Am) dans les fractions fines des sédiments des berges de l'Orne, la Dives et la Touques.

III.5.3. Corrélations entre les radionucléides et l'aluminium

Les activités en ^{137}Cs avec ceux de l'aluminium montrent une belle corrélation pour les trois cours d'eau côtiers (Fig.3.89.). Seuls deux échantillons dans l'Orne (ORNE06 et ORNE11) se distinguent et suggèrent une nature minéralogique différente de celle des autres sédiments.

De la même manière, la corrélation ^{60}Co -Al est belle malgré quelques échantillons (sédiments en amont des barrages) dont les activités sont en dessous de la limite de détection.

Comme cela a déjà été mentionné dans le reste du système, les résultats de ces deux corrélations montrent que :

- les phases porteuses de ces deux radionucléides sont les argiles
- le sédiment prélevé dans chaque cours d'eau peut présenter des activités très variées.

Les activités en ^{137}Cs et ^{60}Co dépendent à la fois de la nature minéralogique du sédiment prélevé, mais également de la proximité à la source en ces deux radionucléides artificiels (dans le cas présent, l'usine de retraitement des combustibles usés AREVA au Cap de la Hague).

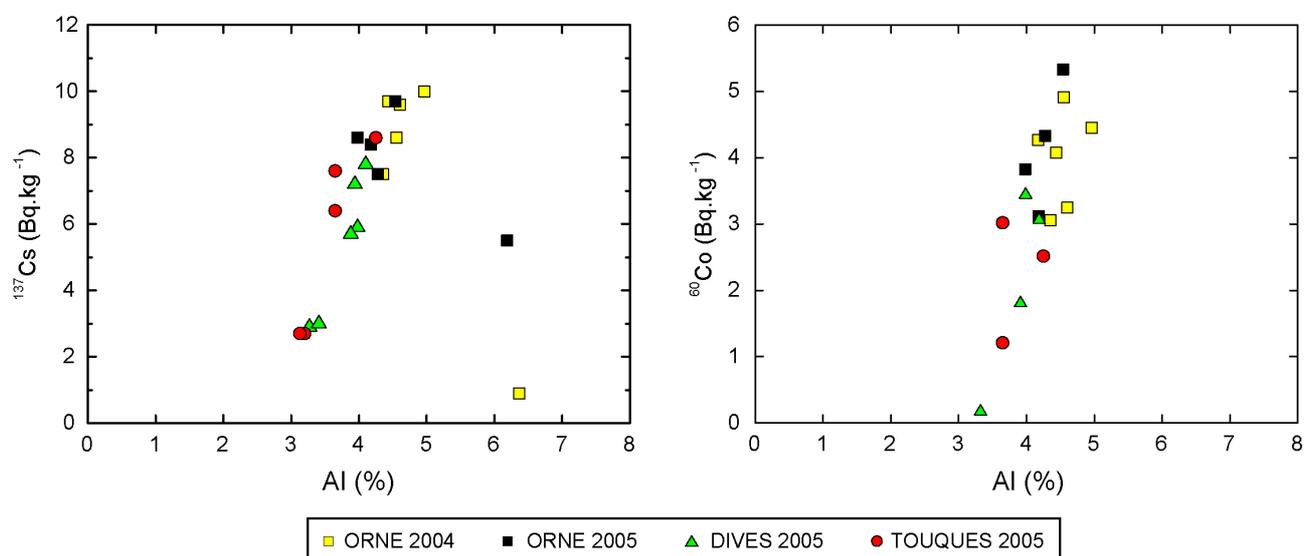


Figure 3.89. Corrélations ^{137}Cs -Al et ^{60}Co -Al pour les sédiments intertidaux de l'Orne, la Dives et la Touques.

La répartition des rapports $^{137}\text{Cs}/\text{Al}$ et $^{60}\text{Co}/\text{Al}$ montrent des tendances, déjà observées avec les données brutes (Fig.3.90.) :

- pour l'Orne, le rapport $^{137}\text{Cs}/\text{Al}$ reste stable autour de 2 dans la partie aval tandis que dans la zone amont, les valeurs sont variables selon la station d'échantillonnage. En revanche, le rapport $^{60}\text{Co}/\text{Al}$ décroît depuis l'embouchure vers le barrage de Caen ;

- pour la Dives, les rapports $^{137}\text{Cs}/\text{Al}$ et $^{60}\text{Co}/\text{Al}$ décroissent depuis l'embouchure jusqu'au PK6. Jusqu'au barrage, le rapport $^{137}\text{Cs}/\text{Al}$ reste stable, mais le ^{60}Co n'est plus détecté en amont du PK6 ;

- pour la Touques, le rapport $^{137}\text{Cs}/\text{Al}$ se comporte de la même façon que celui des sédiments de la Dives, avec des valeurs qui décroissent depuis l'embouchure jusqu'au PK7. Du PK7 à la station en amont, les valeurs restent constantes autour de 1,8. Le rapport $^{60}\text{Co}/\text{Al}$ montre en revanche des valeurs décroissantes jusqu'au PK12, puis les activités en ^{60}Co se trouvent être sous la limite de détection.

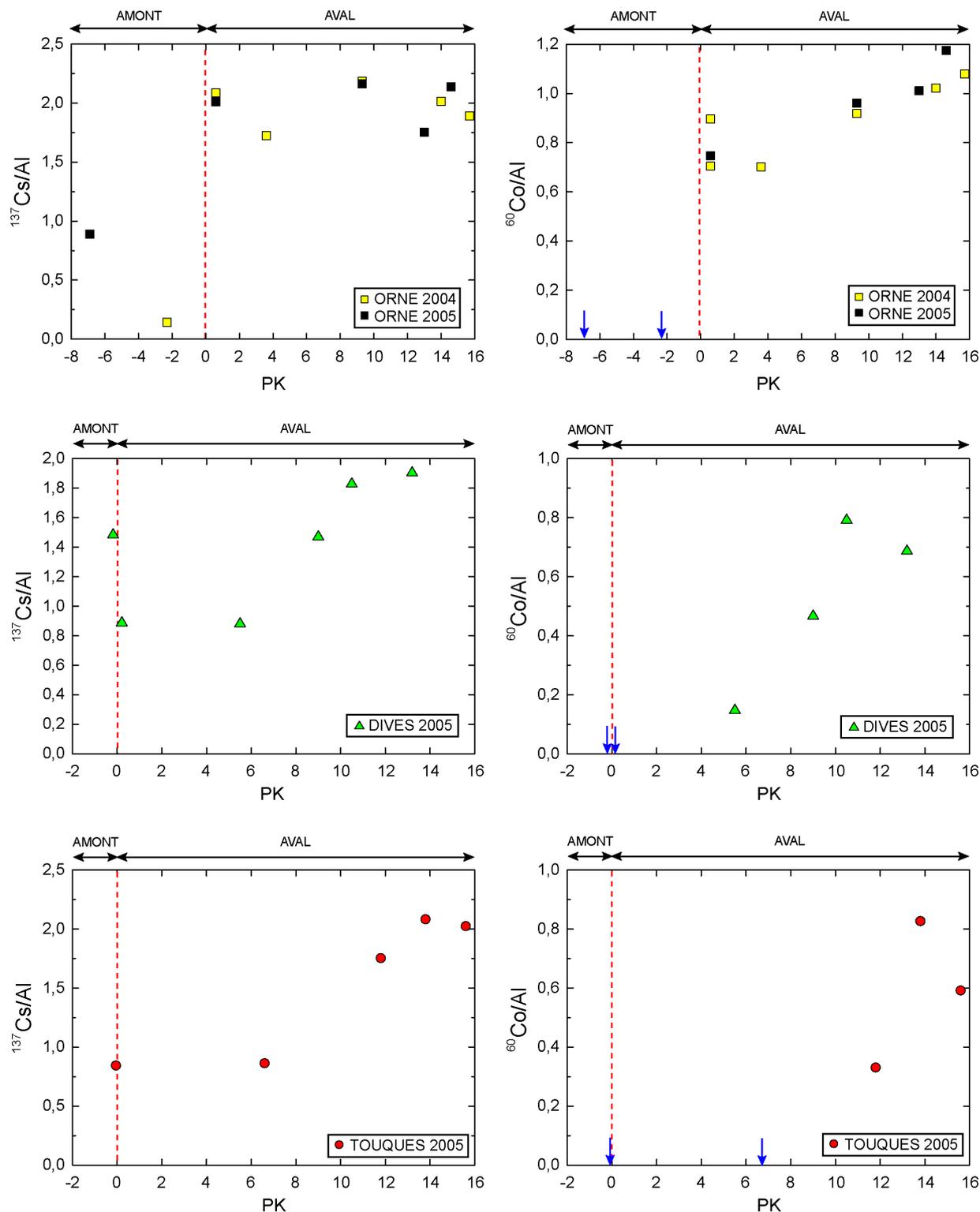


Figure 3.90. Représentations des rapports $^{137}\text{Cs}/\text{Al}$ et $^{60}\text{Co}/\text{Al}$ selon le PK (point kilométrique calculé pour chaque cours d'eau) pour les sédiments intertidaux de l'Orne, la Dives et la Touques. Les lignes pointillées rouges correspondent à la position des barrages dans chaque cours d'eau. Les flèches indiquent la position des prélèvements où le ^{60}Co n'a pas été détecté dans les sédiments.

III.5.4. Rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$

Pour les mêmes raisons expliquées précédemment, les rapports d'activités et uniquement le rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$, ont été préférés à la normalisation au ^{40}K . La figure 3.91. donne l'évolution du rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ en fonction de la distance dans l'Orne, la Dives et la Touques.

Pour l'Orne, le rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ confirme la présence de particules fines marines jusqu'au barrage de Caen et indique une très légère décroissance de l'aval vers l'amont, qui peut être alors considérée comme relativement stable, autour de 0,4. La comparaison des rapports entre 2004 et 2005 ne distingue aucune variation : la décroissance est toujours présente quelque soit l'année d'échantillonnage.

Dans le cas de la Dives, le rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ montre une décroissance beaucoup plus prononcée que pour l'Orne, avec un rapport stable (autour de 0,4) sur les deux premiers kilomètres du fleuve, puis une diminution des activités progressivement jusqu'à la limite de détection, avant le barrage de la Dives.

La Touques présente approximativement le même profil que la Dives avec toujours une certaine stabilité sur les deux premiers kilomètres du fleuve, puis une décroissance qui tend vers la limite de détection, cette fois-ci, bien plus en aval que le barrage du cours d'eau.

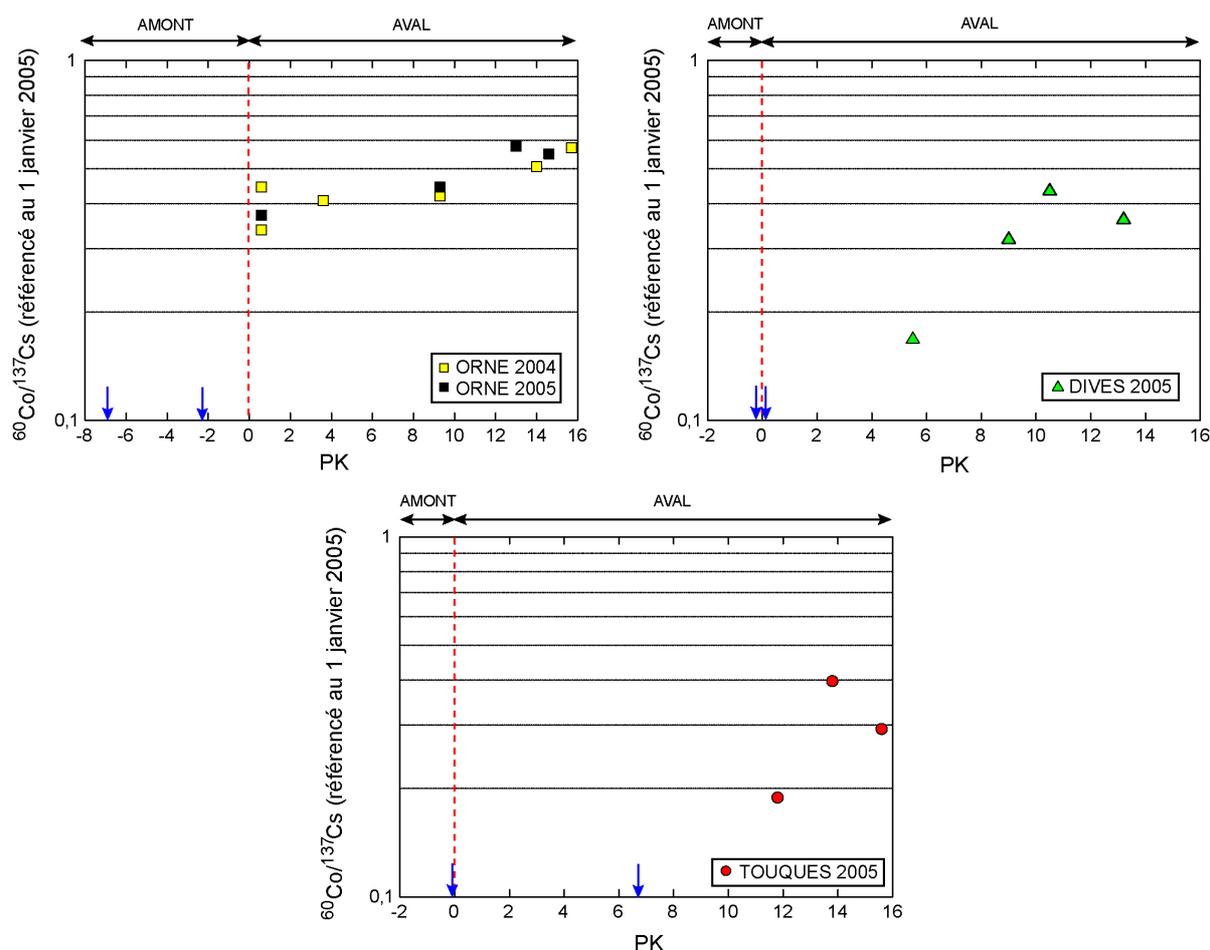


Figure 3.91. Évolution du rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ dans les fractions fines des sédiments des berges de l'Orne, la Dives et la Touques en fonction de la distance (PK calculé pour chaque cours d'eau côtier). Les lignes pointillées rouges correspondent à la position des barrages dans chaque cours d'eau. Les flèches indiquent la position des prélèvements où le ^{60}Co n'a pas été détecté dans les sédiments.

En résumé, de la même manière que pour l'estuaire de la Seine, les radionucléides montrent que les particules fines marines pénètrent également dans les fleuves adjacents à la baie de Seine.

Si l'on met en parallèle les résultats obtenus sur les teneurs en carbonates et les radionucléides des sédiments prélevés sur les berges des trois cours d'eau côtiers (Fig.3.92.), on remarque que la pénétration est différente selon la dynamique du fleuve :

- dans l'Orne les particules fines marines sont présentes jusqu'au barrage, soit à 16 Km de l'embouchure ;

- dans la Dives, le matériel fin d'origine marine ne pénètre qu'à 8 Km, au minimum de l'embouchure ;

- dans la Touques, les particules fines marines ne pénètrent qu'à 4 Km, au moins depuis l'embouchure.

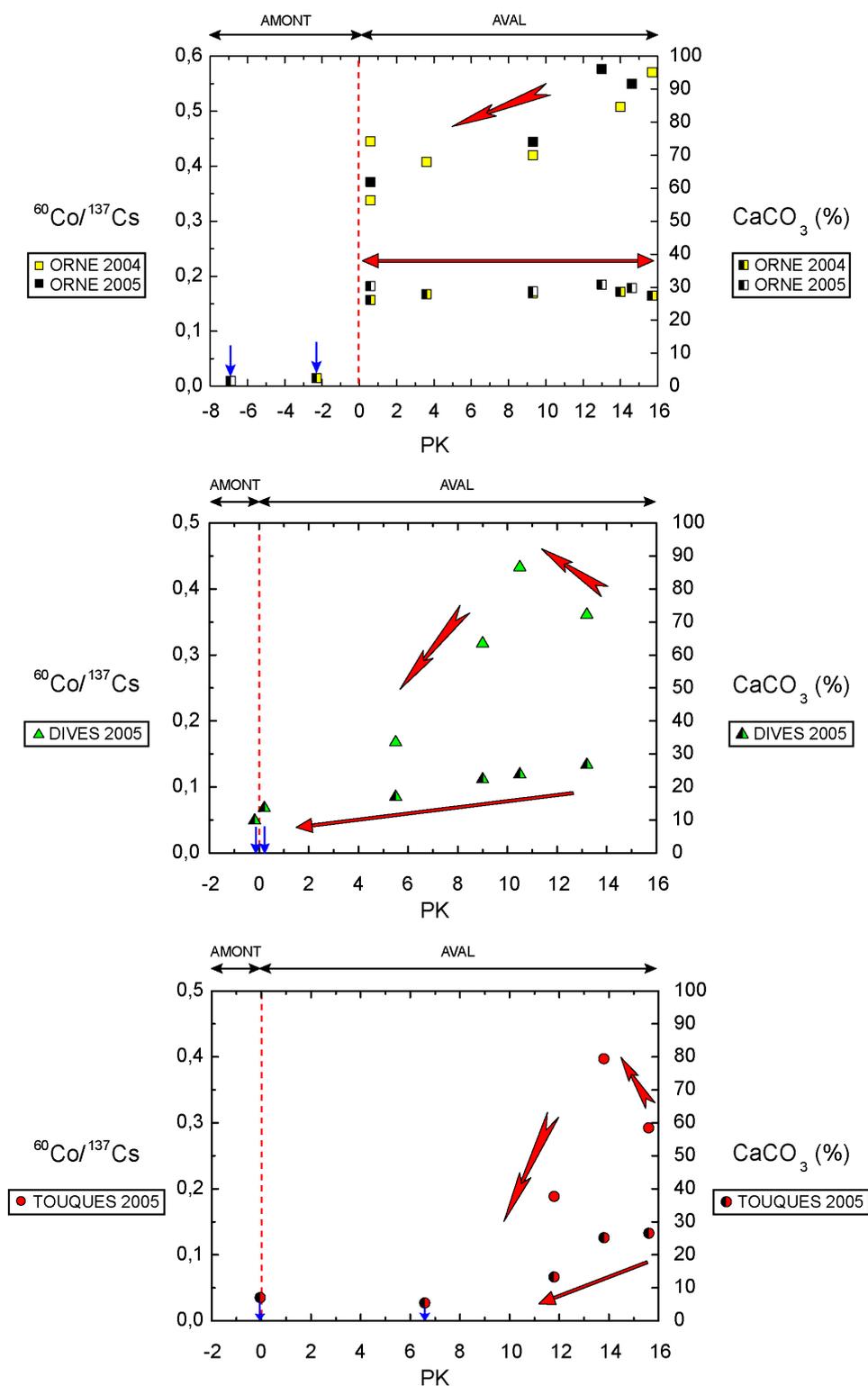


Figure 3.92. Évolutions du rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ et de la teneur en carbonates dans les fractions fines des sédiments des berges de l'Orne, la Dives et la Touques en fonction de la distance (PK calculé pour chaque cours d'eau côtier). Les lignes pointillées rouges correspondent à la position des barrages dans chaque cours d'eau. Les flèches bleues indiquent la position des prélèvements où le ^{60}Co n'a pas été détecté dans les sédiments. Les flèches rouges indiquent les tendances des teneurs en carbonates et des rapports $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$.

Les variations des limites de pénétration des particules fines d'origine marine s'expliquent à la fois par les volumes oscillants différents et par les morphologies des cours d'eau côtiers.

En effet, comparés à l'estuaire de la Seine, les volumes oscillants de marée des trois cours d'eau sont évidemment considérablement moindres, même si les débits fluviaux sont extrêmement faibles (tout du moins lors des campagnes de prélèvement, en période de faibles débits annuels prolongés). Ainsi, le mélange des masses d'eau et des particules fines est moins important et ne se fait sentir que dans la partie aval des cours d'eau côtier, une zone fortement sous influence de la marée.

La morphologie des cours d'eau interfère également dans la pénétration des masses d'eau et des particules fines associées. De ce point de vue, les trois cours d'eau bas à leur embouchure sont affectés par la dérive littorale O-E. Il existe peu (Orne), voire pas (Dives et Touques) de données récentes sur les sections d'écoulement et leur répartition longitudinale sur le cours aval.

L'Orne, dans sa partie aval, ne présente qu'un seul méandre à l'embouchure, puis après qu'il ait été canalisé, il devient très rectiligne jusqu'au barrage de Caen (Fig.3.93.). Cela facilite ainsi la pénétration des masses d'eau dans ce système très rectiligne, les vitesses des courants ne diminuant que peu ce qui explique une pénétration du matériel fin marin jusqu'au barrage de Caen.

Les cours d'eau de la Dives et de la Touques sont beaucoup plus étroits dès leur embouchure et deviennent très méandriformes depuis leur partie aval jusqu'aux barrages seuils (Fig.3.94. et Fig.3.95.). Les vitesses des courants s'amenuisent au fur et à mesure que les masses d'eau marines pénètrent vers l'intérieur du cours d'eau. La pénétration du matériel fin est alors moindre.

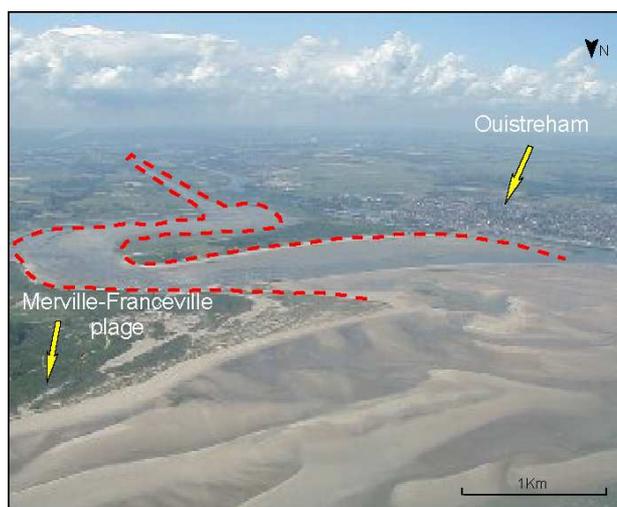


Figure 3.93. Photographie de l'Orne aval. La ligne pointillée souligne le tracé du cours d'eau.



Figure 3.94. Photographie de la Dives aval. La ligne pointillée souligne le tracé du cours d'eau.



Figure 3.95. Photographie de la Touques aval. La ligne pointillée souligne le tracé du cours d'eau.

L'Orne, la Dives et la Touques

Granulométrie de la fraction fine des sédiments intertidaux

La granulométrie des sédiments des trois cours d'eau montre peu de distinctions.

Dans le cas de l'Orne, les populations granulométriques sont différentes en amont et en aval :

- l'amont est caractérisé par des argiles (0-4 μm), des silts très fins (4-8 μm) à fins (8-16 μm) et des silts moyens (16-32 μm) à grossiers (32-50 μm), en 2004. En revanche en 2005, seul les silts grossiers prédominent.

- l'aval est constitué de silts fins à très fins et de silts grossiers et ne varie pas pour les deux années étudiées.

Dans le cas de la Dives et de la Touques, les populations granulométriques restent bimodales d'amont en aval avec les silts fins à très fins et les silts grossiers. À l'approche des embouchures, les populations granulométriques deviennent trimodales avec l'apparition des argiles.

Minéralogie argileuse de la fraction fine des sédiments intertidaux

L'identification et la semi-quantification des minéraux argileux des sédiments des trois cours d'eau montrent l'apparition d'un nouveau minéral argileux : la vermiculite. Seule ou associée à des minéraux interstratifiés, elle apparaît dans les sédiments des trois cours d'eau côtiers (Tab.3.9.). Le cortège des minéraux argileux de l'Orne très fluctuant selon les années de prélèvements est différent entre l'amont et l'aval. En revanche, les cortèges des minéraux argileux dans la Dives et dans la Touques varient peu. Seule une augmentation des smectites est observée dans la Touques de l'amont vers l'aval.

Tableau 3.9. Semi-quantifications moyennes des sédiments intertidaux de l'Orne, la Dives et la Touques.

Cours d'eau	Orne	Dives	Touques
AMONT	20-40 % V	30-40 % Sm-(C-V)	30-70 % Sm-(C-V)
	35 % K	25 % K	25 % K
	20-25 % I	20 % I	20 % I
	5-10 % (10-C)	5-10 % (10-C)	5-10 % (10-C)
AVAL	30-50 % Sm-(V-Sm) ou V-(V-Sm)	30-40 % Sm-(C-V)	30-70 % Sm-(C-V)
	30 % K	25 % K	25 % K
	25 % I	20 % I	20 % I
	5-10 % (10-C)	5-10 % (10-C)	5-10 % (10-C)

Les indices de cristallinité de l'illite varient peu pour les sédiments des trois cours d'eau et se situent entre 0,5 et 0,6 2θ . En revanche, pour ceux de l'Orne prélevés en 2004, ils sont plus faibles autour de 0,3-0,4 2θ .

Les indices de cristallinité des smectites similaires entre l'Orne, la Dives et la Touques se situent entre 0,8 et 0,9. Il est à remarquer néanmoins une diminution des valeurs à l'embouchure de chaque cours d'eau.

Le cortège moyen des minéraux argileux pour les sédiments actuels des cours d'eau côtiers est, comme le reste du système étudié, le résultat de l'érosion des formations géologiques et superficielles des différents bassins versants rencontrés. Ainsi la présence de la vermiculite dans l'ensemble des sédiments montre l'apport de matériel fin détritique par les formations loessiques. Dans ces petits systèmes, la vermiculite semble être un très bon marqueur du domaine fluvial, en tout cas pour l'Orne. Cela devient plus difficile pour la Dives et la Touques. Malheureusement, la vermiculite n'apparaît pas dans les échantillons de la baie de Seine et du littoral bas-normand et ne peut être utilisée dans le continuum Seine-baie de Seine comme marqueur particulière.

Les éléments majeurs-mineurs-traces dans la fraction fine des sédiments intertidaux

Les éléments majeurs-mineurs-traces caractérisent d'un point de vue géochimique tous les sédiments superficiels intertidaux actuels des cours d'eau côtiers. Ils permettent ainsi d'établir une " carte d'identité chimique " de la fraction fine.

Il est apparu difficile, en revanche, avec les éléments majeurs-mineurs-traces de distinguer au mieux le signal du stock sédimentaire de la baie de Seine (estuaire de la Seine, littoral bas-normand et baie de Seine), du stock sédimentaire des trois cours d'eau côtiers.

Ainsi, les éléments susceptibles d'être de bons marqueurs du domaine fluvial de la Seine (Zn, Cu, Sb et Cu) ne sont pas adaptés et ne montrent pas de décroissance des valeurs depuis l'embouchure des cours d'eau jusqu'à leurs barrages. Il semble que l'Orne, la Dives et la Touques aient une source secondaire en ces éléments.

Au final, seul le plomb et le bismuth montrent des teneurs qui diminuent depuis l'embouchure jusqu'au barrage et confirme la pénétration de matériel fin fluvial de la Seine dans l'Orne, la Dives et la Touques.

Les radionucléides dans la fraction fine des sédiments intertidaux

Comme cela a déjà été évoqué pour le reste du système, la recherche de marqueurs particuliers parmi les radionucléides semble acquise. En effet, l'origine des radionucléides artificiels (^{60}Co , ^{137}Cs et ^{241}Am) est déjà connue (rejets de l'usine de retraits des combustibles usés AREVA au Cap de la Hague (Nord Cotentin)). Ils sont d'excellents traceurs du domaine marin.

Les études des radionucléides naturels et artificiels dans les sédiments montrent, encore une fois, l'existence d'une affinité entre la fraction argileuse et les radionucléides.

Les données des radionucléides artificielles (^{60}Co , ^{137}Cs et ^{241}Am) prouvent également :

- la présence de matériel fin d'origine marine sur l'ensemble des sédiments intertidaux de l'Orne et dans la partie aval de la Dives et de la Touques ;
- des activités qui décroissent depuis l'embouchure de chaque cours d'eau, soit l'explication d'une pénétration de particules fines d'origine marine.

Les rapports $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ montrent que les particules fines d'origine marine pénètrent dans les trois cours d'eau en fonction de leur volume oscillant et de leur morphologie. Ainsi, la pénétration des particules fines marines s'observe jusqu'au barrage de Caen pour l'Orne, jusqu'au PK8 pour la Dives et au PK4 pour la Touques.

CHAPITRE 4

**Les contributions en matériel fin
dans la sédimentation fine actuelle
du système estuarien de la Seine**

Introduction	229
I – Synthèse des informations données par les marqueurs particuliers dans le système estuarien de la Seine	229
I.1. La granulométrie des sédiments fins	229
I.2. Les minéraux argileux des sédiments fins	231
I.3. Les éléments majeurs-mineurs-traces et la fraction fine	233
<i>I.3.1. Répartition des éléments chimiques dans la fraction fine</i>	233
<i>I.3.2. Les éléments majeurs-mineurs-traces des sédiments fins</i>	238
I.4. Les radionucléides des sédiments fins	241
Résumé cartographique	243
II – Détermination des différentes contributions en matériel fin dans la sédimentation fine actuelle	244
II.1. La sédimentation fine dans le système estuarien de la Seine : un mélange	244
II.2. Résolution du mélange particulaire	245
<i>II.2.1. Principe de la méthode d'Analyse en Composantes Principales (ACP)</i>	245
<i>II.2.2. Application de l'ACP aux sédiments intertidaux et subtidaux prélevés en 2005</i>	249
<i>II.2.3. Mélange à trois pôles</i>	255
II.3. Le mélange particulaire dans le système estuarien de la Seine	261
Conclusion	268

INTRODUCTION

Dans le chapitre 3, les résultats des analyses granulométriques, minéralogiques et géochimiques ont permis d'établir une "carte d'identité" de la fraction fine de chaque sédiment déposé dans le système étudié (estuaire de la Seine, baie de Seine, littoral bas-normand, et cours d'eaux côtiers bas-normands). Malgré la grande complexité du matériel fin et/ou sa ressemblance, différentes caractéristiques sont susceptibles d'être utilisées en tant que marqueurs particuliers des sources. Cependant, à l'échelle du système estuarien,

- Sont-elles aussi pertinentes ?
- Peuvent-elles vraiment caractériser les sources de matériel fin ?
- Est-il possible d'estimer les différentes contributions à la sédimentation fine actuelle ?

Dans ce dernier chapitre, l'approche synthétique va tenter de répondre à ces questions.

Le premier sous chapitre permet de rappeler et de réunir à l'échelle de l'ensemble de la zone d'étude, les principales tendances déduites de l'étude de chaque marqueur particulière (granulométrie, minéralogie des argiles, éléments majeurs-mineurs-traces et radionucléides), puis d'argumenter le choix de certains marqueurs particuliers caractéristiques d'une source donnée.

La méthode statistique et les équations de mélange développées dans le second sous chapitre ont pour but de déterminer différentes contributions des stocks sédimentaires et visent à comprendre le mélange particulière dans le système estuarien de la Seine.

I – Synthèse des informations données par les marqueurs particuliers dans le système estuarien de la Seine

I.1. La granulométrie des sédiments fins

Bien que nécessaire à la compréhension des analyses minéralogiques et géochimiques, la distinction en taille des particules ne peut être utilisée comme marqueur particulière.

Seul un bilan qualitatif des populations granulométriques des fractions fines des envasements considérés peut donc être fait sur l'ensemble du système estuarien de la Seine.

La figure 4.1. synthétise la présence et la prédominance des classes granulométriques de la fraction fine pour l'ensemble du continuum Seine-baie de Seine. Toutes les classes granulométriques de la fraction fine sont représentées, et généralement, deux classes prédominent : les silts fins (8-16 μm) et les silts grossiers (32-50 μm). Trois caractéristiques sont particulièrement remarquables :

- dans l'estuaire de la Seine, dans les cours d'eau côtiers et sur le littoral bas-normand, la population granulométrique de la fraction fine est identique, avec deux modes principaux : les silts fins et les silts grossiers ;

- le matériel fin du nord Cotentin est constitué presque uniquement de silts grossiers ;

- dans les sédiments échantillonnés en baie de Seine, le matériel fin ne présente pas de classe granulométrique dominante.

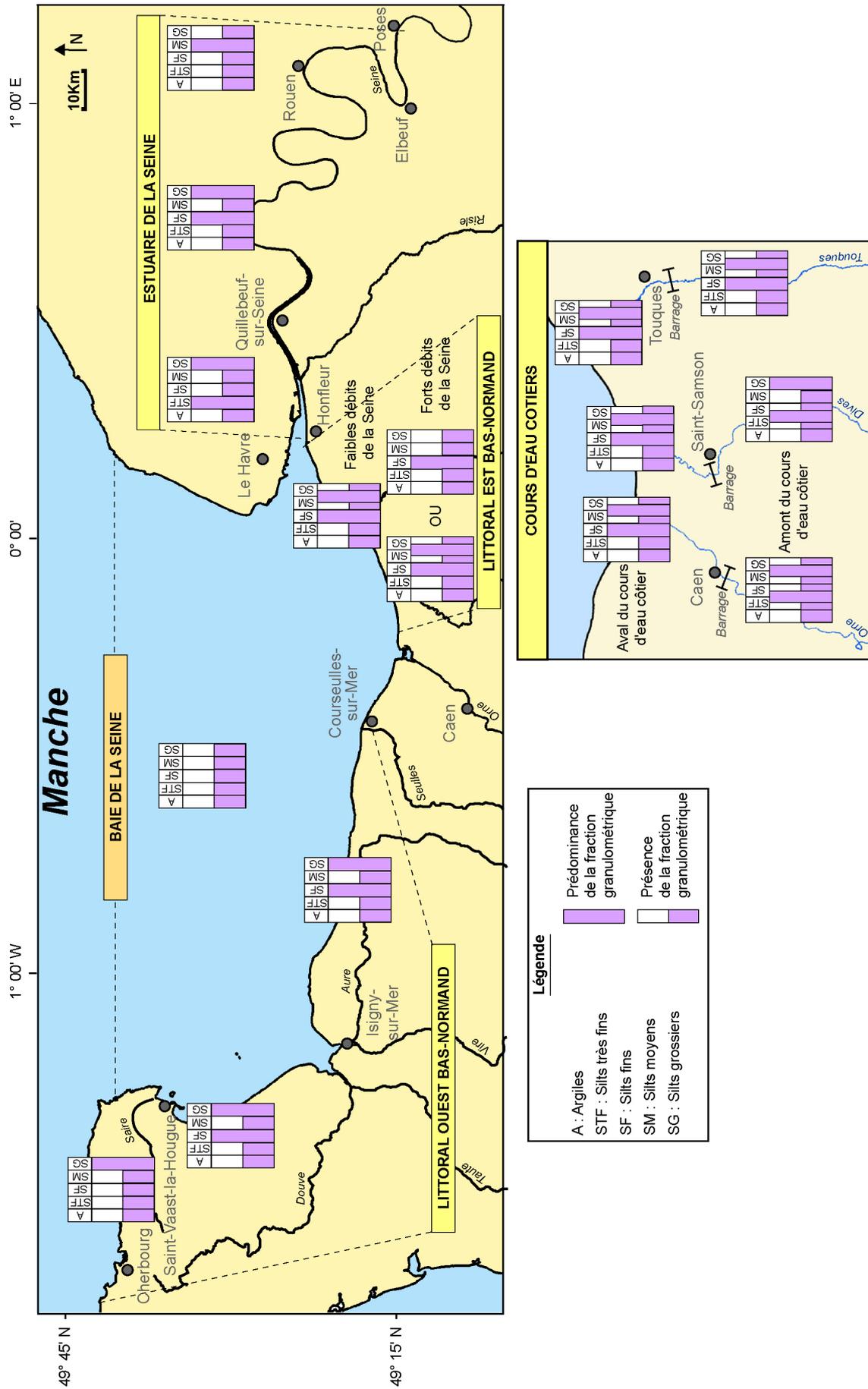


Figure 4.1. Répartition des populations granulométriques de la fraction fine, au sein du continuum Seine-baie de Seine.

Ce résultat révèle une particularité étonnante : malgré les distances concernées, les diverses sources locales, le ou les stocks de sédiments fins ont des distributions granulométriques analogues que ce soit le long de tout l'estuaire de la Seine, du littoral bas-normand, ou des cours d'eau côtiers.

En revanche, dans le nord Cotentin, le stock sédimentaire, dominé par des particules plus grossières (silts grossiers), est différent ce qui peut être mis en relation avec une source arénitique proche (massif cristallin de Barfleur), et par le déficit des particules de la taille des argiles et des silts fins (éloignement de sources fluviales). Cette caractéristique est par ailleurs conforme à la distribution granulométrique des sédiments subtidiaux de l'ouest de la baie de Seine, dominée par des sables moyens à grossiers et des cailloutis (Larsonneur, 1971).

En baie de Seine, la fraction fine résulte d'un " mélange " complexe de différents stocks sédimentaires, issus de l'estuaire de la Seine, du domaine marin et du remaniement de matériel provenant du fond de la baie de Seine occidentale.

1.2. Les minéraux argileux des sédiments fins

L'étude détaillée de la nature des minéraux argileux de chaque partie de la zone géographique étudiée a permis (chapitre 3) d'identifier les cortèges et d'estimer leurs proportions relatives par semi-quantifications. La figure 4.2. présente de manière synthétique l'importance relative de chaque minéral argileux.

Il apparaît que le cortège des minéraux argileux de l'ensemble du système Seine-baie de Seine présente dans les sédiments fins de fortes similarités avec une prédominance des smectites, de l'illite et de la kaolinite. Les minéraux interstratifiés irréguliers chlorite-chlorite gonflante ou smectites-chlorite apparaissent en moindre proportion. Les résultats des cortèges des minéraux argileux sont en accord avec ceux d'Avoine (1981) et de Lesourd (2000) dans l'estuaire de la Seine. Ils ne mettent toutefois pas en évidence une tendance décroissante amont-aval des proportions en smectites-kaolinites par rapport aux chlorites-illites montrée par Lesourd (2000).

Dans l'estuaire de la Seine et sur le littoral bas-normand, la chlorite, très rarement bien individualisée, n'apparaît que sous la forme d'un minéral interstratifié. Dans le nord Cotentin par contre, le cortège des minéraux argileux est totalement différent : les smectites sont absentes, seuls chlorite, illite, kaolinite et de quelques minéraux interstratifiés irréguliers sont présents.

Dans la baie de Seine, l'analyse des différents échantillons de sédiments subtidiaux prélevés ne permet pas de distinguer un cortège de minéraux argileux dominant. Chaque minéral décrit dans le reste du système peut s'exprimer ; l'illite et la kaolinite sont néanmoins toujours présentes. Parmi l'ensemble des cortèges des minéraux argileux déterminés, aucune relation avec la situation géographique ne peut être mise en évidence.

L'analyse des minéraux argileux dans ce système estuarien ne permet pas de distinguer correctement des stocks sédimentaires, bien que les différents bassins versants soient caractérisés par une variété de cortèges de minéraux argileux avec des semi-quantifications spécifiques à chaque formation géologique.

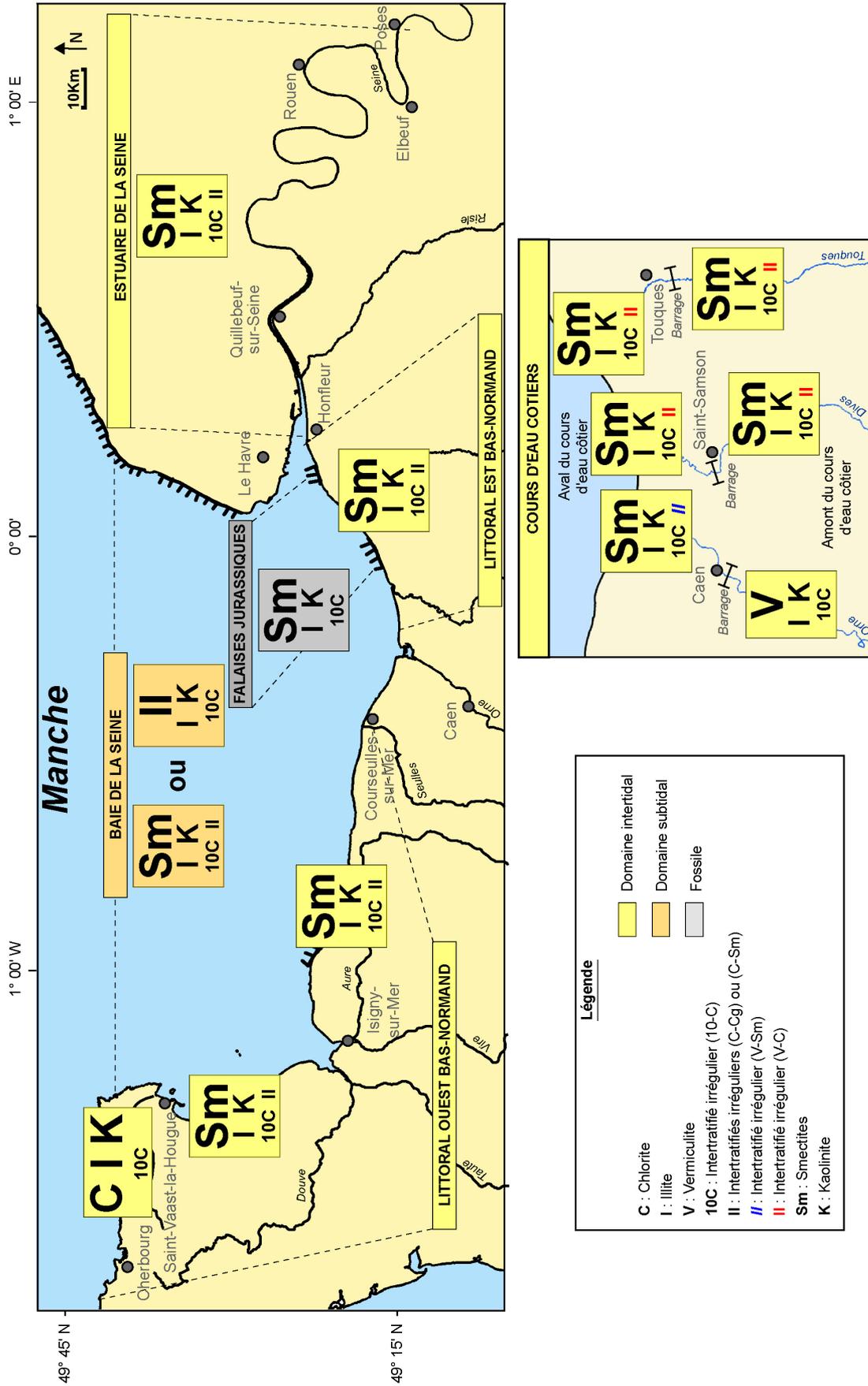


Figure 4.2. Répartition des cortèges de minéraux argileux des sédiments intertidaux et subtidaux, au sein du continuum Seine-baie de Seine.

