UNIVERSITE DE LILLE 1 SCIENCES ET TECHNOLOGIES

ECOLE DOCTORALE : Sciences de la Matière, du Rayonnement et de l'Environnement

Doctorat

Pour obtenir le grade de DOCTEUR de L'UNIVERSITE DE LILLE 1
Discipline : Géosciences, Ecologie, Paléontologie, Océanographie

Par

SYLVIE BRIZARD ZONGO

Fluctuations multi-échelles et extrêmes dans les séries temporelles biogéochimiques à moyen et long terme en milieu marin côtier

Thèse dirigée par **François. G. Schmitt**, directeur de recherche CNRS
Soutenue le 12 octobre 2010

Jury :

Gilles Durrieu, PR Université de Bretagne-Sud	Rapporteur
Stéphane Blain, PR Université de Paris 6	Rapporteur
Pascal Morin, CR CNRS, HDR, Roscoff	Examinateur
Alain Lefebvre, Cadre de Recherche, Ifremer	Examinateur
Sami Souissi, PR Université de Lille 1	Examinateur
François Schmitt, DR CNRS	Directeur de thèse
Benoît Sautour, PR Université de Bordeaux	Examinateur
Jean Prygiel, PR associé, Université de Lille 1	Examinateur

« Je dédie ce travail
de recherche à la
famille Zongo »

Ouf !! il fallait oser le faire !!!
Passer de la biologie à la théorie de la turbulence !!!!!!

« *Les espèces qui survivent ne sont pas les espèces les plus fortes, ni les plus intelligentes, mais celles qui s'adaptent le mieux aux changements » [Charles Darwin]*

Table des Matières

REMERCIEMENTS IX

LISTE DE FIGURES XI

LISTE DE TABLEAUX XXVI

LISTE DES ENCADRES XXIX

RESUME XXX

ABSTRACT XXXI

INTRODUCTION 3

CHAPITRE I. MATERIELS ET METHODES 9

A. Introduction 9

B. Présentation des réseaux analysés : mesures à moyen et long terme 10
1. SOMLIT (national et local) 10
2. MAREL (ROSLIT) 18
2.1. MAREL Carnot 23
2.2. MAREL Baie de Seine (Honfleur, Grande rade, La Carosse) 26
3. Roscoff : la sonde Seabird SBE39 30
4. S.R.N (Suivi Régional des Nutriments) 30
5. Le Wimereux : mesures utilisant une sonde multiparamétrique 32
6. Les paramètres biogéochimiques analysés 34
6.1. La température et la salinité 34
6.2. L'oxygène dissous et saturé 35
6.3. La turbidité 38
6.4. La fluorescence 39
6.5. Le pH 39
6.6. Les nutriments 40

C. Présentation succincte de la théorie de la turbulence homogène et isotrope 43
1. Kolmogorov 1941 et cascade de Richardson 43
2. Spectres d'énergie en turbulence 45
3. Scalaires passifs : Obukhov-Corrsin 46
4. Fonction de structure et intermittence 47

D. Méthodes utilisées dans la thèse 49
1. Densités de probabilité et extrêmes 49

2. Densité spectrale d'énergie 53
3. Fonction de structure 55
4. Covariation par une moyenne conditionnelle 56

E. Le logiciel de programmation MATLAB 58

CHAPITRE II. ANALYSES SPECTRALES DES SERIES BIOGEOCHIMIQUES A HAUTE FREQUENCE 63

A. Introduction 63

B. MAREL Carnot 64
1. La Manche orientale 64
2. Dynamique journalière, saisonnière et valeurs manquantes 66
3. Spectre d'énergie 76

C. MAREL Honfleur 83
1. La Baie de Seine 83
2. Dynamique journalière, saisonnière et valeurs manquantes 87
3. Les spectres d'énergie 100

D. Comparaison multi-sites : cas de la température, du pH et de l'oxygène dissous 106
1. La température, scalaire passif 107
2. Le pH, scalaire actif 111
3. L'oxygène dissous à l'équilibre 115

E. Fluctuations locales à micro-échelle à l'aide d'un capteur autonome 119
1. Le Wimereux 119
2. La dynamique en amont et en aval du Wimereux 121
2.1. Déploiement en aval 121
2.2. Déploiement en amont 123