Si les minéraux argileux des sédiments fins actuels ne permettent pas de distinguer les différents apports continentaux, c'est qu'ils sont le résultat du mélange intense de l'ensemble des apports des bassins versants. Il est alors normal que la baie de Seine, en tant que lieu de convergence, se caractérise par un cortège très diversifié et brassé, reflet de la nature et de la composition des formations argileuses locales, dominées par des smectites, de l'illite et de la kaolinite (argiles à silex, craies, loess, marnes).

Toutefois à plus petite échelle, dans de plus petits systèmes estuariens, tels que les cours d'eau côtiers bas-normands (Orne, Dives et Touques), les minéraux argileux permettent d'identifier des populations différentes de matériel fin. Par exemple, dans le cas de l'Orne, la vermiculite caractérise parfaitement le domaine sous influence uniquement fluviale, du domaine sous influence marine ; le bassin versant renferme de la vermiculite associée à de l'illite et de la kaolinite. Cette vermiculite se retrouve dans la partie aval du cours d'eau, sous la forme de minéraux interstratifiés, de type chlorite-vermiculite ou smectite-vermiculite, disparaît totalement à l'embouchure des cours d'eaux côtiers et n'est plus identifiée sur le littoral adjacent.

Ces petits systèmes estuariens caractérisés par un volume oscillant (de marée) considérablement inférieur à celui de l'estuaire de la Seine, ont des débits fluviaux extrêmement faibles (notamment avant et pendant la période d'étude) : le mélange des masses d'eau et des particules fines moindre concerne surtout le cours aval sous l'influence de la marée, permettant d'y différencier des tendances au niveau des minéraux argileux.

Si l'analyse des minéraux argileux se révèle peu efficace pour le marquage des différents stocks sédimentaires au sein du continuum Seine-baie de Seine, elle peut se révéler précieuse pour l'identification d'apports ponctuels très localisés. En effet, les indices de cristallinité de l'illite et des smectites restent de bons marqueurs de l'état d'altération des minéraux argileux. Une bonne cristallinité signifie que l'argile est soit proche de sa source " géologique ", soit n'a été introduite dans le système depuis peu, n'ayant pas encore subi d'altération ou de dégradation, notamment dans ce type de système où le mélange est dominant. C'est le cas de certains dépôts superficiels proches d'affleurements d'argiles et marnes mésozoïques.

I.3. Les éléments majeurs-mineurs-traces et la fraction fine

I.3.1. Répartition des éléments chimiques dans la fraction fine

Dans le chapitre 3, les résultats des analyses géochimiques ont été considérés pour l'ensemble de la fraction pélitique, et donc admis homogènes quelle que soit la distribution des différentes classes granulométriques. Or, nous avons vu (chap. 4, I.1.) que cette distribution peut varier (silts grossiers, moyens, etc).

Il est donc nécessaire de vérifier que la distribution des éléments majeurs-mineurs-traces obtenue par analyse de l'ensemble de la fraction pélitique est peu variable en fonction de la classe granulométrique. En effet, si les teneurs en éléments chimiques sont plus importantes sur une classe granulométrique, cela signifie que les variations des concentrations dans un environnement donné sont fonction d'une population granulométrique. Si celle-ci n'est plus représentée dans le dépôt, il est impossible de suivre ce stock sédimentaire et d'utiliser les éléments chimiques comme des marqueurs de stocks de particules fines.

Ainsi, quatre échantillons de différents sites de la zone d'étude ont été analysés sur quatre classes granulométriques.

- Méthodologie :

Les quatre échantillons des berges de l'estuaire de la Seine et du littoral bas-normand adjacent ont été analysés en séparant quatre classes granulométriques de la fraction fine, sans utiliser les ultrasons. Les échantillons choisis sont AMON (amont du barrage de Poses et représentatif de la Seine fluviale), JUMI (Jumièges, dans l'estuaire de la Seine), HONF (Honfleur, à l'embouchure de la Seine) prélevés en novembre 2004, et BLON (Blonville-sur-Mer) récolté en avril 2005.

La méthode de séparation et de récupération de chaque classe granulométrique est expliquée et détaillée dans le chapitre 2. La fraction < 50 µm a été subdivisée en quatre classes granulométriques comme suit :

- argiles et silts très fins (0 - 8 µm),
- silts fins (8 - 16 µm),
- silts moyens (16 - 32 µm),
- silts grossiers tronqués en limite supérieure (32 - 50 µm).

L'assurance de focaliser l'analyse géochimique sur la fraction granulométrique considérée, nécessite qu'une granulométrie de contrôle soit effectuée sur chaque échantillon. Les résultats pour les quatre échantillons sont représentés dans la figure 4.3.. Les populations granulométriques ont un mode centré sur la fraction recherchée. Néanmoins, malgré le soin apporté à la séparation granulométrique, une partie de la distribution se répartit dans les classes voisines.

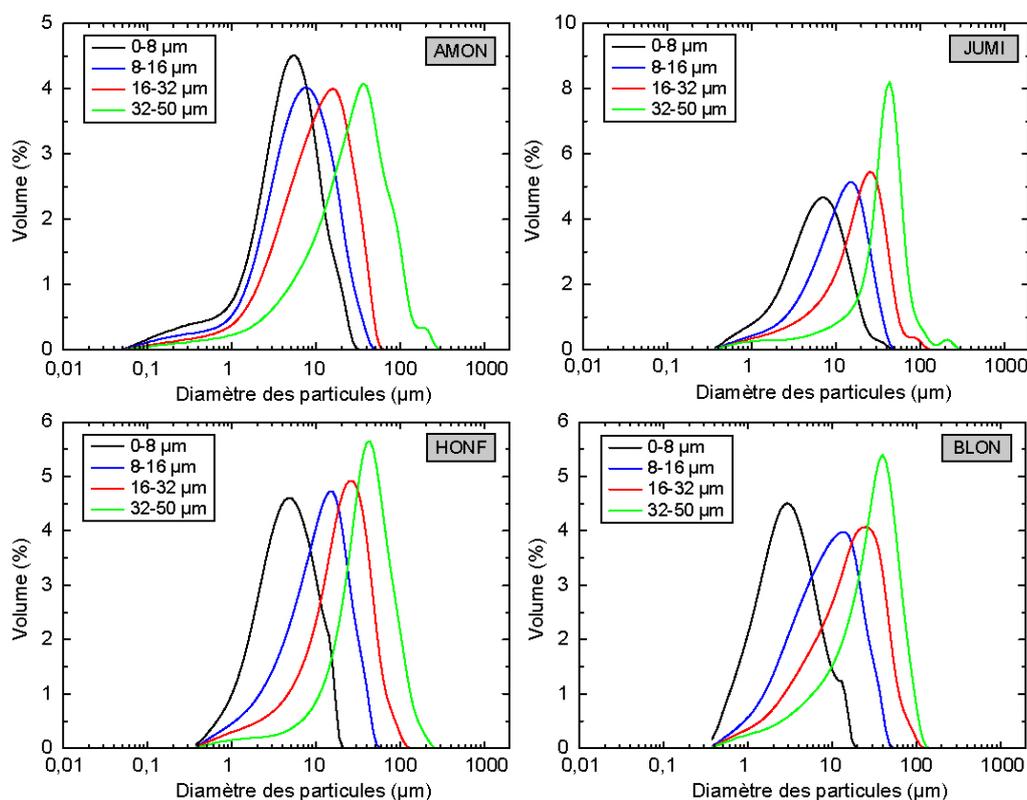


Figure 4.3. Courbes granulométriques des fractions 0-8 ; 8-16 ; 16-32 et 32-50 µm des échantillons intertidaux AMON, JUMI, HONF, prélevés en novembre 2004 et BLON, en avril 2005.

Chaque classe granulométrique a ensuite suivi le même protocole analytique que les échantillons bruts (fraction < 50 µm), soit 53 éléments analysés par ICP-OES et ICP-MS.

Les teneurs des éléments chimiques obtenues pour chaque fraction granulométrique ont ensuite été corrigées en prenant en compte la proportion réelle des différentes classes granulométriques de la fraction < 50 µm (Tab.4.1.).

Tableau 4.1. Proportions granulométriques (%) de la fraction fine des échantillons intertidaux AMON, JUMI, HONF, BLON, avant séparation de la fraction fine.

Echantillon	CLASSES GRANULOMETRIQUES (µm)					
	0-2	2-4	4-8	8-16	16-32	32-50
AMON	5,76	3,44	10,08	24,18	35,80	20,74
JUMI	9,03	7,43	13,25	18,19	27,02	25,07
HONF	11,30	7,34	10,71	13,28	23,96	33,43
BLON	6,89	12,19	21,13	23,46	22,50	13,83

- Résultats :

D'une manière générale, les éléments chimiques normalisés à l'aluminium se répartissent de manière assez homogène sur les quatre classes granulométriques, au sein d'un même échantillon (Fig.4.4.). Pour quelques éléments (tel que le potassium), les teneurs normalisées sont prédominantes dans une des classes granulométriques (32-50 µm) : cette répartition inégale entre les fractions suggère que l'élément dosé n'est pas seulement présent dans la fraction aluminosilicatée.

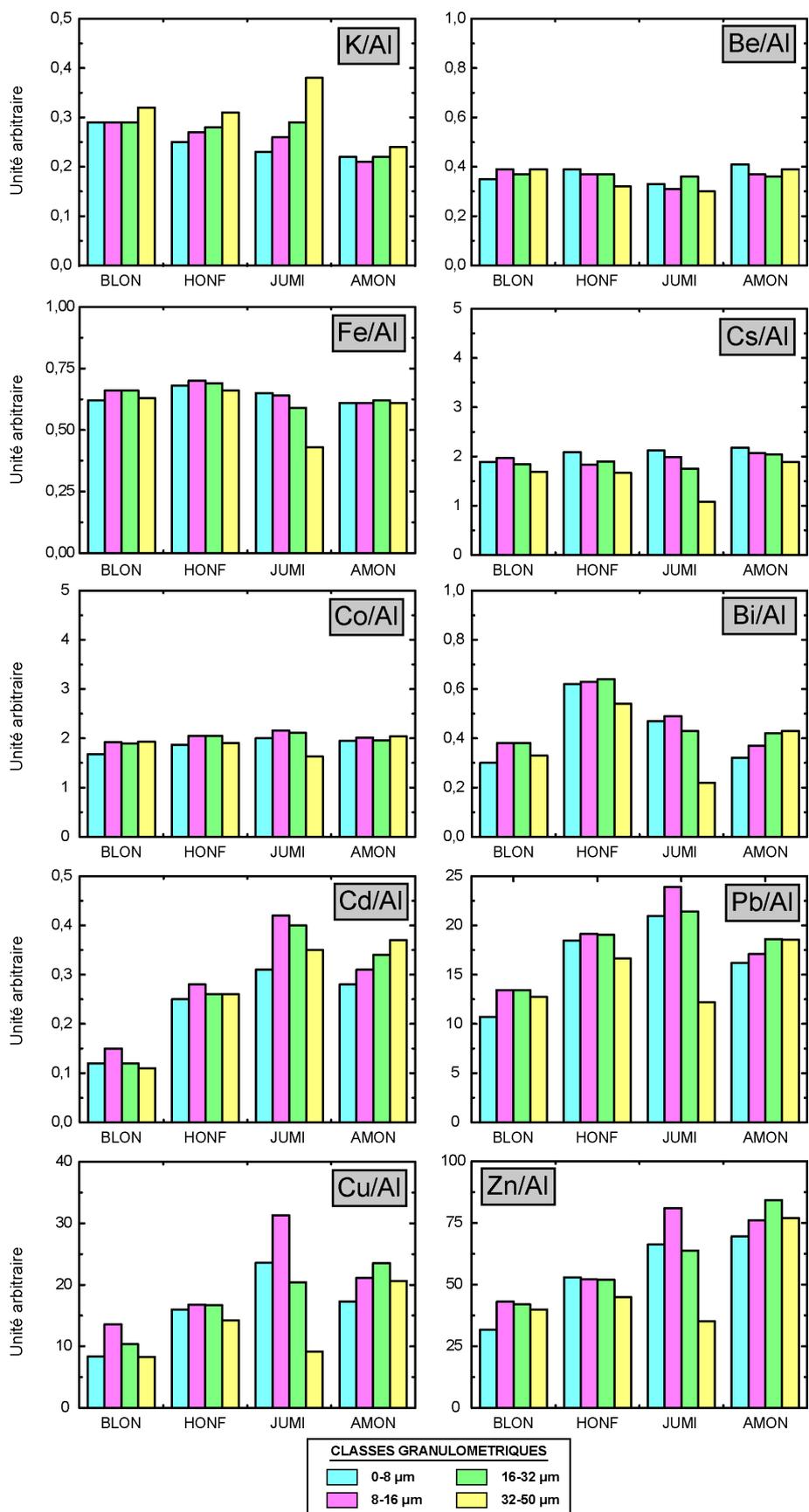


Figure 4.4. Répartition des concentrations normées à l'aluminium du K, Be, Fe, Cs, Co, Bi, Cd, Pb, Cu et Zn dans les fractions granulométriques 0-8 ; 8-16 ; 16-32 et 32-50 µm des échantillons intertidaux AMON, JUMI, HONF prélevés en novembre 2004 et BLON en avril 2005.

Parmi les 53 éléments majeurs-mineurs-traces dosés, quelques éléments n'ont pas une répartition homogène. Le zirconium et l'hafnium normalisés à l'aluminium ont leurs plus forts rapports dans la classe des silts grossiers (Fig.4.5.) ; la présence de minéraux lourds dans les fractions sableuses des échantillons considérés en est la cause.

Le sodium et le silicium ont également des rapports élevés dans les silts grossiers et ce quel que soit l'échantillon analysé (Fig.4.6.). L'excès de silicium dans la même classe s'explique probablement par la présence de quartz, en continuité avec la fraction sableuse. La présence du sodium en excès dans les silts grossiers est difficile à justifier dans nos échantillons.

Pour le cérium, le chrome, le thorium et l'uranium, les rapports élément sur l'aluminium montrent de légères décroissances des silts grossiers vers les argiles-silts très fins (Fig.4.7.). De plus, les distributions des rapports varient d'un échantillon à l'autre, surtout pour l'échantillon OISS (vasière d'Oissel). Ces variations résultent probablement d'une nature minéralogique différente du matériel prélevé.

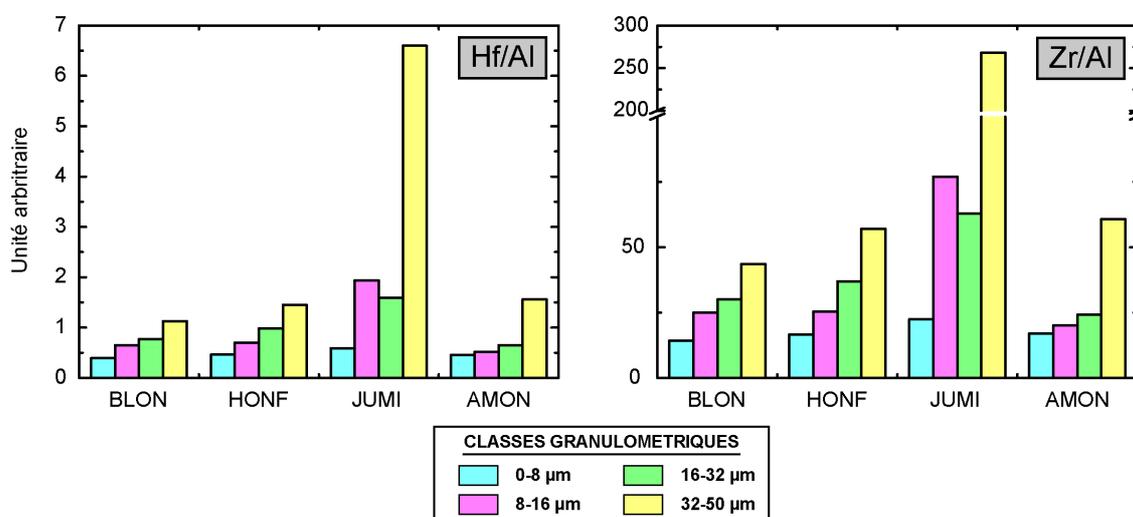


Figure 4.5. Répartition des concentrations normées à l'aluminium du Hf et Zr dans les fractions granulométriques 0-8 ; 8-16 ; 16-32 et 32-50 µm des échantillons intertidaux AMON, JUMI, HONF prélevés en novembre 2004 et BLON en avril 2005.

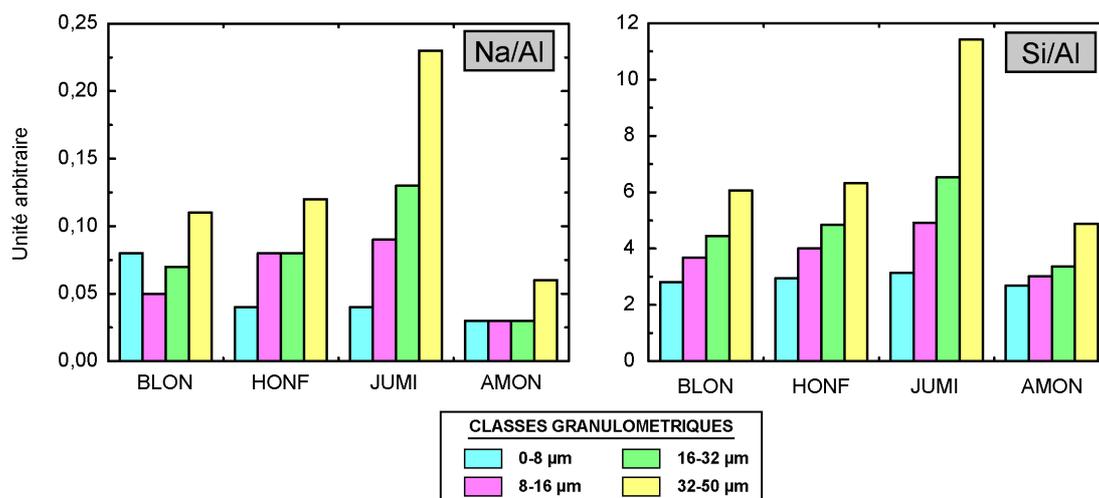


Figure 4.6. Répartition des concentrations normées à l'aluminium du Na et Si dans les fractions granulométriques 0-8 ; 8-16 ; 16-32 et 32-50 µm des échantillons intertidaux AMON, JUMI, HONF prélevés en novembre 2004 et BLON en avril 2005.

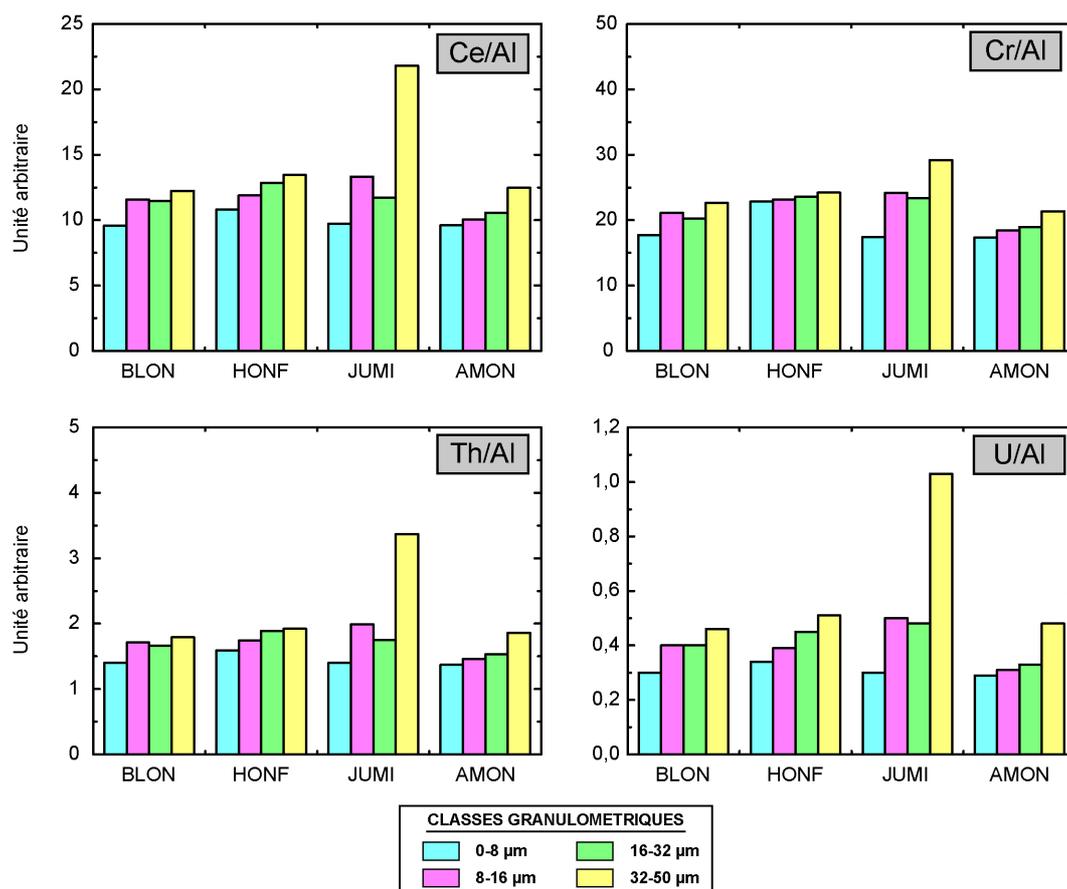


Figure 4.7. Répartition des concentrations normées à l'aluminium du Ba, Ce, Cr et Th dans les fractions granulométriques 0-8 ; 8-16 ; 16-32 et 32-50 µm des échantillons intertidaux AMON, JUMI, HONF prélevés en novembre 2004 et BLON en avril 2005.

En résumé, l'analyse des éléments majeurs-mineurs-traces dans les quatre classes distinguées au sein de la fraction < 50 µm permet de montrer que les éléments chimiques analysés ne sont pas confinés à une fraction granulométrique donnée : les résultats géochimiques sont alors peu influencés par la différence de distribution en classes de particules.

1.3.2. Les éléments majeurs-mineurs-traces des sédiments fins

Le chapitre 3 a détaillé les caractéristiques géochimiques de chaque échantillon de sédiment fin du continuum Seine-baie de Seine. La présence de certains éléments majeurs-mineurs-traces a été expliquée et quelques éléments susceptibles d'être des marqueurs particuliers ont été mis en avant.

Sur la figure 4.8. ci-dessous, les données des facteurs d'enrichissement (FE) du zinc et du cuivre, deux éléments définis comme de bons marqueurs du domaine fluvial de la Seine, ont été reportées sur l'ensemble du système étudié. Comme cela a déjà été dit précédemment, les teneurs les plus élevées sont enregistrées dans la partie amont de l'estuaire de la Seine, de l'amont du barrage de Poses à la zone industrielle de Grand Couronne (15 Km en aval de Rouen). Dans la partie aval, les teneurs des FE en zinc et cuivre restent relativement constantes. Cela correspond à la zone définie comme homogène de l'estuaire de la Seine (chapitre 3, page 123).

Cependant, une station se distingue, les FE en excès correspondent à un dépôt plus ancien, situé à l'entrée de l'ancienne écluse de Tancarville. C'est l'accumulation probable de sédiments marqués par quelques éléments chimiques.

À l'embouchure de la Seine, les FE diminuent progressivement vers la baie de Seine, en un "panache" de particules fines d'origine fluviale qui se disperse dans un matériel fin plus marin. Dans cet ensemble, plusieurs zones (correspondant parfois à un seul échantillon) se distinguent tantôt par leur enrichissement (nord de l'embouchure : lieu du dépot centre de sédiments fins), tantôt par leur déficit (voisinage du dépôt de dragages d'Octeville-sur-Mer).

Il est important de rappeler que la période d'échantillonnage des sédiments superficiels coïncide avec d'importantes perturbations liées aux travaux d'extensions du port du Havre ("Port 2000"). Leur activité propre (dragages et mise à nu de sédiments plus anciens, dépôts de dragage) et leur influence (déplacement des masses sédimentaires sur les modifications des champs de courants) sont responsables d'anomalies concernant des sédiments plus chargés en métaux (époques des années antérieures à 1990), ou au contraire plus anciens, non influencées par l'ère industrielle. En effet, les volumes de sédiments déplacés sont considérables. Les études menées sur les dragages par le Port Autonome de Rouen estiment à 5 millions de m³ le volume de vases et de sables dragués à l'engainement et au niveau de la brèche, puis rejetés aux dépôts d'Octeville-sur-Mer et du Kannik, auxquels s'ajoutent 1,5 millions de m³ relatifs aux travaux de Port 2000 (PAR, 2003).

Ceci explique les différences de teneurs mesurées dans le nord de l'embouchure (excès ou déficit) et en baie de Seine orientale ; le déficit étonnant dans les sédiments du secteur voisin du dépôt de dragage du port du Havre à Octeville peut être expliqué par les dépôts considérables de sédiments anciens (antérieurs aux années 1950) extraits de l'emprise de la darse de Port 2000.

Sur le littoral bas-normand, les FE décroissent progressivement et atteignent dans la partie ouest des valeurs basses, reflet de l'atténuation de l'influence de l'estuaire de la Seine, voire l'absence d'autres sources potentielles, où certains éléments chimiques sont en excès, et seraient susceptibles d'être des sources de matériel particulaire aussi importantes que la Seine.

Dans les petits systèmes côtiers de l'Orne, la Dives et la Touques, les valeurs maximales des FE se situent généralement en amont des barrages et les teneurs diminuent progressivement vers l'aval, à l'embouchure, les FE augmentent à nouveau. En fait, ces petits systèmes fonctionnent de la même manière que l'estuaire de la Seine. Il existe un apport en éléments chimiques par l'amont des cours d'eau, un apport de matériel fin fluviale, qui se dilue plus ou moins facilement dans un matériel non fluviale. À l'embouchure, les valeurs plus élevées s'expliquent par l'apport du matériel sédimentaire originaire de l'estuaire de la Seine s'étendant en baie de Seine et sur le littoral bas-normand. En revanche, en domaine subtidal (petits fonds inférieurs à 5 m), les valeurs des FE plus faibles peuvent s'expliquer par un mélange entre un matériel enrichi de la baie de Seine et un matériel fin appauvri provenant des apports fluviaux des cours d'eau côtiers.

À l'échelle de la zone étudiée, tous ces systèmes estuariens contribuent donc à l'apport en matériel fin d'origine fluviale en baie de Seine. La Seine est de loin le plus grand pourvoyeur d'éléments, les cours d'eau côtiers apportent leur contribution mais ne se distinguent pas dans le pool sédimentaire de la baie de Seine. Les éléments majeurs-mineurs-traces sont donc, à l'échelle du système estuarien de la Seine, de très bons marqueurs potentiels du domaine fluviale global, et de la Seine en particulier.

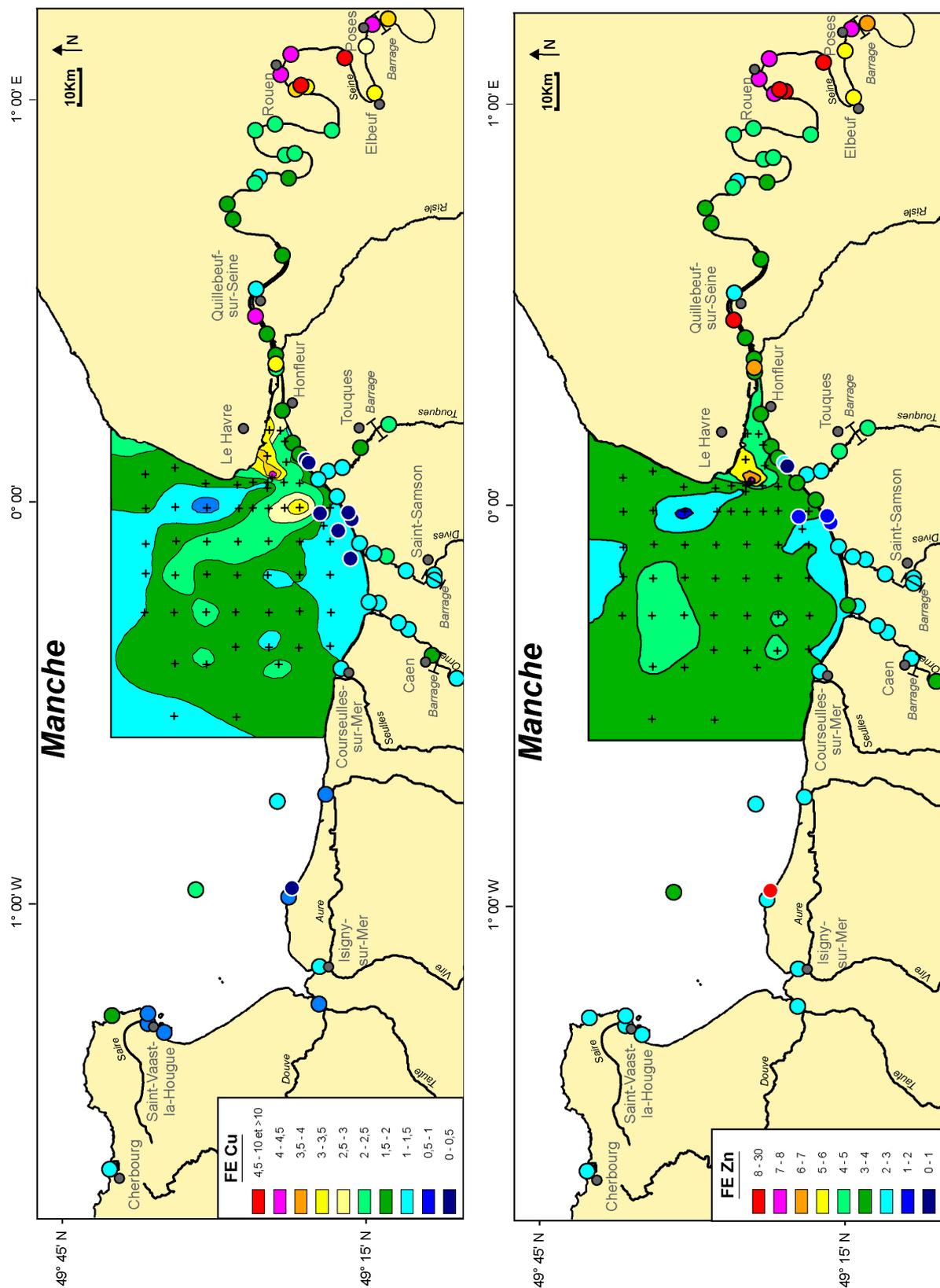


Figure 4.8. Cartographie des facteurs d'enrichissement (FE) du cuivre et du zinc des sédiments intertidaux et subtidaux, au sein du continuum Seine-baie de Seine.

I.4. Les radionucléides des sédiments fins

Dans le système Manche-baie de Seine, la source des radionucléides artificiels est bien connue. Les radionucléides artificiels tels le ^{60}Co proviennent des rejets en mer de l'usine AREVA de retraitement des combustibles usés de la Hague (nord Cotentin). La figure 4.9. synthétise uniquement les données sur le rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ des sédiments prélevés sur l'ensemble du système en 2005 et dont le rapport s'est révélé être un bon marqueur particulière du domaine marin (chapitre 3).

La cartographie du rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ montre la présence de particules fines marines dans le matériel sédimentaire du continuum Seine-baie de Seine, des domaines intertidal et subtidal. Ces observations sont conformes à ce qui est connu des transferts sédimentaires en baie de Seine et dans l'estuaire : forts rapports à proximité de la source, dérive générale vers l'est et pénétration profonde de particules marines dans l'estuaire de la Seine et moindre dans les cours d'eau côtiers. Il s'ensuit un mélange entre des stocks sédimentaires marins et fluviaux et la propagation vers l'est du signal transitoire que constitue le rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$.

La comparaison des données sur les radionucléides rapportée à une même date de référence (1^{er} janvier 2005) permet de faire abstraction de l'évolution du rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ au cours du temps. En effet, Boust (1981 ; 1999) et Boust *et al.* (2002) ont mis en évidence une évolution temporelle de ce rapport, à la fois en Manche centrale, en baie de Seine et dans l'estuaire de la Seine, du fait de la variation dans le temps du marquage du pôle marin en ^{60}Co . Le temps de parcours des particules fines d'origine marine est estimé à environ une dizaine d'années entre Cherbourg et Le Havre.

Dans l'estuaire de la Seine, la pénétration des particules fines marines est détectée jusqu'à Grand Couronne (PK255) en 2005 (avec des activités néanmoins affectées d'une erreur importante dans cette dernière zone). Ces résultats sont en accord avec les travaux de Guézennec *et al.* (1999) et Boust *et al.* (2002) qui ont détecté du matériel silto-argileux marin actuel marqué jusqu'à 120 Km à l'intérieur de l'estuaire de la Seine (l'île Lacroix, PK240).

Dans les cours d'eau côtiers, aucune donnée sur la pénétration depuis l'embouchure des particules fines marines n'avait été recueillie conjointement à celles de l'estuaire de la Seine. Les résultats montrent également une remontée du matériel marin dans les trois petits systèmes :

- pour l'Orne, une remontée de 15 Km jusqu'au barrage de Caen, limite de la marée dynamique,
- pour la Dives et la Touques, les pénétrations depuis l'embouchure sont limitées à 5 et 7 Km respectivement.

Cette disparité s'explique par le rôle important du transport résiduel en suspension vers l'amont des petits estuaires, porté par l'asymétrie de la marée (pompage tidal). Le volume oscillant de la marée est alors largement prépondérant dans l'importance des distances de remontées du matériel marin. La morphologie du cours d'eau (ici sections plus ou moins modestes) influence l'importance du volume oscillant. Ainsi, la pénétration est totale (limitée par un barrage) pour l'Orne dont la section est rectiligne et canalisée, contrairement à la Dives et à la Touques dont les sections sont étroites et le tracé méandrique.

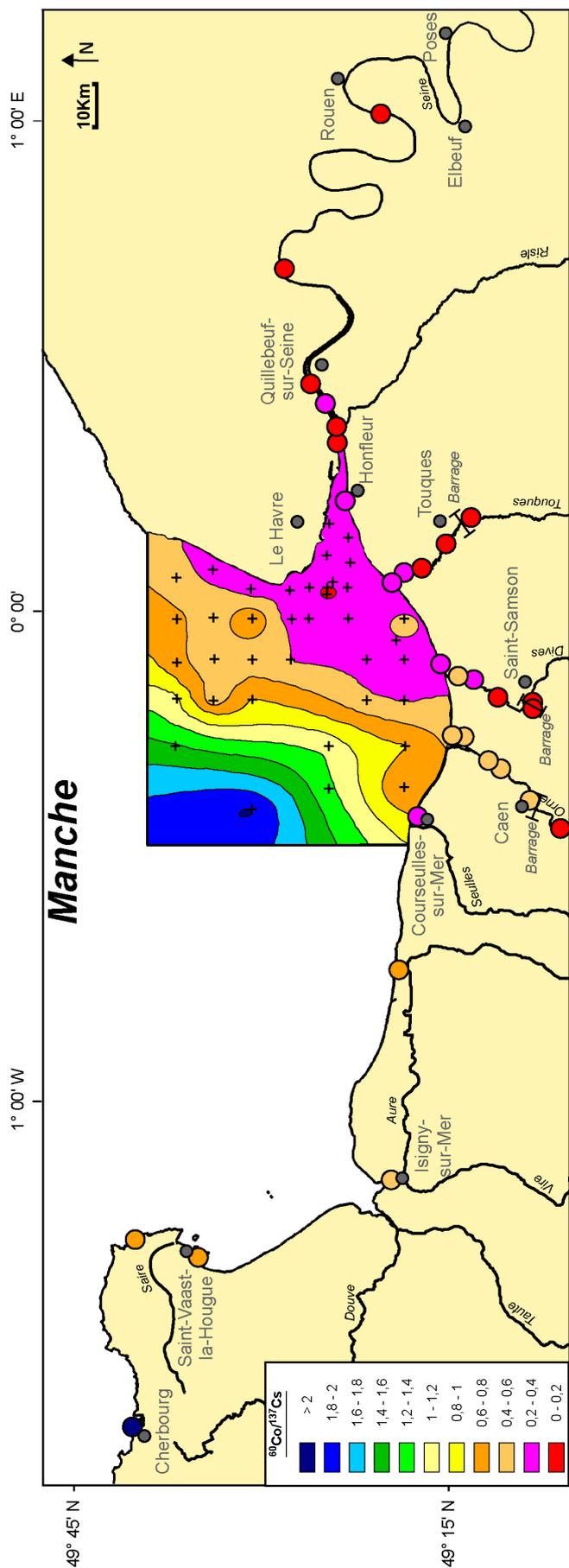
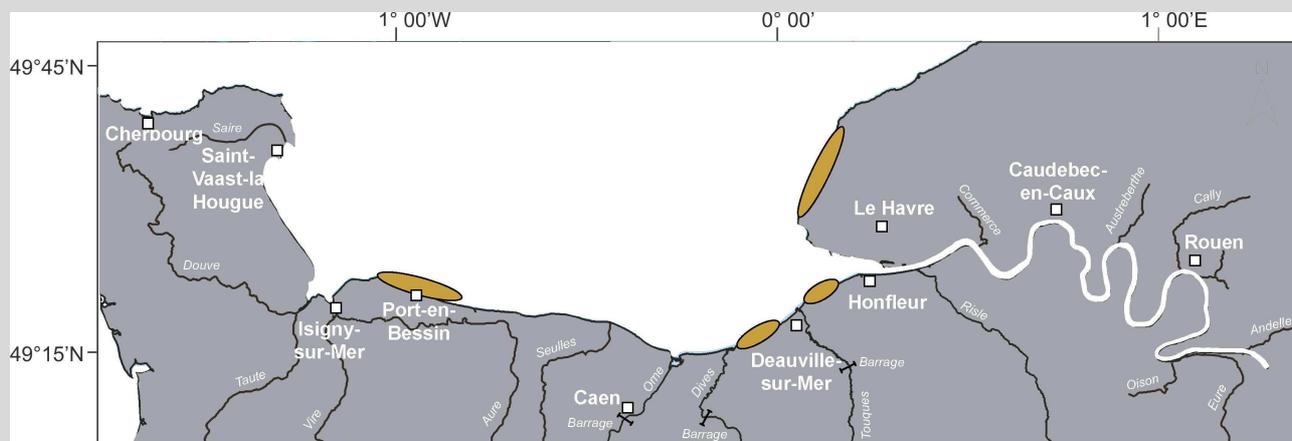
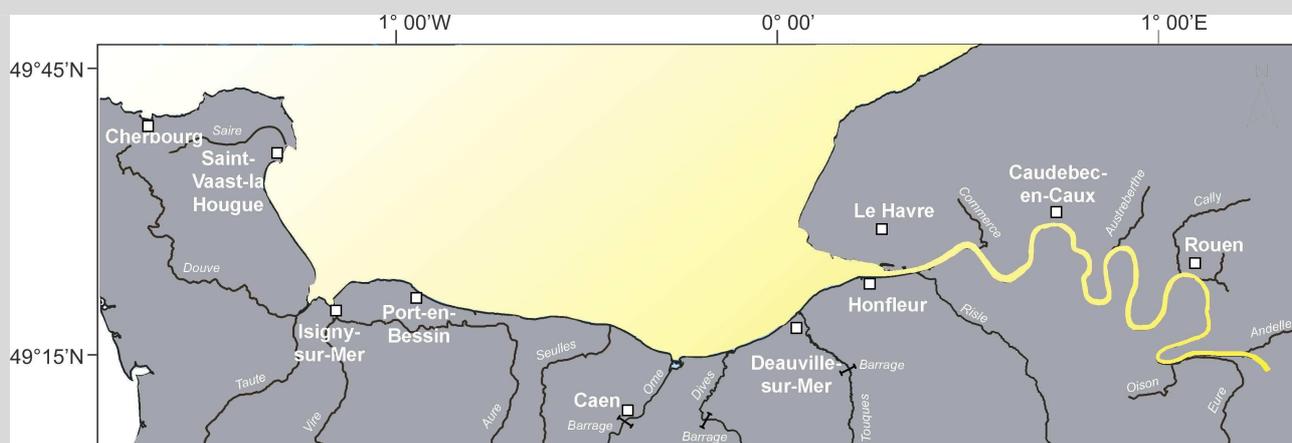


Figure 4.9. Distribution du rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ dans le système estuarien de la Seine et des cours d'eau côtiers bas-normands en 2005.

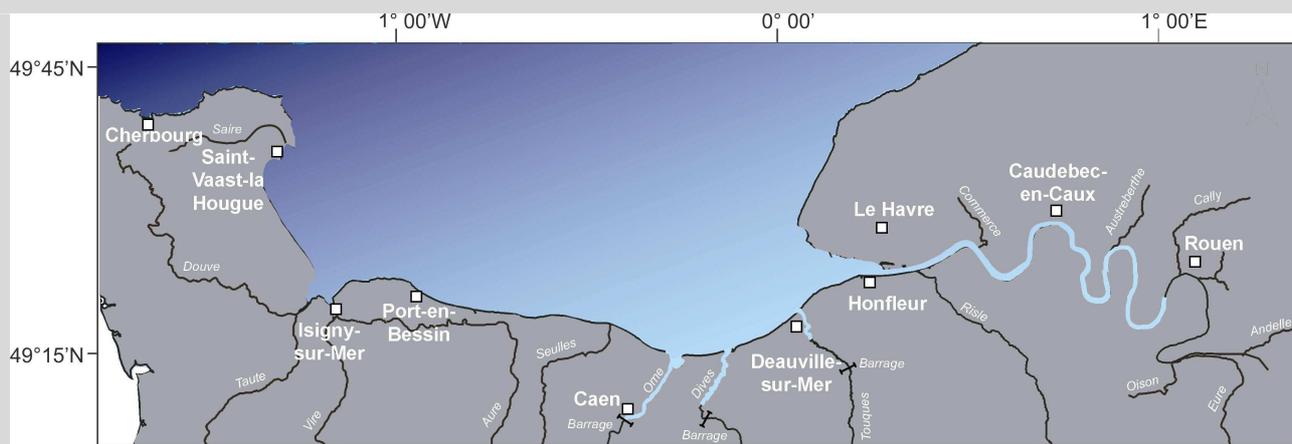
RÉSUMÉ CARTOGRAPHIQUE



DOMAINE FOSSILE : apport local et ponctuel de matériel fossile



DOMAINE FLUVIATILE : dilution du matériel fin fluvial dans le système estuarien



DOMAINE MARIN : pénétration de particules fines marines dans le système estuarien

II – Détermination des différentes contributions en matériel fin dans la sédimentation fine actuelle

II.1. La sédimentation fine dans le système estuarien de la Seine : un mélange

Dans tout système estuarien en régime macrotidal et sous climat océanique, les particules fines peuvent être apportées par les fleuves et le plateau continental ; l'interface continent-océan devient par conséquent un lieu où les particules marines et fluviales convergent et se mélangent, notamment par des remises en suspension lors de forts courants de marée et de houle (Périllo, 1995).

Or, les différentes synthèses des marqueurs particuliers potentiels du système estuarien de la Seine conduisent au constat qu'il existe :

- une pénétration de particules fines marines dans le système estuarien,
- une dilution de particules fines fluviales en baie de Seine,
- un apport local et ponctuel de matériel fin fossile.

L'image d'un système estuarien soumis à deux sources est à compléter pour le cas de la Seine. La sédimentation fine actuelle dans le continuum Seine-baie de Seine est donc le résultat d'un mélange entre trois pôles (Fig.4.10.) : une source fluviale (Seine) ou estuarienne (estuaire de la Seine), une source marine (la Manche) et une source fossile ponctuelle (falaises jurassiques du Calvados essentiellement et falaises crétacées de Haute Normandie, probablement).

Dans le cas de petits systèmes estuariens, ce schéma reste valable. Les sédiments fins présents dans l'Orne, la Dives et la Touques résultent eux aussi d'un mélange de trois sources (marine, fluviale et fossile).

Malheureusement, l'ensemble des données acquises ne permet jusqu'à présent de n'établir qu'un constat ; rien ne permet d'indiquer les contributions de chaque source dans la sédimentation, ni de les estimer.

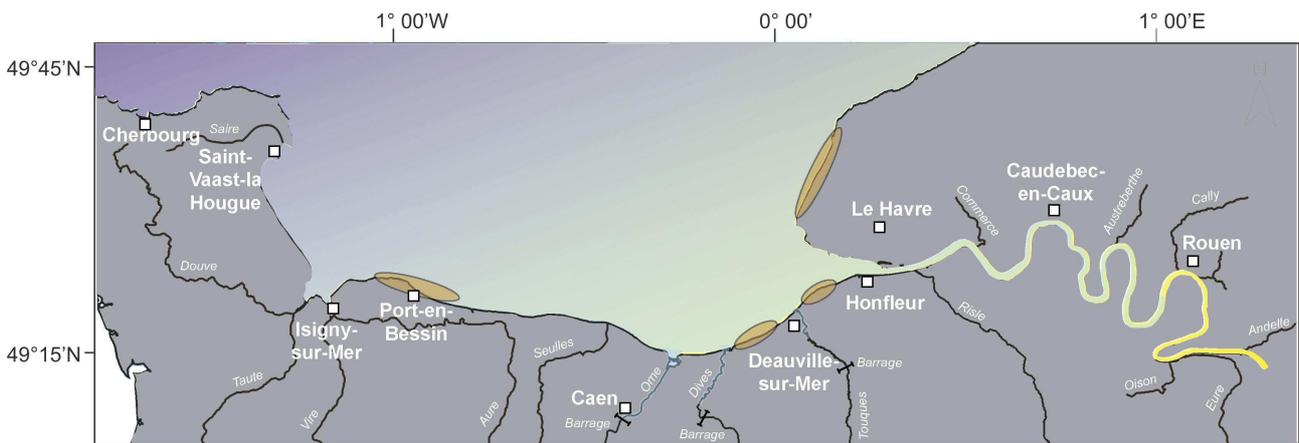


Figure 4.10. Représentation schématique du mélange particulaire dans le système estuarien de la Seine.

II.2. Résolution du mélange particulaire

Pour déterminer les différentes sources au sein d'un matériel sédimentaire, plusieurs méthodes existent. Ici, un certain nombre de marqueurs potentiels existent : des marqueurs minéralogiques argileux et des marqueurs géochimiques (éléments majeurs-mineurs-traces et éléments radioactifs). Pour simplifier l'étude, seuls les échantillons prélevés en 2005 sont considérés et seuls les marqueurs géochimiques, stables et radioactifs, sont utilisés. L'approche statistique, dans un premier temps, semble appropriée puisqu'elle permet de considérer l'ensemble des échantillons avec une multitude de marqueurs particuliers et de donner une répartition continue des phénomènes.

La méthode statistique, utilisée en premier lieu, vise à différencier les sources de matériel fin du système de la Seine aval, puis aide à la résolution du " modèle " de mélange.

II.2.1. Principe de la méthode d'Analyse en Composantes Principales (ACP)

L'analyse en composantes principales (ACP) est une technique statistique d'analyse factorielle multidimensionnelle qui s'applique aux tableaux de type " variables-individus ", dont les colonnes sont des variables à valeurs numériques continues et dont les lignes sont des individus ou observations. Son utilisation en géologie est encore peu répandue mais s'étend de plus en plus en hydrologie, notamment karstique dans le but d'investiguer la structure et le fonctionnement des systèmes (Bakalowicz, 1979 ; Mudry et Blavoux, 1986 ; Marchet, 1991 ; Mudry, 1991 ; Bakalowicz, 1994 ; Maqsoud, 1996 ; Ben Othman *et al.*, 1997 ; Plagnes, 1997 ; Reisenhofer *et al.*, 1998 ; Stetzenbach *et al.*, 1999 ; Stetzenbach *et al.*, 2001 ; Fournier, 2003, 2006 ; Valdès, 2005).

La plupart des ACP est réalisée en normalisant les variables afin de leur faire jouer un rôle identique dans la définition des proximités entre individus, sans qu'elles aient ni les mêmes unités ni les mêmes amplitudes. Pour cela, la somme des carrés des distances entre les couples de points est divisée par l'écart type et \sqrt{n} . Toutes les variables sont donc centrées réduites, elles ont une même dispersion égale à 1. Ainsi transformées, elles sont comparables par mesure des écarts à la moyenne.

L'intérêt des ACP est de fournir des variables synthétiques qui constituent un résumé de l'ensemble des variables initiales et sont la base d'une représentation plane la moins déformée des variables et de leurs angles. Le principe des ACP n'est présenté que sommairement dans ce paragraphe et illustré par la figure 4.11. :

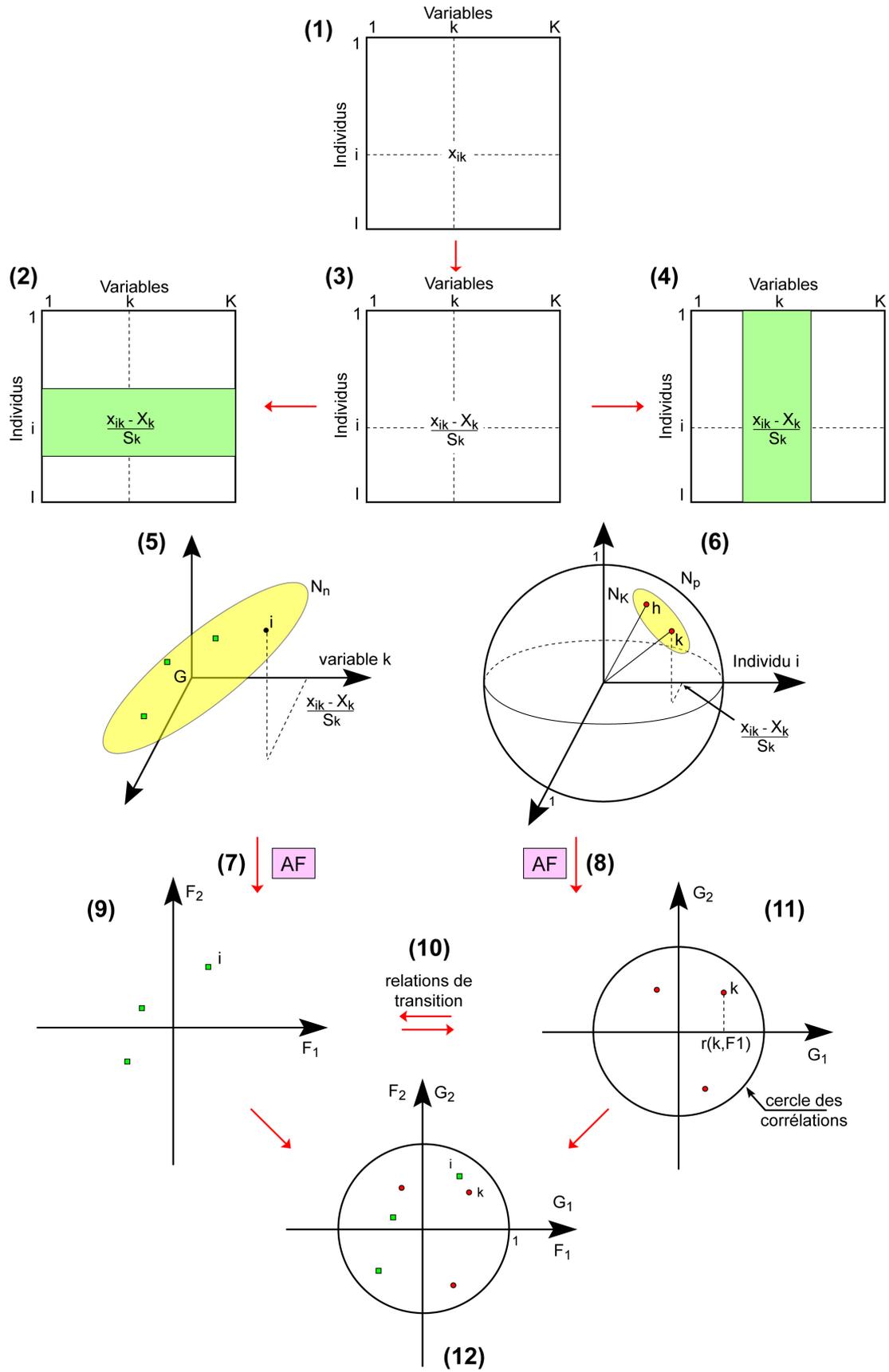


Figure 4.11. Principe de l'analyse en composantes principales (d'après Lebart *et al.*, 1995 modifié).

(1) les lignes (individus) et les colonnes (variables), constituant les données brutes, ne jouent pas de rôles symétriques : les moyennes et les variances n'ont généralement de sens que pour les colonnes.

(2) le tableau de données (individus et/ou variables) est transformé de la même manière : les données sont centrées et réduites, ce qui permet de s'affranchir de la diversité des unités de mesure.

(3) et (4) le tableau est considéré comme une juxtaposition de lignes dans l'étude des individus, et comme une juxtaposition de colonnes dans celle des variables.

(5) un **individu** est une suite de p nombres et peut être représenté par un point dans R^p . Dans le nuage N_n , on s'intéresse aux distances inter-individuelles qui s'interprètent comme des ressemblances. Du fait du centrage, l'origine des axes est confondue avec le centre de gravité N_n et la droite d'ajustement ne doit pas être astreinte à passer par l'origine (Fig.4.12.). Il faut donc rendre maximale la somme des carrés des distances $d_{H_1}(i, i')$ entre tous les couples d'individus (Fig.4.13.). Cela revient à maximiser la somme des carrés des distances entre les points et le centre de gravité du nuage G .

L'analyse du nuage des points-individus en données centrées réduites dans R^p amène donc à effectuer une translation de l'origine des axes au centre de gravité du nuage. Dans cet espace, la transformation a deux objectifs : obtenir un ajustement qui respecte les distances entre points-individus et faire jouer des rôles similaires à toutes les variables dans la définition des distances entre individus.

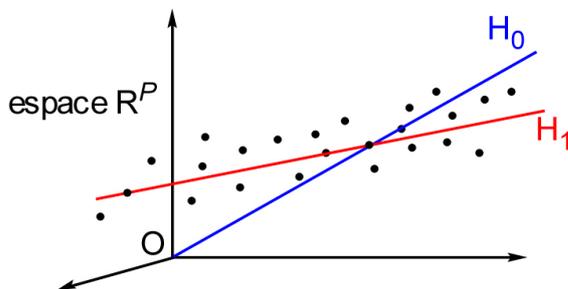


Figure 4.12. Droite d'ajustement du nuage de n points (d'après Lebart *et al.*, 1995 modifié).

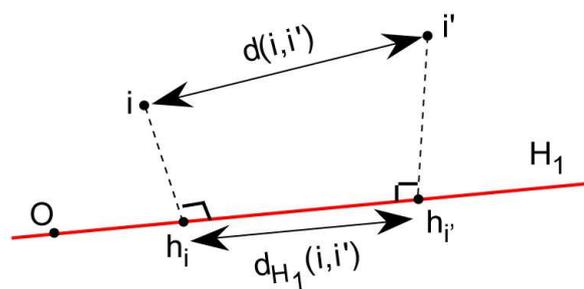


Figure 4.13. Principe de projection des points-individus sur la droite H_1 (d'après Lebart *et al.*, 1995 modifié).

(6) une **variable** est une suite de n nombres et peut être représentée par un vecteur de R^n . Dans le nuage N_p , on s'intéresse surtout aux angles entre les variables. Les angles entre les vecteurs représentent les variables et sont peu déformés par les projections.

En effet, le plan factoriel, en maximisant l'inertie à l'origine du nuage projeté, rend maximale la somme des cosinus carrés des angles entre les vecteurs et leur projection : il ajuste les vecteurs et déforme donc le moins possible leurs angles. Du fait de la réduction, tous les points-variables sont donc sur une sphère de rayon 1 centrée à l'origine des axes : *la sphère des corrélations*.

Les plans d'ajustement couperont cette sphère suivant de grands cercles de rayon 1 : les cercles des corrélations ou plans factoriels à l'intérieur desquels se trouveront les points-variables (Fig.4.14.).

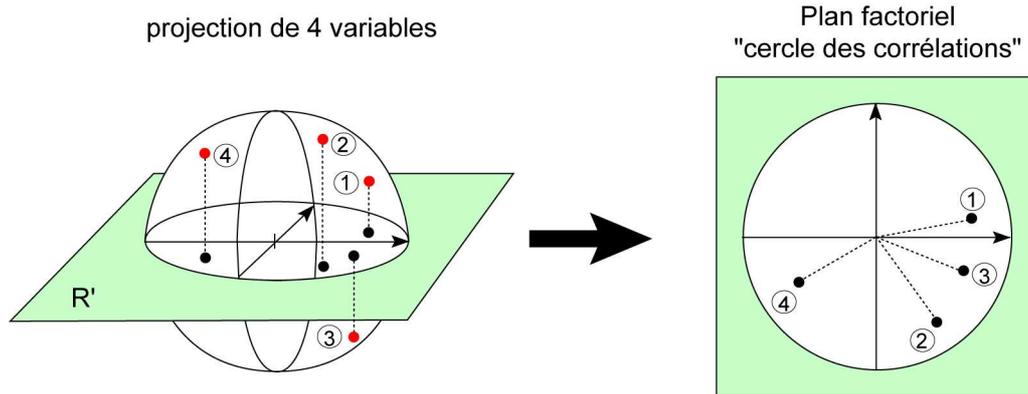


Figure 4.14. Représentation de la sphère et du cercle des corrélations (d'après Lebart *et al.*, 1995 modifié).

La construction des plans factoriels se fait à partir de deux axes factoriels orthogonaux obtenus par une série de variables artificielles non corrélées entre elles appelées composantes principales et dont les coordonnées sont constituées par les n projections des individus sur ces axes. Ces variables artificielles synthétisent les corrélations de l'ensemble des variables initiales.

Ainsi la coordonnée d'un point-variable sur un axe factoriel n'est autre que le coefficient de corrélation de cette variable avec l'axe factoriel. En effet, dans le repère euclidien, la covariance entre deux variables est identique au produit scalaire des deux vecteurs matérialisant ces variables ; il s'ensuit que le coefficient de corrélation entre les deux variables sera égal au cosinus de l'angle formé par ces deux vecteurs.

Ainsi deux variables fortement corrélées sont très proches l'une de l'autre ou au contraire les plus éloignées possible selon que la relation qui les lie est directe ou inverse, de même deux variables non corrélées, c'est-à-dire orthogonales, sont à distance moyenne (Fig.4.15.).

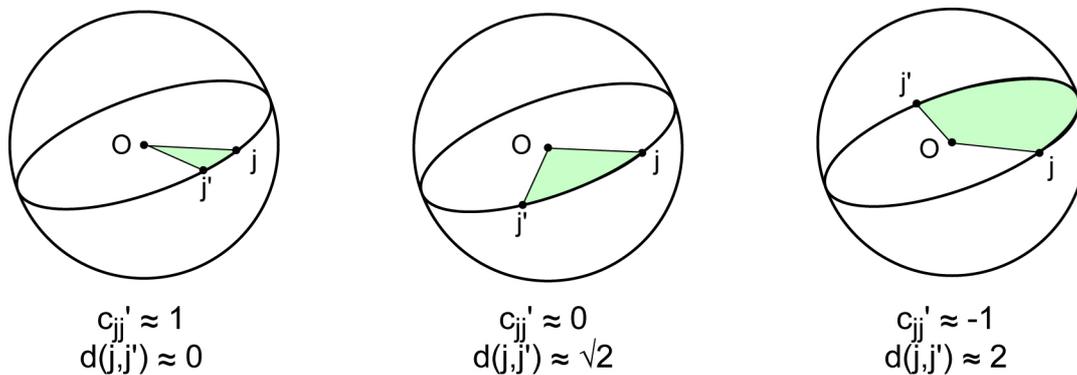


Figure 4.15. Corrélations et distances entre points-variables (d'après Lebart *et al.*, 1995 modifié).

(7) et (8) l'analyse factorielle (AF) d'un nuage consiste à mettre en évidence une suite de directions de la projection du nuage où l'inertie est maximale par rapport à l'origine O . Dans R^p où l'origine O est confondue avec le centre de gravité G , les axes factoriels sont les directions d'allongement maximum de N_n . Dans R^n où la projection d'une variable sur une autre s'interprète comme un coefficient de corrélation, les axes factoriels sont les variables synthétiques les plus liées à l'ensemble des variables initiales.

(9) le plan factoriel croisant deux facteurs sur les individus $F_1(n)$ et $F_2(n)$ fournit une image approchée de N_n dans R^p (Fig.4.11.). La distance entre deux points s'interprète comme une ressemblance.

(10) le plan factoriel croisant deux facteurs sur les variables $G_1(p)$ et $G_2(p)$ fournit une image approchée de N_p dans R^n (Fig.4.11.). Les coordonnées d'une variable s'interprètent comme des coefficients de corrélation avec les facteurs sur les individus.

(11) les relations de transition expriment les résultats d'une analyse factorielle, par exemple dans R^n , en fonction des résultats dans R^p .

(12) du fait des relations de transition, les interprétations des axes factoriels doivent être menées simultanément. Il est souvent commode de superposer ces deux représentations. Toutefois, il convient de faire ces analyses avec certaines précautions car les deux nuages ne sont pas dans le même repère. Il faut donc bien se garder d'interpréter la distance séparant un point-variable d'un point-individu car ces deux points ne font pas partie d'un même nuage dans un même espace : la superposition de ces deux plans factoriels est dénuée de sens. Cependant si l'on considère non plus des points-variables mais des directions de variables dans R^p , on peut alors envisager de représenter simultanément, dans cet espace, à la fois les points-individus et des vecteurs représentant les variables. Dans le cas de la représentation simultanée, on n'interprète pas la distance entre deux variables en terme de corrélation puisque celle-ci ne peut se faire que dans R^n . Il est donc autorisé de comparer, sur la représentation simultanée, les positions respectives de deux individus vis-à-vis de l'ensemble des variables, ou de deux variables vis-à-vis de l'ensemble des individus.

II.2.2. Application de l'ACP aux sédiments intertidaux et subtidaux prélevés en 2005

La méthode ACP est appliquée sur la matrice des individus et des variables définie dans le tableau 4.2.. Les variables retenues correspondent aux marqueurs potentiels discriminants des sources déterminées au cours du traitement des données telles que développées dans le chapitre 3.

Tableau 4.2. Données géochimiques utilisées pour l'analyse en composantes principales.

Domaine	Echantillon	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Sn	Sb	Pb	Bi	²⁴¹ Am	⁶⁰ Co	¹³⁷ Cs
BAIE DE SEINE	3200 CYSAVA	79,0	27,4	15,1	77,5	9,5	0,3	9,0	0,6	33,0	0,4	0,0	0,7	0,9
	3201 CYSAVA	99,4	27,3	38,3	166,8	16,1	0,9	9,3	1,3	83,8	2,1	2,7	3,8	11,6
	3202 CYSAVA	102,1	27,4	32,3	143,3	11,9	0,8	9,1	1,2	63,6	1,7	2,3	3,6	11,2
	3203 CYSAVA	94,5	27,7	30,3	150,7	12,3	0,6	8,5	1,2	69,6	1,7	2,7	5,6	11,7
	3204 CYSAVA	90,5	29,3	42,8	160,6	15,7	0,4	12,8	1,3	80,2	1,6	4,8	6,1	13,3
	3205 CYSAVA	80,1	25,6	26,4	129,0	12,4	0,4	8,3	1,1	54,5	1,2	4,4	8,3	12,2
	3206 CYSAVA	88,7	28,5	34,1	167,4	11,9	0,5	9,2	1,2	81,1	1,9	4,0	8,2	12,5
	3207 CYSAVA	91,0	26,4	40,7	151,3	12,6	0,4	15,6	1,3	76,6	1,7	3,1	5,0	10,0
	3208 CYSAVA	79,5	35,7	54,2	224,4	14,0	0,3	12,3	1,5	115,7	2,0	3,8	4,9	10,0
	3209 CYSAVA	78,8	26,4	23,9	131,4	11,6	0,3	7,4	1,2	58,6	1,1	5,0	13,9	13,1
	3210 CYSAVA	73,7	27,4	31,9	145,8	13,5	0,4	7,6	1,4	73,4	1,2	7,8	16,5	11,6
	3211 CYSAVA	68,0	28,5	33,1	181,6	22,9	0,0	18,0	1,5	116,0	1,4	0,0	0,0	0,0
	3212 CYSAVA	74,7	30,1	42,5	189,9	13,5	0,0	9,8	1,7	86,3	1,0	0,0	0,0	0,0
	3213 CYSAVA	63,3	29,5	24,0	124,1	13,0	0,0	10,6	1,4	67,9	0,7	0,0	0,0	0,0
	3214 CYSAVA	69,4	35,6	35,3	159,4	12,6	0,0	10,9	1,5	74,8	0,8	0,0	0,0	0,0
	3215 CYSAVA	80,3	30,9	45,5	182,6	15,2	0,4	8,6	1,5	97,1	1,3	9,2	21,8	10,8
	3216 CYSAVA	77,5	30,6	42,8	176,0	11,4	0,3	21,3	1,6	150,2	1,4	0,0	0,0	0,0
	3217 CYSAVA	82,5	29,1	34,3	168,4	12,0	0,4	9,8	1,4	92,2	1,7	3,5	9,5	11,8
	3218 CYSAVA	95,7	31,4	47,5	163,8	15,6	0,3	12,0	1,7	83,7	1,5	0,0	0,0	0,0
	3219 CYSAVA	93,8	28,8	51,7	190,9	12,9	0,5	11,8	1,3	113,1	2,7	3,9	7,6	12,5
	3220 CYSAVA	107,8	32,1	64,5	208,0	20,4	0,5	11,7	1,6	129,3	3,0	4,6	5,9	15,2
	3221 CYSAVA	90,2	28,0	53,5	182,1	9,8	0,5	19,8	1,5	94,2	1,9	0,0	0,0	0,0
	3222 CYSAVA	91,6	29,2	35,5	156,0	13,5	0,4	9,7	1,3	75,8	1,9	0,0	0,0	0,0
	3223 CYSAVA	81,6	27,3	35,4	161,3	15,9	0,4	11,3	1,4	79,3	1,4	5,5	13,6	11,8
	3224 CYSAVA	85,1	32,2	42,9	188,0	15,7	0,3	11,2	1,5	94,0	1,6	0,0	0,0	0,0
	3225 CYSAVA	78,3	32,5	44,9	195,1	13,2	0,0	10,8	1,5	86,1	1,2	0,0	0,0	0,0
	3226 CYSAVA	75,1	31,5	29,2	154,8	18,4	0,0	8,6	1,3	69,4	1,1	5,9	17,4	13,9
	3227 CYSAVA	82,7	27,9	38,4	207,3	19,6	0,5	9,2	1,7	107,4	1,7	0,0	0,0	0,0
	3228 CYSAVA	81,4	25,1	30,2	137,2	15,7	0,4	8,1	1,0	71,6	1,4	3,1	6,2	10,5
	3229 CYSAVA	87,8	32,1	33,0	166,1	12,1	0,4	9,1	1,1	73,3	1,4	3,3	9,4	11,5
	3230 CYSAVA	85,3	29,0	41,0	217,5	14,3	0,4	12,5	1,4	114,0	2,1	0,0	0,0	0,0
	3231 CYSAVA	97,4	27,8	36,9	159,1	14,6	0,4	9,2	1,1	76,5	2,0	3,0	5,5	12,6
	3232 CYSAVA	97,8	27,4	32,3	149,5	16,7	0,5	8,5	1,1	70,4	1,7	2,2	4,4	11,6
	3233 CYSAVA	99,3	25,5	34,1	143,6	14,3	0,5	9,8	1,2	71,0	1,5	1,7	3,5	9,4
	3234 CYSAVA	88,7	24,6	31,6	137,3	13,9	0,4	11,7	1,0	75,9	1,6	2,3	3,6	9,9
	3235 CYSAVA	96,1	21,3	27,6	127,3	15,0	0,7	10,1	1,1	65,9	1,4	1,5	2,8	6,7
	3236 CYSAVA	84,4	19,9	26,5	109,1	10,1	0,7	7,1	0,8	47,3	1,5	1,4	0,8	4,5
	3237 CYSAVA	97,9	25,6	51,9	177,9	10,0	0,8	9,9	1,2	79,0	2,1	0,0	0,0	0,0
	3238 CYSAVA	99,1	24,4	39,7	157,4	12,1	1,0	8,5	1,1	64,2	2,0	1,3	1,3	7,1
	3239 CYSAVA	108,0	18,2	48,9	126,2	10,6	1,3	20,0	1,9	100,5	1,0	0,0	0,0	0,0
	3240 CYSAVA	84,3	20,8	37,3	159,6	9,7	1,1	7,1	1,0	60,5	1,3	0,0	0,0	0,0
	3241 CYSAVA	96,2	22,6	34,7	145,9	9,4	1,1	8,9	1,0	58,7	1,9	0,0	1,3	6,9
3242 CYSAVA	74,9	15,6	18,8	85,2	5,0	0,7	4,7	0,8	33,3	0,8	0,0	0,0	3,7	
3243 CYSAVA	76,9	19,7	46,4	279,5	6,0	1,5	9,5	1,1	74,5	1,2	0,0	0,0	0,0	
3244 CYSAVA	103,6	31,6	107,6	382,1	10,0	2,2	16,7	2,5	157,2	2,5	0,0	1,8	5,8	
3245 CYSAVA	109,9	37,8	70,7	330,2	14,1	1,9	10,8	2,3	116,1	1,7	0,0	0,0	9,5	
3246 CYSAVA	103,5	25,5	60,3	260,9	10,8	1,4	14,1	1,5	96,8	2,2	1,0	1,2	8,2	
3248 CYSAVA	89,8	28,5	77,1	315,4	10,0	1,6	12,5	2,0	103,6	1,6	0,0	0,0	0,0	
3249 CYSAVA	92,9	23,0	58,2	326,5	15,5	2,8	12,2	2,0	132,8	2,6	0,0	0,0	2,8	
3250 CYSAVA	78,7	18,6	48,6	206,6	5,6	1,3	8,5	1,1	60,4	1,1	0,0	0,0	3,4	
3251 CYSAVA	75,1	18,8	32,8	147,1	5,7	1,2	6,2	0,9	59,8	1,2	0,0	0,0	4,0	
3252 CYSAVA	95,4	22,1	30,9	128,5	11,4	0,7	9,4	1,0	58,7	1,6	1,4	2,0	7,4	
3253 CYSAVA	121,0	25,7	65,6	217,6	16,2	2,5	14,2	2,0	90,2	6,0	0,0	0,0	9,1	
3254 CYSAVA	91,7	22,7	59,1	175,0	16,7	0,7	13,1	1,6	103,5	1,6	1,1	0,0	3,7	
3255 CYSAVA	82,5	15,8	16,2	74,6	6,7	0,7	7,9	0,6	30,3	1,0	0,0	0,6	3,5	
3256 CYSAVA	107,2	20,5	40,8	141,9	9,2	1,1	20,3	1,2	65,1	1,5	0,0	1,0	4,8	
3257 CYSAVA	115,5	26,6	58,9	180,9	13,0	0,8	9,9	1,4	82,7	1,9	1,8	4,1	11,3	
3258 CYSAVA	115,5	30,2	61,4	198,1	13,1	0,7	14,2	1,5	101,9	2,4	0,0	0,0	0,0	
3259 CYSAVA	110,3	24,6	42,3	160,3	12,3	0,7	9,6	1,1	76,6	1,9	1,9	2,9	10,7	
3260 CYSAVA	100,4	22,8	25,9	117,0	11,1	0,7	7,4	1,0	52,0	1,4	1,7	2,4	8,1	
3261 CYSAVA	101,2	26,0	46,6	178,7	11,8	0,9	10,0	1,2	83,6	2,1	1,6	2,7	10,2	
3262 CYSAVA	107,1	26,0	37,5	152,8	12,2	0,9	10,2	1,1	64,2	2,0	1,8	2,1	8,6	
3263 CYSAVA	95,0	21,8	35,9	140,8	13,4	0,8	11,9	1,1	74,4	1,7	0,0	0,0	0,0	
3264 CYSAVA	94,1	20,0	68,2	133,8	19,1	0,5	12,7	1,1	86,8	1,5	0,0	0,0	0,0	
3265 CYSAVA	89,0	22,4	30,0	119,8	11,7	0,7	8,6	0,9	54,6	1,5	1,1	2,3	7,3	
3266 CYSAVA	105,8	25,3	46,0	188,9	12,7	1,4	9,2	1,2	73,3	2,4	1,2	1,8	9,9	
3267 CYSAVA	82,1	19,0	28,9	117,6	9,2	0,8	6,9	1,0	49,7	1,4	0,0	0,7	6,1	
3268 CYSAVA	72,8	18,7	23,0	99,6	10,2	0,6	5,4	0,8	47,2	1,3	1,6	2,3	5,8	
42 DISPRO	76,9	29,5	46,9	678,6	19,4	0,4	9,6	1,3	94,3	1,6	0,0	0,0	0,0	
40 DISPRO	66,9	24,5	65,4	354,7	12,9	0,3	11,1	0,8	66,0	0,9	0,0	0,0	0,0	
39 DISPRO	84,8	28,6	28,9	135,0	13,3	0,0	8,8	1,0	57,5	1,1	0,0	0,0	0,0	
38 DISPRO	59,2	35,5	44,6	131,2	21,8	0,4	17,1	1,1	77,4	0,8	0,0	0,0	0,0	

Tableau 4.2. (suite) Données géochimiques utilisées pour l'analyse en composantes principales.

Domaine	Echantillon	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Sn	Sb	Pb	Bi	²⁴¹ Am	⁶⁰ Co	¹³⁷ Cs
ESTUAIRE DE LA SEINE	AMON_180405	99,4	33,2	86,1	340,3	11,7	1,7	13,7	2,2	86,0	2,3	0,0	0,0	5,5
	POSE_180405	114,2	28,9	73,8	258,0	6,8	1,6	15,4	1,8	86,1	2,8	0,0	0,0	4,8
	PTAR_180405	94,3	34,4	74,1	304,2	11,8	1,5	10,6	2,0	75,5	1,7	0,0	0,0	8,5
	ELBE_180405	92,2	31,6	67,3	270,6	14,7	1,5	14,1	1,8	90,8	2,2	0,0	0,0	4,5
	ILE_180405	101,5	30,6	88,3	343,4	9,7	2,4	19,7	2,5	169,7	2,6	0,0	0,0	7,2
	CROI_180405	98,3	31,3	98,9	365,5	10,3	2,3	13,8	2,6	162,0	3,3	0,0	0,0	6,5
	DOCK_180405	93,8	27,3	74,1	289,5	9,2	2,0	12,5	2,0	126,9	2,5	0,0	0,0	4,9
	BSDK_180405	106,4	32,3	98,8	385,5	9,2	2,9	12,9	2,3	132,3	3,0	0,0	0,0	8,0
	BARD_140405	80,9	17,3	35,7	146,7	6,4	1,0	6,8	1,0	55,5	1,1	0,0	0,0	2,2
	DUCL_180405	90,0	20,8	35,0	146,2	6,6	1,2	8,9	0,9	58,0	1,0	0,0	0,0	3,2
	LMSJ_140405	80,7	17,3	35,5	139,6	5,3	1,2	6,0	1,0	51,5	1,2	0,0	0,0	2,8
	JUMI_140405	76,5	14,9	23,4	100,0	4,3	0,9	5,5	0,8	38,2	0,7	0,0	0,0	2,3
	TRAI_140405	83,0	18,8	31,7	134,0	5,6	1,0	5,5	1,0	50,1	1,0	0,0	0,0	3,3
	CAUD_140405	79,0	16,8	27,4	119,9	5,3	0,8	5,3	0,9	45,0	1,0	0,0	0,0	3,4
	COUR_140405	85,5	18,4	29,5	119,2	6,7	0,8	6,8	1,0	45,0	1,2	1,0	0,5	5,6
	QUIL_140405	88,7	14,0	19,0	78,4	5,7	0,8	6,8	0,8	30,5	0,8	0,0	0,0	2,7
	TANC_130405	91,4	21,9	34,5	129,0	9,5	0,8	7,0	0,9	51,1	1,6	0,9	1,4	6,7
BERV_130405	77,8	15,7	22,9	95,0	7,3	0,8	5,2	0,8	37,3	1,1	1,1	1,5	8,6	
HONF_130405	87,6	21,6	35,3	140,8	10,3	0,9	7,8	1,1	59,4	1,9	0,7	1,0	4,2	
LITTORAL BAS-NORMAND	COUS_200405	71,1	21,2	19,6	93,7	8,5	0,4	4,8	0,8	33,0	0,5	0,9	2,2	5,9
	PTBS_200405	75,8	26,5	21,7	118,6	11,6	0,3	6,1	0,8	41,1	0,8	3,6	6,9	9,1
	ISIG_200405	76,7	23,5	23,7	115,1	11,2	0,5	5,3	0,9	33,1	0,5	2,4	4,1	7,7
	BREV_200405	77,7	23,0	20,7	104,1	12,7	0,4	5,9	0,8	32,6	0,5	2,5	4,6	8,9
	VAAS_200405	125,0	19,9	17,6	87,9	16,4	1,1	7,7	0,9	36,0	0,4	1,2	4,5	5,9
	SAIR_200405	85,9	18,9	18,9	99,5	27,4	0,6	3,3	1,3	28,3	0,2	0,0	0,0	5,3
	JONV_200405	77,4	18,4	14,4	75,2	12,4	0,4	5,7	0,7	25,6	0,3	1,3	4,9	4,9
	BARF_200405	131,6	15,6	25,3	80,3	12,2	1,2	7,8	0,9	39,3	0,2	0,0	2,5	3,7
	CHER_100405	69,9	20,2	19,8	93,2	8,0	0,3	9,8	1,0	35,7	0,3	6,8	28,5	6,4
	PEN_060505	95,1	25,1	32,0	153,7	11,5	0,6	7,9	1,0	62,0	1,8	1,2	2,4	8,1
	VILL_060505	95,0	26,3	33,9	158,6	12,3	0,6	8,5	1,1	62,6	1,9	1,3	2,7	9,4
	TROU_060505	76,0	19,7	21,6	117,6	9,6	0,4	6,0	0,8	41,8	1,0	0,8	0,9	6,0
	BLON_060505	91,5	24,8	24,0	131,1	13,8	0,4	7,0	0,9	50,4	1,5	2,0	2,3	8,4
CAB_060505	81,9	22,9	24,1	126,2	13,0	0,5	7,6	0,9	52,1	1,3	0,0	3,1	9,1	
FOSSILES	FAL01	95,9	44,2	15,4	95,0	23,4	0,7	2,3	0,6	24,6	0,3	0,0	0,0	0,0
	FAL02	108,6	48,5	14,9	116,0	41,9	0,9	2,3	0,6	26,6	0,4	0,0	0,0	0,0
	FAL03	74,1	31,6	15,9	44,0	11,5	0,5	2,1	0,5	22,7	0,2	0,0	0,0	0,0
	FAL04	98,0	86,9	18,8	98,2	10,5	0,3	9,8	0,9	29,7	0,5	0,0	0,0	0,0
	FAL05	65,4	21,6	9,9	97,2	10,7	0,4	1,4	0,6	16,5	0,2	0,0	0,0	0,0
	HOL01	56,4	16,7	6,3	48,1	8,3	0,4	1,8	0,3	16,2	0,2	0,0	0,0	0,0
	HOL02	59,5	17,6	7,8	47,1	8,3	0,7	1,9	0,4	14,9	0,2	0,0	0,0	0,0
	HOL03	52,2	16,2	6,7	45,9	10,5	0,0	1,7	0,4	29,7	0,2	0,0	0,0	0,0
COURS D'EAU COTIERS	ORNE11	100,2	45,9	64,4	262,0	11,7	1,1	5,4	1,8	45,7	0,4	0,0	0,0	5,5
	ORNE12	79,3	24,1	31,1	150,6	10,2	0,7	6,2	0,9	43,3	1,0	2,7	3,1	8,4
	ORNE13	78,5	22,3	39,5	128,1	10,6	0,6	5,4	0,8	39,0	0,8	2,0	3,8	8,6
	ORNE14	87,8	25,2	25,9	121,4	11,5	0,7	6,1	0,8	40,9	0,9	1,5	4,3	7,5
	MERV11	89,8	26,0	26,1	137,3	13,2	0,5	6,3	1,0	46,5	1,1	2,9	5,3	9,7
	DIVE Amont	88,2	23,3	31,5	115,8	9,1	0,6	6,7	0,8	26,2	0,3	0,0	0,0	5,9
	DIVE00	92,7	19,3	24,7	90,2	7,2	0,7	6,3	0,7	21,5	0,2	0,0	0,0	2,9
	DIVE01	90,4	17,4	21,0	85,8	6,7	0,5	3,5	0,6	22,4	0,3	0,0	0,5	3,0
	DIVE02	85,4	21,5	31,6	110,9	9,8	0,5	4,7	1,0	33,7	0,7	1,1	1,8	5,7
	DIVE03	85,8	21,7	27,9	112,1	10,3	0,6	6,1	0,8	36,8	0,8	1,2	3,1	7,2
	DIVE04	87,6	22,1	24,0	112,9	10,3	0,6	5,3	1,1	38,3	0,9	2,2	2,8	7,8
	TOUQ01	96,0	17,2	34,1	137,5	7,1	1,3	12,4	1,0	34,7	0,4	0,0	0,0	2,7
	TOUQ02	90,0	14,7	26,4	104,5	5,9	0,9	8,1	0,8	26,7	0,2	0,0	0,0	2,7
	TOUQ03	85,7	19,2	25,3	115,7	8,1	0,7	7,0	0,9	35,4	0,6	0,9	1,2	6,4
	TOUQ04	82,2	19,8	23,1	104,4	9,7	0,5	5,4	0,8	36,3	0,8	2,0	3,0	7,6
TROU	89,1	24,7	30,4	126,0	12,5	0,5	6,2	0,9	47,2	1,2	1,9	2,5	8,6	

- Valeurs propres :

L'histogramme des valeurs propres décrit la façon dont diminue le pourcentage de variance exprimée par les axes factoriels. Plus la valeur propre est élevée, plus elle explique une part importante de la variance.

Cela permet ainsi de déterminer le nombre d'axes factoriels à conserver selon deux critères : celui du coude de Catell et celui de Kaiser. Le premier exprime la linéarité de la décroissance de la variance, et le second considère que doivent être conservés les axes factoriels dont la valeur propre est supérieure à 1. Dans le cas présent, l'histogramme des valeurs propres montre que la dispersion du nuage de points est expliquée principalement par l'axe F1 (Fig.4.16.). Au mieux, avec quatre axes, il est possible d'expliquer 81,15 % de la dispersion du nuage de points (Tab.4.3.).

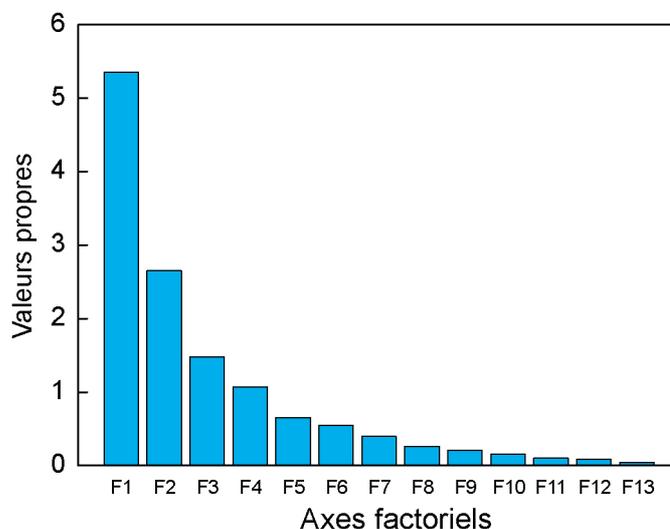


Figure 4.16. Histogramme des valeurs propres.

Tableau 4.3. Valeurs propres calculées pour les treize variables.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13
Valeur propre	5,35	2,64	1,48	1,06	0,65	0,54	0,39	0,26	0,21	0,15	0,10	0,08	0,04
% variance	41,17	20,37	11,39	8,22	5,01	4,19	3,03	2,02	1,61	1,20	0,77	0,64	0,33
% cumulé	41,17	61,54	72,93	81,15	86,16	90,36	93,40	95,42	97,04	98,24	99,01	99,66	100,00

- Cercles des corrélations :

Les représentations graphiques des variables selon les axes F1 et F2 montrent deux ensembles bien définis (Fig.4.17.) :

- un premier ensemble selon l'axe F1, qui regroupe le plomb, l'antimoine, le bismuth, le cadmium, le zinc, le cuivre et l'étain ;
- un deuxième ensemble selon l'axe F2, avec les éléments radioactifs (²⁴¹Am, ⁶⁰Co et ¹³⁷Cs)

De la même manière, les représentations selon les axes F1 et F3, mettent en valeur l'arsenic et le nickel qui définissent un troisième ensemble (Fig.4.17.).

La dernière représentation selon les axes F1 et F4 suggère l'émergence d'un quatrième ensemble avec l'isolement du chrome (Fig.4.17.).

Cela est confirmé par le tableau 4.4. ci-dessous, où le chrome a une contribution de près de 50 % sur l'axe F4, ainsi que le nickel et l'arsenic sur l'axe F3 avec plus de 30 %.