F. Discussion 127

CHAPITRE III. LES DONNEES SOMLIT EN MANCHE : COMPARAISONS AVEC DES DONNEES MAREL, COVARIATION ET RAPPORTS STOECHIOMETRIQUES 133

A. Introduction 133

B. Les séries temporelles MAREL et SOMLIT en Manche orientale 133
1. La dynamique annuelle 135
2. Covariations entre paramètres 144
3. Etude des ratios : N/P, Si/N, Si/P 152
3.1. Introduction 152
3.2. Evolution temporelle des ratios 154
3.3. Densité de probabilité des ratios stoechiométriques 159

C. Les séries temporelles SOMLIT en Manche 162
1. Le point C et le point Estacade : deux points côtiers 163
2. Comparaison des densités de probabilité des ratios: N/P, Si/N, Si/P, COP/NOP et COP/Chla 168

D. Discussion **181**

CHAPITRE IV. EXTREMES ET DYNAMIQUE **189**

A. Introduction **189**

B. Relation avec le débit de la Seine **190**
1. Du barrage de Poses à Honfleur 191
2. La série temporelle du débit de la Seine 195
3. Les extrêmes : les percentiles 10 et 90 200
4. Dynamique des paramètres biogéochimiques à Honfleur en relation avec le débit de la Seine 204
4.1. En période de saisons humide et sèche 205
4.2. En période d'événements extrêmes 211
4.2.1. Les densités de probabilité 211
4.2.2. Les spectres d'énergie 218
5. Discussion 223

C. Simulation bon état dans le cadre de la loi sur l'eau (DCE) **227**
1. Protocole établi par la DCE (Directive Cadre sur l'Eau) 227
2. Méthodologie de l'étude 231
3. Les données haute fréquence MAREL Carnot 231
4. L'état des masses d'eau à haute fréquence : MAREL Carnot 233
4.1. L'influence de l'échelle : les percentiles 10 et 90 234
4.1.1. L'échelle de 1 semaine 235
4.1.2. L'échelle de 15 jours 239
4.1.3. L'échelle de 1 mois 242
4.1.4. L'échelle de 3 mois 244
4.1.5. L'échelle de 1 an 248
4.2. L'influence du changement d'heure et du jour de prélèvement 250
4.2.1. Le percentile 10 (OD) 251
4.2.2. Le percentile 90 (Chla) 254
5. Discussion et conclusion 273

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES **281**

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES **291**

Remerciements

Mon premier refrain de remerciements est adressé tout naturellement à mon directeur de thèse François Schmitt, qui a cru en moi en me confiant cette problématique de recherche. Cette aventure a commencé en 2005, lors de mon stage de recherche en Master. Depuis là, mes ambitions professionnelles ont été bouleversées. J'ai eu beaucoup de chance ou peut être la bonne ''étoile'' d'avoir fait cette belle rencontre. Un encadrant qui a toujours été présent, disponible à tout moment et bon conseiller. J'espère qu'on continuera à travailler ensemble et que naisse une collaboration avec le Gabon. Je ne peux terminer ces mots sans dire également merci pour ces contrats qui ont été des compléments à ma bourse.

Je tiens ensuite à remercier les membres de mon jury, Stéphane Blain, Gilles Durrieu, Alain Lefebvre, Pascal Morin, Sami Souissi, Benoît Sautour et Jean Prygiel qui ont bien voulu évaluer ce travail de recherche malgré leurs multiples occupations.

Un travail à mi-chemin entre les concepts de physique et de biologie ne pouvait avoir lieu sans une collaboration étroite avec les biologistes et les écologistes. Pour cela, je remercie Alain Lefebvre, cadre de recherche au sein du laboratoire de l'Ifremer de Boulogne-sur-mer, pour son implication dans le déroulement de cette thèse. Je remercie également le professeur Sami Souissi, de m'avoir confié l'étude faite dans le cadre de son projet ZOOSEINE. Je tiens également à remercier Filipe Artigas pour notre future collaboration.

Je dis un grand merci aux responsables des programmes MAREL et SOMLIT et tout particulièrement à Michel Répécaud pour sa disponibilité lorsque le besoin se faisait ressentir (MAREL), à Nicole Negros et à Eric Lécuyer pour les données SOMLIT. Que tout le personnel, les techniciens, les anonymes qui travaillent pour le bon fonctionnement de ces réseaux de surveillance trouvent ici l'expression de ma gratitude. Merci à Denis Marin pour son aide précieuse dans la confection des différentes cartes.

Je tiens également à remercier le personnel du laboratoire LOG, de la Station Marine de Wimereux, Evelyne, Laurence Dauvin, Philipe, Thierry Caron, Josette, Christine, Dominique, Régis Sion. Un merci à mes collègues thésards ou qui ne le sont plus, tout particulièrement à Benjamin, Anissa, Maud, David, Sophiane, Olivier, Xing qui était de passage au LOG pour leur gentillesse. Un merci particulier à Huang Yongxiang pour son aide dans la conception de certains programmes MATLAB. Mes remerciements vont aussi aux stagiaires avec qui j'ai travaillé : la petite Pauline (très courageuse), le grand Issam (au tempérament fougueux) et Santiago (l'espagnol), merci à vous 3 pour l'aide que vous m'avez apportée.

Ce travail de thèse a bénéficié du soutien financier de l'Etat Gabonais (4 ans de bourse d'étude et de recherche), du CNRS, de l'Université de Lille 1, de l'Agence de l'Eau Artois Picardie (5 mois de contrat) et du programme Seine-Aval (2 mois de rémunération).

Sur le plan personnel, je tiens à remercier mes amis de France et du Gabon pour leur soutien moral durant les moments difficiles, toujours à l'écoute : Nath, Privat, Béranger, Dyana, Fabrice, Alix, Loïc, Magalie, Teka, Urdice, Body, Hermès, Marie de Rosa, Ghislain, José, Tania Noëlle, Charmelle, Armel, Séverin, Stéphanie, Ophélie, Wilfrand, Loïc, Idriss, Davy, Ketty, Mino, Magalie, Mathilde, Joey, Pracillia, Zanutey, Armel, Boban et mon équipe de la boutique « Ma Normandie » : Jean-Pierre (le fromager de Wimereux), Marie Claude, Isabelle, Wouter (le belge qui a traversé une partie de l'Afrique en camionnette ..hi hi hi) et Karine (la suédoise aventurière). Au petit Tahina, merci pour ton soutien dans les longues marches à travers les sentiers de Wimereux. Merci, Maëlle pour ces beaux portraits, n'arrête surtout pas le dessin.

Une derrière note familiale, merci à mes parents Marie, Michel et à ma maman Gisèle pour leur soutien moral et financier et surtout d'avoir fait de moi la femme que je suis devenue. Toujours des mots encourageants de ma mère que j'adore. Mon frère Landry, mes sœurs Aloïsia, Zita et Maguy merci de faire partie de ma vie. Merci à tantine Arlette et à tonton Justin pour ses coups de fils que j'ai beaucoup appréciés. Je te remercie Rodrigue, mon frère de cœur d'être toujours là à me soutenir surtout depuis ces derniers mois de rédaction. Et Enfin une dernière pensée à notre papa Raoul, qui grâce un peu à toi j'ai pu faire ce parcours, je te souhaite un bon rétablissement.

Liste de figures

Chapitre I

Figure 1-1 *: Stations de prélèvement SOMLIT reparties le long des côtes françaises. Les prélèvements sont assurés par chacune des Stations marines ; Wimereux, Luc sur mer, Roscoff, Brest, Arcachon, Banyuls, Marseille et Villefranche. (Source : Denis Marin ; LOG).*

Figure 1-2 *: Stations de prélèvement SOMLIT en Manche orientale dans les eaux proches de Boulogne-sur-mer. Le point C (le point côtier est soumis aux apports continentaux) et le point L (point au Large est à l'écart des perturbations anthropiques) (Source : Denis Marin ; LOG).*

Figure 1-3 *: Localisation des stations de mesures MAREL le long des côtes françaises : la façade Manche (orientale et occidentale), la façade Atlantique et la façade Méditerranéenne. (Source : Denis Marin ; LOG).*

Figure 1-4 *: Station de mesure MAREL-Carnot (tube à demi-immergé au premier plan, en bas à gauche du phare) installée sur la digue Carnot de Boulogne-sur-mer, (Photo F.G. Schmitt).*