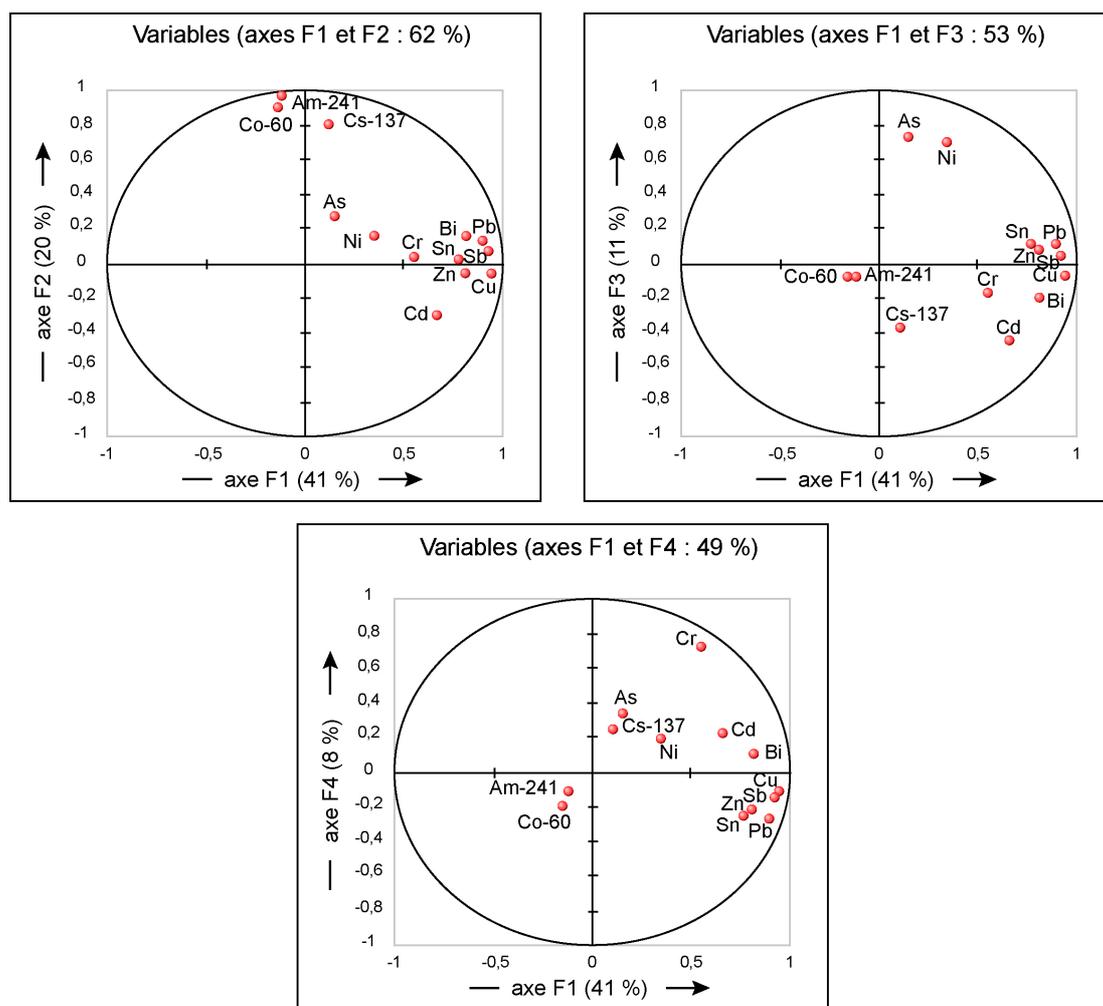


Figure 4.17. Représentation des variables selon les axes F1 et F2, F1 et F3 et F1 et F4.

Tableau 4.4. Contributions des variables (%).

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13
Cr	5,63	0,05	1,97	49,55	4,34	5,11	7,27	12,17	3,26	8,11	2,20	0,25	0,09
Ni	2,23	1,04	33,10	3,71	17,56	32,44	6,02	1,98	0,18	1,22	0,04	0,36	0,10
Cu	16,39	0,12	0,36	1,13	2,20	0,00	0,61	1,32	2,18	6,80	60,64	5,99	2,26
Zn	12,09	0,12	0,46	4,44	18,41	8,99	0,01	35,86	9,53	4,38	3,83	1,39	0,48
As	0,43	2,84	36,34	11,12	2,88	36,94	3,56	1,59	0,75	1,74	1,72	0,04	0,05
Cd	8,15	3,34	13,70	5,31	11,30	0,65	10,25	24,82	0,03	19,11	0,42	2,55	0,38
Sn	11,00	0,02	0,81	5,48	32,11	11,63	3,17	1,44	0,23	30,45	1,15	1,93	0,57
Sb	15,94	0,22	0,14	1,95	0,84	0,03	2,55	4,54	14,46	16,10	4,10	33,53	5,60
Pb	15,03	0,66	0,72	6,39	3,85	0,62	0,57	1,05	1,31	3,69	23,81	36,19	6,09
Bi	12,24	0,91	2,58	1,09	4,88	2,39	37,66	8,43	23,83	0,23	1,40	4,31	0,05
Am-241	0,26	35,18	0,38	1,11	0,15	0,03	0,69	0,08	1,09	0,14	0,54	8,94	51,40
Co-60	0,39	30,97	0,35	2,99	0,62	0,80	16,05	2,21	13,44	0,34	0,00	3,92	27,91
Cs-137	0,23	24,54	9,07	5,73	0,87	0,36	11,60	4,51	29,71	7,68	0,14	0,57	5,00

Cette répartition des variables confirme l'appartenance des éléments chimiques à un domaine sédimentaire particulier, déjà suspecté avec les multiples observations et interprétations décrites dans le chapitre 3. Ainsi, les éléments radioactifs caractérisent le mieux le domaine marin, les éléments majeurs-mineurs-traces tels que l'antimoine, le plomb, le bismuth, le cadmium, le zinc, le

cuivre et l'étain identifient le domaine fluviatile et l'arsenic et le nickel marquent le domaine fossile (sédiments fossiles uniquement d'âge jurassique). Le cas du chrome est à mettre à part : il est sans doute le résultat d'une source anthropique qui reste encore à définir.

- Caractéristiques des individus

La distribution des individus selon les axes F1 et F2 présente un nuage de points très dispersé. Deux individus (échantillons) ont volontairement été enlevés du traitement par ACP : leurs contributions à l'axe F1 étiraient totalement le nuage de points et faussaient l'interprétation. Il s'agit de l'échantillon 3247, qui correspond au sédiment prélevé à l'entrée du bassin des Docks, dans la zone industrielle du port de Rouen, et de l'échantillon OISS de la vasière d'Oissel. Une fois ces deux individus enlevés, il est possible de distinguer quelques individus qui contribuent à l'axe F1 et à l'axe F2 (Fig.4.18.) :

- une première direction selon l'axe F1, qui regroupe les individus représentatifs du domaine fluviatile et de l'estuaire amont de la Seine,

- une deuxième direction selon l'axe F2, dont les individus ont des caractéristiques du domaine marin (baie de Seine et littoral ouest bas-normand),

Un petit groupe de points tend à former une troisième direction avec les individus fossiles mésozoïques (échantillons des falaises de Villerville, d'âge jurassique).

Le reste des individus (les cours d'eaux côtiers, le littoral bas-normand et la baie de Seine) est très dispersé et se regroupe vers le centre du nuage de points. Proche du centre de gravité, ils ne contribuent pas aux axes factoriels F1 et F2.

L'analyse en composantes principales suppose donc et confirme le mélange particulière selon trois sources au minimum. Elle suggère une quatrième, voire une cinquième source, probablement d'origine anthropique.

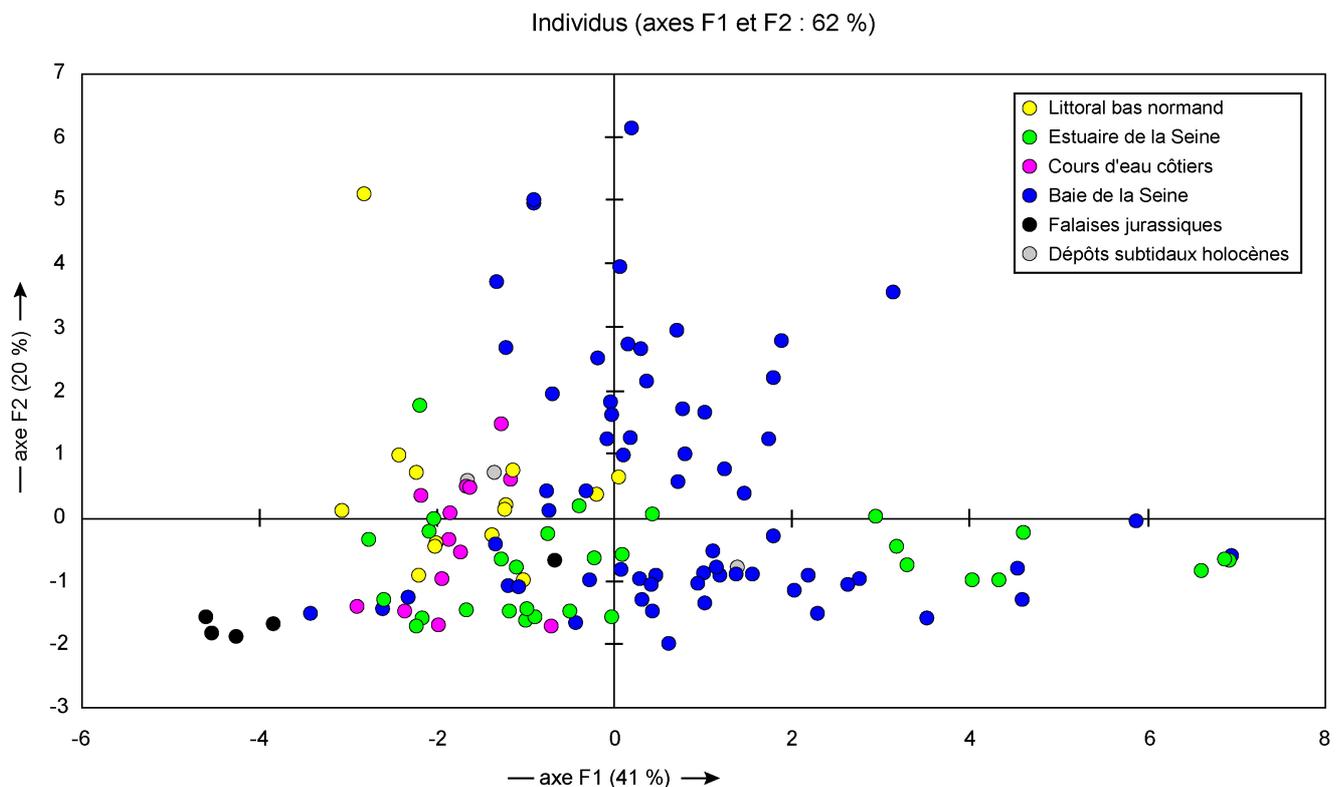


Figure 4.18. Représentation des individus selon les axes F1 et F2.

II.2.3. Mélange à trois pôles

À partir des résultats acquis avec la méthode ACP, plusieurs caractéristiques des pôles de mélange ont été mis en valeur. Il est alors possible maintenant de construire les bases de ce modèle puis de le résoudre selon des équations de mélange.

- Caractéristiques des pôles de mélange

L'analyse des données par ACP a confirmé l'identification d'un système estuarien soumis à trois principaux pôles de mélange. Pour essayer de résoudre les équations de mélange, il est nécessaire de fixer les caractéristiques géochimiques de chaque source potentielle.

Différents cas sont exposés ci-après et prennent en compte des sources en matériel fin différentes dans les trois domaines sédimentaires considérés (fluvatile, marin et fossile).

Cas 1 :

Dans ce premier cas, les zones sources ont été choisies en fonction des teneurs ou activités en éléments chimiques les plus élevées du système (Tab.4.5.) :

- l'échantillon CHER, récolté dans la rade de Cherbourg rend compte du pôle marin,

- l'échantillon OISS, prélevé dans l'estuaire amont représente le pôle fluvatile-estuarien,

- l'échantillon FAL02, échantillon prélevé au pied des falaises de Villerville, caractérise le pôle fossile.

Tableau 4.5. Caractéristiques géochimiques des pôles de mélange (exprimées en Bq.kg⁻¹ pour le ⁶⁰Co et en ppm pour le Zn et As).

CAS 1				
POLE	ECH.	⁶⁰ Co	Zn	As
MARIN	CHER	28,5	182,6	7,968
FLEUVE	OISS	0,01	640,2	12,46
FOSSILE	FAL02	0,001	116	41,91

Cas 2 :

Le second cas considère les sources potentielles avec des marqueurs particuliers différents : le cuivre (pour le domaine fluvatile-estuarien) et le nickel (pour le domaine fossile). Les valeurs extrêmes sont toujours conservées (Tab.4.6.).

Le domaine marin est ainsi caractérisé par l'échantillon CHER, prélevé dans la rade de Cherbourg. Le domaine fluvatile est expliqué par l'échantillon OISS (vasière d'Oissel).

Le domaine fossile est quant à lui défini par l'échantillon FAL04, prélevé aux pieds des falaises de Villerville, susceptibles d'être battus par les vagues et d'alimenter le système.

Tableau 4.6. Caractéristiques géochimiques des pôles de mélange (exprimées en Bq.kg⁻¹ pour le ⁶⁰Co et en ppm pour le Cu et Ni).

CAS 2				
POLE	ECH.	⁶⁰ Co	Cu	Ni
MARIN	CHER	28,5	19,82	20,18
FLEUVE	OISS	0,01	160,5	44,03
FOSSILE	FAL04	0,001	18,75	86,94

Cas 3 :

Le cas 3 reflète des sources en matériel fin plus logiques vis-à-vis du contexte défini précédemment dans les caractéristiques du système estuarien (Tab.4.7). Le domaine marin est ainsi caractérisé par l'échantillon 3215 (partie nord-ouest de la baie de Seine orientale), dont les activités sont les plus élevées en ^{60}Co dans la baie de Seine.

Le domaine fluviale est illustré par l'échantillon AMON, qui correspond au prélèvement amont de l'estuaire de la Seine et qui rend compte des caractéristiques de la Seine fluviale.

Le domaine fossile est quant à lui défini par l'échantillon FAL moyen, une moyenne des teneurs des différents échantillons prélevés sur les falaises de Villerville.

Tableau 4.7. Caractéristiques géochimiques des pôles de mélange (exprimées en Bq.kg^{-1} pour le ^{60}Co et en ppm pour le Zn et As).

CAS 3				
POLE	ECH.	^{60}Co	Zn	As
MARIN	3215	21,8	182,6	15,15
FLEUVE	AMON	0,01	340,3	11,66
FOSSILE	FALmoyen	0,001	90,07	19,60

Cas 4 :

Le cas 4 est peu différent du cas 3. Seul le pôle fossile est modifié, la source potentielle n'est plus caractérisée par une moyenne des teneurs des échantillons FAL des falaises de Villerville, mais par la référence SHALES, elle-même. Les deux autres sources restent les mêmes que dans le cas 3 (Tab.4.8.).

Tableau 4.8. Caractéristiques géochimiques des pôles de mélange (exprimées en Bq.kg^{-1} pour le ^{60}Co et en ppm pour le Zn et As).

CAS 4				
POLE	ECH.	^{60}Co	Zn	As
MARIN	3215	21,8	182,60	15,15
FLEUVE	AMON	0,01	340,30	11,66
FOSSILE	SHALES	0,001	95,00	13,00

Cas 5 :

Le dernier cas considéré est constitué de sources potentielles dont les caractéristiques géochimiques semblent être adéquates, puisque les teneurs sont moyennées (Tab.4.9.). Le domaine marin est caractérisé alors par la moyenne des teneurs et des activités des échantillons 3209, 3210, 3211, 3212, 3213, 3214 et 3215.

Tableau 4.9. Caractéristiques géochimiques des pôles de mélange (exprimées en Bq.kg^{-1} pour le ^{60}Co et en ppm pour le Zn et As).

CAS 5			
POLE	^{60}Co	Zn	As
MARIN	17,98	159,26	14,60
FLEUVE	0,01	355,24	10,64
FOSSILE	0,001	95,00	13,00

Ces échantillons en bordure nord-ouest de la baie de Seine orientale peuvent être considérés comme hors de toute autre influence que celle du domaine marin.

Le domaine fluviale-estuarien regroupe l'ensemble des stations comprises entre le point le plus amont (en amont du barrage de la Seine) et le point situé à Grand Couronne (BSDK). De la même manière que le domaine marin, les caractéristiques géochimiques correspondent à des moyennes des teneurs analysées à toutes ces stations. Pour le domaine fossile, les données références (c'est-à-dire shales) sont conservées.

- Équation générale d'un mélange de trois sources

Si l'on considère un mélange à trois pôles, l'équation de mélange s'écrit de la manière suivante :

$$A [Ex]_S + B [Ex]_M + C [Ex]_F = [Ex]_m$$

où Ex représente le marqueur particulière, A, B et C les contributions relatives des pôles fluviale (S), marin (M) et fossile (F), et m, la valeur mesurée.

- Résolution du mélange de trois sources

Pour résoudre cette équation à trois inconnues, il est nécessaire de résoudre une matrice incluant trois marqueurs particuliers. Pour discuter des résultats obtenus, les cinq cas décrits précédemment avec diverses sources, sont présentés ci-après. Les équations de mélange s'écrivent alors :

Cas 1, 3, 4 et 5 :

$$\begin{aligned} A [Co-60]_S + B [Co-60]_M + C [Co-60]_F &= [Co-60]_m \\ A [Zn]_S + B [Zn]_M + C [Zn]_F &= [Zn]_m \\ A [As]_S + B [As]_M + C [As]_F &= [As]_m \end{aligned}$$

Cas 2 :

$$\begin{aligned} A [Co-60]_S + B [Co-60]_M + C [Co-60]_F &= [Co-60]_m \\ A [Cu]_S + B [Cu]_M + C [Cu]_F &= [Cu]_m \\ A [Ni]_S + B [Ni]_M + C [Ni]_F &= [Ni]_m \end{aligned}$$

Pour la résolution de cette matrice 3x3, le choix s'est porté sur la méthode de Cramer, qui permet de résoudre cette matrice et d'aboutir à la détermination des facteurs A, B et C. Pour les cas 1, 3, 4 et 5, les facteurs s'écrivent :

$$A = \frac{\begin{vmatrix} [Co-60]_m & [Co-60]_M & [Co-60]_F \\ [Zn]_m & [Zn]_M & [Zn]_F \\ [As]_m & [As]_M & [As]_F \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} [Co-60]_S & [Co-60]_M & [Co-60]_F \\ [Zn]_S & [Zn]_M & [Zn]_F \\ [As]_S & [As]_M & [As]_F \end{vmatrix}}$$

$$B = \frac{\begin{vmatrix} [Co-60]_S & [Co-60]_m & [Co-60]_F \\ [Zn]_S & [Zn]_m & [Zn]_F \\ [As]_S & [As]_m & [As]_F \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} [Co-60]_S & [Co-60]_M & [Co-60]_F \\ [Zn]_S & [Zn]_M & [Zn]_F \\ [As]_S & [As]_M & [As]_F \end{vmatrix}}$$

$$C = \frac{\begin{vmatrix} [Co-60]_S & [Co-60]_M & [Co-60]_m \\ [Zn]_S & [Zn]_M & [Zn]_m \\ [As]_S & [As]_M & [As]_m \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} [Co-60]_S & [Co-60]_M & [Co-60]_F \\ [Zn]_S & [Zn]_M & [Zn]_F \\ [As]_S & [As]_M & [As]_F \end{vmatrix}}$$

Pour chacun des cas présentés, les résultats obtenus donnent des valeurs de contributions très variables. Le tableau 4.10. donne, pour les cinq cas, la résolution de la matrice 3x3 pour tous les échantillons des berges et du littoral du continuum Seine-baie de Seine.

Les cas 1 et 2 donnent des résultats cohérents puisque chaque contribution est déterminée, mais la somme des contributions est très loin de 100 %. Pour l'ensemble des échantillons, la somme atteint à peine les 50 %.

Le cas 3 permet d'affiner les résultats, la somme des contributions dépasse les 50 %, mais il manque toujours des contributions additionnelles.

En peaufinant les sources potentielles (cas 4), la résolution apporte des résultats satisfaisants pour quelques échantillons (dont la somme des contributions approche 100 %, Tab.4.10., cas 4), mais ne permet pas de résoudre l'intégralité du mélange dans tout le système estuarien.

Le cas 5, qui, pour rappel, considère des pôles de mélange non purs, mais moyennés à partir de plusieurs sites d'échantillonnage, définit les sommes de contributions avec près de 80 %. Par contre, pour certains échantillons, la résolution n'est pas possible (les valeurs des facteurs restants sont négatives). Il reste néanmoins 20 % en moyenne des contributions qui n'est pas expliqué par ces équations de mélange.

Tableau 4.10. Détermination des contributions A, B et C pour les cas 1 à 5. Le "reste " correspond aux contributions complémentaires pour atteindre 100 %.

CAS 1					CAS 2					CAS 3					CAS 4					CAS 5									
	A	B	C	A+B+C	Reste		A	B	C	A+B+C	Reste		A	B	C	A+B+C	Reste		A	B	C	A+B+C	Reste						
AMON	0.51	0.00	0.13	0.64	0.36	AMON	0.53	0.00	0.02	0.55	0.45	AMON	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	AMON	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	AMON	0.92	0.00	0.14	1.06	-0.06
POSE	0.39	0.00	0.04	0.44	0.56	POSE	0.46	0.00	0.02	0.48	0.52	POSE	0.82	0.00	-0.21	0.61	0.39	POSE	0.82	0.00	-0.21	0.61	0.39	POSE	0.75	0.00	-0.08	0.66	0.34
PTAR	0.45	0.00	0.15	0.60	0.40	PTAR	0.45	0.00	0.09	0.54	0.46	PTAR	0.87	0.00	0.08	0.95	0.05	PTAR	0.86	0.00	0.14	0.99	0.01	PTAR	0.79	0.00	0.26	1.05	-0.05
ELBE	0.38	0.00	0.24	0.62	0.38	ELBE	0.41	0.00	0.08	0.49	0.51	ELBE	0.71	0.00	0.33	1.04	-0.04	ELBE	0.64	0.00	0.56	1.20	-0.20	ELBE	0.59	0.00	0.86	1.24	-0.24
OISS	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	OISS	1.02	0.00	-0.19			OISS	2.03	0.00	-0.57			OISS	2.15	0.00	-0.97			OISS	1.98	-0.01	-0.66		
ILE	0.52	0.00	0.07	0.60	0.40	ILE	0.55	0.00	-0.03	0.53	0.47	ILE	1.04	0.00	-0.13			ILE	1.07	0.00	-0.22			ILE	0.98	0.00	-0.06	0.92	0.08
CROI	0.56	0.00	0.08	0.64	0.36	CROI	0.62	0.00	-0.07	0.56	0.44	CROI	1.11	0.00	-0.14			CROI	1.14	0.00	-0.23			CROI	1.05	0.00	-0.07		
DOCK	0.44	0.00	0.09	0.53	0.47	DOCK	0.46	0.00	0.00	0.46	0.54	DOCK	0.86	0.00	-0.04	0.82	0.18	DOCK	0.87	0.00	-0.07	0.80	0.20	DOCK	0.80	0.00	0.05	0.86	0.14
BSDK	0.59	0.00	0.04	0.64	0.36	BSDK	0.62	0.00	-0.05	0.57	0.43	BSDK	1.20	0.00	-0.24			BSDK	1.25	0.00	-0.41			BSDK	1.15	0.00	-0.23		
BARD	0.21	0.00	0.09	0.30	0.70	BARD	0.22	0.00	0.05	0.27	0.73	BARD	0.41	0.00	0.08	0.49	0.51	BARD	0.39	0.00	0.14	0.53	0.47	BARD	0.36	0.00	0.19	0.56	0.44
DUCL	0.21	0.00	0.09	0.31	0.69	DUCL	0.21	0.00	0.10	0.31	0.69	DUCL	0.40	0.00	0.09	0.50	0.50	DUCL	0.38	0.00	0.16	0.54	0.46	DUCL	0.35	0.00	0.21	0.57	0.43
LMSJ	0.21	0.00	0.07	0.27	0.73	LMSJ	0.21	0.00	0.05	0.27	0.73	LMSJ	0.40	0.00	0.03	0.43	0.57	LMSJ	0.39	0.00	0.05	0.45	0.55	LMSJ	0.36	0.00	0.11	0.47	0.53
JUMI	0.14	0.00	0.06	0.21	0.79	JUMI	0.14	0.00	0.08	0.22	0.78	JUMI	0.28	0.00	0.05	0.33	0.67	JUMI	0.27	0.00	0.09	0.36	0.64	JUMI	0.25	0.00	0.13	0.38	0.62
TRAI	0.19	0.00	0.08	0.27	0.73	TRAI	0.19	0.00	0.09	0.28	0.72	TRAI	0.38	0.00	0.06	0.44	0.56	TRAI	0.36	0.00	0.10	0.47	0.53	TRAI	0.33	0.00	0.15	0.49	0.51
CAUD	0.17	0.00	0.07	0.25	0.75	CAUD	0.16	0.00	0.08	0.25	0.75	CAUD	0.33	0.00	0.07	0.41	0.59	CAUD	0.32	0.00	0.12	0.44	0.56	CAUD	0.29	0.00	0.16	0.46	0.54
COUR	0.16	0.02	0.11	0.29	0.71	COUR	0.17	0.02	0.09	0.28	0.72	COUR	0.30	0.02	0.15	0.47	0.53	COUR	0.27	0.02	0.25	0.54	0.46	COUR	0.25	0.03	0.28	0.56	0.44
QUIL	0.10	0.00	0.10	0.21	0.79	QUIL	0.11	0.00	0.09	0.20	0.80	QUIL	0.18	0.00	0.18	0.36	0.64	QUIL	0.14	0.00	0.30	0.45	0.55	QUIL	0.13	0.00	0.32	0.46	0.54
TANC	0.16	0.05	0.17	0.38	0.62	TANC	0.20	0.05	0.11	0.36	0.65	TANC	0.27	0.07	0.27	0.61	0.39	TANC	0.22	0.07	0.46	0.74	0.26	TANC	0.20	0.08	0.47	0.75	0.25
BERV	0.11	0.05	0.13	0.29	0.71	BERV	0.13	0.05	0.08	0.26	0.74	BERV	0.19	0.07	0.21	0.46	0.54	BERV	0.14	0.07	0.35	0.56	0.44	BERV	0.13	0.09	0.35	0.57	0.43
HONF	0.18	0.04	0.19	0.40	0.60	HONF	0.20	0.04	0.10	0.34	0.66	HONF	0.31	0.05	0.30	0.66	0.34	HONF	0.24	0.05	0.52	0.81	0.19	HONF	0.23	0.06	0.54	0.82	0.18
COUS	0.09	0.08	0.16	0.33	0.67	COUS	0.09	0.08	0.16	0.33	0.67	COUS	0.15	0.10	0.26	0.62	0.48	COUS	0.10	0.10	0.44	0.64	0.36	COUS	0.09	0.13	0.43	0.65	0.35
PTBS	0.08	0.25	0.21	0.53	0.47	PTBS	0.08	0.25	0.19	0.52	0.48	PTBS	0.10	0.33	0.28	0.70	0.30	PTBS	0.04	0.33	0.47	0.84	0.16	PTBS	0.05	0.40	0.40	0.85	0.15
ISIG	0.10	0.15	0.21	0.46	0.54	ISIG	0.11	0.15	0.16	0.42	0.58	ISIG	0.15	0.19	0.33	0.67	0.33	ISIG	0.08	0.19	0.57	0.84	0.16	ISIG	0.08	0.24	0.53	0.85	0.15
BREV	0.07	0.17	0.25	0.49	0.51	BREV	0.09	0.17	0.16	0.42	0.58	BREV	0.07	0.22	0.43	0.73	0.27	BREV	-0.02	0.22	0.74			BREV	-0.01	0.27	0.88		
VAA5	0.03	0.16	0.36	0.54	0.46	VAA5	0.07	0.16	0.14	0.38	0.62	VAA5	-0.04	0.21	0.69			VAA5	-0.19	0.21	1.17			VAA5	-0.16	0.26	1.10		
SAIR	0.04	0.00	0.64	0.68	0.32	SAIR	0.10	0.00	0.15	0.25	0.75	SAIR	-0.09	0.00	1.45			SAIR	-0.40	0.01	2.45			SAIR	-0.36	0.01	2.39		
JONV	0.02	0.18	0.26	0.45	0.55	JONV	0.05	0.18	0.13	0.36	0.64	JONV	-0.03	0.23	0.47			JONV	-0.13	0.23	0.79			JONV	-0.11	0.28	0.72		
BARF	0.05	0.08	0.26	0.40	0.60	BARF	0.14	0.09	0.06	0.29	0.71	BARF	0.04	0.12	0.51	0.67	0.33	BARF	-0.07	0.12	0.86			BARF	-0.06	0.14	0.83		
CHER	-0.16	1.04	0.04			CHER	0.00	1.04	-0.01			CHER	-0.34	1.36	-0.44			CHER	-0.25	1.36	-0.75			CHER	-0.19	1.64	-1.08		
PEN	0.18	0.08	0.21	0.47	0.53	PEN	0.17	0.09	0.15	0.41	0.59	PEN	0.31	0.11	0.32	0.74	0.26	PEN	0.24	0.11	0.54	0.89	0.11	PEN	0.22	0.14	0.55	0.91	0.09
VILL	0.18	0.10	0.22	0.50	0.50	VILL	0.18	0.10	0.16	0.44	0.56	VILL	0.31	0.13	0.35	0.78	0.22	VILL	0.23	0.13	0.59	0.95	0.05	VILL	0.22	0.16	0.80	0.97	0.03
TROU	0.14	0.03	0.18	0.36	0.64	TROU	0.11	0.03	0.14	0.29	0.71	TROU	0.24	0.04	0.32	0.60	0.40	TROU	0.17	0.04	0.54	0.75	0.25	TROU	0.16	0.05	0.55	0.76	0.24
BLOU	0.13	0.08	0.27	0.49	0.51	BLOU	0.12	0.08	0.19	0.39	0.61	BLOU	0.19	0.11	0.50	0.81	0.19	BLOU	0.09	0.11	0.85	1.05	-0.05	BLOU	0.08	0.13	0.84	1.06	-0.06
CAB	0.12	0.11	0.26	0.49	0.51	CAB	0.12	0.11	0.16	0.39	0.61	CAB	0.17	0.15	0.45	0.77	0.23	CAB	0.08	0.15	0.75	0.98	0.02	CAB	0.08	0.18	0.73	0.99	0.01

Comment peut-on alors expliquer les variations importantes entre les différents cas étudiés ?

(1) les sources potentielles ne sont pas très bien définies au départ.

Dans les chapitres précédents, trois pôles de mélange ont été définis : le pôle marin, le pôle fluvial et le pôle fossile. Ainsi, comme point de départ pour une source donnée, il semblait logique de prendre, en premier lieu, les stations dont les teneurs étaient les plus élevées pour chaque pôle. Or, la résolution n'est pas concluante.

Ensuite, il semblait plus adapté d'attribuer comme sources des échantillons de zones géographiquement stratégiques. Le point AMON est le seul qui puisse rendre compte des caractéristiques géochimiques de la Seine fluviale, il a donc tout naturellement été choisi comme source du domaine fluvial. Le point CHER est la station la plus éloignée du système estuarien de la Seine, le témoin de la source marine hors de l'influence de la Seine. Les échantillons des falaises de Villerville ont été choisis comme des références pour le domaine fossile. Un site de prélèvement peut ne pas être représentatif des séries de l'ensemble des falaises. Là encore, l'équation est résolue mais les facteurs des sources sont négatifs.

La dernière solution était de considérer des sources construites sur des valeurs moyennes de zones géographiques susceptibles d'être des pôles des trois domaines considérés (cas 5). Le résultat de la matrice s'améliore mais il n'est toutefois pas concluant pour l'ensemble du système.

Petit à petit, les sources potentielles ont été de mieux en mieux définies mais, il semble que ce ne soit pas suffisant pour résoudre le mélange sur l'intégralité du continuum Seine-baie de Seine.

(2) les marqueurs particuliers ne sont pas bien adaptés au stock sédimentaire considéré.

Il faut rappeler que deux types de données géochimiques sont utilisés : des données d'éléments stables et des données d'éléments radioactifs. Les premiers ont des teneurs intrinsèques qui varient peu dans le temps, excepté par phénomènes d'adsorption ou de désorption, ou d'apports anthropiques au système. Les concentrations en éléments radioactifs, au contraire, diminuent dans le temps d'autant plus vite que leur période physique est courte. Le cobalt 60 a une période de demi-vie de 5,27 ans. Même en référençant l'intégralité des activités en ^{60}Co des échantillons du continuum Seine-baie de Seine à la date du 1^{er} janvier 2005, il est difficile de savoir si la mesure de cobalt 60 correspond à un sédiment récent, avec des activités en ^{60}Co élevées, ou à un sédiment appauvri (sous-entendu mélangé avec du matériel fin non marqué par le ^{60}Co) ou " ancien " (de quelques mois à quelques années) avec des activités moindres.

La deuxième incertitude réside dans l'intégration des particularités du domaine fossile dans ce mélange particulière. Les résultats obtenus pour le stock sédimentaire fossile ne permettent pas de distinguer parfaitement les sédiments fossiles des sédiments récents. Les sédiments tardioholocènes, tels que ceux à l'affleurement et à l'érosion sur certains tronçons de plage ou dans les petits fonds subtidiaux, ont par ailleurs des caractéristiques géochimiques et minéralogiques argileuses similaires à celles des sédiments récents. Seuls les sédiments jurassiques se distinguent, mais restent proches de la référence shales. Il a également été vu précédemment que seuls les minéraux argileux permettaient de distinguer les différentes sources fossiles dans le mélange particulière. Malheureusement, au vu de la diversité des cortèges minéralogiques argileux, il n'est pas possible de les intégrer dans les équations de mélange.

(3) le mélange particulaire n'est pas seulement le résultat de la combinaison de trois sources.

Jusqu'alors trois pôles de mélange ont toujours été déduits et considérés, aussi bien par le traitement individuel des analyses géochimiques que par les résultats de l'analyse en composantes principales. Or, il apparaît dans la résolution d'un mélange selon trois pôles que la somme des contributions est rarement égale à 100 %. Cela signifie donc qu'il doit exister au moins une autre source, soit une quatrième source en matériel fin dans le système. Il ne faut donc pas essayer de résoudre une équation de mélange avec trois inconnues, mais avec quatre inconnues. L'équation serait du type :

$$A [Ex]_S + B [Ex]_M + C [Ex]_F + D [Ex]_Q = [Ex]_m$$

où Ex représente le marqueur particulaire, A, B, C et D les contributions relatives des pôles fluviatile (S), marin (M), fossile (F) et "quatrième" (Q), et m, la valeur mesurée.

Ce quatrième pôle peut correspondre soit à :

- une **source anthropique** : un endroit dans l'estuaire de la Seine, sur le littoral bas-normand ou dans la baie de Seine qui alimenterait en quelques éléments chimiques le système. Elle peut correspondre à un lieu de dépôt où les sédiments fins se sont accumulés au fil du temps et avec eux les éléments chimiques.

- une **source "mélange"**, ou appelée **source estuarienne**, c'est-à-dire un stock sédimentaire qui serait déjà le résultat d'un mélange de trois sources sédimentaires (au minimum), et qui correspondrait à un mélange de sédiments plus anciens (de quelques mois, à quelques années, voire quelques décennies).

Dans ces deux cas, il semble théoriquement aisé de résoudre une matrice 4x4. Il suffit en effet de reprendre la même méthode mathématique (méthode de Cramer) et de déterminer les contributions A, B, C et D. Le seul problème est qu'il n'est pas possible de définir ce quatrième pôle parmi les échantillons analysés : on ne peut pas attribuer une valeur pour $[Ex]_Q$.

Néanmoins, on peut faire l'hypothèse que $[Ex]_Q = a [Ex]_S + b [Ex]_M + c [Ex]_F$, c'est à dire la somme des sources d'un mélange à trois pôles et considérer que les concentrations des pôles restent invariantes dans le temps (ce qui ne semble pas être tout à fait le cas). Mais là encore, la résolution de cette matrice 3x3 nécessite la valeur de $[Ex]_Q$ pour trois marqueurs particuliers.

Il demeure donc impossible à l'heure actuelle de définir ce quatrième pôle, quel qu'il soit (source anthropique, ou source estuarienne).

II.3. Le mélange particulaire dans le système estuarien de la Seine

L'analyse statistique et la résolution des équations de mélange amènent à considérer le continuum Seine-baie de Seine comme un système "**hyper complexe**". Ces observations remettent en cause plusieurs caractéristiques essentielles du système estuarien de la Seine admises auparavant :

(1) les limites du mélange particulaire sont beaucoup plus étendues que celles définies jusqu'à présent.

Les études antérieures avaient déjà permis de distinguer deux zones dans l'estuaire de la Seine : une zone homogène dans l'estuaire aval et une zone hétérogène dans l'estuaire amont. Guézennec (1999) définit l'estuaire amont de la Seine comme une zone " piège " ou une zone " source " en fonction des conditions hydrologiques. Il explique que les apports provenant du fleuve Seine sont ainsi stockés dans l'estuaire amont et alimentent en matériel fin et sous

certaines conditions hydrologiques (hautes eaux saisonnières) l'estuaire aval. Il est possible également qu'une partie des apports amont du fleuve puisse transiter directement vers la baie et vers la Manche sans se déposer dans l'estuaire aval (Guézennec, 1999 ; Dupont *et al.*, 2001). En revanche, Boust (1981) met en évidence des caractéristiques géochimiques analogues des sédiments dans l'estuaire aval : il sous entend ainsi la présence d'un stock sédimentaire homogène dans toute cette partie de l'estuaire.

La présente étude confirme ces différentes observations. Dans l'estuaire amont, le stock sédimentaire est typique de la source fluviale, mais reste hautement fluctuant dans le temps et géographiquement. Dans l'estuaire aval, les sédiments fins sont beaucoup plus homogènes et mélangés, c'est le stock typique estuarien : il est très important et très bien installé (temps de résidence long). Entre les deux, il existe une sorte de seuil, à partir de La Bouille (PK260), qui donne l'apparence d'une non continuité entre les deux stocks sédimentaires. Les sédiments fins dans la partie aval de l'estuaire sont omniprésents, et font alors partie d'un système à forte rémanence, puisque ce stock sédimentaire est déjà la combinaison aboutie des stocks précédemment identifiés.

La limite aval de la zone " mélange " peut ainsi être étendue jusqu'à la baie de Seine. En effet, jusqu'à présent, la zone de " mélange " n'était considérée que limitée vers l'aval à l'embouchure de l'estuaire de la Seine. Or, les résultats obtenus par les analyses géochimiques et minéralogiques des argiles ont montré que les sédiments de la baie de la Seine sont le résultat d'apports très variés et sont similaires aux sédiments de l'estuaire aval. Ainsi, la baie de Seine constitue la majeure partie de cette zone " mélange ". Elle est donc définie à partir du PK260 dans l'estuaire de la Seine et s'étend au minimum depuis la longitude de Courseulles-sur-Mer à la latitude du Cap d'Antifer. Au-delà de ces limites, les analyses n'ont pas permis de conclure (Fig.4.19.).

Avec l'étude des cours d'eau côtiers, nos résultats montrent que la partie aval de ces petits fleuves constitue également une zone de mélange. L'influence du système estuarien de la Seine se fait alors sentir jusqu'à 15 Km dans l'Orne et jusqu'à 5 et 7 Km respectivement dans la Dives et la Touques (Fig.4.19.).

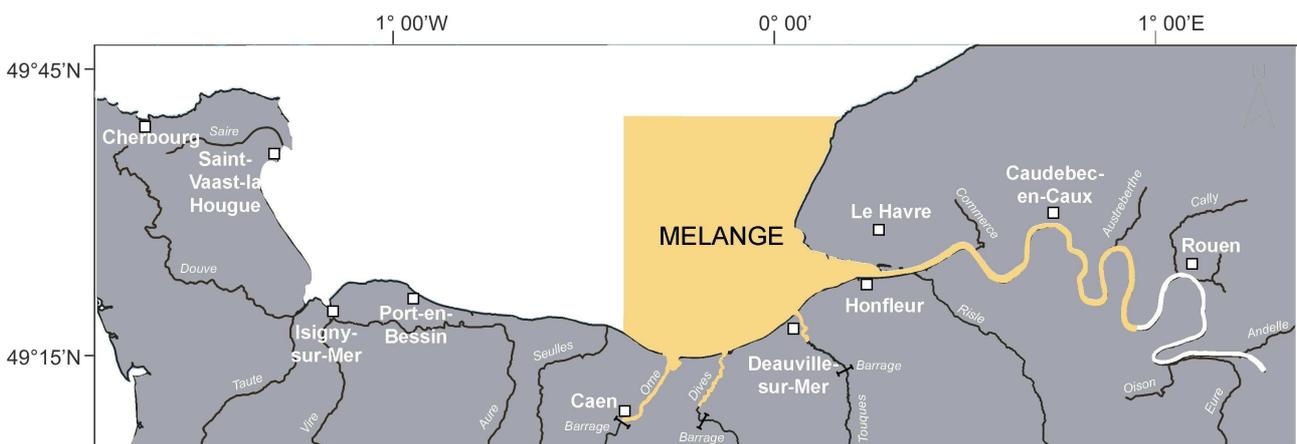


Figure 4.19. Limites de la zone de mélange dans le continuum Seine-baie de Seine.

(2) la sédimentation fine actuelle n'est pas uniquement le résultat du mélange d'un stock sédimentaire marin et d'un stock sédimentaire fluviale.

Les résultats de la géochimie et de la minéralogie des argiles des sédiments, du système estuarien, ont abouti au schéma d'une sédimentation fine actuelle issue d'un mélange de trois sources principales : fleuve, mer, fossile. Néanmoins, grâce à l'analyse statistique et aux équations

de mélange, on a vu que ces trois contributions ne suffisent pas à expliquer le mélange particulaire dans le système estuarien de la Seine.

Le nouveau schéma de la sédimentation fine actuelle ne se fonde plus sur un modèle simple à trois pôles mais sur un modèle à quatre pôles, auquel s'ajoute une combinaison de contributions de sources secondaires plus ou moins importantes et localisées et rend ce système estuarien hyper complexe.