Figure 1-5 *: Représentation schématique de l'intérieur du tube de prélèvement. Le flotteur coulisse à l'intérieur du tube au gré des marées grâce à un système de roulements. Le flotteur est immergé jusqu'au 2/3 de la partie haute du cylindre jaune. Le prélèvement d'eau se fait 1,5 m sous la surface via une perche sortant du tube support. (1) Flotteur (partie immergée) ; (2) automate de gestion de la station de mesures ; (3) perche de prélèvement ; (4) système de roulement ; (5) analyseur de nutriments ; (6) vanne et débitmètre ; (7) chambre de mesures des paramètres physico-chimiques et système anti-fouling ; (8) débulleur. Source, Ifremer.*

Figure 1-6 *: Les 3 stations marines MAREL (La Carosse, Grande rade et Banc de Seine) installées dans la baie de Seine et la station estuarienne Honfleur (*http://www.ifremer.fr/marel*).*

Figure 1-7 *: La bouée MAREL (Grande rade) qui était installée en baie de Seine (source : Michel Répécaud ; Ifremer).*

Figure 1-8 *: Station de mesures MAREL Honfleur dans l'estuaire de la Seine, implanté sous la passerelle (source : Michel Répécaud ; Ifremer).*

Figure 1-9 *: La sonde multiparamétrique : le TROLL 9500. A son extrémité une variété de capteur de couleur noire. Les piles sont insérées dans la partie blanche de la sonde (*http://www.in-situ.com*).*

Figure 1-10 *: Déploiement de la sonde multiparamétrique en amont du Wimereux. Le support de la sonde est flottant et maintenue par une perche qui est fixé sur berge (photo F. G. Schmitt).*

Figure 1-11 *: Schématisation succincte de la transformation successive des composés azotés. Les étapes de la nitrification se font uniquement par les bactéries, d'assimilation par les bactéries, les champignons et par les algues et la dégradation de l'azote organique* (N_{org}) *libère de l'ammonium* (NH_4^+)*. L'ammonium* (NH_4^+) *se transforme en nitrites* (NO_2^-) *par nitrification et les nitrites en nitrate* (NO_3^-) *par nitrification également (adaptée de Frontier et al., 2008).*

Figure 1-12 *: Cascade de Richardson, le transfert d'énergie des grandes échelles* (L) *vers les petites échelles* (η) *, via les échelles intermédiaires* (ℓ)*. Les gros tourbillons se scindent en petits tourbillons et ainsi de suite jusqu'à l'échelle de la viscosité.*

Figure 1-13 *: Illustration schématique de la cascade d'énergie de Kolmogorov-Obukhov dans l'espace de Fourier ; le spectre d'énergie suit une loi de puissance* $E_v(k) \approx k^{-5/3}$ *dans le domaine inertiel.*

Figure 1-14 *: Exemple de densité de probabilité (ici loi Gaussienne).*

Figure1-15 *: Ici la probabilité d'être entre a et b est la zone hachurée,* $\int_a^b p(t)dt;$

Figure 1-16 *: PDF de la distribution gaussienne en log-lin : il s'agit d'une parabole. Ceci illustre le fait que les grandes valeurs ont une probabilité très faible (ici* 10^{-20} *pour* $x = \pm 9$*).*

Figure 1-17 *: Estimateur de Hill pour trouver la valeur de μ pour une distribution en loi de puissance (Eq.(15)). Ici μ est estimé selon l'équation (16).*

Figure 1-18 *: Illustration du spectre d'énergie mettant en évidence : un forçage périodique* $(E(f) = E_0)$ *, la zone d'invariance d'échelle et un bruit* $(E(f) = cte).$

Figure 1-19 : *Représentation du mouvement Brownien* $B(t)$ *et son incrément* $g(t).$

Figure 1-20 : *Exemple d'illustration de la dépendance entre deux variables* X *et* Y *: (A) régression linéaire, (B) la moyenne conditionnelle de* Y *sachant* X *.*

Figure 1-21*: MATLAB; les fenêtres MATLAB, current directory, command history, workspace and command window.*

Chapitre II

Figure 2-1 *: La Manche orientale montrant la limite du fleuve côtier, la zone frontale et les eaux océaniques. (Source Denis Marin ; LOG).*

Figure 2-2 *: Densité de probabilité des intervalles de temps des valeurs manquantes pour les séries de fluorescence, d'oxygène dissous de pH et de température, mesurés à MAREL Carnot. La durée d'interruption est estimée à 16h pour les 4 paramètres.*

Figure 2-3 *: Evolution temporelle de la température de l'eau (°C). On note une certaine cyclicité de la température au cours de ces 5 ans (2004-2009). Des fluctuations bien marquées apparaissent dans cette évolution périodique. Le maximum de température enregistré est compris entre 20 et 22°C. Le minimum de température enregistré est de l'ordre de 4°C. Ceci montre aussi que certains hivers sont bien plus doux que d'autres : autour de 8°C en 2007, 4° de plus que 2006 et 2009.*

Figure 2-4 *: (A) : variation des valeurs minimales et maximales journalière, (B) : Amplitude journalière* $(t_{max} - t_{min})$ *de la température de l'eau, montrant une grande variabilité (année 2004).*

***Figure 2-5** : Les durées en jours de deux événements extrêmes (des valeurs de température supérieures à P_{90} (percentile 90), 18,6 °C et inférieures à P_{10} (percentile 10), 6,9 °C de 2004 à 2009). Pour les températures les plus chaudes $(> P_{90})$, la durée varie de 12 à 55 jours. Pour les températures les plus froides $(< P_{10})$ la durée varie de 0 à 78 jours et l'année 2006 étant la plus froide. Ceci indique une forte variabilité interannuelle de cet indicateur, et ne révèle pas de tendance au réchauffement sur ces 5 années.*

***Figure 2-6** : Evolution de la concentration en oxygène dissous de 2004 à début 2009. La série d'oxygène dissous montre une allure fortement fluctuante, une forte intermittence. Une évolution saisonnière se dessine difficilement à travers ces fortes fluctuations. On note un pic important en d'oxygène dissous en 2005, de l'ordre de 16 mg/L. Les plus faibles valeurs d'oxygène enregistrées sont de l'ordre de 4 mg/L.*

***Figure 2-7** : (A) : cycle annuelle des valeurs minimales et maximales de la concentration en oxygène dissous (l'année 2005), montrant une variabilité avec des teneurs maximales journalières non négligeable, (B) : l'amplitude journalière de la teneur en oxygène dissous, on note une grande variabilité avec un ordre moyen de 0,81mg/L.*

***Figure 2-8** : Moyenne hebdomadaire estimée sur la période de 2004-2009 de l'oxygène dissous montre une diminution importante en été. Des concentrations très importantes apparaissent au printemps et en hiver sur les 5 ans d'étude.*

***Figure 2-9** : Evolution de la teneur en pH de 2004 à 2009, mettant en évidence une très forte variabilité. L'année 2005 est marquée par l'absence de donnée. Cette figure montre des fluctuations brusques des teneurs en pH. L'année 2008 montre des concentrations de pH qui varient entre 8 et 9 UpH. Les très brusques variations peuvent être liées à des dessalures lors de l'ouverture des vannes du barrage sur la Liane, au niveau du port, mais situé assez loin du capteur, puisque celui-ci se trouve à l'extrémité de la digue Carnot longue de plus de 1 km.*

***Figure 2-10** : Un exemple type d'évolution de la teneur en pH sur une journée au mois d'avril 2007. Les faibles teneurs en pH sont enregistrées entre minuit et 9 h du matin et les teneurs élevées sont enregistrées entre 12 h et 15 h. Les teneurs baissent à partir de 16 h.*

***Figure 2-11**: Evolution de la teneur en fluorescence de 2004 à février 2009. La série de fluorescence montre une allure violente avec de fortes fluctuations. Les années 2004 et 2006 montrent des teneurs en fluorescence importantes comparées aux autres. Ceci correspond à des blooms printaniers, en particulier les blooms de Phaeocystis.*

***Figure 2-12**: (A) : variation dans les valeurs minimales et maximales journalière sur 156 jours (l'année 2005), (B) : l'amplitude journalière de la teneur en fluorescence montrant une variabilité importante.*