Parmi ces sources secondaires, certains stocks sédimentaires, en terme de sources ou de puits, sont encore à l'heure actuelle mal connus :

- une partie inconnue de particules fines échappe au système par le jeu des courants de marée en direction de la Manche orientale ;

- un stock de particules fines est réintroduit dans les estuaires par pompage tidal, notamment pour l'estuaire de la Seine et l'estuaire de l'Orne ;

- une partie de particules fines est piégée par les ports de l'estuaire de la Seine (port de Rouen et du Havre, par exemple) et par ceux qui bordent la baie de Seine (port de Ouistreham, port de Port-en-Bessin, par exemple) ;

- des sédiments fins se déposent, ne sont plus réintroduits dans le système et contribuent à l'archivage sédimentaire. À très long terme, en revanche, ils peuvent être remis en suspension et réintégrer le système du fait de la dynamique estuarienne (déplacement des chenaux qui implique une remise en suspension des vasières littorales) ;

- une partie des sédiments fins, enfin, est déplacée de manière anthropique par les dragages vers d'autres parties du système. En effet, les volumes annuels de vases et de sables dragués pour le port du Havre sont estimés à 2,7 millions de m³ à l'endiguement, à 1,3 millions de m³ dans le chenal endigué amont (brèche), auxquels s'ajoutent 1,5 millions de m³ pour les travaux de Port 2000. Pour les ports du littoral bas-normand, les volumes sont plus faibles et sont estimés à 100 000 m³ pour Honfleur, 2 500 m³ pour Deauville-sur-Mer et à 500 000 m³ pour Ouistreham annuellement (PAR, 2003).

En résumé, la base du modèle sédimentaire à quatre pôles est constituée (Fig.4.20.) :

- d'une source marine, par un apport de sédiment fin depuis la Manche,

- d'une source fluviale, par un apport en matériel fin du fleuve Seine,

- d'une source fossile, issue de l'érosion du littoral bas-normand d'âge Mésozoïque-Cénozoïque, et de l'érosion des fonds fossiles tardi-holocènes de la baie et de l'estuaire de la Seine.

- d'une source appelée " estuarienne ", un stock sédimentaire plus ou moins âgé (de quelques jours à quelques années), qui forme des placages d'étendues variables dans la baie de Seine. Ces placages sont remis en suspension par les courants de marée et de houle et s'intègrent dans le système en fonction des conditions hydrodynamiques, mais également hydrologiques de la Seine.

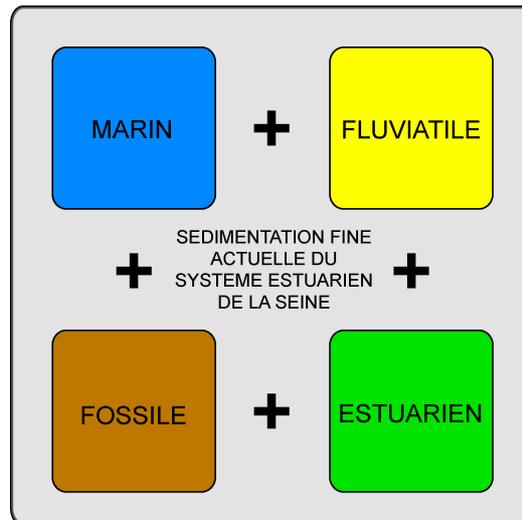


Figure 4.20. Schéma illustrant les bases de la sédimentation fine actuelle dans le système estuarien de la Seine.

Ce modèle semble plus simple maintenant à résoudre mais les stocks de la sédimentation fine actuelle peuvent varier selon l'échelle de temps considérée.

En effet, à très long terme et en dehors de phénomènes extrêmes (crues ou érosion littorale intense), le stock sédimentaire estuarien prédomine sur une grande partie du système étudié. Le schéma synthétique illustre parfaitement de telles conditions, des conditions rencontrées au cours de cette étude où les débits de la Seine n'ont pas atteint des seuils extrêmes et, au cours desquelles aucune variation saisonnière ou pluri-annuelle n'a été observée (Fig.4.21.). La sédimentation fine actuelle de l'estuaire amont est alors dominée par un stock de particules fines fluviales, l'estuaire aval et une partie de la baie de Seine orientale regroupent des sédiments à dominance estuarienne, avec la présence des stocks marin, fluviale et fossile. La baie de Seine occidentale est, au contraire, dominée par une sédimentation marine, hors de l'influence des apports de l'estuaire de la Seine. À l'intérieur de chaque cours d'eau côtier, la sédimentation fine actuelle dans les zones amont se caractérise par une source fluviale caractéristique (Orne, Dives et Touques).

Sur une échelle de temps plus courte, la sédimentation fine actuelle est plus difficile à expliciter. En effet, sous des conditions extrêmes, certaines sources peuvent en supplanter d'autres (Fig.4.22.) :

- en cas de tempêtes, ou de pluies importantes, des glissements de terrains en domaine littoral, peuvent alimenter le système en matériel fin. Cela n'a d'importance que sur une courte période et ne modifie le mélange particulaire que très localement (Dubrulle *et al.*, 2004 ; Dubrulle *et al.*, 2007). Les glissements de terrains de Villerville en janvier 1982 et de Criqueboeuf en février 1988 doivent en représenter de très bons exemples ;

- en période de fortes houles, les fonds holocènes subtidaux de la baie de Seine sont mis à nu et alimentent également le système en matériel fin. Ces apports se confondent, en revanche, avec le stock sédimentaire estuarien déjà prédominant dans la sédimentation fine de la baie de Seine et il est alors difficile de distinguer leurs contributions ;

- en conditions hydrologiques de hautes eaux saisonnières, la Seine et les cours d'eau côtiers alimentent le système en matériel fin d'origine fluviale. La sédimentation fine, dans une large partie amont de ces systèmes estuariens est dominée par un stock de particules fines

fluviales. Dans la partie aval, le bouchon vaseux, principalement celui de l'estuaire de la Seine, est en partie expulsé en baie de Seine ; il enrichit alors la baie de Seine en matériel estuarien. Dans de telles conditions, les apports intra-estuariens des affluents contribuent à alimenter la Seine, en matériel fin d'origines fluviales diverses ;

- d'importants stocks estuariens sont déplacés dans le système, au cours de crues longues et prolongées succédant à plusieurs années de débits faibles de la Seine, appelées " crues estuariennes ". Le bouchon vaseux est quasiment expulsé en baie de Seine et les vasières longeant les berges de l'estuaire sont pratiquement décapées. L'embouchure de l'estuaire de la Seine et la baie de Seine orientale sont alors constitués d'un matériel sédimentaire fin estuarien relativement homogène (Garnaud *et al.*, 2003). Dans les cas des cours d'eau côtiers, les données antérieures mettent en avant des phénomènes d'inondations intenses qui entraînent des apports importants de matériel fin depuis les bassins versants ; c'est le cas de l'Orne en janvier 1995 ;

- enfin, selon certaines périodes de l'année, la production biologique peut apporter du matériel fin dans le système. Lors du Programme National d'Environnements Côtiers (PNEC) Baie de Seine, les études menées sur les blooms planctoniques printaniers (au mois de mai généralement) ont montré que la fraction organique est plus importante dans les matières en suspension (24 à 34 %) situées à 2 m au dessus du fond, mais qu'elle se retrouve aussi dans le sédiment (13 à 19 %). Cela est dû à la fois à la remise en suspension différentielle des sédiments et au non dépôt des organismes vivants (Menesguen, 2003).

En résumé, sur une échelle à long terme, les sources qui contribuent à la sédimentation fine sont donc aisément identifiables, mais elles se révèlent plus complexes à court terme, lors d'événements particuliers ou extrêmes.

Cette complexité des apports dans le système estuarien rend donc presque impossible la quantification des contributions de chaque source, bien que l'identification par des marqueurs pertinents soit possible.

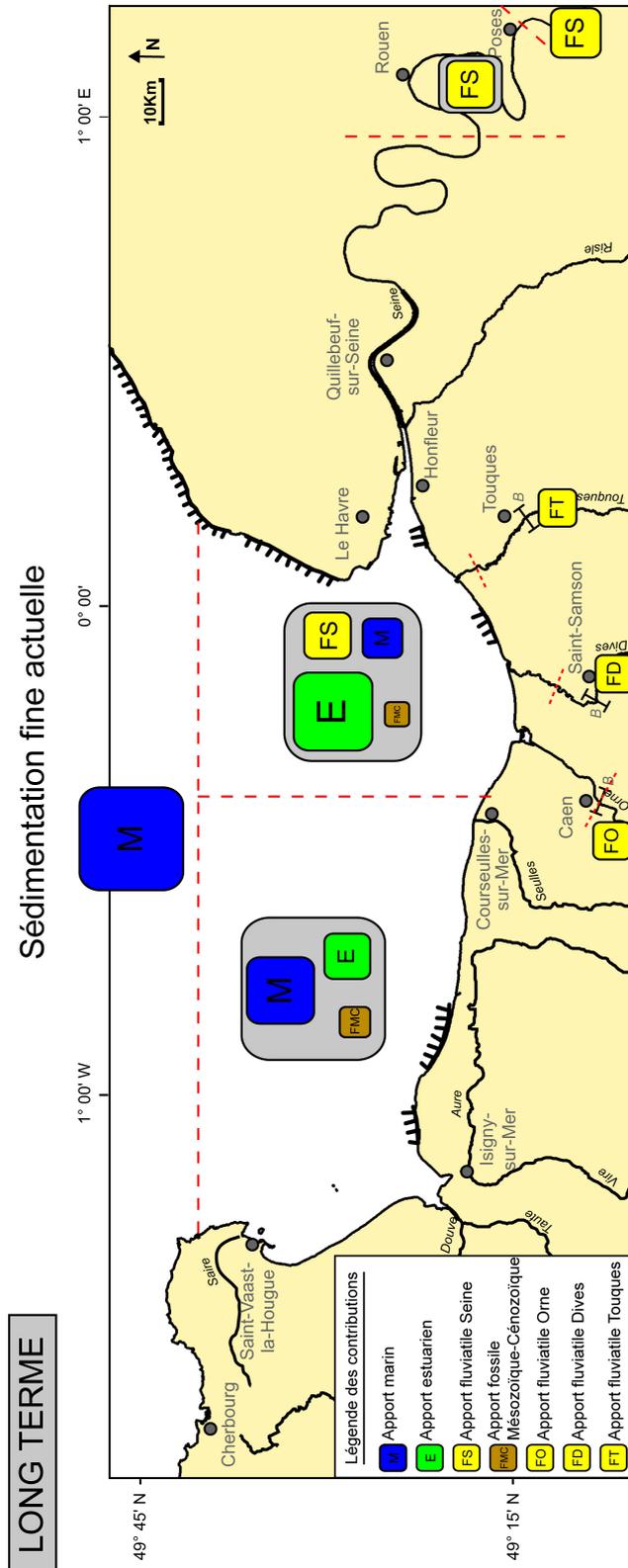
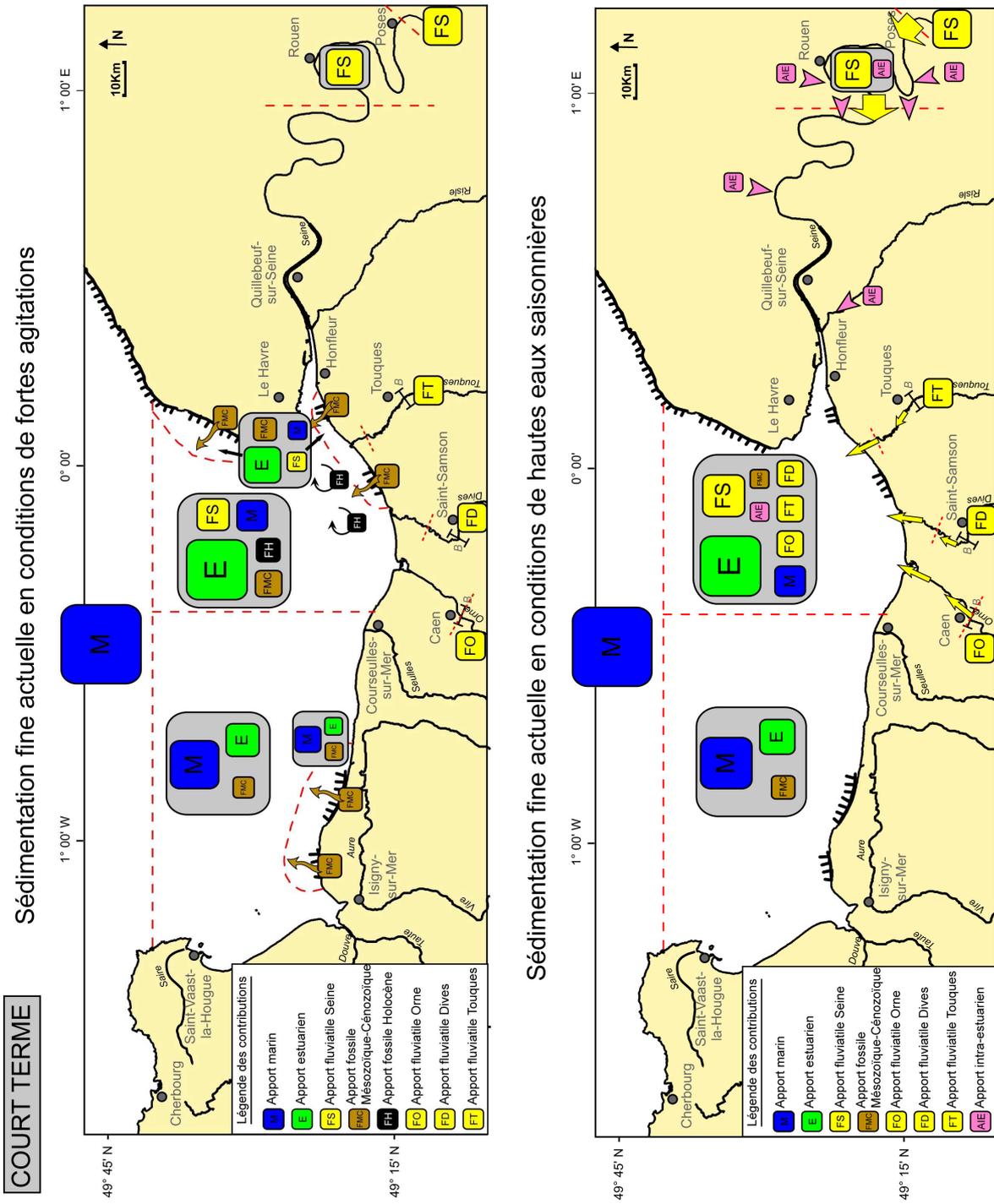


Figure 4.21. Les différentes contributions de la sédimentation fine actuelle à une longue échelle de temps (pluri-annuelle). Les lignes pointillées rouges correspondent aux limites géographiques des différents ensembles.



CONCLUSION

Le dernier chapitre clôt l'étude sur la sédimentation fine actuelle et les sources en matériel fin associées. La synthèse de chaque marqueur particulaire de la fraction fine permet de montrer ou de confirmer sur l'ensemble du système étudié :

- une pénétration de particules fines d'origine marine dans l'estuaire de la Seine jusqu'au PK250 (soit à 100 Km de l'embouchure), et dans les cours d'eau côtiers jusqu'à 15 Km pour l'Orne, 5 Km pour la Dives et 7 Km pour la Touques ;
- un apport de particules fines fluviales dans la baie de Seine et leur dilution ;
- un apport de matériel fin fossile local et ponctuel, dépendant des conditions hydrodynamiques et météorologiques.

La résolution du mélange particulaire selon trois pôles, représentatifs d'un stock sédimentaire, par une analyse statistique et des équations de mélange n'a pas permis, malgré les nombreux essais entrepris, d'expliquer dans sa totalité le mélange particulaire. En revanche, elle a mis en évidence l'émergence d'une quatrième source résultant déjà d'un mélange et appelée source estuarienne. Elle adopte le rôle d'un " tampon " et représente une part importante dans la sédimentation fine actuelle.

Au final, cette étude redéfinit les limites du système estuarien de la Seine. La zone de mélange, association de quatre principales sources (marine, fluviale, fossile et estuarienne), a ainsi pu être élargie. Elle intègre maintenant l'estuaire de la Seine, la baie de Seine orientale et se prolonge dans les cours d'eau côtiers bas-normands.

Sur une échelle à long terme (pluri-annuelle), la sédimentation fine actuelle est donc le résultat, dans des proportions restant encore indéterminées, d'un mélange entre quatre sources : marine, fluviale, fossile et estuarienne. Alors que sur une échelle de temps plus courte (saisonnière ou événementielle), le mélange particulaire est plus complexe : il n'est plus seulement la combinaison de quatre sources principales, mais fait intervenir des sources secondaires très diversifiées.

Conclusions générales

Cette thèse, pour la toute première fois, compile sur près de 300 échantillons de sédiments fins superficiels les données géochimiques (majeurs-mineurs-traces et radioactifs) et minéralogiques de la fraction fine (< 50 µm). L'étude considère également le système estuarien dans sa globalité (estuaire de la Seine, baie de Seine, littoral bas-normand, et cours d'eau côtiers bas-normands), intégrant à la fois le domaine intertidal et subtidal, et ce de manière quasi synchrone.

Les principaux acquis de ce travail ont donc permis de répondre à trois questions évoquées au tout début du manuscrit :

- quelles sont les caractéristiques sédimentaires, géochimiques et minéralogiques des sédiments fins du système estuarien de la Seine ?
- quelles sont les sources du matériel fin dans le continuum Seine-baie de Seine ?
- quelles sont les modalités de la sédimentation fine actuelle dans un tel environnement ?

Caractérisation des sédiments fins du système estuarien de la Seine

Du fait de la non représentativité pour un site donné de l'échantillon prélevé, la granulométrie de la fraction fine ne permet pas de conclure sur l'étude détaillée des populations granulométriques, mais elle renseigne sur la prédominance, la présence ou non de certaines d'entre elles à l'échelle de l'ensemble du système estuarien.

L'étude des minéraux argileux permet de distinguer des variations dans les cortèges selon la zone géographique. Ainsi, les proportions moyennes dans les sédiments superficiels du système étudié sont :

- de 50 % de smectites, 25 à 35 % de kaolinite, 15 à 20 % d'illite, 5 % du minéral (10-C) et la présence d'autres minéraux interstratifiés pour l'estuaire de la Seine ;

- de 30 % de smectites, ou 30 % de chlorite pour le nord Cotentin, 30 à 40 % de kaolinite, 30 % d'illite, 5 à 10 % du minéral (10-C) et 15 % d'autres minéraux interstratifiés sur le littoral ouest bas-normand ;

- de 30 à 40 % de smectites, 30 % de kaolinite, 20 % d'illite, 10 % du minéral (10-C) et la présence d'autres minéraux interstratifiés sur le littoral est bas-normand ;

- de 60 % de smectites, de chlorite ou de chlorite gonflante, 25 % de kaolinite, 15 à 20 % d'illite, 15 % du minéral (10-C) et 20 à 30 % d'autres minéraux interstratifiés pour le domaine subtidal de la baie de Seine ;

- pour l'Orne, les proportions dans la partie amont sont de 20 à 40 % de vermiculite, 35 % de kaolinite, 20 à 25 % d'illite, 5 à 10 % du minéral (10-C) ; tandis que dans la partie aval, elles sont composées de 30 à 50 % du minéral Sm-(V-Sm) ou V-(V-Sm), 30 % de kaolinite, 25 % d'illite et de 5 à 10 % du minéral (10-C) ;

- pour la Dives et la Touques, les cortèges des minéraux argileux sont identiques et varient peu de l'amont vers l'aval, seules les proportions varient : elles sont de 30 à 40 % du minéral Sm-(C-V), 25 % de kaolinite, 20 % d'illite et 5-10 % du minéral (10-C) pour la Dives et de 30 à 70 % du minéral Sm-(C-V), 25 % de kaolinite, 20 % d'illite et 5-10 % du minéral (10-C) pour la Touques.

Les cortèges des minéraux argileux des sédiments récents apparaissent comme le résultat de l'érosion des formations géologiques et superficielles des différents bassins rencontrés. Avec l'ensemble des données consultées, les minéraux argileux permettent ainsi de définir que les sédiments fins actuels du système estuarien de la Seine sont soit d'origine fossile, soit d'origine

fluviatile. L'origine marine peut être envisagée mais aucune donnée récente ne permet de conforter cette hypothèse.

Sur l'ensemble des résultats acquis, aucun minéral argileux des bassins versants ne se distingue particulièrement dans le cortège du sédiment actuel de la zone Seine-Aval. Les seules différences se situent dans le nord Cotentin, où la présence de la chlorite est mise en relation avec les massifs granitiques, et dans l'Orne amont, la Dives et la Touques, où la présence de la vermiculite est le témoin de l'érosion des dépôts loessiques.

Les éléments majeurs-mineurs-traces permettent d'établir une " carte d'identité chimique " des sédiments fins superficiels.

Pour l'estuaire de la Seine, ils distinguent deux stocks sédimentaires distincts avec une zone hétérogène dans l'estuaire amont (entre les PK200 et PK250), une zone de transition (entre les PK250 et PK310), et une zone homogène dans le reste de l'estuaire aval (du PK310 à l'embouchure de l'estuaire). La zone industrielle voisine de Rouen s'avère être une zone enrichie en certains éléments chimiques, source probable des éléments les plus enrichis dans l'estuaire aval. Sur le littoral bas-normand et en baie de Seine, les données acquises montrent des teneurs qui diminuent progressivement en s'éloignant de l'influence de la source Seine. Dans l'embouchure, une aire dont les caractéristiques sont similaires à celles de la zone industrielle de Rouen est mise en évidence, interprétée comme liée aux activités de dragages. Dans les cours d'eau côtiers de l'est de la baie de Seine, l'influence de l'estuaire de la Seine est toujours présente dans la partie aval, témoignant de l'influence de l'asymétrie de la marée ; néanmoins les signaux des stocks sédimentaires fluviatiles de l'Orne, de la Dives et de la Touques se distinguent, notamment dans la partie la plus amont des bas cours échantillonnés.

Les radionucléides d'origine artificielle sont présents dans les sédiments de l'ensemble du continuum Seine-baie de Seine. Leur source marine étant connue (ils proviennent des rejets de l'usine de retraits des combustibles usés AREVA, au Cap de la Hague), il est aisé de déterminer l'origine du matériel analysé. L'activité du cobalt 60 décroît de manière importante vers l'est et le sud de la baie de Seine. Cependant, sa présence a été détectée dans l'estuaire de la Seine, à plus de 100 Km de l'embouchure, dans l'Orne, la Dives et la Touques (respectivement 15, 8 et 4 Km de l'embouchure) et sur l'intégralité du littoral bas-normand et de la baie de Seine. Cela confirme alors que le matériel fin échantillonné dans le système estuarien est au moins pour partie d'origine marine.

Origines des particules fines dans le continuum Seine-baie de Seine

La géochimie et la minéralogie des argiles des sédiments fins du continuum ont montré que la sédimentation fine actuelle est le résultat d'un mélange entre trois principales sources :

- une pénétration des particules fines d'origine marine dans l'estuaire de la Seine et des cours d'eau côtiers adjacents à la baie de Seine,
- une dilution du matériel fin de la Seine fluviale enrichie des apports intra-estuariens (bassins versants, apports anthropiques) en baie de Seine,
- un apport ponctuel et local de matériel fin fossile, fluctuant selon les conditions hydrodynamiques et météorologiques.

L'utilisation d'une méthode statistique (ACP) permet de définir les bases du modèle de mélange et de confirmer qu'il existe bien un mélange de trois pôles sédimentaires. Néanmoins, il suggère également l'existence d'un quatrième pôle.

La résolution du mélange particulière par des équations de mélange selon trois pôles ne permet pas d'établir les proportions des trois contributions. Il faut tenir compte d'une contribution supplémentaire dans la sédimentation fine actuelle : une source estuarienne, elle-même résultat du mélange plus ancien de trois sources (marine, fluviale et fossile).

Sédimentation fine actuelle à différentes échelles de temps

Le système estuarien de la Seine est donc un système **hyper complexe** dont les limites aval sont étendues. La zone de mélange, qui résulte de la combinaison de quatre sources sédimentaires (marine, fluviale, fossile et estuarienne) s'étend maintenant dans l'estuaire de la Seine (PK250), dans les cours d'eau côtiers et intègre la baie de Seine orientale. Cette zone de mélange est caractérisée par une très forte dynamique de la masse d'eau (agitation dans des faibles profondeurs, forts courants de marée) et par des renouvellements de sédiments d'origine anthropique (secteurs dragués et zones de rejets de dragage).

Les modalités de la sédimentation fine actuelle dans le continuum Seine-baie de Seine ne peuvent plus être généralisées en considérant une même échelle de temps. Ainsi, il faut distinguer la sédimentation fine à longue et courte échelle de temps :

- à la plus longue échelle de temps, plusieurs décennies, la sédimentation fine est le résultat du mélange de quatre sources (marine, fluviale, fossile et estuarienne), avec des proportions de la source estuarienne importantes mais variables selon le lieu géographique du système,

- à la plus courte échelle de temps (événementielle, saisonnière), la sédimentation fine est fortement influencée par des sources pouvant avoir des conséquences contradictoires. Alors que les apports locaux (sources d'importance généralement secondaire) peuvent être ressentis en un lieu donné (e. g. les glissements de falaises fossiles argileuses sur les plages qui les bordent), la source estuarienne, reconstituée pendant les années de plus faibles débits fluviaux, peut probablement l'emporter lors d'événements des premières fortes crues qui les suivent (" crues estuariennes "), combinés à la source fluviale vraie.

Perspectives

Cette nouvelle vision du système estuarien de la Seine amène à poursuivre les investigations sur le matériel fin, l'objectif principal étant de pouvoir, un jour, quantifier les contributions de chaque source évoquée dans ce travail. Pour cela plusieurs pistes existent :

- mieux définir les sources (notamment les données sur les sources en matériel fossile, dont les résultats datent de plus de 30 ans), ou choisir des marqueurs particuliers plus appropriés.

- tester et améliorer les modèles de mélange non pas sur le système estuarien de la Seine mais sur des plus petits systèmes estuariens, tels que les cours d'eau côtiers du littoral bas-normand où les sources sont plus facilement identifiables.

Les années d'échantillonnage n'ont pas coïncidé avec de très forts débits de la Seine, il apparaît donc important d'intégrer de nouveaux échantillonnages après des épisodes de hautes eaux saisonnières significatives sur l'ensemble du système étudié.

Depuis les travaux du port du Havre, il semble nécessaire d'effectuer dans le système estuarien une nouvelle reconnaissance du matériel sédimentaire et des conditions hydrodynamiques, qui ont certainement été modifiés ; et de poursuivre les prélèvements en quelques sites ateliers pour conserver le suivi sédimentaire sur l'ensemble du système.

Enfin, ce travail ne constitue qu'une contribution de l'ensemble constitué par le projet MEDIUM initié il y a maintenant quatre ans. Il faut, dès lors, intégrer les données acquises par d'autres chercheurs, notamment sur un affluent de la Seine, la Risle ; et essayer de donner une dimension verticale en combinant les travaux de cette thèse à ceux obtenus par N. Delsinne sur le prisme d'embouchure. Ce sont ces prochains objectifs qui m'attendent pendant mon projet post-doctoral pour les mois à venir.

Références bibliographiques

A

- ALAGARSAMY R. (2006). Distribution and seasonal variation of trace metals in surface sediments of the Mandovi estuary, west coast of India. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 67 (1-2), 333-339.
- ALBANI A., SERANDREI BARBERO R. et DONNICI S. (2007). Foraminifera as ecological indicators in the Lagoon of Venice. *Italy Ecological Indicators* 7(2), 239-253.
- ALIMÈRE H. et CAILLÈRE S. (1964a). Quelques considérations sur les successions climatiques au Quaternaire déduites de l'étude des argiles des sédiments des Pyrénées, de la Bigorre et du Béarn. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris* 258, 5475-5478.
- ALIMÈRE H. et CAILLÈRE S. (1964b). Caractérisation des nappes quaternaires des Pyrénées, de la Bigorre et du Béarn par les minéraux argileux et essai d'interprétation climatique. *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest, Toulouse* 35, 373-396.
- ALLER R. C. et COCHRAN J. K. (1976). ^{234}Th - ^{238}U disequilibrium and diagenetic time scales. *Earth and Planetary Science Letters* 29, 37-50.
- ALTABET M. A. (1996). Nitrogen and carbon isotopic tracers of the source and transformation of particles in the deep sea. In "Particle flux in the ocean", V. Ittekkot, S. Honjo and P.J. Depetris - John Wiley & Sons Ltd (éd.). *SCOPE* 56 (8), 155-184.
- AMINOT A., GUILLAUD, J. F. et KÉROUEL, R. (1997). La Baie de Seine, hydrologie, nutriments et chlorophylle (1978-1994). Ifremer (éd.), *Repères Océan*, Brest 14, 148 p.
- ANANTHA M. G. et NIGAM R. (1984). Benthic foraminifera as pollution indices in the marine environment of west coast of India. *Rivista Italiana di Paleontologiae Stratigrafia*, Milano 89, 421-436.
- ANGUENOT F. et MONACO A. (1967). Étude de transits sédimentaires sur le littoral du Roussillon, par la méthode des traceurs radioactifs. *Cahiers Océanographiques* 7, 579-589.
- ARAUJO M. F., JOUANNEAU J. M., VALERIO P., BARBOSA T., GOUVEIA A., WÉBER O., OLIVEIRA A., RODRIGUES A. et DIAS J.M.A. (2002). Geochemical tracers of northern Portuguese estuarine sediments on the shelf. *Progress in Oceanography* 52, 277-297.
- ARMYNOT DU CHATELET E., DEBENAY J. P. et SOULARD R. (2004). Foraminiferal proxies for pollution monitoring in moderately polluted harbors. *Environmental Pollution* 127 (1), 27-40.
- AUBRY J. (1982). Formations permienes et triasiques du Bassin de Carentan : quelques aspects de la distinction entre deux formations. Thèse 3^{ème} cycle. Univ. Caen. 312 p.

- AUFFRET J. P. et D'OUZOUVILLE L. (1986). Apports de l'imagerie fournie par le sonar à balayage latéral à la connaissance de la dynamique sédimentaire en Baie de Seine. *La Baie de Seine (GRECO-MANCHE)*. Univ. Caen. Ifremer (éd.). 201-209.
- AVOINE J. (1981). L'estuaire de la Seine : sédiments et dynamique sédimentaire. Thèse 3^{ème} cycle. Univ. Caen. 236 p.
- AVOINE J. (1986). Sediment exchanges between the Seine estuary and its adjacent shelf. *Journal of the Geological Society*, London 144, 135-148.
- AVOINE J. (1992). Étude d'impact de la deuxième passerelle transmanche de Caen-Ouistreham - Étude de la dispersion des rejets de dragages à l'aide de traceurs fluorescents. Rapport DDE Calvados. 70 p.
- AVOINE J. (1994). Synthèse des connaissances sur l'estuaire de la Seine. Rapport d'étude, Ifremer - Port autonome du Havre, Brest. 153 p.
- AVOINE J., ALLEN J. P., NICHOLS M., SALOMON J. C. et LARSONNEUR C. (1981). Suspended-sediment transport in the Seine estuary, France : effect of man-made modification on estuary-shelf sedimentology. *Marine Geology* 40, 119-137.
- AVOINE J., CREVEL L., DUBRULLE L., BOUST D. et GUÉGUÉNIAT P. (1984). Sédiments et dynamique sédimentaire en Baie de Seine. *Sociétés Hydrotechniques de France, XVII^{ème} Journées de l'hydraulique*, Marseille, I.3.1-I.3.8.
- AVOINE J., BOUST D. et GUILLAUD J. F. (1986). Flux et comportement des contaminants dissous et particulaires dans l'estuaire de la Seine. *Rapports et procès-verbaux des réunions - Conseil international pour l'exploration de la mer* 186, 392-411.
- AVOINE J., TÉXIER H. et QUILLARD J. (1993). Les rejets de dragage du port Caen-Ouistreham. Impacts hydrosédimentaires et géochimiques. Univ. Caen. 9 p.
- AVOINE J., LESUEUR P. et ROUAULT T. (1996). Evolution morphologique et couverture sédimentaire de l'estuaire de la Seine. Actualisation et fluctuations. Rapport programme Seine-Aval 1995/FIN-1, Thème Hydrodynamique et transport sédimentaire, 2-20.

B

- BAILLY DU BOIS P. et GUÉGUÉNIAT P. (1999). Quantitative assessment of dissolved radiotracers in the English Channel : Sources, average impact of la Hague reprocessing plant and conservative behaviour (1983, 1986, 1988, 1994). *Continental Shelf Research* 19 (15-16), 1977-2002.
- BAIZE S. (1998). Tectonique, eustatisme et climat dans un système géomorphologique côtier, le Nord-Ouest de la France au Plio-Pléistocène : exemple du Cotentin (Normandie). Thèse Doc. Univ. Caen. 333 p. Document BRGM, 289 [1999], 366 p.
- BAKALOWICZ M. (1979). Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de sa karstification. Thèse Doc. Univ. Paris VI. 269 p.

- BAKALOWICZ M. (1994). Water geochemistry : water quality and dynamics. *Groundwater Ecology*, 97-127.
- BASAHAM A. S. et EL-SAYED M. A. (1998). Distribution and Phase Association of Some Major and Trace Elements in the Arabian Gulf Sediments. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 46 (2), 185-194.
- BEN OTHMAN D., LUCK J. M. et TOURNOUD M. G. (1997). Geochemistry and water dynamics : application to short time-scale flood phenomena in a small Mediterranean catchment : I. Alkalis, alkali-earths and Sr isotopes. *Chemical Geology* 140 (1-2), 9-28.
- BERTINE K. K. et GOLDBERG E. D. (1973). History of heavy metal pollution in southern California coastal zone. *Environmental Science Technology* 11, 297-299.
- BERTRAN A. (2001). Dispersion en Manche des particules sédimentaires marquées par le ⁶⁰Co rejeté par l'usine de retraitement COGEMA - LA HAGUE. Rapport de maîtrise. Univ. Caen. 44 p.
- BILLY C. (1964). Etude minéralogique des sables côtiers de la Manche entre l'estuaire de la Dives et l'estuaire de la Somme. *Revue de géographie physique et de géologie dynamique* 2, 123-154.
- BISCAYE P. E. (1965). Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans. *Geological Society of America Bulletin* 76, 803-832.
- BLASHCHISHIN A. I. (1976). Mineralnyj sostav domnykh osadkov. In : Gudelis, V.K., Emelyanov, E.M. (éd.), *Geologiya Baltijskogo Morya. Mokslas*, Vilnius. (en Russe). 221-255.
- BLATT H. (1985). Provenance studies and mudrocks. *Journal of Sedimentary Petrology* 55 (1), 59-75.
- BLATT H., MIDDLETON G. et MURRAY R. (1972). *Origin of Sedimentary Rocks*. Prentice-Hall, Inc., New Jersey. 634 p.
- BODERGAT A. M., IK EYA N. et IR ZI Z. (1998). Domestic and industrial pollution : use of Ostracods (Crustacea) as sentinels in the marine coastal environments. *Journal de la Recherche Océanographique* 23, 139-144.
- BODERGAT A. M., ISHIZAKI K., OKI K. et RIO M. (2002). Currents, civilization, or volcanism? Ostracodes as sentinels in a patchy environment : Kagoshima Bay, Japan. *Micropaleontology* 48, 285-299.
- BOLSUNOVSKY A. Y. et BONDAREVA L. G. (2003). Tritium in surface waters of the Yenisei River basin. *Journal of Environmental Radioactivity* 66 (3), 285-294.

- BOOMER I. (1993). Palaeoenvironmental indicators from Late Holocene and contemporary ostracoda of the Aral Sea. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 103 (3-4), 141-153.
- BOURCART J. et FRANCIS-BŒUF C. (1942). La vase. Hermann (éd.). *Actualités scientifiques et industrielles : sédiments et sédimentation* 1, 1-67.
- BOUST D. (1981). Les métaux-traces dans l'estuaire de la Seine et ses abords. Thèse 3^{ème} cycle. Univ. Caen. 207 p.
- BOUST D. (1998). Contribution de l'analyse des radionucléides naturels et artificiels à la compréhension des processus hydrosédimentaires dans l'estuaire de la Seine. Programme scientifique Seine-Aval. Thème hydrodynamique et transport sédimentaire. *Rapport SERE 98/020(P)*. 10 p.
- BOUST D. (1999). Distribution and inventories of some artificial and naturally occurring radionuclides in medium to coarse-grained sediments of the channel. *Continental Shelf Research* 19 (15-16), 1959-1975.
- BOUST D., JOUANNEAU J. M. et LATOUCHE C. (1981). Méthodologie d'interprétation des teneurs totales en métaux traces contenus dans les sédiments estuariens et littoraux. *Bulletin de l'Institut de Géologie du Bassin d'Aquitaine* 30, 71-86.
- BOUST D., ROZET M., SOLIER L., DUPONT J. P., LAFITE R. et FICHT A. (1999). Contribution de l'analyse des radionucléides naturels et artificiels à la compréhension des processus hydrosédimentaires dans l'estuaire amont de la Seine. Programme scientifique Seine-Aval. Thème hydrodynamique et transport sédimentaire. *Rapport DPRE/SERNAT/99-12*. 11 p.
- BOUST D., LESUEUR P., ROZET M., SOLIER L. et FICHT A. (2002). The dynamics of ⁶⁰Co labelled sediment particles in the Seine estuary. *Radioprotection - Colloques* 37 (C1), 749-754.
- BOUTIER B., CHIFFOLEAU J. F., AUGER D. et TRUQUET I. (1993). Influence of the Loire River on dissolved lead and cadmium concentrations in coastal waters of Brittany. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 36 (2), 133-145.
- BOUTIER B., CHIFFOLEAU J. F., GONZALEZ J. L., LAZURE P., AUGER D. et TRUQUET I. (2000). Influence of the Gironde estuary outputs on cadmium concentrations in the waters : consequences on the Marennes-Oleron bay (France). *Oceanologica Acta* 23 (7), 745-757.
- BRAJNIKOV B. (1942). Sur les associations de minéraux lourds dans quelques formations post-crétacées du Bassin Parisien (région du Sud de la Seine). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, 491-493.
- BRAJNIKOV B. (1947). Le problème de l'origine des alluvions dans l'Estuaire de la Seine. *Bulletin Océanographique* 916, 28 p.

- BRIGGS L. I. (1965). Heavy mineral correlations and provenances. *Journal of Sedimentary Petrology* 35 (4), 939-955.
- BRUNET C., BRYLINSKI J. M., BODINEAU L., THOUMELIN G., BENTLEY D. et HILDE D. (1996). Phytoplankton dynamics during the spring bloom in the south-eastern English Channel. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 43, 469-483.
- BRUNSKILL G. J., ORPIN A. R., ZAGORSKIS I., WOOLFE K. J. et ELLISON J. (2001). Geochemistry and particle size of surface sediments of Exmouth Gulf, Northwest Shelf, Australia. *Continental Shelf Research* 21 (2), 157-201.
- BUCKLEY D. E. et CRANSTON R. E. (1991). The use of grain size information in marine geochemistry. In : Syvitski, J.P.M. (éd.), Principles, Methods, and Application of Particle Size Analysis. *Cambridge University Press, Cambridge*. 311-331.

C

- CAMUZARD J. P. (2000). Les sols marqueurs de la dynamique des systèmes géomorphologiques continentaux. Thèse Doc. Univ. Caen. 509 p.
- CAPLAT C. (2001). Caractérisation géochimique de sédiments fins du littoral du Calvados (Baie de Seine). Thèse Doc. Univ. Caen. 225 p.
- CARLSON C. E. A. et MORRISON G. M. (1992). Fractionation and toxicity of metals in sewage sludge. *Environmental Technology* 13, 751-759.
- CATO I. (1977). Recent sedimentological and geochemical conditions and pollution problems in two marine areas in Soutwestern Sweden. *Striae* 6, 1-150.
- CHABERT D'HIÈRES G. et LE PROVOST C. (1978). Atlas des composantes harmoniques de la marée dans la Manche. *Annales hydrographiques, Paris*, 46, 5-35.
- CHAMLEY H. (1971). Recherches sur la sédimentation argileuse en Méditerranée. *Sciences Géologiques* 35, 209 p.
- CHAMLEY H. (1989). Clay sedimentology. Springer-Verlag (éd.). 623 p.
- CHAN L. S., NG S. L., DAVIS A. M., YIM W. W. S. et YEUNG C. H. (2001). Magnetic properties and heavy-metal contents of contaminated seabed sediments of Penny's Bay, Hong Kong. *Marine Pollution Bulletin* 42, 569-583.
- CHAPPELL J., ZHENG H., et FIFIELD K. (2006). Yangtse River sediments and erosion rates from source to sink traced with cosmogenic ¹⁰Be : Sediments from major rivers. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology Monsoon and Tectonics of Asia, IGCP 476, *Monsoons and Tectonics* 241 (1), 79-94.
- CHARMASSON S. (2003). ¹³⁷Cs inventory in sediment near the Rhone mouth : role played by different sources. Inventaires de ¹³⁷Cs dans les sédiments à l'embouchure du Rhône : contribution des différentes sources. *Oceanologica Acta* 26 (4), 435-441.

- CHAUCHAT J. (2007). Contribution à la modélisation diphasique du transport sédimentaire en milieux côtiers et estuariens. Thèse Doc. Univ. Caen. 219 p.
- CHAUVIN P., FREGER G. et GUYADER J. (1985). Synthèse des connaissances sur les effets du dépôt de dragage d'Octeville. La Baie de Seine (GRECO MANCHE), Colloque National du CNRS (Caen 1985), *Actes de Colloques n°4*, Ifremer (éd.). 465-470.
- CHEN Z. T., XU L., HONG H. S. (1997). Heavy metals at the sediment-water interface of estuary : a review. *Advances in Earth Sciences* 12 (5), 434-439 (en Chinois, résumé en Anglais).
- CHIFFOLEAU J. F., CLAISSE D., COSSA D., FICHT A., GONZALEZ J. L., GUYOT T., MICHEL P., MIRAMAND P., OGER C. et PETIT F. (2001). La contamination métallique. Fascicule du Programme Scientifique Seine Aval, Ifremer (éd.). 40 p.
- CHIFFOLEAU J. F., COSSA D., AUGER D. et TRUQUET I. (1994). Trace metal distribution, partition and fluxes in the Seine estuary (France) in low discharge regime. *Marine Chemistry* 47, 145-158.
- CHO Y. G., LEE C. B., et CHOI M. S. (1999). Geochemistry of surface sediments off the southern and western coasts of Korea. *Marine Geology* 159 (1-4), 111-129.
- CHOW T. J., BRULAND K. W., BERTINE K. et SOUTAR A. (1973). Lead pollution in Southern California coastal sediments. *Science* 181, 551-552.
- CHRISTIE M. C., DYER K. R., et TURNER P. (1999). Sediment Flux and Bed Level Measurements from a Macro Tidal Mudflat. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 49 (5), 667-688.
- CIFUENTES L. A., SHARP J. H., FOGEL M. L. (1988). Stable carbon and nitrogen isotope biogeochemistry in the Delaware estuary. *Limnology and Oceanography* 33 (5), 1102-1115.
- CLET-PELLERIN M., DUPEUBLE P. A., HELLUIN M., LEFEBVRE D., PELLERIN J., BREBION P., LAURIAT-RAGE A., LAUTRIDOU J. P. et RIOULT M. (1987). Les formations marines et continentales du Pléistocène récent dans la région d'Asnelles-Saint-Côme-de-Fresné (Calvados). *Bulletin du Centre de Géomorphologie du CNRS-Caen* 32, 71-98.
- CLET-PELLERIN M., HUAULT M. F., LARSONNEUR C., PELLERIN J. (1976). La basse vallée de l'Orne, le remblaiement périglaciaire et post-glaciaire, l'évolution paléogéographique et l'histoire de la végétation. *Bulletin de la Société Linnéenne de Normandie* 105, 23-44.
- COUTARD S. (2003). Formations quaternaires en bordure d'une mer épicontinentale, la Manche. Tectonique, eustatisme, climat et occupations humaines. Exemple du Val de Saire (Normandie, France). Thèse Doc. Univ. Caen. 446 p.
- CREVEL L. (1983). Contribution à l'étude de la dynamique sédimentaire dans la partie nord-orientale de la baie de Seine. Thèse 3^{ème} cycle. Univ. Caen. 179 p.