***Figure 2-13** : Cycle saisonnier (moyenne hebdomadaire sur les 5 ans d'étude) de la teneur en fluorescence avec des valeurs importantes au printemps et une chute progressive jusqu'en hiver. Cette figure est un exemple type du cycle saisonnier de la fluorescence. Le bloom printanier apparaît nettement.*

***Figure 2-14** : Spectre d'énergie de la température : on constate une invariance d'échelle avec une pente de l'ordre de 1.6 et des pics (1) à 12 h, à (2) 24 h et à (3) 1 an, correspondant à la marée, au cycle diurne et au cycle annuel respectivement.*

***Figure 2-15** : Spectre d'énergie du pH montrant une invariance d'échelle, avec une pente de 1,5 et un pic (1) à 12 h.*

***Figure 2-16** : Spectre d'énergie de la fluorescence mettant en évidence une invariance d'échelle avec un pic (1) à 12 h, un pic (2) à 1 mois et un pic (3) correspondant au cycle annuel.*

***Figure 2-17** : Spectre d'énergie de la teneur en oxygène dissous montrant une invariance d'échelle, un pic (1) à 12h, un pic (2) à 10 jours et un pic (3) à 1 an.*

***Figure 2-18** : Superposition du spectre de fluorescence et de l'oxygène dissous, on note une assez bonne superposition avec un décalage pour les échelles inferieures à 2 h.*

***Figure 2-19**: Spectre compensé de la fluorescence par la température indiquant deux comportements : pour les échelles supérieures à 1 jour, un spectre compensé plat, ce qui suppose une distribution temporelle identique. Alors que pour les échelles en dessous de 1 jour, la relation est différente. Soulignons que si le spectre compensé est plat (horizontal) ceci indique que les deux spectres ont une pente spectrale identique.*

***Figure 2-20** : Spectre compensé de l'oxygène dissous par la température : deux comportements bien net se dessinent avec pour les échelles supérieures à 12 h, un spectre compensé plat pour les échelles inférieures à 12h, une relation différente apparaît.*

***Figure 2-21** : Le bassin de la Seine, densité de la population (nombre d'habitant au* km^2*), (Source : Seine-Aval ; http://www. seine-aval.crihan.fr).*

***Figure 2-22** : L'estuaire de la Seine et son embouchure : une morphologie sinueuse de l'estuaire à partir de Poses jusqu'à Tancarville. L'estuaire est découpé en 3 zones : l'estuaire aval ; l'estuaire moyen à partir du Vieux port jusqu'à Honfleur et l'estuaire amont du Vieux port à Poses (Source : Guézennec, 1999).*

***Figure 2-23** : La propagation de l'onde de marée : déformation de l'onde de marée au cours de sa pénétration dans l'estuaire de la Seine ; au Havre, elle possède une allure sinusoïdale et une allure asymétrique à Rouen (le 5 mai 1996, coefficient de 101 et un débit de 200* m^3/s*). (Source : Seine-Aval ; http// www. seine-aval.crihan.fr).*

***Figure 2-24** : Densité de probabilité des durées d'interruption pour les séries de température, de turbidité, d'oxygène saturé et de salinité mesurées à Honfleur. Les allures sont similaires pour toutes les séries. La bosse a le même maximum pour chaque série, pour une durée d'environ 3 h, correspondant à des activités de maintenance.*

***Figure 2-25** : Série de température de 1996 à 2007. Une périodicité est visible dans l'évolution de la température de 1996 à 2007.*

***Figure 2-26** : L''évolution des températures moyennes annuelles de 1996 (année incomplète) à 2006. On constate une stabilité de la température moyenne. Depuis 2003, il y a une légère tendance à la décroissance.*

***Figure 2-27** : L'évolution de la durée en jours de temps de résidence dans des événements extrêmes de 1996 à 2007. Le percentile 90* (P_{90}) *est de 20 °C et le percentile 10* (P_{10}) *est de 6,5 °C. Ces graphes indiquent donc pendant combien de temps il a fait « très chaud » et « très froid », chaque année. La première figure (A) possède comme on pouvait s'y attendre un pic pour l'année 2003 ; d'une année sur l'autre on constate une assez forte variabilité, et pas de tendance claire. La figure B indique par contre une forte augmentation en 2006 de la durée des événements « très froids ». Globalement sur la série, on constate une tendance à l'augmentation de la durée de ces périodes froides.*