CRUSIUS J., BOTHNER M. H., et SOMMERFIELD C. K. (2004). Bioturbation depths, rates and processes in Massachusetts Bay sediments inferred from modeling of ^{210}Pb and $^{239,240}\text{Pu}$ profiles. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 61 (4), 643-655.

CUNDY A. B., CROUDACE I. W., THOMSON J. et LEWIS J. T. (1997). Reliability of salt marshes as "geochemical recorders" of pollution input: a case study from contrasting estuaries in Southern England. *Environmental Science and Technology* 31, 1093-1101.

D

DALRYMPLE R. W., ZAITLIN B. A. et BOYD R. (1992). Estuarine facies models : conceptual basis and stratigraphic implication. *Journal of Sedimentary Petrology* 62 (6), 1130-1146.

DE BRABANDERE L., DEHAIRS F., VAN DAMME S., BRION N., MEIRE P. et DARO N. (2002). $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ dynamics of suspended organic matter in freshwater and brackish waters of the Scheldt estuary. *Journal of Sea Research* 48, 1-15.

DELCAILLAU B., OZOUF J. C., MASIÉE D., LAVILLE E. et COUTARD J. P. (1998). Évolution géomorphologique d'un bassin versant côtier : l'exemple de la Touques (Basse-Normandie). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, 326, 609-615.

DELOFFRE J. (2005). La sédimentation fine sur les vasières intertidales en estuaires macrotidaux. Processus, quantification et modélisation de l'échelle semi-diurne à l'échelle annuelle. Thèse Doc. Univ. Rouen. 236 p.

DELOFFRE J., LAFITE R., LESUEUR P., LESOURD S., VERNEY R. et GUÉZENNEC L. (2005). Sedimentary processes on an intertidal mudflat in the upper macrotidal Seine estuary, France. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 64 (4), 710-720.

DELOFFRE J., VERNEY R., LAFITE R., LESUEUR P., LESOURD S. et CUNDY A. B. (2007). Sedimentation on intertidal mudflats in the lower part of macrotidal estuaries : Sedimentation rythms and their preservation. *Marine Geology* 241 (1-4), 19-32.

DELSINNE N. (2005). Evolution pluri-annuelle du prisme sédimentaire d'embouchure de la Seine. Facteurs de contrôle naturels et d'origine anthropique. Thèse Doc. Univ. Caen. 180 p.

DIBB J. E. (2007). Vertical mixing above Summit, Greenland : Insights into seasonal and high frequency variability from the radionuclide tracers ^7Be and ^{210}Pb . *Atmospheric Environment* 41 (24), 5020-5030.

DIBB J. E. et RICE D. L. (1989). Temporal and spatial distribution of beryllium-7 in the sediments of Chesapeake Bay. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 28, 395-406.

DIEKMANN B. et KUHN G. (1999). Provenance and dispersal of glacial-marine surface sediments in the Weddell Sea and adjoining areas, Antarctica : ice-rafting versus current transport. *Marine Geology* 158 (1-4), 209-231.

- DI-GIOVANNI C., DISNAR J. R., BICHET V. et CAMPY M. (1998). Meso-Cenozoic organic matter in present humus layers (Chailexon basin, Doubs, France). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, Paris, 326, 553-559.
- DI-GIOVANNI C., DISNAR J. R., TURPIN S. et BREHERET J. G. (1999). Contribution of reworked organic matter in soils and present lacustrine sediments (Peysniers basin, Hautes-Alpes, France) : preliminary results. *Bulletin de la Société Géologique de France*, Paris, 170 (2), 121-129.
- DIONNE J. C. (1963). Vers une définition plus adéquate de l'estuaire du Saint-Laurent. *Zeitschrift für Geomorphologie* 7(1), 36-44.
- DONAZZOLO R., MERLIN O. H., MENEGAZZO VITTURI L., ORIO A. A., PAVONI B., PERIN G. et RABITTI S. (1981). Heavy metal contamination in surface sediments from the Gulf of Venice, Italy. *Marine Pollution Bulletin* 12, 417-425.
- DORÉ F. et PONCET J. (1978). Notice explicative carte géologique de la France (1/50000), La Haye du Puits. XII-12. BRGM Orléans, 116, 25 p.
- DUBRULLE C., JOUANNEAU J. M., LESUEUR P., BOURILLET J. F. et WÉBER O. (2007). Nature and rates of fine-sedimentation on a mid-shelf : "La Grande Vasière" (Bay of Biscay, France). *Continental Shelf Research* 27, 2099-2115.
- DUBRULLE C., LESUEUR P., BOUST D., DUGUÉ O., POUPINET N. et LAFITE R. (2007). Source discrimination of fine-grained deposits occurring on marine beaches : The Calvados beaches (eastern Bay of the Seine, France). *Estuarine Coastal and Shelf Science* 72, 138-154.
- DUBRULLE C., LESUEUR P., BOUST D., POUPINET N., DUGUÉ O., ROZET M., SOLIER L. et BRUN-COTTAN J. C. (2004). Contribution à la compréhension des processus d'envasement du littoral du Calvados par l'utilisation de marqueurs particuliers. *Groupement d'Intérêt Public Seine Aval, Rapport 2003-2004* (Thème Zones Connexes). 57 p.
- DUBRULLE C., SIROT O., LESUEUR P., LEVOY F., CLAEYS-MEKDADE C., BOUST D., LAFITE R., DELOFFRE J., POUPINET N. et DUGUÉ O. (2005). L'envasement des plages de l'Est du Calvados : fantôme scientifique ou réalité sociologique ? Communication orale. *Groupement d'Intérêt Public Seine Aval, Séminaire de restitution des travaux 2004*, Rouen, 7 et 8 septembre 2005.
- DUBRULLE L. (1982). Etude hydrosédimentaire de l'estuaire de l'Orne et de ses abords. Thèse 3^{ème} cycle. Univ. Caen, 212 p.
- DUGUÉ O. (1989). Géodynamique d'une bordure de massifs anciens. La bordure occidentale du Bassin anglo-parisien au Callovo-Oxfordien. Pulsations épirogéniques et cycles eustatiques. Thèse Doc. Univ. Caen. 550 p.
- DUGUÉ O. (1991). Comportement d'une bordure de massifs anciens et cortèges de minéraux argileux : l'exemple de la bordure occidentale du Bassin anglo-parisien au Callovo-Oxfordien. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology* 81, 323-346.

- DUGUÉ O., FILY G. et RIOUT M. (1998). Le Jurassique des côtes du Calvados. Biostratigraphie, sédimentologie, paléoécologie, paléogéographie et stratigraphie séquentielle. *Bulletin de la Société Géologique de Normandie et des Amis du muséum du Havre*. 132 p.
- DUNOYER DE SEGONZAC G. (1969). Les minéraux argileux dans la diagénèse, passage au métamorphisme. *Mémoires du Service de la Carte géologique d'Alsace et de Lorraine* 29, 320 p.
- DUPONT J.P., GUÉZENNEC L., LAFITE R., LE HIR P. et LESUEUR P. (2001). Matériaux fins : le cheminement des particules en suspension. Fascicule de synthèse du Programme Seine-Aval, n°8. Ifremer (éd.). 39 p.
- DUPUIS É. LAIGNEL B., DURAND A. et DUPONT J. P. (2005). Apports fluviaux latéraux à l'estuaire de Seine : synthèse des données disponibles et apports des mesures en continu. Séminaire Journées 2005 - Hydrosystèmes normands. Livret des résumés. p 91.
- DUVAL S. (1994). Les métaux lourds dans les produits de dragage du Port Autonome de Rouen - Caractéristiques et valorisation. Mémoire de DESS. Univ. Rouen. Port Autonome de Rouen.
- DYER K. R., CHRISTIE M. C. et WRIGHT E. W. (2000). The classification of intertidal mudflats. *Continental Shelf Research* 20 (10-11), 1039-1060.

E

- EHRHOLD A. (1992). Etude des sédiments superficiels dans la Baie de Seine occidentale. Mémoire de maîtrise. Univ. Caen. 41 p.
- EHRHOLD A. (1993). Cartographie et dynamique des sédiments meubles de la Baie de Seine occidentale. Mémoire de DEA. Univ. Lille. 95 p.
- ELBAZ-POULICHET F., MARTIN J. M., HUANG W. W. et ZHU J. X. (1987). Dissolved Cd Behavior in Some Selected French and Chinese Estuaries. Consequences on Cd Supply to the Ocean. *Marine Chemistry* 22 (2-4), 125-136.
- ELHAI H. (1963). La Normandie occidentale entre la Seine et le Golfe normand-breton. Etude morphologique. Thèse État. Univ. Paris. 624 p.
- ERGIN M., KAZAN B. et EDIGER V. (1996). Source and depositional controls on heavy metal distribution in marine sediments of the Gulf of Iskenderun, Eastern Mediterranean. *Marine Geology* 133 (3-4), 223-239.
- ETCHÉBER H. (1978). Etude de la répartition et du comportement de quelques oligo-éléments métalliques (Zn, Pb, Cu, Ni) dans le complexe fluvio-estuarien de la Gironde. Thèse 3^{ème} cycle. Univ. Bordeaux. 353 p.

F

- FAIRBRIDGE R. W. (1980). The estuary : its definition and geodynamic cycle. In : E. Olausson and I. Cato (éd.), *Chemistry and biogeochemistry of estuaries*, Wiley, NY, 1-35.
- FENG H., COCHRAN J. K., HIRSCHBERG D. J. et WILSON R. E. (1998). Small-scale spatial variations of natural radionuclide and trace metal distributions in sediments from the Hudson River Estuary. *Estuaries* 21, 263-280.
- FENG H., COCHRAN J. K., et HIRSCHBERG D. J. (1999). ^{234}Th and ^7Be as tracers for transport and sources of particle-associated contaminants in the Hudson River estuary. *The Science of The Total Environment* 237-238, 401-418.
- FERRARO L., SPROVIERI M., ALBERICO I., LIRER F., PREVEDELLO L. et MARSELLA E. (2006). Benthic foraminifera and heavy metals distribution : A case study from the Naples Harbour (Tyrrhenian Sea, Southern Italy). *Environmental Pollution* 142 (2), 274-287.
- FILY G. (1967). Etude sédimentologique de l'Estuaire de l'Orne et du littoral adjacent (de Langrune à Cabourg). Thèse 3^{ème} cycle. Univ. Caen. 128 p.
- FORSTNER U. et WITTMANN G. T. M. (1981). Metal pollution in the Aquatic Environment. Springer (éd.), Berlin. 471 p.
- FOURNIER M. (2003). Impact anthropique sur le fonctionnement et les propriétés de transport d'un aquifère crayeux karstique exploité pour l'AEP. Rapport de DEA. Univ. Montpellier. 78 p.
- FOURNIER M. (2006). Identification des modalités de transport et de vulnérabilité du karst de la craie. Application de nouveaux outils statistiques d'analyse des données au système du Hannetot (Seine-Maritime, France). Thèse Doc. Univ. Rouen. 232 p.
- FREUDENTHAL T., WAGNER T., WENZHOFER F., ZABEL M. et WEFER G. (2001). Early diagenesis of organic matter from sediments of the eastern subtropical Atlantic: Evidence from stable nitrogen and carbon isotopes. *Geochimica and Cosmochimica Acta* 65 (11), 1795-1808.
- FUKAI R. et MURRAY C. N. (1973). Environmental behaviour of radiocobalt and radiosilver released from nuclear power stations into aquatic systems. In Environmental Behaviour of Radionuclides Released in the Nuclear Industry (Proc. Symp. Aix-en-Provence, 1973), IAEA, Vienne, 217-242.

G

- GARNAUD S. (2003). La sédimentation fine sur une plate-forme interne actuelle macrotidale : la Baie de Seine sud-orientale (France). Thèse Doc. Univ. Caen. 308 p.
- GARNAUD S. et GARLAN T. (2005). Bilan de l'envasement en Baie de Seine sud-orientale depuis 200 ans. *M@ppemonde* 80, 10 p.

- GARNAUD S., LESUEUR P., CLET M., LESOURD S., GARLAN T., LAFITE R. et BRUN-COTTAN J. C. (2003). Holocene to modern fine-grained sedimentation on a macrotidal shoreface-to-inner-shelf setting (eastern Bay of the Seine, France). *Marine Geology* 202 (1-2), 33-54.
- GEBHARDT H. et ZORN I. (2007). Cenomanian ostracods of the Tarfaya upwelling region (Morocco) as palaeoenvironmental indicators. Ostracodes cénomaniens de la région d'upwelling de Tarfaya (Maroc) comme indicateurs des paléoenvironnements. *Revue de Micropaléontologie*. Sous Presse.
- GERMAIN P. (1970). Etude sédimentologique et hydrologique de l'Estuaire de la Dives et du littoral adjacent (Cabourg-Houlgate). Thèse 3^{ème} cycle. 77 p.
- GERMANEAU J. (1969). Etude de la sédimentation dans l'Estuaire de la Seine. Origine, déplacement et dépôt en suspensions. *Travaux du Centre de Recherches et d'Etudes Océanographiques IX* (1-4), 1-100.
- GIBBS R. J. (1967). The geochemistry of the Amazon river system. Part I : The factors that control the salinity and the composition and concentration of the suspended solids. *Geological Society of America Bulletin* 78, 1203-1232.
- GIBBS R. J. (1977). Transport phases of transition metals in the Amazon and Yukon Rivers. *Geological Society of America Bulletin* 88, 829-843.
- GINGELE X. F., DE DECKKER P. et HILLENBRAND C. D. (2001). Clay mineral distribution in surface sediments between Indonesia and NW Australia - source and transport by ocean currents. *Marine Geology* 179, 135-146.
- GIRESE P. (1969). Essai de sédimentologie comparée des milieux fluvio-marins du Gabon, de la Catalogne et du Sud-Cotentin. Thèse État. Univ. Caen. 730 p.
- GOLDBERG E. D., GRIFFIN J. J., HODGE V., KOIDE M. et WINDOM H. (1979). Pollution history of the Savannah River estuary. *Environmental Science and Technology* 13, 588-594.
- GORDON E. S., GONIA M. A., ROBERTSA Q. N., KINEKEB G. C. et ALLISONC M. A. (2001). Organic matter distribution and accumulation on the inner Louisiana shelf west of the Atchafalaya River. *Continental Shelf Research* 21, 1691-1721.
- GROOT J. J., GROOT C. R., EWING M., BURCKLE L. et CONOLLY J. R. (1965). Spores, pollens, diatoms and provenance of the Argentine basin sediments. *Progress In Oceanography* 4, 179-217.
- GROUSSET F. E., QUETEL C. R., THOMAS B., DONARD O. F. X., LAMBERT C. E., GUILLARD F. et MONACO A. (1995). Anthropogenic vs. lithogenic origins of trace elements (As, Cd, Pb, Rb, Sb, Sc, Sn, Zn) in water column particles : northwestern Mediterranean Sea. *Marine Chemistry* 48, 291-310.
- GUÉGUÉNIAT P. et AUFFRET J. P. (1981). Etude des transferts des radionucléides artificiels dans les sédiments de la baie du Mont Saint Michel. *Océanis* 7 (3), 295-308.

- GUÉGUÉNIAT P., AUFFRET J. P. et BARON Y. (1979). Evolution de la radioactivité artificielle gamma dans les sédiments littoraux de la Manche pendant les années 1976-1977-1978. *Oceanology Acta* 2, 165-180.
- GUÉGUÉNIAT P., BAILLY DU BOIS P., SALOMON J. C., MASSON M., et CABIOCH L. (1995). FLUXMANCHE radiotracers measurements : A contribution to the dynamics of the English Channel and North Sea. *Journal of Marine Systems* 6(5-6), 483-494.
- GUÉZENNEC L. (1999). Hydrodynamique et transport en suspension du matériel particulaire fin dans la zone fluviatile d'un estuaire macrotidal : l'exemple de l'estuaire de la Seine (France). Thèse Doc. Univ. Rouen. 240 p.
- GUÉZENNEC L., LAFITE R., DUPONT J.P., MEYER R. et BOUST D. (1999). Hydrodynamics of suspended particulate matter in the tidal freshwater zone of a macrotidal estuary (the Seine Estuary, France). *Estuaries* 22 (3A), 717-727.
- GUILCHER A. (1965). Précis d'Hydrologie – Marine et continentale. Masson (éd.), Paris. 389 p.
- GUINASSO N. L. et SCHINK D. R. (1975). Quantitative estimates of biological mixing rates in abyssal sediments. *Journal of Geophysical Research* 80, 3032-3043.
<http://mappemonde.mgm.fr/num8/articles/art05406.html>.

H, I

- HALLAM A. (1975). Jurassic environments. Cambridge earth science series. Cambridge (Eng.) *Cambridge University Press* (éd.). 239 p.
- HAYES M. O. (1975). Morphology of sand accumulation in estuaries : an introduction to the symposium. In : L.E. Cronin (éd.). *Estuarine research*, vol II. Academic press, NY, 3-22.
- HEDGES J. I., KEIL R. G. et BENNER R. (1997). What happens to terrestrial organic matter in the ocean ? *Organic Geochemistry* 27, 195–212.
- HÖLTZAPFFEL T. (1985). Les minéraux argileux. Préparation. Analyse diffractométrique et détermination. *Société Géologique du Nord* 12, 136 p.
- HOMMERIL P. (1967). Etude de la géologie marine concernant le littoral bas-normand et la zone pré-littorale de l'Archipel anglo-normand. Thèse État. Univ. Caen. 304 p.
- HU J., PENG P. A., JIA G., MAI B., et ZHANG G. (2006). Distribution and sources of organic carbon, nitrogen and their isotopes in sediments of the subtropical Pearl River estuary and adjacent shelf, Southern China. *Marine Chemistry* 98 (2-4), 274-285.
- HUH C. A., FINNEY B. P., et STULL J. K. (1992). Anthropogenic inputs of several heavy metals to nearshore basins off Los Angeles. *Progress in Oceanography* 30, 335-351.

J

- JAFFE D. et WALTERS J. K. (1977). Intertidal trace metal concentrations in some sediments from the Humber estuary. *Science of the Total Environment* 7, 1-15.
- JOUANNEAU J. M., WÉBER O., GROUSSET F. E. et THOMAS B. (1998). Pb, Zn, Cs, Sc and rare earth elements as tracers of the Loire and Gironde particles on the Biscay shelf (SW France). *Oceanologica Acta* 21 (2), 233-241.
- JUIGNET P. (1965). Analyse minéralogique des sédiments arénacés de l'Oxfordien supérieur, de l'Albien et d'une formation intermédiaire dans la région de Lisieux (Calvados). *Bulletin de la Société Géologique de France* 7 (VII), 327-333.
- JUIGNET P. (1974). La transgression crétacée sur la bordure orientale du Massif armoricain : Aptien, Albien, Cénomaniens de Normandie et du Maine. Le stratotype du Cénomaniens. Thèse État. Univ. Caen. 806 p.

K

- KAIRYTE M., STEVENS R. L. et TRIMONIS E. (2005). Provenance of silt and clay within sandy deposits of the Lithuanian coastal zone (Baltic Sea). *Marine Geology* 218, 97-112.
- KAUTSKY H. (1988). Determination of distribution processes, transport routes and transport times in the North Sea and the northern north Atlantic using artificial radionuclides as tracers. In : Guary, J.C., Guéguéniat, P., Pentreath, R.J. (éd.), *Radionuclides : a Tool for Oceanography*, Cherbourg 1-5 juin 1987. *Elsevier Applied Science Publishers*, London. 271-280.
- KIM G., ALLEMAN L. Y. et CHURCH T. M. (2004). Accumulation records of radionuclides and trace metals in two contrasting Delaware salt marshes. *Marine Chemistry* 87 (3-4), 87-96.
- KIM G.B., YANG H. S. et KODAMA Y. (1998). Distributions of transition elements in the surface sediments of the Yellow Sea. *Continental Shelf Research* 18, 1531-1542.
- KIRCHNER G. et EHLERS H. (1998). Sediment geochronology in changing coastal environments: potentials and limitations of the ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb methods. *Journal of Coastal Research* 14 (2), 483-492.
- KÜBLER B. (1968). Evaluation qualitative du métamorphisme par la cristallinité de l'illite. *Bulletin du Centre de Recherches de Pau* 2 (2), 385-387.

L

- LAFITE R. (1990). Caractérisation et dynamique des particules en suspension dans un domaine marin macrotidal influencé par un estuaire : l'exemple de la Baie de Seine orientale (France). Thèse 3^{ème} cycle. Univ. Rouen. 294 p.

- LAIGNEL B. (1997). Les altérites à silex de l'ouest du bassin de Paris. Caractérisation lithologique, genèse et utilisation potentielle comme granulats. Thèse Doc. Univ. Rouen. 221 p.
- LAIGNEL B., QUESNEL F., LECOUSTUMER M. N. et MEYER R. (1998). Variabilité du cortège argileux des formations résiduelles à silex de l'ouest du bassin de Paris. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, Paris, 326, 467-472.
- LANG L. O. et STEVENS R. L. (1999). Source, transport, and weathering influences upon grain-size and heavy mineral trends in glacial deposits of southwestern Sweden. *GFF* 121, 145-153.
- LARSONNEUR C. (1969). Etude de la partie occidentale de la Baie de Seine. *Cahiers Océanographiques XXI* (5), 439-468.
- LARSONNEUR C. (1971). Manche centrale et Baie de Seine : géologie du substratum et des dépôts meubles. Thèse État. Univ. Caen, 394 p.
- LARSONNEUR C. (1977). De la Baie de Seine à l'estuaire de la Seine, histoire du Quaternaire marin. *Bulletin de la Société Géologique de Normandie et Amis du Muséum du Havre LXIV* (4), 9-19.
- LARSONNEUR C. (1985). Dynamique des suspensions et des dépôts en Baie de Seine : une synthèse des résultats. La Baie de Seine (GRECO-MANCHE). Ifremer (éd.). Univ. Caen. 93-108.
- LARSONNEUR C. et HOMMERIL P. (1967). Sédiments et sédimentation dans la partie orientale de la Baie de Seine. *Revue des Sociétés Savantes de Haute Normandie-Sciences* 47, 45-75.
- LATOUCHE C. (1971). Les argiles des bassins alluvionnaires aquitains et des dépendances océaniques. Thèse État. Univ. Bordeaux. 415 p.
- LATOUCHE C. et MAILLET N. (1979). X-Ray mineralogy studies, Leg 48, Rockall Region (Sites 403, 404, 405 and 406). In : int. Repts DSDP (L. Montadert et D.G. Roberts, éd.), vol.8, Washington (US Gov. Print. Off.), 665-676.
- LAUTRIDOU J. P. (1968a). Les formations superficielles de Saint-Romain (Pays de Caux) : leur contribution à l'étude morphologique de la région. *Publication de la Faculté des lettres et sciences humaines de l'université de Caen*. Thèse 3^{ème} cycle. Univ Caen. 200 p.
- LAUTRIDOU J. P. (1968b). Les loess de Saint-Romain et de Mesnil-Esnard (Pays de Caux). *Bulletin du Centre de Géomorphologie-CNRS* 2, 56 p.
- LAUTRIDOU J. P. (1985). Le cycle périglaciaire pléistocène en Europe du Nord-Ouest et plus particulièrement en Normandie. Thèse État. Univ. Caen. 908 p.

- LAUTRIDOU J. P., AUFFRET J. P., BALTZER A., CLET M., LECOLLE F., LEFEBVRE D., LERICOLAIS G., ROBLIN-JOUVE A., BALESCU S., CARPENTIER G., OCCHIETTI S. et ROUSSEAU D. D. (1999). Le fleuve Seine, le fleuve Manche. *Bulletin de la Société Géologique de France* 170 (4), 545-558.
- LAUTRIDOU J. P., PELLERIN J. et CLET-PELLERIN M. (1987). Les formations marines et continentales d'Asnelles-Saint-Côme-de-Fresné. Excursion du 28 au 31 mai 1987. *Association Française pour l'étude du Quaternaire, "La normandie"*, 161-170.
- LCHF et LNH : Laboratoire Central d'Hydraulique de France et Laboratoire National d'Hydraulique (1986). Catalogue sédimentologique des côtes de France : côtes de la Mer du Nord et de la Manche. Eyrolles (éd.). 406 p.
- LCHF : Laboratoire Central d'Hydraulique de France (1973). Etude du littoral entre Le Havre et Antifer. Rapport ronéotypé, Maisons Alfort, 38 p.
- LE FLOCH J. F. (1961). Propagation de la marée dans l'estuaire de la Seine et en Seine-Maritime, Thèse État. Univ. Paris. 494 p.
- LE HIR P., FICHT A., SILVA JACINTO R., LESUEUR P., DUPONT J. P., LAFITE R., BRENON I., THOUVENIN B. et CUGIER P. (2001). Fine sediment transport and accumulations at the mouth of the Seine estuary (France). *Estuaries* 24 (6B), 950-963.
- LE HIR P., SALOMON J. C, LE PROVOST C., CHABERT D'HIÈRES G. et MAUVAIS J. L. (1986). Approche de la circulation résiduelle en Baie de Seine. La Baie de Seine (GRECO MANCHE), Colloque National du CNRS (Caen 1985), *Actes de Colloques n°4*, Ifremer (éd.). 63-72.
- LEBART L., MORINEAU A. et PIRON M. (1995). Statistique exploratoire multidimensionnelle, Paris, Dunod (éd.). 480 p.
- LEE S. V. et CUNDY A. B. (2001). Heavy Metal Contamination and Mixing Processes in Sediments from the Humber Estuary, Eastern England. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 53 (5), 619-636.
- LEFEBVRE D (1988). Les méandres hypertrophiés de la basse Seine sont une forme dégradée de méandres surimposés. *Bulletin de la Société géologique de Normandie et des Amis du Muséum du Havre*, 75 (2), 43-57.
- LEFEBVRE D. (1974). L'estuaire de la Seine (France) – Evolution du modèle sédimentaire pendant l'Holocène. *IX^{ème} Congrès International de Sédimentologie*. Nice. 267-274.
- LEFEBVRE D. (1977a). Le prisme alluvial de l'estuaire de Seine. *Bulletin de la Société Géologique de Normandie et Amis du Muséum du Havre* LXIV (4), 67-72.
- LEFEBVRE D. (1977b). Les alluvions holocènes de la Basse-Seine. *Bulletin de la Société Géologique de Normandie et Amis du Muséum du Havre* LXIV (4), 73-74.

- LEFEBVRE D., HUAULT M. F., GUYADER J., GIRESSSE P., HOMMERIL P. et LARSONNEUR C. (1974). Le prisme alluvial de l'estuaire de la Seine : synthèse sédimentologique, stratigraphique et paléogéographique. *Bulletin d'Information Géologique du Bassin de Paris* 39, 27-36.
- LEIVUORI M. et NIEMISTO L. (1995). Sedimentation of trace metals in the Gulf of Bothnia. *Chemosphere* 31 (8), 3839-3856.
- LESOURD S. (2000). Processus d'envasement d'un estuaire macrotidal : zoom temporel du siècle à l'heure ; application à l'estuaire de la Seine. Thèse Doc. Univ. Caen, 280 p.
- LESOURD S., LESUEUR P., BRUN-COTTAN J. C., AUFFRET J. P., POUPINET N. et LAIGNEL B. (2001). Morphosedimentary evolution of a macrotidal estuary subjected to human impact : the example of the Seine (France). *Estuaries* 24 (6B), 940-949.
- LESOURD S., LESUEUR P., BRUN-COTTAN J. C., GARNAUD S. et POUPINET N. (2003). Seasonal variations of the superficial sediments characteristics in a macrotidal estuary : the Seine inlet, France. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 18 (1), 3-16.
- LESUEUR P. et LESOURD S. (1999). Sables, chenaux, vasières... : dynamique des sédiments et évolution morphologique. Fascicule de synthèse du Programme Seine-Aval, n°3. Ifremer (éd.). 39 p.
- LESUEUR P., JOUANNEAU J. M., BOUST D., TASTET J.P. et WÉBER O. (2001). Sedimentation rates and fluxes in the continental shelf mud fields in the Bay of Biscay (France). *Continental Shelf Research* 21, 1383-1401.
- LESUEUR P., TASTET J. P., WÉBER O. (2003). Origin and morphosedimentary evolution of fine-grained modern continental shelf deposits : the Gironde mud fields (Bay of Biscay, France). *Sedimentology* 49, 1299-1320.
- LEVOY F., ANTHONY E., MONFORT O. et LARSONNEUR C. (2000). The morphodynamic of megatidal beaches in Normandy, France : implications for the application of beach environmental parameters. *Marine Geology* 17, 39-59.
- LEVOY F., BIZIEN H. et MONFORT O. (2004). Marquage de l'origine et conditions hydrodynamiques des envasements littoraux. Partie Hydrodynamique : Mesures Hydrodynamiques. Synthèse des données acquises sur le site de Blonville/Villers sur Mer entre avril 2003 et avril 2004. Rapport Seine Aval. Action R.II-B2 - État et origine de l'envasement du littoral du Calvados. 19 p.
- LIM D. I., JUNG H. S., CHOI J. Y., YANG S., et AHN K. S. (2006). Geochemical compositions of river and shelf sediments in the Yellow Sea : Grain-size normalization and sediment provenance. *Continental Shelf Research* 26 (1), 15-24.
- LIN S., HSIEH I. J., HUANG K. M. et WANG C. H. (2002). Influence of the Yangtze River and grain size on the spatial variations of heavy metals and organic carbon in the East China Sea continental shelf sediments. *Chemical Geology* 182, 377-394.

- LOUGHNAN F. C. (1971). Kaolinite claystones associated with the Wongawilli seam in the southern part of the Sydney basin. *Journal of the Geological Society of Australia* 18, 293-302.
- LU X. et ZHAI S. (2006) Distributions and sources of organic biomarkers in surface sediments from the Changjiang (Yangtze River) Estuary, China. *Continental Shelf Research* 26 (1), 1-14.

M

- MADSEN P. P. (1981). Accumulation rates of heavy metals determined by ^{210}Pb dating: experience from a marsh area in Ho Bay. *Rapports et procès-verbaux des réunions - Conseil international pour l'exploration de la mer* 181, 59-63.
- MAQSOUUD A. (1996). Approche hydrologique et hydrochimique du caractère karstique éventuel d'hydrosystèmes souterrains de la craie du bassin de Paris. Thèse Doc. Univ. Lille. 323 p.
- MARCHET P. (1991). Approche de la structure et du fonctionnement des systèmes aquifères karstiques par l'analyse de leur fonctionnement : application au nord-ouest du Causse de Martel (Quercy-France). Thèse Doc. Univ. Toulouse. 326 p
- MARIOTTI A., LANCELOT C. et BILLEN G. (1984). Natural isotopic composition of nitrogen as natural tracer of origin for suspended organic matter in the Sheldt estuary. *Geochimica and Cosmochimica Acta* 48, 549-555.
- MARTIN J. M. et MEYBECK M. (1979). Elemental mass-balance of material carried by major world rivers. *Marine Chemistry* 7, 173-206.
- MATTHAI C., BIRCH G. F. et BICKFORD G. P. (2002). Anthropogenic trace metals in sediment and settling particulate matter on a high-energy continental shelf (Sydney, Australia). *Marine Environmental Research* 54, 99-127.
- McCAVE I. N. (1972). Transport and escape of fine-grained sediments from shelf areas. In : Swift, D.J.P., Duane, D.B. & Pilkey, O.H. (éd.). *Shelf Sediment Transport : Process and Patterns*. Hutchinson and Ross, Stroudsburg, Dowden. 225-248.
- McCUBBIN D., LEONARD K. S., McDONALD P., BONFIELD R. et BOUST D. (2006). Distribution of Technetium-99 in subtidal sediments of the Irish Sea. *Continental Shelf Research* 26 (4), 458-473.
- McDONALD P., COOK G. T., BAXTER M. S. et THOMSON J. C. (1990). Radionuclide transfer from Sellafield to south-west Scotland. *Journal of Environmental Radioactivity* 12 (3), 285-298.
- McDONALD R. W., McDONALD D. M., O'BRIEN M. C. et GOBEIL C. (1991). Accumulation of heavy metals (Pb, Zn, Cu, Cd), carbon and nitrogen in sediments from Strait Georgia, B.C., Canada. *Marine Chemistry* 34, 109-135.

- McMAHON C. A. FEGAN M., WONG J., LONG S. C., MCKITTRICK L., THOMAS K., RYAN T. P. et RAFFERTY B. (2005). Transfer of conservative and non-conservative radionuclides from the Sellafield Nuclear Fuel Reprocessing plant to the coastal waters of Ireland. *Radioprotection* 40, S629-S634
- MENESGUEN A. (2003). Rapport final du projet "Baie de Seine". Programme National Français de l'Environnement Côtier (PNEC). 32 p.
- MOJTAHID M., JORISSEN F., DURRIEU J., GALGANI F., HOWA H., REDOIS F. et CAMPS R. (2006). Benthic foraminifera as bio-indicators of drill cutting disposal in tropical east Atlantic outer shelf environments. Foraminifera and Environmental Micropaleontology, Environmental Micropaleontology Symposium at the 32nd International Geological Congress. *Marine Micropaleontology* 61 (1-3), 58-75.
- MOORE D. M. et REYNOLDS R. C. (1989). X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals. *Oxford University Press (éd.)*. 332 p.
- MORAL-CARDONA J. P., SANCHEZ BELLON A., LOPEZ-AGUAYO F., CABALLERO M. A. (1996). The analysis of quartz grain surface features as a complimentary method for studying their provenance: the Guadalete river basin (Cadiz, SW, Spain). *Sedimentary Geology* 106, 155-164.
- MORRISEY D. J., STARK J. S., HOWITT L. et UNDERWOOD A. J. (1994). Spatial variation in concentrations of heavy metals in marine sediments. *Australian Journal of Marine and Freshwater Research* 45, 177-184.
- MORZADEC-KERFOURN M. T. (1995). Coastal changes in the armorican massif (France) during the Holocene. *Journal of Coastal Research* 17, 197-203.
- MUDRY J. (1991). L'analyse discriminante, un puissant moyen de validation des hypothèses hydrogéologiques. *Revue des Sciences de l'Eau* 4 (1), 19-37.
- MUDRY J. et BLAVOUX B. (1986). Le tarissement des aquifères karstiques : période non influencée ? Journées de printemps de l'Association Internationale d'Hydrogéologie, Neuchâtel (Suisse) en hommage à M. Burger. *Bulletin du Centre d'Hydrogéologie* 7, 193-204.
- MULLER G. (1979). Schwermetalle in den sedimenten des Rheins-Veränderungen seitt 1971. *Umshan* 79, 778-783.
- MULLER G. et FORSTNER V. (1968). General relationship between suspended sediment concentration and water discharge in the Alpenhein and some other rivers. *Nature* 217, p.244-5.
- MURI G., WAKEHAM S. G., PEASE T. K. et FAGANELI J. (2004). Evaluation of lipid biomarkers as indicators of changes in organic matter delivery to sediments from Lake Planina, a remote mountain lake in NW Slovenia. *Organic Geochemistry* 5, 1083-1093.
- MUSSET R. (1961). La Normandie. Colin Paris (éd.). 220 p.

N

- NAGAYA Y. et SAIKI M. (1967). Accumulation of radionuclides in coastal sediment of Japan (I). Falloyt radionuclides in some coastal sediments in 1964-1965. *Journal of Radiation Research* 8, 37-43.
- NAKAMURA K. et NAGAYA Y. (1975). Dispersion and accumulation of radionuclides in sediment of Urazoko Bay (I). *Journal of Oceanography* 31 (4), 145-153.
- NANCE W. B. et TAYLOR S. R. (1976). Rare earth element patterns and crustal evolution - I. Australian post-Archaeon sedimentary rocks. *Geochimica and Cosmochimica Acta* 40, 15-39.
- NEIHEISEL J. et WEAVER C. E. (1967). Transport and deposition of clay minerals, Southeastern United States. *Journal of Sedimentary Petrology* 37, 1084-1116.
- NITTROUER C. A. et STERNBERG R. W. (1981). The formation of sedimentary strata in an allochthonous shelf environment : the Washington continental shelf. *Marine Geology* 42, 201-232.
- NITTROUER C. A., STERNBERG R. W., CARPENTER R. et BENNETT J. T. (1979). The use of Pb-210 geochronology as a sedimentological tool : application to the Washington shelf. *Marine Geology* 31, 297-316.
- NOAKES S. E. et JUTTE P. C. (2006). Utilizing gamma isotope tracers to determine sediment source at reef sites near the Charleston Ocean Dredged Material Disposal Site. *Marine Pollution Bulletin* 52 (6), 666-673.

O

- OLIVEIRA A., ROCHA F., RODRIGUES A., JOUANNEAU J. M., DIAS A., WÉBER O. et GOMES C. (2002). Clay minerals from the sedimentary cover from the Northwest Iberian shelf. *Progress In Oceanography* 52 (2-4), 233-247.
- OLSEN C. R., LARSEN I. L., LOWRY P. D., CUTSHALL N. H. et NICHOLS M. M. (1986). Geochemistry and Deposition of ⁷Be in river-estuarine and coastal waters. *Journal of Geophysical Research* 91, 896-908.
- OSTERMAN L. (2003). Benthic foraminifers from the continental shelf and slope of the Gulf of Mexico : an indicator of shelf hypoxia. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 58 (1), 17-35.
- OTTE M. L., BESTEBROER S. J., VAN DER LINDEN J. M., ROZEMA J. et BROEKMAN R. A. (1991). A survey of zinc, copper and cadmium concentrations in salt marsh plants along the Dutch coast. *Environmental Pollution* 72, 175-189.

P, Q

- P.A.R. : Port Autonome de Rouen (2003). La gestion des sédiments de dragage d'entretien. Comité Scientifique et Technique de l'Estuaire de la Seine. Note de Synthèse. 43 p.
- PATTERSON R. T., DALBY A. P., ROE H. M., GUIBAULT J. P., HUTCHINSON I. et CLAGUE J. J. (2005). Relative utility of foraminifera, diatoms and macrophytes as high resolution indicators of paleo-sea level in coastal British Columbia, Canada. *Quaternary Science Reviews. Quaternary coastal morphology and sea-level changes* 24 (18-19), 2002-2014.
- PELLERIN J. (1968). La campagne de Caen, Plateaux jurassiques et bordure du Massif ancien. Thèse 3ème cycle. Univ. Caen. 343 p.
- PÉRILLO G. M. E. (1995). Definitions and geomorphologic classifications of estuaries. In *Geomorphology and sedimentology of estuaries. Developments in sedimentology* 53, 17-47. G. M. E. Périllo (éd.). 471 p.
- PETTIJOHN E. J. (1975). Sedimentary Rocks. *Harper International (éd.)*. 628 p.
- PFITZNER J., BRUNSKILL G. et ZAGORSKIS I. (2004). ^{137}Cs and excess ^{210}Pb deposition patterns in estuarine and marine sediment in the central region of the Great Barrier Reef Lagoon, north-eastern Australia. *Journal of Environmental Radioactivity* 76 (1-2), 81-102.
- PICKERING R. J., CARRIGAN P. H., TAMURA T., ABEE H. H., BEVARAGE J. W. et ANDREW R. W. (1966). Radioactivity in bottom sediment of the Clinch and Tennessee rivers. International Atomic Energy Agency Proceedings. Symposium on the Disposal of Radioactive Wastes into Seas, Oceans and Surface Waters, 57-88.
- PLAGNES V. (1997). Structure et fonctionnement des aquifères karstiques. Caractérisation par la géochimie des eaux. Thèse Doc. Univ. Montpellier II. 372 p.
- PORCHER M. (1977). Lithostratigraphie des alluvions fluviales holocènes de la basse vallée de la Seine. *Bulletin de la Société Géologique de Normandie et Amis du Muséum du Havre* LXIV (4), 181-201.
- POTTER P. E., HELING D., SHIMP N. E. et VAN WIE W. (1975). Clay mineralogy of modern alluvial muds of the Mississippi River Basin. *Bulletin du Centre de Recherches de Pau* 9, 353-389.
- POTTER P. E., MAYNARD J. B. et PRYOR W. A. (1980). Sedimentology of shale. *Springer-Verlag (éd.)*, Berlin, Heidelberg, New York. 306 p.
- PRITCHARD D. W. (1960). Lectures on estuarine oceanography. *B. Kinsman (éd.)*, J. Hopkins Univ. 154 p.

R

- RAJCEVIC B. M. (1957). Etude des conditions de sédimentation dans l'Estuaire de la Seine. *Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics* 117, 744-775.
- RATHBURN A. E., PEREZ M. E. et LANGE C. B. (2001). Benthic-pelagic coupling in the Southern California Bight : Relationships between sinking organic material, diatoms and benthic foraminifera. *Marine Micropaleontology* 43 (3-4), 261-271.
- REISENHOFER E., ADAMI G. et BARBIERI P. (1998). Using chemical and physical parameters to define the quality of karstic freshwaters (Timavo river, North-Eastern Italy) : A chemometric approach. *Water Research* 32 (4), 1193-1203.
- RIOULT M., PELLERIN J. et JUIGNET P. (1966). Témoins résiduels d'Albien en Basse-Normandie et spécialement sur la campagne de Caen. *Bulletin de la Société Linéenne de Normandie* 10 (VII), 19-44.
- RUIZ-FERNANDEZ A. C., PAEZ-OSUNA F., MACHAIN-CASTILLO M. L. et ARELLANO-TORRES E. (2004). ²¹⁰Pb geochronology and trace metal fluxes (Cd, Cu and Pb) in the Gulf of Tehuantepec, South Pacific of Mexico. *Journal of Environmental Radioactivity* 76 (1-2), 161-175.

S

- SALOMON J. C. (1981). Modelling turbidity maximum in the Seine estuary. In : Nihoul J. C. J. (éd.). *Ecohydrodynamics*. Elsevier, Amsterdam, 285-317.
- SALOMON J. C. (1986). Courantologie calculée en Baie de Seine : In : La Baie de Seine, Colloque National du CNRS (Caen 1985), *Actes de Colloques n°4*, Ifremer (éd.).
- SALOMON J. C. (1988). Oceanographic characteristics of the Seine estuary. In : *Hydrodynamics of Estuaries, Vol II – Estuarine case studies (B. Kjerfve (éd.))*, CRC Press inc. Boca Raton. 79-88
- SALOMON J. C. et BRETON M. (1993). An atlas of long-term currents in the Channel. *Oceanologica Acta*. 16 (5-6), 439-448.
- SALOMON J. C. et LE HIR P. (1981). Etude de l'estuaire de la Seine : modélisation numérique des phénomènes physiques. Rapport Technique. Univ. Bretagne occidentale. 286 p.
- SANDERS C. J., SANTOS I. R., SILVA-FILHO E. V. et PATCHINEELAM S. R. (2006). Mercury flux to estuarine sediments, derived from Pb-210 and Cs-137 geochronologies (Guaratuba Bay, Brazil). *Marine Pollution Bulletin* 52 (9), 1085-1089.

- SANTSCHI P. H., GUO L., ASBILL S., ALLISON M., KEPPLER A. B. et WEN L.S. (2001). Accumulation rates and sources of sediments and organic carbon on the Palos Verdes shelf based on radioisotopic tracers (^{137}Cs , $^{239,240}\text{Pu}$, ^{210}Pb , ^{234}Th , ^{238}U and ^{14}C). *Marine Chemistry* 73, 125-152.
- SARR R., DEBENAY J. P. et SOW E. H. (2007). Sea level changes recorded by foraminiferal assemblages in the Upper Holocene of the Retba Lake (Senegal). Enregistrement des fluctuations du niveau marin dans l'Holocène supérieur du lac Retba (Sénégal) par les foraminifères. *Revue de Micropaléontologie*. Sous presse.
- SCHNABEL C., OLIVE V., ATARASHI-ANDOH M., DOUGANS A., ELLAM R. M., FREEMAN S., MADEN C., STOCKER M., SYNAL H. A., WACKER L. et XU S. (2006). $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ ratios in Scottish coastal surface sea water : Geographical and temporal responses to changing emissions. *Applied Geochemistry* 22 (3), 628-636.
- SCOTT D. B., SCHAFER C. T. et MEDIOLI F. S. (1980). Eastern Canadian estuarine foraminifera : a framework for comparison. *Journal of Foraminiferal Research* 10, 205-234.
- SEBAG D., COPARD Y., DI-GIOVANNI C., DURAND A., LAIGNEL B., OGIER S. et LALLIER-VERGES E. (2006). Palynofacies as useful tool to study origins and transfers of particulate organic matter in recent terrestrial environments : synopsis and prospects. *Earth-Science Reviews* 79 (3-4), 241-259.
- SHIOZAKI M., ODA K., KIMURA T. et SETO Y. (1972). The artificial radioactivity in sea water. In *Researches in Hydrography and Oceanography* (Commemoration Pub. Of the Century of the Hydrographic Dept. Of Japan). Tokyo. 203-249.
- SHUMILIN E. N., CARRIQUIRY J. D., CAMACHO-IBAR V. F., SAPOZHNIKOV D., KALMYKOV S., SANCHEZ A., AGUINIGA-GARCIA S. et SAPOZHNIKOV Y. A. (2002). Spatial and vertical distributions of elements in sediments of the Colorado River delta and Upper Gulf of California. *Marine Chemistry* 79 (3-4), 113-131.
- SILLIMAN J. E., MEYERS P. A. et BOURBONNIERE R. A. (1996). Record of post-glacial organic matter delivery and burial in sediment of Lake Ontario. *Organic Geochemistry* 24, 463-472.
- SINEX S. et HELZ G. (1981). Regional geochemistry of trace elements in Chesapeake Bay sediments. *Environmental Geology* 3, 315-323.
- SIROCKO F., GARBE-SCHONBERG D. et DEVEY C. (2000). Processes controlling trace element geochemistry of Arabian Sea sediments during the last 25 000 years. *Global and Planetary Change* 26 (1-3), 217-303.
- SNOUSSI M. (1986). Nature, estimation et comparaison des flux de matières issus des bassins versants de l'Adour (France), du Sebou, de l'Oum-Er-Rbia et du Souss (Maroc). Thèse État. Univ. Bordeaux. 456 p.

- SOHLENIUS G., EMEIS K. C., ANDREN E., ANDREN T. et KOHLY A. (2001). Development of anoxia during the Holocene fresh-brackish water transition in the Baltic Sea. *Marine Geology* 177 (3-4), 221-242.
- SOMMERFIELD C. K., NITTROUER C. A. et ALEXANDER C. R. (1999). ^7Be as a tracer of flood sedimentation on the northern California continental margin. *Continental Shelf Research* 19 (3), 335-361.
- SOMMERFIELD C. K. et NITTROUER C. A. (1999). Modern accumulation rates and a sediment budget for the Eel River Shelf : a flood-dominated depositional environment. *Marine Geology* 154, 227-242.
- SPINEANU A. (1998). Mobilité des sédiments fins en Baie de Seine (Manche). Mémoire de DEA. Univ. Lille. 56 p.
- SRISUKSAWAD K., PORNTEPKASEMSAN B., NOUCHPRAMOOL S., YAMKATE P., CARPENTER R., PETERSON M. L. et HAMILTON T. (1997). Radionuclide activities, geochemistry and accumulation rates of sediments in the Gulfe of Thailand. *Continental Shelf Research* 17 (8), 925-965.
- STENNER R. et NICKLESS G. (1975). Heavy metals in organisms of the Atlantic Coast of Southwest Spain and Portugal. *Marine Pollution Bulletin* 6, 89-92.
- STETZENBACH J., FARNHAM I. M., HODGE V. F. et JOHANNESSON K. H. (1999). Using multivariate statistical analysis of groundwater major cation and trace element concentrations to evaluate groundwater flow in a regional aquifer. *Hydrological Processes* 13 (17), 2655-2673.
- STETZENBACH K. J., HODGE V. F., GUO C., FARNHAM I. M. et JOHANNESSON K. H. (2001). Geochemical and statistical evidence of deep carbonate groundwater within overlying volcanic rock aquifers/aquitards of southern Nevada, USA. *Journal of Hydrology* 243 (3-4), 254-271.
- SU C. C. et HUH C. A. (2002). ^{210}Pb , ^{137}Cs and $^{239,240}\text{Pu}$ in East China Sea sediments : sources, pathways and budgets of sediments and radionuclides. *Marine Geology* 183 (1-4), 163-178.

T, U

- TAM N. F. Y. et WONG Y. S. (2000). Spatial variation of heavy metals in surface sediments of Hong Kong mangrove swamps. *Environmental Pollution* 110 (2), 195-205.
- TERS M., AZEMA C., BREBION P., CHURCHER C. S., DELIBRIAS G., DENEFLÉ M., GUYADER J., LAURIAT-RAGE A., MATHIEUR R., MICHEL J. P., OSBORNE P. J., ROUVILLOIS A. et SHOTTON F. W. (1971). Sur le remblaiement holocène dans l'estuaire de la Seine au Havre (Seine Maritime), France. *Quaternaria* XIV, 151-174.
- TESSIER L. (2003). Transport et caractérisation des matières en suspension dans le bassin versant de la Seine : Identification de signatures naturelles et anthropiques. Thèse Doc. École Nationale des Ponts et Chaussées. 344 p.

TUREKIAN K. K. et WEDEPOHL. K. H. (1961). Distribution of the elements in some major units of the Earth's crust. *Geological Society of America Bulletin* 72, 175-191.

V

VALDÈS D. (2005). Variabilité spatiale du fonctionnement hydrologique de l'aquifère karstique de la craie (Département de l'Eure, France). Thèse Doc. Univ. Rouen. 282 p.

VERNEY R. (2006). Processus de contrôle de la dynamique des sédiments cohésifs. Mesures in situ, mesures expérimentales et modélisations. Application à l'estuaire de la Seine. Thèse Doc. Univ. Rouen. 323 p.

VIGARIÉ A. (1964). Etude critique de la documentation sur l'évolution morphologique de l'Estuaire de la Seine. Thèse État. Univ. Paris. 239 p.

VIGARIÉ A. (1965). Les modalités du remblaiement alluvial dans l'estuaire de la Seine. *Cahiers Océanographiques* XIV (5), 301-330.

VOLMAT M. (1929). Les érosions du littoral du Calvados et les atterrissements de l'estuaire de la Seine. 22^{ème} *Cahiers de la Recherche Hydraulique sur le régime des côtes*, Paris, Imp. Nat., 39 p.

W, X

WAELES B. (2005). Modélisation morphodynamique de l'embouchure de la Seine. Thèse Doc. Univ. Caen. 225 p.

WEI T., CHEN Z., DUAN L., GU J., SAITO Y., ZHANG W., WANG Y. et KANAI Y. (2007). Sedimentation rates in relation to sedimentary processes of the Yangtze Estuary, China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 71 (1-2), 37-46.

WELLS J. T. (1995). Tide-dominated estuaries and tidal rivers. In : *Geomorphology and sedimentology of estuaries. Developments in sedimentology* 53, 179-205. G.M.E. Périllo (éd.). 471p.

WELTJE G. J. et EYNATTEN H. (2004). Quantitative provenance analysis of sediments : review and outlook. *Sedimentary Geology* 171, 1-11.

WEN W. Y. et HE Y. Q. (1987). An analysis of sediment pollution status quo in Pearl River estuary. In : *GDCRIO (éd.), Investigation Report of Coastal Environment Quality in Guangdong Province*. Ocean Press, Beijing. 112-122 (en Chinois).

WINDOM H. L., GRIFFIN J. J. et GOLDBERG E. D. (1967). Talc in atmospheric dusts. *Environmental Science and Technology* 1, 923-926.

WONG K. M., JOKELA T. A., EAGLE R. J., BRUNK J. L. et NOSHKIN V. E. (1992). Radionuclide concentrations, fluxes and residence times at Santa Monica and San Pedro Basins. *Progress In Oceanography* 30 (1-4), 353-391.

Y

- YANG S. Y., LI C. X., JUNG H. S., et LEE H. J. (2002). Discrimination of geochemical compositions between the Changjiang and the Huanghe sediments and its application for the identification of sediment source in the Jiangsu coastal plain, China. *Marine Geology* 186 (3-4), 229-241.
- YANG S. Y., JUNG H. S., LIM D. I., et LI C. X. (2003). A review on the provenance discrimination of sediments in the Yellow Sea. *Earth-Science Reviews* 63 (1-2), 93-120.
- YANG S. Y., LIM D. I., JUNG H. S., et OH B. C. (2004). Geochemical composition and provenance discrimination of coastal sediments around Cheju Island in the southeastern Yellow Sea. *Marine Geology* 206 (1-4), 41-53.
- YOON H. I., HAN M. W., PARK B. K., HAN S. J. et OH J.K. (1992). Distribution, Provenance, and Dispersal Pattern of Clay Minerals in Surface Sediments, Bransfield Strait, Antarctica. *Geo-Marine Letters* 12, 223-227.

Z

- ZHOU H. Y., PENG X. T. et PAN J. M. (2004). Distribution, source and enrichment of some chemical elements in sediments of the Pearl River Estuary, China. *Continental Shelf Research* 24 (16), 1857-1875.

Liste des figures

Chapitre 1 : Du marqueur particulaire à la source

Figure 1.1. Localisation de la zone d'étude près de la Mer Baltique Lituanienne (Kairyte <i>et al.</i> , 2005).	22
Figure 1.2. Localisation de la zone d'étude près de la mer Weddel. (Diekmann et Kuhn, 1999).	23
Figure 1.3. Localisation de l'étude menée sur les minéraux argileux par Oliviera <i>et al.</i> , 2002.	24
Figure 1.4. Distribution des minéraux argileux : (a) kaolinite, (b) chlorite, (c) illite, (d) smectites dans les sédiments superficiels du détroit Bransfield (Yoon <i>et al.</i> , 1992).	25
Figure 1.5. Distribution des minéraux argileux dans les alluvions récentes de la Garonne (dans Chamley, 1989, d'après Latouche, 1971).	26
Figure 1.6. Zone d'étude de l'estuaire Pearl River et direction des transports des matières en suspension. Les nombres représentent les stations d'échantillonnage (Zhou <i>et al.</i> , 2004).	27
Figure 1.7. Localisation des systèmes fluviaux de la Corée et de la Chine (Lim <i>et al.</i> , 2006).	28
Figure 1.8. Localisation de l'estuaire Mondovi en Inde (Alagarsamy, 2005).	29
Figure 1.9. Plateau continental de Sydney. Les carrés R1-R5 et I1 correspondent aux stations d'échantillonnage (Matthai <i>et al.</i> , 2002).	30
Figure 1.10. Localisation de la zone d'échantillonnage sur le plateau continental de la Californie et inventaires en ⁷ Be des sédiments superficiels (Sommerfield <i>et al.</i> , 1999).	32
Figure 1.11. Localisation de la zone d'étude sur le plateau continental du Golfe de Gascogne (Dubrulle <i>et al.</i> , 2007).	32
Figure 1.12. Localisation de la zone d'étude en Mer du Japon. Les points noirs correspondent aux stations de prélèvement (Nakamura et Nagaya, 1975).	33
Figure 1.13. Localisation de l'estuaire Pearl River au Sud de la Mer de Chine (Hu <i>et al.</i> , 2006).	34
Figure 1.14. Localisation de la zone d'étude en Mer de Chine (d'après Lü et Zhai, 2006).	35
Figure 1.15. Estuaires dominés par la marée. A) Distribution des processus dynamiques le long de l'estuaire ; B) Distribution des principaux éléments morphologiques (d'après Dalrymple <i>et al.</i> , 1992 modifié).	37
Figure 1.16. Classification morphogénétique des estuaires d'après Périllo (1995).	38
Figure 1.17. Description des différentes parties d'un estuaire proposée par Dionne (1963).	38
Figure 1.18. Le système estuarien de la Seine : zonations (en gris) d'après Fairbridge (1980), et délimitations pour la zone d'étude (en couleur).	40
Figure 1.19. Carte géologique de la basse vallée de la Seine (Lesueur et Lesourd, 1999 ; Lesourd, 2003).	43
Figure 1.20. Carte synthétique de la couverture meuble des fonds de l'estuaire de la Seine (Lesueur et Lesourd, 1999).	45
Figure 1.21. Carte lithologique et bathymétrie de la Normandie (d'après l'Atlas de la Normandie).	47
Figure 1.22. Schéma de la circulation résiduelle à l'embouchure de la Seine, basé sur des données de courant et des modèles numériques (d'après Avoine, 1986 ; Salomon et Le Hir, 1981).	49
Figure 1.23. Déformation de l'onde de marée du 5 mai 1996 (coefficient 101, débit 200 m ³ .s ⁻¹) au cours de sa progression dans l'estuaire amont de la Seine (d'après Guézennec, 1999, modifié) et illustration du flot, de l'étalement et du jusant. Données PAR.	50
Figure 1.24. Salinité en période de crue fluviale, en baie de Seine (Données CNEXO-COB-ELGMM, d'après IFREMER).	51

Figure 1.25. Distribution de la salinité en surface (‰) à marée basse, pendant une crue (A) et pendant un étiage (B) dans la baie de Seine orientale (d'après Avoine, 1986 modifié).	51
Figure 1.26. Fréquences et fréquences cumulées des hauteurs et des périodes des houles moyennes, (moyennées sur une année) entre août 1996 et mars 1998 (Données CETMEF réseau Candhis).	53
Figure 1.27. Fréquences et fréquences cumulées des hauteurs et des périodes des houles moyennes, (moyennées sur une année) entre janvier 1997 et juillet 2001 (Données CETMEF réseau Candhis).	53
Figure 1.28. Rose des houles à Villerville et Pennedepie, entre 2003 et 2005 (d'après Dubrulle <i>et al.</i> , 2005 ; Levoy <i>et al.</i> , 2004). Le trait de côte est une donnée GIPSA, 2007.	54
Figure 1.29. Débits de la Seine au barrage de Poses entre 1941 et 1990 : (—) courbes des débits minima et maxima, (—), débits mensuels moyens (d'après Guézennec, 1999, modifié). Données PAR.	55
Figure 1.30. Débits de la Seine au barrage de Poses entre 1941 et 2005 : (—) débits journaliers, (—), débit moyen entre 1941 et 2005, (- - -) débits supérieurs à $1000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Données PAR et GIPSA.	55
Figure 1.31. Concentrations et extension moyenne du bouchon vaseux en marée de vive eau, en étiage (débit de $200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) et en crue (débit de $800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) en 1978 (d'après Avoine, 1981, modifié).	56
Figure 1.32. Sources potentielles en matériel fin dans l'estuaire de la Seine, exprimées en tonnes par an ou en mètres cube, (Avoine <i>et al.</i> , 1984 ; Avoine <i>et al.</i> , 1986 ; Dupont <i>et al.</i> , 2001 et Guézennec, 1999).	60
Figure 1.33. Sources potentielles en matériel fin dans la baie de Seine, exprimées en mètres cube par an, (Avoine, 1992 ; Avoine <i>et al.</i> , 1984 ; Avoine <i>et al.</i> , 1993 ; Boust, 1999 ; Chauvin <i>et al.</i> , 1985 ; Dubrulle, 1982 ; Duval, 1994 ; Guézennec, 1999 ; Larsonneur, 1985 ; LCHF, 1973 ; Volmat, 1929).	61

Chapitre 2 : Stratégie d'échantillonnage et méthodologie analytique

Figure 2.1. Débits de la Seine entre 2002 et 2005. Missions des prélèvements de sédiments en domaine intertidal (le domaine subtidal ne concerne que le mois d'avril 2005).	67
Figure 2.2. Carte de positionnement des échantillons prélevés en estuaire de Seine en 2004 et 2005. (Tracé de l'estuaire de la Seine : données GIPSA 2007).	68
Figure 2.3. Typologie de quelques envasements caractéristiques observés sur les berges de l'estuaire de la Seine.	70
Figure 2.4. Carte de positionnement des échantillons prélevés le long du littoral bas-normand lors des campagnes de 2002, 2003, 2004 et 2005.	72
Figure 2.5. Vue aérienne du littoral de Deauville-sur-Mer à basse mer, laissant découvrir la morphologie de la plage, avec barres et dépressions inter-barres (ou bâches) et réseaux de drainage transverses (Deauville-sur-Mer).	72
Figure 2.6. Typologie de quelques envasements observés sur les plages du Calvados.	74
Figure 2.7. Typologie de quelques envasements observés à l'ouest du littoral bas-normand de la baie de Seine.	75
Figure 2.8. Typologie de quelques affleurements de falaises vives le long du littoral bas-normand.	76
Figure 2.9. Localisation des échantillons prélevés sur les berges des cours d'eau côtiers (Orne, Dives et Touques) en 2004 et 2005.	77

Figure 2.10. Typologie de quelques envasements caractéristiques observés sur les berges des trois cours d'eau côtiers : Orne, Dives et Touques.	78
Figure 2.11. Typologie de quelques envasements en amont des barrages de l'Orne, de la Dives et de la Touques.	79
Figure 2.12. Carte de positionnement des échantillons prélevés en domaine subtidal en baie et estuaire de Seine en 2004 et 2005.	80
Figure 2.13. Typologie de quelques envasements subtidaux du chenal de navigation, dans l'estuaire de la Seine, en avril 2005.	81
Figure 2.14. Typologie de quelques envasements subtidaux à l'embouchure de l'estuaire de la Seine, en avril 2005.	82
Figure 2.15. Typologie de quelques envasements subtidaux dans la partie Est de la baie de Seine orientale, en avril 2005.	83
Figure 2.16. Typologie de quelques envasements subtidaux dans la partie centrale de la baie de Seine orientale, en avril 2005.	84
Figure 2.17. Typologie de quelques envasements subtidaux dans la partie Ouest de la baie de Seine orientale, en avril 2005.	84
Figure 2.18. Carte de positionnement des matières en suspension (MES) prélevées en domaine subtidal en baie et estuaire de Seine en avril 2005.	85
Figure 2.19. Photographies montrant le principe de décantation par ampoule à décanter. L'image de droite agrandie permet de voir nettement la limite entre deux classes granulométriques.	88
Figure 2.20. Mesure de la cristallinité de l'illite ou des smectites sur le diffractogramme de l'essai glycolé (d'après Holtzapffel, 1985, modifié).	91
Figure 2.21. Éléments mesurés dans les sédiments par ICP-OES et par ICP-MS.	92

Chapitre 3 : Distribution des marqueurs particuliers dans l'estuaire de la Seine, dans la baie de Seine, sur le littoral bas-normand et dans les cours d'eau côtiers bas-normands

Figure 3.1. Courbes granulométriques de la fraction < 50 µm des sédiments récoltés sur les berges de l'estuaire de la Seine en février 2004, octobre-novembre 2004 et avril 2005.	101
Figure 3.2. Diffractogrammes caractéristiques des cortèges argileux trouvés dans l'estuaire de la Seine.	104
Figure 3.3. Relation entre l'indice de cristallinité de l'illite (en 2θ) et la distance dans l'estuaire de la Seine (PK) pour les sédiments intertidaux et subtidaux. Les lignes en pointillées correspondent aux valeurs supérieures et inférieures.	105
Figure 3.4. Relation entre l'indice de cristallinité des smectites et la distance dans l'estuaire de la Seine (PK) pour les sédiments intertidaux et subtidaux.	105
Figure 3.5. Semi-quantification des cortèges argileux dans l'estuaire de la Seine pour les sédiments intertidaux (berges) et subtidaux (fond de chenal).	107
Figure 3.6. Carte géologique (extrait de la carte géologique de la Normandie au 1/50000, BRGM) et minéraux argileux associés de l'estuaire de la Seine.	109
Figure 3.7. Facteurs d'enrichissement (FE) des échantillons des berges de l'estuaire de Seine, toutes années confondues (février 2004, octobre-novembre 2004 et avril 2005).	112
Figure 3.8. Facteurs d'enrichissement (FE) des échantillons subtidaux (fond de chenal) prélevés dans l'estuaire de Seine en avril 2005.	112

Figure 3.9. Relation entre les teneurs en Si et Al calculées sur la base d'un sédiment décarbonaté (CFB), droite représentative des sédiments intertidaux et subtidaux de l'estuaire de la Seine.	113
Figure 3.10. Diagrammes ternaires représentant la proportion en carbonates, quartz et aluminosilicates pour chaque échantillon prélevé sur les berges de la Seine (en février 2004, octobre-novembre 2004 et avril 2005) et dans le chenal de navigation de l'estuaire de Seine (avril 2005).	114
Figure 3.11. Relation entre les teneurs en K et Al pour les sédiments intertidaux et subtidaux de l'estuaire de la Seine.	114
Figure 3.12. Relation entre les teneurs en Mg et Al pour les sédiments intertidaux et subtidaux de l'estuaire de la Seine.	115
Figure 3.13. Relation entre les teneurs en Fe et Al pour les sédiments intertidaux et subtidaux de l'estuaire de la Seine.	115
Figure 3.14. Relations entre les teneurs en P et Al, et les teneurs en Ti et Al pour les sédiments intertidaux et subtidaux de l'estuaire de la Seine.	116
Figure 3.15. Répartition de la teneur en carbonates selon la distance pour les sédiments intertidaux et subtidaux de l'estuaire de la Seine.	116
Figure 3.16. Relation entre les teneurs en Sr et Al pour les sédiments intertidaux et subtidaux de l'estuaire de la Seine.	117
Figure 3.17. Corrélations à l'aluminium pour Rb, Ga, Ge et Cs pour les sédiments intertidaux et subtidaux de l'estuaire de la Seine.	118
Figure 3.18. Corrélations à l'aluminium pour Zr et relation entre l'excès de Zr et Si pour les sédiments intertidaux et subtidaux de l'estuaire de la Seine.	119
Figure 3.19. Relations entre et les excès de Yb, U avec les excès de Zr et les excès de Zr avec ceux de Ti, pour les sédiments intertidaux et subtidaux de l'estuaire de la Seine.	119
Figure 3.20. Corrélations à l'aluminium pour Zn, Cu, Cd, Cr, Sn, Sb, Pb et Bi pour les sédiments intertidaux et subtidaux de l'estuaire de la Seine. Des agrandissements sont présentés pour le Cd et le Bi (bas de la figure à droite).	121
Figure 3.21. Facteurs d'enrichissement (FE) du Cd, Cu, Cr, Bi, Sn, Sb, Zn et Pb portés en fonction de la distance (PK) pour tous les échantillons prélevés en domaine intertidal et subtidal de l'estuaire de la Seine. LH : Le Havre, R : Rouen, P : Poses. La ligne rouge en pointillés situe le barrage à Poses.	122
Figure 3.22. Facteurs d'enrichissement (FE) du Cr, Cd, Cu et Zn portés en fonction de la distance (PK) pour les échantillons prélevés en domaine intertidal de l'estuaire de la Seine, entre 1980 et 2000 (Données Cellule Anti-Pollution du port de Rouen). LH : Le Havre, R : Rouen, P : Poses. La ligne rouge en pointillés situe le barrage à Poses. La zone en vert indique la position de la zone de transition.	123
Figure 3.23. Activités du ^{241}Am , du ^{60}Co , du ^{137}Cs et du ^{40}K mesurées dans les sédiments des berges de l'estuaire de la Seine en 2004 et 2005 (toutes les activités ont été référencées au 1 janvier 2005).	125
Figure 3.24. Quelques corrélations entre des radionucléides naturels (^{40}K) et artificielles (^{60}Co , ^{137}Cs et ^{241}Am) dans les fractions fines des sédiments intertidaux et subtidaux de l'estuaire de la Seine en 2004 et 2005.	127
Figure 3.25. Corrélations ^{137}Cs -Al et ^{60}Co -Al, et représentations des rapports $^{137}\text{Cs}/\text{Al}$ et $^{60}\text{Co}/\text{Al}$ selon le PK (point kilométrique) pour les sédiments intertidaux et subtidaux de l'estuaire de la Seine en 2004 et 2005.	128
Figure 3.26. Evolution du rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ dans les fractions fines des sédiments des berges de la Seine, en 2004 et 2005 en fonction de la distance (PK). LH : Le Havre, R : Rouen et P : Barrage de Poses.	129
Figure 3.27. Courbes granulométriques de la fraction $< 50 \mu\text{m}$ de l'ensemble des sédiments récoltés à l'ouest du littoral normand en juin 2004 et avril 2005.	133

Figure 3.28. Courbes granulométriques de la fraction < 50 µm de deux plages de l'est du Calvados (PEN : Pennedepie, à l'est ; BLON : Blonville-sur-Mer, à l'ouest) entre mars 2002 et juin 2003. A : Argile (0-4 µm), STF : silt très fin (4-8 µm), SF : silt fin (8-16 µm), SM : silt moyen (16-32 µm), SG : silt grossier avec la limite supérieure tronquée à 50 µm (32-50 µm).	135
Figure 3.29. Courbes granulométriques de la fraction < 50 µm de l'ensemble des sédiments récoltés à l'est du littoral normand entre mars 2002 et juin 2003 et avril 2005.	136
Figure 3.30. Répartition de la fraction < 50 µm (exprimée en pourcentage) des sédiments bruts récoltés en domaine subtidal en avril 2005 dans la baie de Seine. Les petites croix noires représentent les stations d'échantillonnage (missions CYSAVA et DISPRO).	138
Figure 3.31. Cartographies des pourcentages de 5 classes granulométriques (argile (0-4 µm), silts très fins (4-8 µm), silts fins (8-16 µm), silts moyens (16-32 µm) et silts grossiers tronqués en limite supérieure (32-50 µm)) de la fraction fine (< 50 µm) des sédiments subtidaux prélevés en avril 2005 dans la baie de Seine. Les petites croix noires représentent les stations d'échantillonnage.	139
Figure 3.32. Exemples de diffractogrammes des sédiments actuels intertidaux du littoral bas-normand oriental, lors de forts ou faibles débits de la Seine.	142
Figure 3.33. Exemples de diffractogrammes des sédiments actuels intertidaux du littoral bas-normand (littoral Ouest) et subtidaux de la baie de Seine orientale.	143
Figure 3.34. Diffractogrammes types des sédiments d'âge holocène fossile (HOL02) et jurassique (FAL02).	144
Figure 3.35. Relation entre l'indice de cristallinité de l'illite (en 2θ) et la distance (PK étendu) le long du littoral bas-normand (sédiments intertidaux) et de la baie de Seine (sédiments subtidaux).	145
Figure 3.36. Relation entre l'indice de cristallinité des smectites et la distance (PK étendu) le long du littoral bas-normand (sédiments intertidaux) et de la baie de Seine (sédiments subtidaux).	146
Figure 3.37. Semi-quantifications des cortèges argileux du littoral bas-normand occidental, pour les sédiments intertidaux (plages et embouchures).	147
Figure 3.38. Semi-quantifications des cortèges argileux des sédiments intertidaux des plages de référence du littoral bas-normand oriental, à différentes périodes hydrologiques de la Seine.	149
Figure 3.39. Semi-quantifications des cortèges argileux des sédiments superficiels subtidaux actuels de la baie de Seine.	150
Figure 3.40. Semi-quantifications des cortèges argileux des sédiments fossiles intertidaux (falaises littorales d'âge jurassique) et subtidaux holocènes fossiles.	151
Figure 3.41. Carte géologique (extrait de la carte géologique de la Normandie au 1/50000, BRGM) et minéraux argileux associés du littoral normand.	153
Figure 3.42. Facteurs d'enrichissement (FE) des échantillons prélevés sur le littoral bas-normand ouest (juin 2004 et avril 2005).	156
Figure 3.43. Facteurs d'enrichissement (FE) des échantillons prélevés sur le littoral bas-normand est (mars 2002 à février 2003, et avril 2005).	156
Figure 3.44. Facteurs d'enrichissement (FE) des échantillons fossiles (Jurassique) prélevés sur le littoral bas-normand Est (2000, 2003 et 2004).	157
Figure 3.45. Facteurs d'enrichissement (FE) des échantillons subtidaux de sédiments superficiels de la baie de Seine (avril 2005).	159
Figure 3.46. Facteurs d'enrichissement (FE) des matières en suspension prélevées dans l'estuaire de la Seine et dans la baie de Seine (avril 2005).	159
Figure 3.47. Relation entre les teneurs en Si et Al calculées sur la base d'un sédiment décarbonaté (CFB) pour les sédiments intertidaux, subtidaux et des matières en suspension de la baie de Seine et du littoral bas-normand.	160

- Figure 3.48.** Diagrammes ternaires représentant la proportion en carbonates, quartz et aluminosilicates pour les échantillons intertidaux du littoral ouest (carrés jaunes) et du littoral est (triangles verts) de la baie de Seine, ainsi que les échantillons subtidaux (étoiles noires) et les matières en suspension (étoiles bleues) en baie de Seine. Le diagramme central est une compilation de tous les échantillons prélevés en baie de Seine et sur le littoral bas-normand. 162
- Figure 3.49.** Diagramme ternaire représentant la proportion en carbonates, quartz et aluminosilicates pour les échantillons fossiles du littoral normand (rond noir : Holocène, triangle noir : Jurassique, carré noir : Mésozoïque (Bathonien)). 163
- Figure 3.50.** Relation entre les teneurs en Fe, Mg, K, Ti, P et Al dans les sédiments intertidaux et subtidaux de la baie de Seine et du littoral normand, ainsi que des matières en suspension prélevées en baie de Seine. 164
- Figure 3.51.** Répartition de la teneur en carbonates selon la distance pour les sédiments intertidaux du littoral normand et cartographie du taux de carbonates dans la baie de Seine pour les sédiments subtidaux de la baie de Seine. C : Cherbourg, BV : Baie des Veys, O : Embouchure de l'Orne, LH : Le Havre. 165
- Figure 3.52.** Relation entre les teneurs en Sr et Al et corrélation entre l'excès de Sr et le taux de carbonates pour les sédiments intertidaux, subtidaux et des matières en suspension de la baie de Seine et du littoral normand. 166
- Figure 3.53.** Relation entre les teneurs en Ga, Ge, Rb, Cs et Al dans les sédiments intertidaux et subtidaux de la baie de Seine et du littoral normand, ainsi que des matières en suspension prélevées en baie de Seine. 167
- Figure 3.54.** Corrélation entre Zr et Al pour les sédiments intertidaux, subtidaux et des matières en suspension de la baie de Seine et du littoral normand. 168
- Figure 3.55.** Relation entre les excès de Zr, Yb, Ti et U pour les sédiments superficiels récents (intertidaux, subtidaux et des matières en suspension) et fossiles de la baie de Seine et du littoral bas-normand. 168
- Figure 3.56.** Relation entre les teneurs en Cu, Cr, Cd, Pb, Bi, Zn, Sn et Sb et Al dans les sédiments intertidaux et subtidaux de la baie de Seine et du littoral bas-normand, ainsi que des matières en suspension prélevées en baie de Seine. 170
- Figure 3.57.** Facteurs d'enrichissement (FE) du Cu, Sn, Zn et Sb en fonction de la distance (PK et PK étendu) pour les sédiments superficiels récents et fossiles en estuaire de Seine et sur le littoral bas-normand. C : Cherbourg, BV : Baie des Veys, O : Embouchure de l'Orne, LH : Le Havre, R : Rouen, P : Barrage de Poses. La ligne pointillée rouge représente la position du barrage de Poses. 171
- Figure 3.58.** Cartographies des facteurs d'enrichissement (FE) du Cu, Sn, Zn et Sb pour les échantillons de la baie de Seine. Les points noirs correspondent aux sites d'échantillonnages. 172
- Figure 3.59.** Activités du ^{241}Am , du ^{60}Co , du ^{137}Cs et du ^{40}K mesurées dans les sédiments prélevés sur le littoral normand en 2002, 2003, 2004 et 2005 (toutes les activités ont été référencées au 1^{er} janvier 2005). 173
- Figure 3.60.** Activités du ^{241}Am , du ^{60}Co , du ^{137}Cs et du ^{40}K (en Bq.kg^{-1}) mesurées dans les sédiments prélevés en baie de Seine en 2005 (les croix noires correspondent aux stations de prélèvements en domaine subtidal). 174
- Figure 3.61.** Quelques corrélations entre des radionucléides naturels (^{40}K) et artificiels (^{60}Co , ^{137}Cs et ^{241}Am) dans les fractions fines des sédiments prélevés sur le littoral bas-normand et dans la baie de Seine en 2002, 2003, 2004 et 2005. 175
- Figure 3.62.** Corrélations $^{137}\text{Cs}\text{-Al}$ et $^{60}\text{Co}\text{-Al}$, et représentations des rapports $^{137}\text{Cs}/\text{Al}$ et $^{60}\text{Co}/\text{Al}$ selon le PK étendu (point kilométrique étendu) pour les sédiments intertidaux et subtidaux de la baie de Seine et du littoral bas-normand entre 2002 et 2005. C : Cherbourg, BV : Baie des Veys, O : Embouchure de l'Orne, LH : Le Havre. 177
- Figure 3.63.** Evolution du rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ dans les fractions fines des sédiments prélevés sur le littoral bas-normand en 2002, 2003, 2004 et 2005 (toutes les activités sont référencées au 1^{er} janvier 2005) en fonction de la distance (PK étendu). 178

Figure 3.64. Evolution du rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ dans les fractions fines des sédiments prélevés dans la baie de Seine en 2005 (les croix noires correspondent aux stations de prélèvements en domaine subtidal).	179
Figure 3.65. Cartographie du rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ dans les sédiments de la Manche (Bertran, 2001 modifié). <i>Carte A</i> : rapport isotopique de l'usine de retraits des combustibles usés AREVA du Cap de la Hague et des rejets de la centrale nucléaire de Winfrith. <i>Carte B</i> : rapports isotopiques de l'usine de retraits des combustibles usés AREVA du Cap de la Hague.	180
Figure 3.66. Carte géologique d'un cours d'eau côtier, l'Orne (Dubrulle, 1982 modifié).	185
Figure 3.67. Carte géologique simplifiée du cours aval de la Dives (extrait de la carte géologique de la Normandie au 1/50000, BRGM, modifié).	187
Figure 3.68. Carte géologique simplifiée du cours aval de la Touques (extrait de la carte géologique de la Normandie au 1/50000, BRGM, modifié).	189
Figure 3.69. Courbes granulométriques de la fraction $< 50 \mu\text{m}$ de l'ensemble des sédiments récoltés sur les berges des bas cours de l'Orne (en 2004 et 2005), de la Dives (en 2005) et de la Touques (en 2005).	191
Figure 3.70. Diffractogrammes de quelques échantillons des berges de l'Orne, de la Dives et de la Touques (échantillon amont à gauche et aval à droite).	193
Figure 3.71. Indices de cristallinité de l'illite (2θ) selon la distance (PK défini dans chaque cours d'eau) pour les sédiments intertidaux de l'Orne, de la Dives et de la Touques.	194
Figure 3.72. Indices de cristallinités de la smectite selon la distance (PK défini dans chaque cours d'eau) pour les sédiments intertidaux des cours d'eau (Orne, Dives et Touques).	195
Figure 3.73. Semi-quantifications des cortèges argileux pour les sédiments intertidaux de l'Orne, de la Dives et de la Touques. <i>B</i> : Barrage de chaque cours d'eau.	196
Figure 3.74. Carte géologique (extrait de la carte géologique de la Normandie au 1/50000, BRGM) et minéraux argileux associés des cours d'eau côtiers bas-normands.	198
Figure 3.75. Facteurs d'enrichissement (FE) des échantillons prélevés sur les berges de la Dives en janvier 2005.	200
Figure 3.76. Facteurs d'enrichissement (FE) des échantillons prélevés sur les berges de la Touques en janvier 2005.	201
Figure 3.77. Facteurs d'enrichissement (FE) des échantillons prélevés sur les berges de l'Orne en juin 2004 et janvier 2005.	201
Figure 3.78. Relation entre les teneurs en Si et Al calculées sur la base d'un sédiment décarbonaté (CFB) pour les échantillons prélevés sur les berges de l'Orne (juin 2004 et janvier 2005), la Dives (janvier 2005) et la Touques (janvier 2005).	202
Figure 3.79. Diagramme ternaire représentant la proportion en carbonates, en quartz et aluminosilicates pour chaque échantillon prélevé sur les berges de l'Orne (juin 2004 et janvier 2005), la Dives (janvier 2005) et la Touques (janvier 2005).	203
Figure 3.80. Relation entre les teneurs en Fe, Mg, K, Ti, P et Al dans les sédiments intertidaux de l'Orne, la Dives et la Touques.	204
Figure 3.81. Répartition de la teneur en carbonates selon la distance (PK calculé respectivement) pour les sédiments intertidaux de l'Orne, la Dives et la Touques.	206
Figure 3.82. Relation entre les teneurs en Sr et Al et corrélation entre l'excès de Sr et le taux de carbonates pour les sédiments intertidaux de l'Orne, la Dives et la Touques.	207
Figure 3.83. Relation entre les teneurs en Ga, Ge, Rb, Cs et Al dans les sédiments intertidaux de l'Orne, la Dives et la Touques.	208
Figure 3.84. Relation entre Zr et Al ainsi que les excès de Zr, Yb, Ti et U pour les sédiments intertidaux de l'Orne, la Dives et la Touques.	209
Figure 3.85. Relations entre les teneurs en Cu, Cr, Cd, Pb, Bi, Zn, Sn et Al dans les sédiments intertidaux de l'Orne, la Dives et la Touques.	211

Figure 3.86. Facteurs d'enrichissement (FE) du Zn, Cd, Sn, Pb et Bi en fonction de la distance (PK) pour chaque cours d'eau côtier (Orne, Dives et Touques). La ligne pointillée rouge correspond à la position du barrage pour chacun d'entre eux.	212
Figure 3.87. Activités du ^{241}Am , du ^{60}Co , du ^{137}Cs et du ^{40}K mesurées dans les sédiments des berges de des cours d'eau côtiers Orne, Dives et Touques selon le PK calculé pour chaque cours d'eau (toutes les activités des radionucléides ont été référencées au 1 ^{er} janvier 2005). Les lignes rouges pointillées correspondent à la position des barrages sur chaque cours.	214
Figure 3.88. Quelques corrélations entre des radionucléides naturels (^{40}K) et artificielles (^{60}Co , ^{137}Cs et ^{241}Am) dans les fractions fines des sédiments des berges de l'Orne, la Dives et la Touques.	215
Figure 3.89. Corrélations $^{137}\text{Cs-Al}$ et $^{60}\text{Co-Al}$ pour les sédiments intertidaux de l'Orne, la Dives et la Touques.	216
Figure 3.90. Représentations des rapports $^{137}\text{Cs/Al}$ et $^{60}\text{Co/Al}$ selon le PK (point kilométrique calculé pour chaque cours d'eau) pour les sédiments intertidaux de l'Orne, la Dives et la Touques. Les lignes pointillées rouges correspondent à la position des barrages dans chaque cours d'eau. Les flèches indiquent la position des prélèvements où le ^{60}Co n'a pas été détecté dans les sédiments.	217
Figure 3.91. Evolution du rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ dans les fractions fines des sédiments des berges de l'Orne, la Dives et la Touques en fonction de la distance (PK calculé pour chaque cours d'eau côtier). Les lignes pointillées rouges correspondent à la position des barrages dans chaque cours d'eau. Les flèches indiquent la position des prélèvements où le ^{60}Co n'a pas été détecté dans les sédiments.	218
Figure 3.92. Evolutions du rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ et de la teneur en carbonates dans les fractions fines des sédiments des berges de l'Orne, la Dives et la Touques en fonction de la distance (PK calculé pour chaque cours d'eau côtier). Les lignes pointillées rouges correspondent à la position des barrages dans chaque cours d'eau. Les flèches bleues indiquent la position des prélèvements où le ^{60}Co n'a pas été détecté dans les sédiments. Les flèches rouges indiquent les tendances des teneurs en carbonates et des rapports $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$.	220
Figure 3.93. Photographie de l'Orne aval. La ligne pointillée souligne le tracé du cours d'eau.	221
Figure 3.94. Photographie de la Dives aval. La ligne pointillée souligne le tracé du cours d'eau.	221
Figure 3.95. Photographie de la Touques aval. La ligne pointillée souligne le tracé du cours d'eau.	221

Chapitre 4 : Les contributions en matériel fin dans la sédimentation fine actuelle du système estuarien de la Seine

Figure 4.1. Répartition des populations granulométriques de la fraction fine, au sein du continuum Seine-baie de Seine.	230
Figure 4.2. Répartition des cortèges de minéraux argileux des sédiments intertidaux et subtidaux, au sein du continuum Seine-baie de Seine.	232
Figure 4.3. Courbes granulométriques des fractions 0-8 ; 8-16 ; 16-32 et 32-50 μm des échantillons intertidaux AMON, JUMI, HONF, prélevés en novembre 2004 et BLON, en avril 2005.	234
Figure 4.4. Répartition des concentrations normées à l'aluminium du K, Be, Fe, Cs, Co, Bi, Cd, Pb, Cu et Zn dans les fractions granulométriques 0-8 ; 8-16 ; 16-32 et 32-50 μm des échantillons intertidaux AMON, JUMI, HONF prélevés en novembre 2004 et BLON en avril 2005.	236
Figure 4.5. Répartition des concentrations normées à l'aluminium du Hf et Zr dans les fractions granulométriques 0-8 ; 8-16 ; 16-32 et 32-50 μm des échantillons intertidaux AMON, JUMI, HONF prélevés en novembre 2004 et BLON en avril 2005.	237

Figure 4.6. Répartition des concentrations normées à l'aluminium du Na et Si dans les fractions granulométriques 0-8 ; 8-16 ; 16-32 et 32-50 μm des échantillons intertidaux AMON, JUMI, HONF prélevés en novembre 2004 et BLON en avril 2005.	237
Figure 4.7. Répartition des concentrations normées à l'aluminium du Ba, Ce, Cr et Th dans les fractions granulométriques 0-8 ; 8-16 ; 16-32 et 32-50 μm des échantillons intertidaux AMON, JUMI, HONF prélevés en novembre 2004 et BLON en avril 2005.	238
Figure 4.8. Cartographie des facteurs d'enrichissement (FE) du cuivre et du zinc des sédiments intertidaux et subtidaux, au sein du continuum Seine-baie de Seine.	240
Figure 4.9. Distribution du rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ dans le système estuarien de la Seine et des cours d'eau côtiers bas-normands en 2005.	242
Figure 4.10. Représentation schématique du mélange particulaire dans le système estuarien de la Seine.	244
Figure 4.11. Principe de l'analyse en composantes principales (d'après Lebart <i>et al.</i> , 1995 modifié).	246
Figure 4.12. Droite d'ajustement du nuage de n points (d'après Lebart <i>et al.</i> , 1995 modifié).	247
Figure 4.13. Principe de projection des points-individus sur la droite H1 (d'après Lebart <i>et al.</i> , 1995 modifié).	247
Figure 4.14. Représentation de la sphère et du cercle des corrélations (d'après Lebart <i>et al.</i> , 1995 modifié).	248
Figure 4.15. Corrélations et distances entre points-variables (d'après Lebart <i>et al.</i> , 1995 modifié).	248
Figure 4.16. Histogramme des valeurs propres.	252
Figure 4.17. Représentation des variables selon les axes F1 et F2, F1 et F3 et F1 et F4.	253
Figure 4.18. Représentation des individus selon les axes F1 et F2.	254
Figure 4.19. Limites de la zone de mélange dans le continuum Seine-baie de Seine.	262
Figure 4.20. Schéma illustrant les bases de la sédimentation fine actuelle dans le système estuarien de la Seine.	264
Figure 4.21. Les différentes contributions de la sédimentation fine actuelle à une longue échelle de temps (pluri-annuelle). Les lignes pointillées rouges correspondent aux limites géographiques des différents ensembles.	266
Figure 4.22. Les différentes contributions de la sédimentation fine actuelle à court terme (saisonniers) sous des conditions extrêmes. Les lignes pointillées rouges correspondent aux limites géographiques des différents ensembles.	267

Liste des tableaux

Chapitre 1 : Du marqueur particulière à la source

Tableau 1.1. Principales directions de vent enregistrées au Cap de la Hève en baie de Seine.	52
---	----

Chapitre 2 : Stratégie d'échantillonnage et méthodologie analytique

Tableau 2.1. Temps de décantation pour séparer des fractions granulométriques.	87
---	----

Chapitre 3 : Distribution des marqueurs particuliers dans l'estuaire de la Seine, dans la baie de Seine, sur le littoral bas-normand et dans les cours d'eau côtiers bas-normands

Tableau 3.1. Détermination et semi-quantification (%) des cortèges minéralogiques argileux des sédiments subtidiaux et intertidaux de l'estuaire de la Seine.	103
Tableau 3.2. Détermination des cortèges minéralogiques argileux des sédiments intertidaux et subtidiaux de la baie de Seine et du littoral bas-normand.	141
Tableau 3.3. Détermination des cortèges minéralogiques argileux des sédiments fossiles de la baie de Seine (affleurements subtidiaux d'argiles holocènes en l'érosion) et du littoral bas-normand (falaises vives jurassiques de Villerville).	144
Tableau 3.4. Semi-quantifications moyennes des sédiments intertidaux et subtidiaux (actuels et fossiles) de la baie de Seine et du littoral bas-normand.	182
Tableau 3.5. Coordonnées géographiques des stations de prélèvements sur l'Orne (en 2004 et 2005) ainsi que les PK calculés à partir du PK0 correspondant au barrage présent sur l'Orne à Caen. Un PK négatif correspond à une station située à l'amont du barrage.	186
Tableau 3.6. Coordonnées géographiques des stations de prélèvements sur la Dives (en 2005) ainsi que les PK calculés à partir du PK0 correspondant au barrage près de Saint-Samson. Un PK négatif correspond à une station située à l'amont du barrage.	188
Tableau 3.7. Coordonnées géographiques des stations de prélèvements sur la Touques (en 2005) ainsi que les PK calculés à partir du PK0 correspondant au barrage. Un PK négatif correspond à une station située à l'amont du barrage.	189
Tableau 3.8. Identifications, semi-quantifications (%) et détermination des indices de cristallinité de l'illite (2θ) et des smectites des cortèges des minéraux argileux des sédiments intertidaux des berges de l'Orne, de la Dives et de la Touques.	192
Tableau 3.9. Semi-quantifications moyennes des sédiments intertidaux de l'Orne, la Dives et la Touques.	222

Chapitre 4 : Les contributions en matériel fin dans la sédimentation fine actuelle du système estuarien de la Seine

Tableau 4.1. Proportions granulométriques (%) de la fraction fine des échantillons intertidaux AMON, JUMI, HONF, BLON, avant séparation de la fraction fine.	235
Tableau 4.2. Données géochimiques utilisées pour l'analyse en composantes principales.	250
Tableau 4.3. Valeurs propres calculées pour les treize variables.	252

Tableau 4.4. Contributions des variables (%).	253
Tableau 4.5. Caractéristiques géochimiques des pôles de mélange (exprimées en Bq.kg ⁻¹ pour le ⁶⁰ Co et en ppm pour le Zn et As).	255
Tableau 4.6. Caractéristiques géochimiques des pôles de mélange (exprimées en Bq.kg ⁻¹ pour le ⁶⁰ Co et en ppm pour le Cu et Ni).	255
Tableau 4.7. Caractéristiques géochimiques des pôles de mélange (exprimées en Bq.kg ⁻¹ pour le ⁶⁰ Co et en ppm pour le Zn et As).	256
Tableau 4.8. Caractéristiques géochimiques des pôles de mélange (exprimées en Bq.kg ⁻¹ pour le ⁶⁰ Co et en ppm pour le Zn et As).	256
Tableau 4.9. Caractéristiques géochimiques des pôles de mélange (exprimées en Bq.kg ⁻¹ pour le ⁶⁰ Co et en ppm pour le Zn et As).	256
Tableau 4.10. Détermination des contributions A, B et C pour les cas 1 à 5. Le "reste " correspond aux contributions complémentaires pour atteindre 100 %.	259

Glossaire

Activité : nombre de désintégrations nucléaires spontanées se produisant par unité de temps dans un élément de matière radioactive.

Adsorption : fixation ou concentration d'éléments ou de substances à la surface d'un corps solide.

AFNOR : acronyme de l'Association Française de Normalisation. Centralisant en France les travaux de normalisation, elle garantit par un label que les produits diffusés sont conformes à ses normes.

Bâche : dépression de l'estran allongée parallèle à la côte, retenant de l'eau pendant assez longtemps après la pleine mer. Elle est couplée avec la barre d'estran.

Barre d'avant-plage : sur une côte sableuse, sable déplacé par le déferlement et rejeté vers le large.

Bassin versant : aire géographique arrosée par un fleuve et ses affluents

Becquerel (Bq) : unité de mesure équivalant à une désintégration par seconde avec émission d'un rayonnement.

Bouchon vaseux : zone dans l'embouchure où les sédiments fins en suspension sont fortement concentrés (100 à 500 fois plus important que dans le cours d'eau ou en mer). Ce phénomène est caractéristique des estuaires à marée, résultant de la rencontre des eaux du fleuve avec les eaux marines. Dans cette zone de transition, la plupart des organismes d'eau douce y meurent au contact des eaux salées, contribuant avec les sédiments en suspension à former une masse " vaseuse " en suspension permanente qui se déplace au gré de la marée et évolue avec les conditions hydrologiques du fleuve.

CETMEF : Centre d'Etudes Maritimes et Fluviales.

CNEXO : Centre National pour l'Exploitation des Océans.

Concentration : quantité d'un élément ou d'une substance par unité de volume ou de poids.

Contaminant / polluant : un composé chimique est « classé » comme contaminant s'il est présent dans un environnement sans provoquer d'effets toxiques pour l'écosystème, il devient un polluant dès qu'il est toxique pour le milieu où il se trouve.

Crème de vase : mélange instable de vase et d'eau situé près du fond des chenaux estuariens en zone saline, associé au bouchon vaseux.

Débit (m³.s⁻¹) : volume d'eau qui s'écoule dans un cours d'eau par unité de temps.

Décantation : séparation des matières solides en suspension de densité supérieure à celle de l'eau par l'action exclusive de la force de la gravité.

Demi-vie : temps (= durée) nécessaire pour qu'une substance radioactive perde la moitié de son activité.

Dépôt de dragage : aire parfois sous-marine sur laquelle sont déversés les produits de dragage réalisés dans les ports et leurs chenaux d'accès.

Dérive littorale : migration progressive le long du littoral de masses de sédiments sous l'action de houles obliques.

Détritique : sédiment formé de débris, autres que ceux des organismes vivants. Le terme s'applique aux différents produits de l'érosion terrestre ou marine qui transitent vers un lieu où ils pourront se stabiliser. Les sédiments détritiques, à l'origine sont des dépôts meubles de particules d'origine minérale ou organique sur le fond d'une étendue d'eau océanique, lacustre, fluviale. La diagenèse de ceux-ci donne les roches sédimentaires.

DIREN : Direction Régionale de l'Environnement.

Dragage : fait de prélever du sédiment sur le fond de la mer ou d'une rivière à l'aide d'une drague, pour étudier un échantillon de sédiment, ou approfondir un chenal navigable .

Estran : partie du littoral alternativement couverte et découverte par la mer (= zone de balancement des marées). Bande côtière comprise entre les niveaux atteints par les plus hautes mers et les plus basses mers, alternativement émergée et submergée, il est limité par la laisse de pleine mer et celle de basse mer.

Estuaire : embouchure d'un cours d'eau, de forme évasée dessinant dans le rivage une sorte de golfe évasé et profond et où la mer remonte. C'est une zone de mélange entre eaux douces et eaux marines. Ce mélange induit un gradient très important des propriétés physico-chimiques des eaux, variable dans l'espace et dans le temps. Un estuaire est constitué par une masse d'eau confinée ayant une connection libre avec la mer ouverte et à l'intérieur duquel l'eau de mer est diluée d'une façon mesurable avec l'eau douce issue du drainage du bassin versant.

Falaise : forme de côtes, caractérisée par un escarpement rocheux, plus ou moins abrupt créée par l'érosion marine.

Flot : courant de marée dans le sens de la marée montante.

GIPSA : Groupement d'Intérêt Public Seine Aval.

Haut-estran : partie de l'estran située au plus haut, immédiatement en avant du trait de côte.

Holocène : période géologique la plus récente de l'ère quaternaire et qui a débutée il y a 10 000 ans.

ICP-MS : " Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometer ", cet acronyme est traduit en français par spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif.

ICP-OES : " Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer ", cet acronyme est traduit en français par spectrométrie d'émission optique à plasma à couplage inductif.

IFREMER : Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer.

Intertidal : zone de balancement des marées (découverte à basse mer).

Intrusion saline : phénomène dans lequel une masse d'eau salée pénètre à l'intérieur d'une masse d'eau douce.

Jusant : courant de marée portant dans le sens de la marée descendante (= vers l'aval).

Karst : terme géomorphologique allemand qui désigne une région constituée par des roches carbonatées, compactes et solubles, dans lesquelles apparaissent des formes superficielles (lapiez) et souterraines caractéristiques.

Loess : roche sédimentaire détritique meuble formée par l'accumulation de limons issus de l'érosion éolienne (déflation) dans les régions désertiques et périglaciaires.

Macrotidal : qualifie un milieu subissant des amplitudes de marée importantes (plus de 4 à 5 mètres).

Marnage : différence de hauteur d'eau, observée ou calculée, en un lieu et pour un jour donné entre le niveau de pleine mer et le niveau de basse mer.

Matières en suspension (MES) : ensemble de particules solides de petite taille transportées au sein de la masse d'eau.

Mortes-eaux : périodes au cours desquelles l'amplitude de la marée est particulièrement faible.

P.A.R. : Port Autonome de Rouen.

Pélite : particules fines (éléments de 50 à 63 µ au plus) constitutives des vases littorales et présentant un rapport très faible entre leur masse et leur surface de contact.

Phosphogypse : Le phosphogypse est le sous-produit de la fabrication de l'acide phosphorique, résultant de l'attaque sulfurique d'un minerai de phosphate de calcium naturel, l'apatite. Le phosphogypse se présente sous la forme d'une très fine poudre humide. Il est principalement constitué d'oxydes de soufre et de calcium, et dans une moindre mesure d'oxydes de silicium, de sodium. Les minerais de phosphate utilisés contiennent de nombreuses impuretés, qui dans la plupart des cas se concentrent dans le phosphogypse. C'est par exemple le cas des éléments traces métalliques (strontium, baryum, cuivre...) et des radio-éléments (²²⁶radium, ²¹⁰plomb, ²¹⁰polonium...).

PK : point kilométrique permettant un positionnement le long d'un cours d'eau. Pour la Seine, la référence amont PK 0 est située à l'ancienne écluse de la Monnaie de Paris.

Rade : grand bassin naturel ou artificiel, bien protégé des houles du large, ayant une issue vers la mer et où les navires peuvent mouiller.

Radioéléments : élément naturel ou artificiel, possédant une radioactivité ; c'est-à-dire la propriété de se transformer en un autre élément en émettant – par modification du noyau de son atome – des rayonnements corpusculaires (particules X ou β, ou électrons) ou électromagnétiques.

Schorre : nom flamand des prés salés ou des marais maritimes, utilisé dans le langage morphologique des environnements littoraux tempérés.

Shales (référence) : matériel détritique argilo-silteux dont la composition géochimique moyenne est celle de la croûte terrestre.

Slikke : mot flamand désignant, dans un estuaire ou une baie, une étendue de vase limitée vers le haut par le niveau de haute mer de morte-eau (où elle passe au schorre).

Subtidal : qualifie la zone située en-dessous de la zone de balancement des marées et ne découvrant donc jamais à marée basse.

Teneur : partie d'un corps formée d'un élément déterminé. La teneur s'exprime en pourcentage ou en poids de l'élément par rapport au poids ou au volume du corps.

Tourbe : dépôt formé par l'accumulation de matières organiques dans un milieu réducteur.

Tufs : concrétions calcaires poreuses friables provenant de la précipitation d'eau de sources riches en carbonate de calcium.

Vase : dépôt d'origine terrigène dont la taille des particules est inférieure à 2 microns. On parle de vase fine lorsque les pélites prédominent, de vase sableuse si la proportion de sables avoisine la moitié et de sable vaseux lorsque la proportion de sable est supérieure à celle des pélites.

Vasière : accumulation marine, fluvio-marine ou fluviale de matériaux pélitiques, déposés en milieu protégé.

Vive-eau : marée d'amplitude maximum correspondant aux périodes de pleine et de nouvelles lunes.

Volume oscillant : masse d'eau qui, dans un estuaire, se déplace alternativement vers l'amont puis l'aval sous l'influence de la marée.

Table des matières

Dédicace	1
Remerciements	5
Sommaire	11
Introduction générale	15

Chapitre 1 : Du marqueur particulière à la source

Sommaire du chapitre 1	19
Introduction	21
I – La discrimination des sources de particules fines : une grande diversité	22
I.1. Marqueurs minéralogiques	22
<i>I.1.1. Analyse minéralogique globale</i>	22
<i>I.1.2. Analyse minéralogique spécifique : l'exemple des minéraux argileux</i>	23
I.2. Marqueurs géochimiques	26
<i>I.2.1. Identification de sources et dynamique sédimentaire associée</i>	27
<i>I.2.2. Marqueurs de pollution</i>	29
I.3. Marqueurs radioactifs	30
<i>I.3.1. Différence entre les radionucléides à longue et courte période</i>	31
<i>I.3.2. Utilisation des radionucléides artificiels</i>	32
I.4. Marqueurs organiques	33
I.5. Marqueurs biogènes	35
II – Marquage des particules fines dans le système estuarien de la Seine	36
II.1. Le système estuarien de la Seine	36
<i>II.1.1. Définitions d'un système estuarien</i>	36
<i>II.1.2. Zonation longitudinale de l'estuaire de la Seine au sens strict (s.s.)</i>	39
<i>II.1.3. Cadre géologique du système estuarien de la Seine</i>	41
<i>II.1.4. Géomorphologie du système estuarien de la Seine</i>	46
<i>II.1.5. Caractéristiques hydrodynamiques du système estuarien de la Seine</i>	48
<i>II.1.6. Caractéristiques hydrosédimentaires de l'estuaire de la Seine</i>	54
II.2. Bilans des sources et des transferts de sédiments fins dans le système estuarien de la Seine	57
<i>II.2.1. Sources et transferts depuis la Seine fluviale</i>	57
<i>II.2.2. Sources et transferts dans l'estuaire de la Seine</i>	57
<i>II.2.3. Sources et transferts en baie de Seine</i>	58
Conclusion	62

Chapitre 2 : Stratégie d'échantillonnage et méthodologie analytique

Sommaire du chapitre 2	65
I – Prélèvements des dépôts envasés en estuaire et en baie de Seine	67
I.1. Échantillonnages en domaine intertidal	67
<i>I.1.1. La Seine et son estuaire</i>	68
<i>I.1.2. Le littoral bas-normand en baie de Seine</i>	71
<i>I.1.3. Les cours d'eau côtiers bas-normands : Orne, Dives et Touques</i>	76
I.2. Échantillonnages en domaine subtidal	79
<i>I.2.1. Les sédiments vaseux en Seine et baie de Seine</i>	79
<i>I.2.2. Les matières en suspension (MES) en Seine et baie de Seine</i>	85

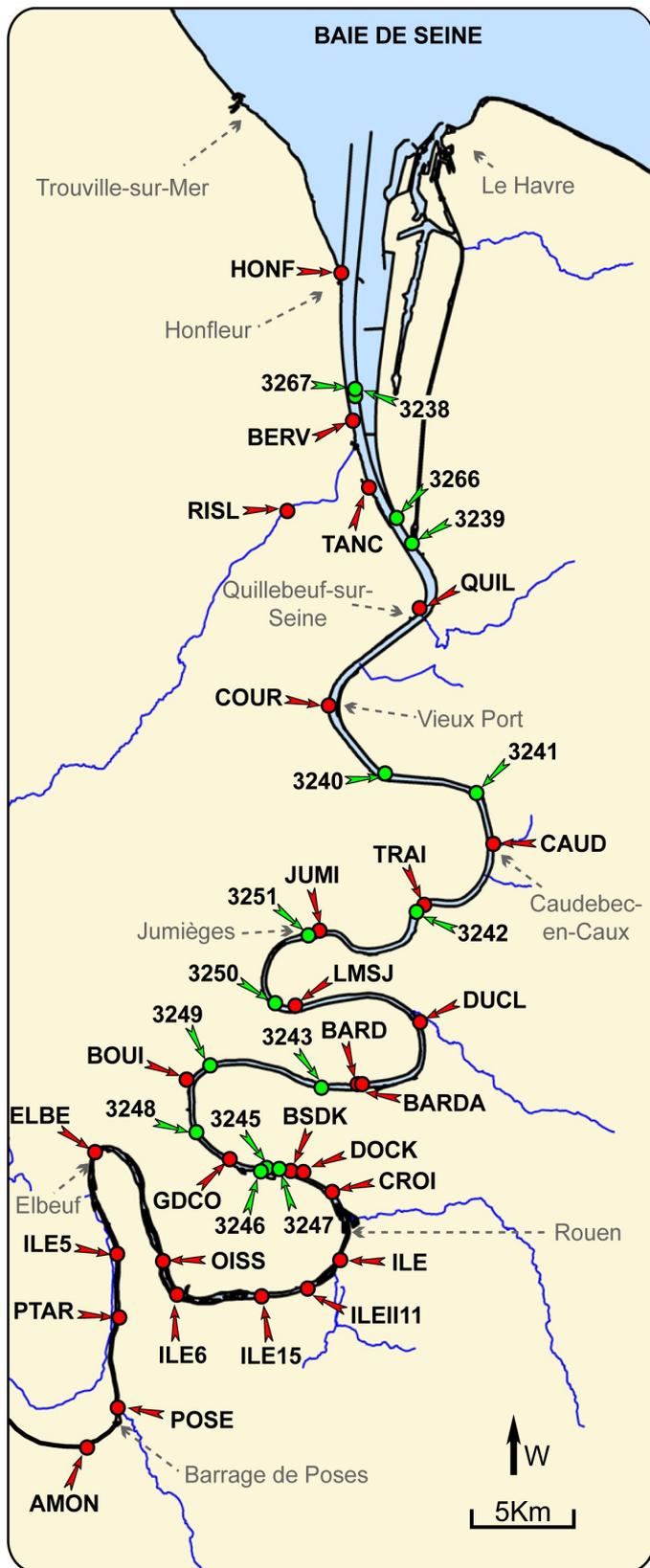
II – Méthodologie analytique	86
II.1. Séparation de la fraction fine (< 50 µm)	86
<i>II.1.1. Les sédiments superficiels</i>	<i>86</i>
<i>II.1.2. Les matières en suspension (MES)</i>	<i>88</i>
II.2. Analyse granulométrique des sédiments	88
II.3. Calcimétrie volumétrique des sédiments	89
II.4. Détermination et quantification des cortèges des minéraux argileux	89
<i>II.4.1. Préparation et fabrication des lames orientées</i>	<i>89</i>
<i>II.4.2. Analyse par diffractométrie RX</i>	<i>90</i>
<i>II.4.3. Écriture des cortèges des minéraux argileux</i>	<i>90</i>
<i>II.4.4. Indices de cristallinité</i>	<i>90</i>
<i>II.4.5. Semi-quantification des cortèges des minéraux argileux</i>	<i>91</i>
II.5. Analyse des éléments majeurs-mineurs-traces	92
<i>II.5.1. Préparation des échantillons</i>	<i>92</i>
<i>II.5.2. Analyse par ICP-MS et ICP-OES</i>	<i>92</i>
<i>II.5.3. Traitement des données</i>	<i>93</i>
II.6. Analyse des radionucléides	93
<i>II.6.1. Préparation des échantillons</i>	<i>93</i>
<i>II.6.2. Analyse par spectrométrie gamma</i>	<i>93</i>
<i>II.6.3. Origine des radionucléides artificiels et naturels</i>	<i>93</i>
<i>II.6.4. Normalisation des activités à une date de référence</i>	<i>94</i>
Chapitre 3 : Distribution des marqueurs particuliers dans l'estuaire de la Seine, dans la baie de Seine, sur le littoral bas-normand et dans les cours d'eau côtiers bas-normands	
<hr/>	
Sommaire du chapitre 3	97
Introduction	99
I – L'estuaire de la Seine	99
I.1. Caractéristiques granulométriques des sédiments de l'estuaire de la Seine	99
I.2. Les minéraux argileux des sédiments dans l'estuaire de la Seine	102
<i>I.2.1. Caractérisation des cortèges des minéraux argileux</i>	<i>102</i>
<i>I.2.2. Discussion sur l'origine des minéraux argileux de l'estuaire de la Seine</i>	<i>108</i>
I.3. Distribution des éléments majeurs-mineurs-traces dans les sédiments de l'estuaire de la Seine	109
<i>I.3.1. Facteurs d'enrichissement</i>	<i>109</i>
<i>I.3.2. Constituants majoritaires du mélange sédimentaire</i>	<i>113</i>
<i>I.3.3. Éléments en trace corrélés aux carbonates dans les sédiments</i>	<i>116</i>
<i>I.3.4. Éléments en trace corrélés à l'aluminium dans les sédiments</i>	<i>117</i>
<i>I.3.5. Éléments dont la concentration est modulée par la présence de minéraux lourds</i>	<i>118</i>
<i>I.3.6. Éléments en trace très excédentaires par rapport aux shales</i>	<i>119</i>
<i>I.3.7. Éléments chimiques susceptibles de constituer des marqueurs discriminants de stocks particuliers</i>	<i>120</i>
I.4. Distribution des radionucléides naturels et artificiels dans les sédiments de l'estuaire de la Seine	124
<i>I.4.1. Résultats bruts</i>	<i>124</i>
<i>I.4.2. Corrélations entre radionucléides</i>	<i>126</i>
<i>I.4.3. Corrélations des radionucléides à l'aluminium</i>	<i>127</i>
<i>I.4.4. Rapport ⁶⁰Co/¹³⁷Cs</i>	<i>128</i>
Résumé : L'estuaire de la Seine	130

II – La baie de Seine et le littoral bas-normand	132
II.1. Caractéristiques granulométriques des sédiments en baie de Seine et sur le littoral bas-normand	132
<i>II.1.1. Zone ouest du littoral bas-normand</i>	<i>132</i>
<i>II.1.2. Zone est du littoral bas-normand</i>	<i>134</i>
<i>II.1.3. La baie de Seine</i>	<i>137</i>
II.2. Cortèges des minéraux argileux des sédiments en baie de Seine et sur le littoral bas-normand	140
<i>II.2.1. Caractérisation des cortèges des minéraux argileux</i>	<i>140</i>
<i>II.2.2. Discussion sur l'origine des minéraux argileux de la baie de Seine et du littoral bas-normand adjacent</i>	<i>151</i>
II.3. Distribution des éléments majeurs-mineurs-traces des sédiments et des matières en suspension de la baie de Seine et du littoral bas-normand	154
<i>II.3.1. Facteurs d'enrichissement</i>	<i>154</i>
<i>II.3.2. Constituants majoritaires du mélange sédimentaire</i>	<i>160</i>
<i>II.3.3. Les carbonates dans les sédiments et le strontium associé</i>	<i>165</i>
<i>II.3.4. Éléments en traces corrélés à l'aluminium dans les sédiments</i>	<i>166</i>
<i>II.3.5. Éléments dont la concentration est modulée par la présence de minéraux lourds</i>	<i>167</i>
<i>II.3.6. Éléments en traces très excédentaires par rapport aux shales</i>	<i>169</i>
<i>II.3.7. Synthèse : candidats aux marquages particulières du domaine fluvial</i>	<i>171</i>
II.4. Distribution des radionucléides des sédiments de la baie de Seine et du littoral bas-normand	172
<i>II.4.1. Caractéristiques des radionucléides</i>	<i>172</i>
<i>II.4.2. Corrélations entre radionucléides</i>	<i>174</i>
<i>II.4.3. Corrélations des radionucléides à l'aluminium</i>	<i>176</i>
<i>II.4.4. Rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$</i>	<i>177</i>
Résumé : La baie de Seine et le littoral bas-normand	181
III – Les cours d'eau côtiers du Calvados : l'Orne, la Dives et la Touques	184
III.1. Présentation générale des trois cours d'eau côtiers	184
<i>III.1.1. L'Orne</i>	<i>184</i>
<i>III.1.2. La Dives</i>	<i>186</i>
<i>III.1.3. La Touques</i>	<i>188</i>
III.2. Caractéristiques granulométriques des sédiments des berges de l'Orne, la Dives et la Touques	190
III.3. Cortèges minéralogiques argileux des sédiments des berges des bas cours de l'Orne, la Dives et la Touques	192
<i>III.3.1. Caractérisation des cortèges des minéraux argileux</i>	<i>192</i>
<i>III.3.2. Discussion sur l'origine des minéraux argileux des trois cours d'eau côtiers du Calvados</i>	<i>197</i>
III.4. Distribution des éléments majeurs-mineurs-traces des sédiments des berges de l'Orne, la Dives et la Touques	198
<i>III.4.1. Facteurs d'enrichissement</i>	<i>199</i>
<i>III.4.2. Constituants majoritaires du mélange sédimentaire</i>	<i>202</i>
<i>III.4.3. Les carbonates et le strontium dans les sédiments</i>	<i>205</i>
<i>III.4.4. Éléments en traces corrélés à l'aluminium dans les sédiments</i>	<i>207</i>
<i>III.4.5. Éléments dont la concentration est modulée par la présence de minéraux lourds</i>	<i>208</i>
<i>III.4.6. Éléments en traces très excédentaires par rapport aux shales</i>	<i>210</i>
<i>III.4.7. Éléments chimiques susceptibles de constituer des marqueurs discriminants de stocks particulières</i>	<i>210</i>
III.5. Distribution des radionucléides dans les sédiments des berges de l'Orne, la Dives et la Touques	213
<i>III.5.1. Les radionucléides dans les cours d'eau côtiers du Calvados</i>	<i>213</i>
<i>III.5.2. Corrélations entre radionucléides</i>	<i>214</i>
<i>III.5.3. Corrélations entre les radionucléides et l'aluminium</i>	<i>216</i>
<i>III.5.4. Rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$</i>	<i>218</i>
Résumé : L'Orne, la Dives et la Touques	222

Chapitre 4 : Les contributions en matériel fin dans la sédimentation fine actuelle du système estuarien de la Seine

Sommaire du chapitre 4	227
Introduction	229
I – Synthèse des informations données par les marqueurs particuliers dans le système estuarien de la Seine	229
I.1. La granulométrie des sédiments fins	229
I.2. Les minéraux argileux des sédiments fins	231
I.3. Les éléments majeurs-mineurs-traces et la fraction fine	233
<i>I.3.1. Répartition des éléments chimiques dans la fraction fine</i>	233
<i>I.3.2. Les éléments majeurs-mineurs-traces des sédiments fins</i>	238
I.4. Les radionucléides des sédiments fins	241
Résumé cartographique	243
II – Détermination des différentes contributions en matériel fin dans la sédimentation fine actuelle	244
II.1. La sédimentation fine dans le système estuarien de la Seine : un mélange	244
II.2. Résolution du mélange particulaire	245
<i>II.2.1. Principe de la méthode d'Analyse en Composantes Principales (ACP)</i>	245
<i>II.2.2. Application de l'ACP aux sédiments intertidaux et subtidaux prélevés en 2005</i>	249
<i>II.2.3. Mélange à trois pôles</i>	255
II.3. Le mélange particulaire dans le système estuarien de la Seine	261
Conclusion	268
Conclusions générales	271
Références bibliographiques générales	277
Liste des figures	307
Liste des tableaux	319
Glossaire	323
Table des matières	329
Planches plastifiées supplémentaires (estuaire de la Seine, baie de Seine, littoral bas-normand)	
Annexes (CD)	
Résumé/Abstract (quatrième de couverture)	

Planches supplémentaires

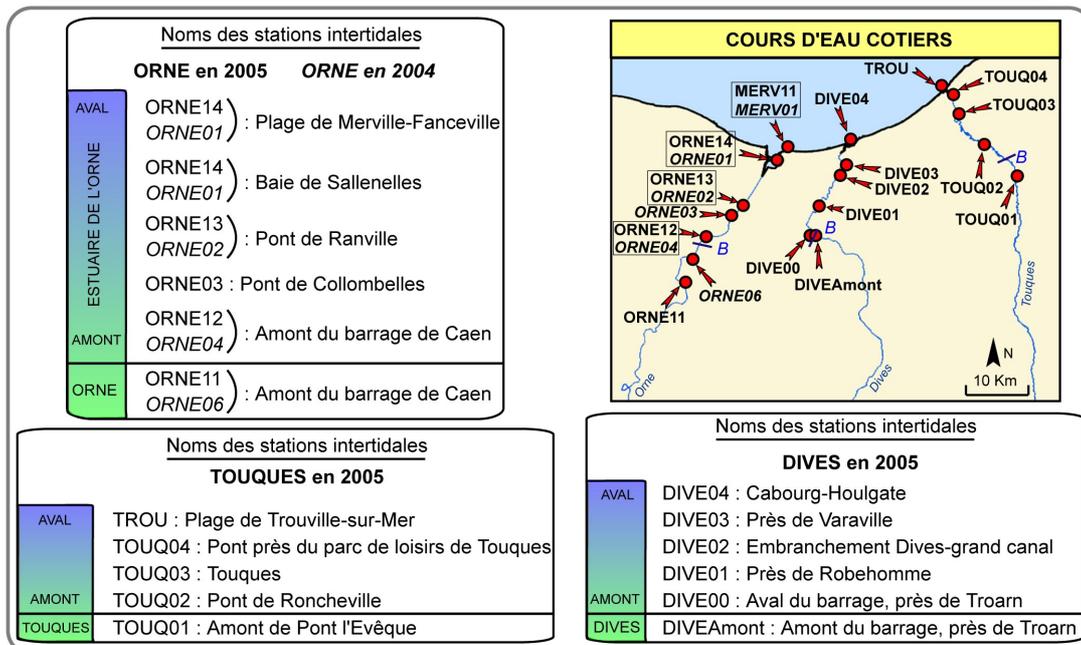
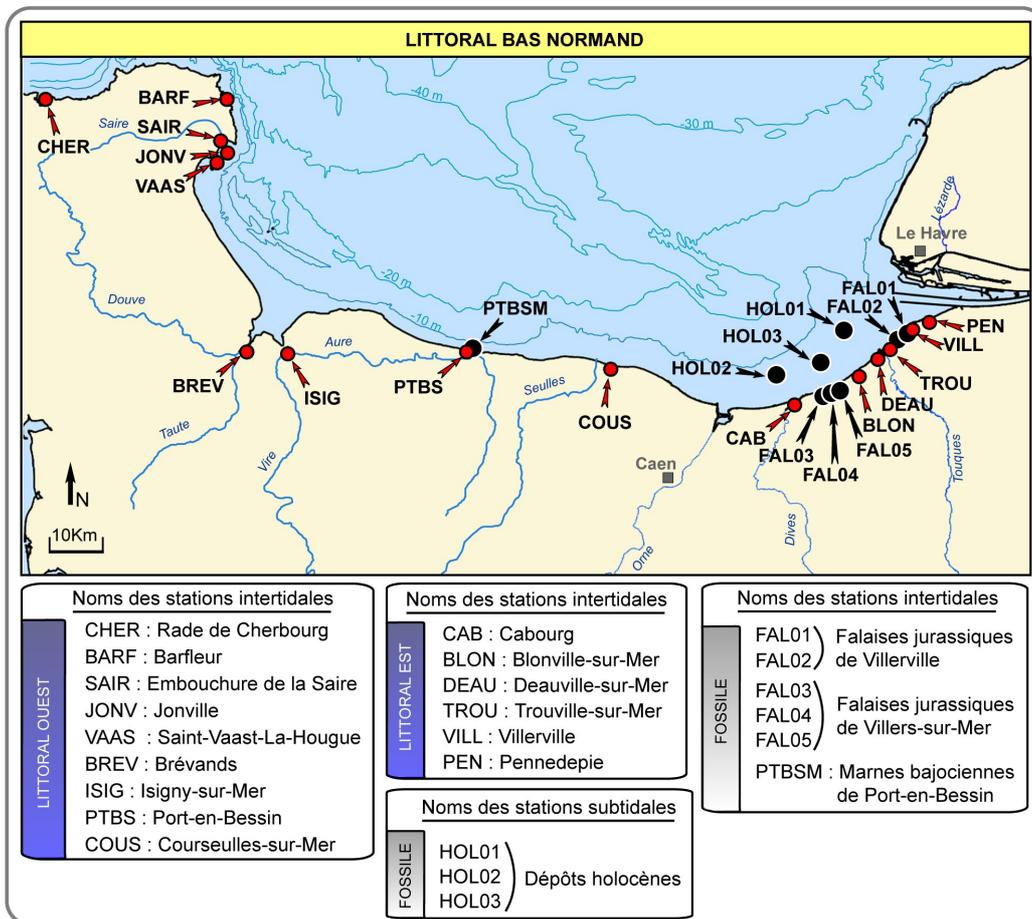


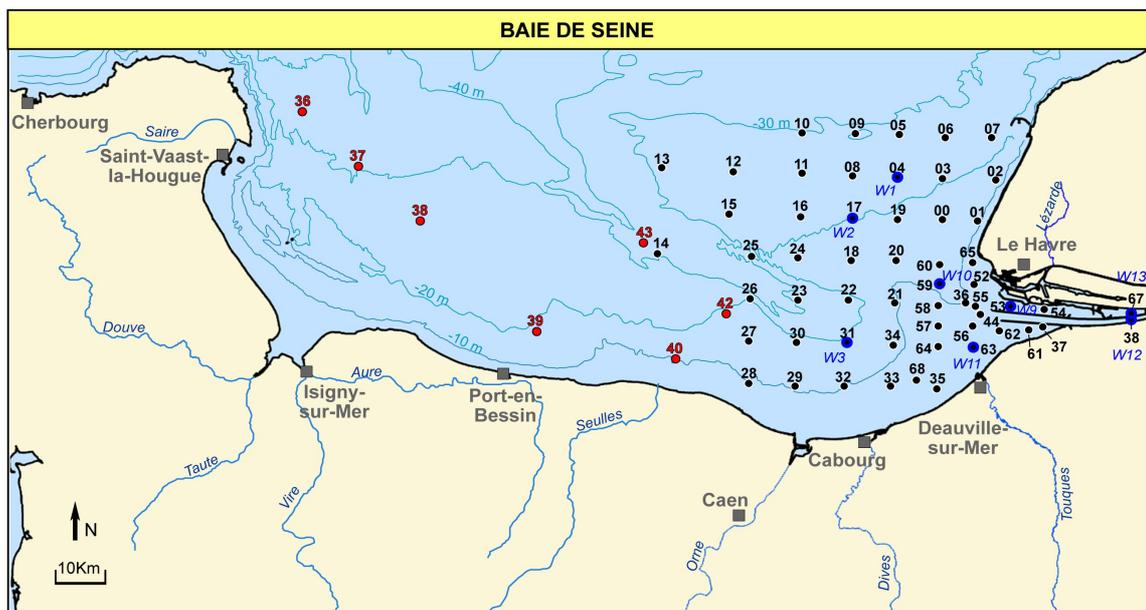
Noms des stations intertidales

AVAL	HONF : Honfleur BERV : Berville-sur-Mer TANC : Tancarville QUIL : Quillebeuf-sur-Seine COUR : Courval CAUD : Caudebec-en-Caux TRAI : Le Trait JUMI : Jumièges LMSJ : Le Mesnil-sous-Jumièges
ESTUAIRE DE LA SEINE	DUCL : Duclair BARDA : Bardouville BARD : Bardouville GDCO : Grand-Couronne BSDK : Entrée du bassin des docks DOCK : Docks de Grand-Quevilly CROI : Croisset ILE : Ile Lacroix ILEII11 : Zone des îles en aval d'Oissel ILE15 : Zone des îles en aval d'Oissel ILE5 : Zone des îles en amont d'Elbeuf ILE6 : Zone des îles en aval d'Oissel
AMONT	OISS : Vasière d'Oissel ELBE : Elbeuf PTAR : Pont de l'Arche POSE : Poses
SEINE	AMON : Amont du barrage de Poses

Numéros des stations subtidales

AVAL	3238 3267 3266 3239
ESTUAIRE DE LA SEINE	3240 3241 3242 3251 3250 3243 3249 3248
AMONT	3246 3245 3247





Noms des stations subtidales

Mission CYSAVA

3200	3208	3216	3224	3232	3252	3260
3201	3209	3217	3225	3233	3253	3261
3202	3210	3218	3226	3234	3254	3262
3203	3211	3219	3227	3235	3255	3263
3204	3212	3220	3228	3236	3256	3264
3205	3213	3221	3229	3237	3257	3265
3206	3214	3222	3230	3238	3258	3267
3207	3215	3223	3231	3244	3259	3268

Seuls les deux derniers chiffres sont reportés sur la carte

Noms des stations subtidales

Mission DISPRO

36
37
38
39
40
42
43

Noms des stations subtidales

Mission DISPRO

W1
W2
W3
W9
W10
W11
W12 : surface
W13 : fond

LES SEDIMENTS FINS DANS UN SYSTEME MACROTIDAL ACTUEL (CONTINUUM SEINE-BAIE DE SEINE) : CARACTERISATIONS GEOCHIMIQUES ET MINERALOGIQUES, IDENTIFICATION DES SOURCES.

Dans l'estuaire à fortes marées de la Seine où les vases s'étendent de plus en plus vers l'aval, l'identification et la quantification des sources de particules ont été entreprises sur trois cents échantillons superficiels par l'utilisation de marqueurs particulières. Une "carte d'identité chimique et minéralogique" complète des sédiments fins de l'ensemble du continuum Seine-baie de Seine apporte de nouvelles informations sur : la dilution des apports fluviaux en baie de Seine, la pénétration de particules fines marines dans l'estuaire et les petits cours d'eau côtiers, et l'apport local et ponctuel par érosion de matériel fossile. La résolution du mélange particulaire (ACP, équations de mélange) montre qu'à long terme (plusieurs décennies), la sédimentation fine actuelle correspond au mélange composite de quatre sources (marine, fluviale, fossile, estuarienne). A court terme (saisonnier, événementiel), le mélange est encore plus complexe, marqué par certaines sources secondaires.

***Mots clés :** sédiments fins, estuaire de la Seine, baie de Seine, éléments majeurs-mineurs-traces, radionucléides, minéraux argileux, système macrotidal, sources.*

FINE-GRAINED SEDIMENTS IN A RECENT MACROTIDAL ESTUARY (CONTINUUM SEINE-BAIE DE SEINE) : GEOCHEMICAL AND MINERALOGICAL CHARACTERIZATIONS, SOURCES OF SEDIMENTS

In the macrotidal Seine estuary where growing mud deposits occurred in the mouth and in the bay of Seine, the identification and quantification of sources of fine material have been undertaken on three hundred superficial samples using particulate markers. A great "chemical and mineralogical identity card" of muddy sediments in the continuum Seine-bay of the Seine contributes new information on: dilution of fine material in the bay of the Seine, penetration of marine fine-grained sediments in the estuary and in the small rivers adjacent to the bay, and local and punctual fossil contribution.

The determination of particulate mixing (PCA, mixing equations) shows that the recent fine sedimentation is the composite mixing of four sources (marine, riverine, fossil, estuarine) at long time scale (several decades). The mixing is more complex at short time scale (seasonal, instantaneous), with the input of secondary sources.

***Keywords :** fine-grained sediments, Seine estuary, bay of the Seine, major-minor-trace elements, radionuclides, clay minerals, macrotidal system, sources.*