***Figure 2-28** : Série temporelle de salinité de 1996 à 2006. Cette figure indique de fortes fluctuations de la salinité.*

***Figure 2-29** : (A) : la variation des valeurs minimales et maximales journalières, (B) : variation de l'amplitude journalière* $(salinité_{\max} - salinité_{\min})$ *de l'année 1998. La forte valeur de l'amplitude journalière (en moyenne proche de 20) est caractéristique d'un estuaire.*

Figure 2-30*: Evolution du paramètre turbidité de 1996 à 2007. De fortes fluctuations sont visibles dans cette figure.*

Figure 2-31 *: Evolution de la turbidité sur une durée de 16 jours : on note une variabilité non négligeable indiquant une très forte composante périodique associé à la marée et le cycle de vive eau et morte eau.*

Figure 2-32 *: (A) : les valeurs minimales et maximales journalières de turbidité (estimée pour l'année 2004), montrant une variabilité mais également une certaine périodicité, (B) : l'amplitude journalière montrant également une certaine périodicité.*

Figure 2-33 *: La série de pH de 1996 à 2007. De fortes fluctuations sont visibles dans cette figure.*

Figure 2-34*: L'évolution du pH sur une échelle de 8 jours : on constate que sur une période d'une journée, on a typiquement des fluctuations de pH de plus de 0,3 unités.*

Figure 2-35 *: Les séries d'oxygène dissous et le pourcentage de saturation en oxygène. De fortes fluctuations sont visibles dans cette figure.*

Figure 2-36 *: Evolution du pourcentage de saturation en oxygène sur une échelle de 8 jours.*

Figure 2-37 *: Les séries d'oxygène dissous et pourcentage de saturation en oxygène sur échelle de 12 h, indiquant une évolution similaire, avec des fortes teneurs pendant la journée et des faibles teneurs pendant la nuit.*

Figure 2-38 *: La série du pourcentage de saturation en oxygène sur une échelle de 31 jours, indiquant l'évolution des valeurs minimales et maximales journalières. On note une allure similaire bien visible entre les deux tendances. L'amplitude journalière est non négligeable.*

Figure 2-39 *: Le spectre d'énergie de la salinité sur une échelle de 10 ans à 10 minutes. On note 2 régimes d'échelle. Un régime pour les échelles inférieures à 1 jour avec une pente de l'ordre de 1,7 et un régime supérieur à 1 jour avec une pente de l'ordre de 1,6. Les deux pentes sont très proches.*

Figure 2-40 *: Les spectres d'énergie des données filtrées pour la salinité et de la température sur une échelle de 10 ans à 10 minutes. On note une pente similaire pour les 2 paramètres qui correspond au scalaire passif. Le spectre de salinité montre une rupture d'échelle à 1 jour.*

Figure 2-41 *: Les spectres d'énergie de l'oxygène dissous et du pourcentage de saturation en oxygène sur une échelle de 10 ans à 10 minutes. On observe 2 régimes d'échelle.*

Figure 2-42 *: Les spectres d'énergie de l'oxygène dissous des données brutes (trait plein) et des données filtrées (pointillé) révélant une invariance d'échelle avec un exposant spectral de 1,22.*

Figure 2-43 *: Les spectres d'énergie des données brutes (trait clair) et filtrées (trait foncé) du pourcentage de saturation en oxygène. Le spectre lissé montre une invariance d'échelle avec un exposant spectral de l'ordre de 1,22.*

Figure 2-44 *: Le spectre d'énergie de la turbidité indique 2 régimes d'échelle, et des pics importants à 12 h (1), à 10 jours (2) et à 1 an (3) qui correspondent aux forçages périodiques.*

Figure 2-45 *: Les spectres d'énergie des données brutes (trait clair) et lissées (trait foncé) de la turbidité ; le spectre lissé montre une invariance d'échelle avec une pente de l'ordre de 1,5.*

Figure 2-46 *: La Manche : le bassin oriental avec la baie de Seine, ouvert vers la Mer du Nord; le bassin occidental ouvert vers l'Atlantique. (Source : Denis Marin ; LOG).*

***Figure 2-47** : Température enregistrée en continu en Manche orientale (Carnot) : de 2004 à 2009 ; en Manche occidentale (Roscoff) : 2004 à 2008 ; et en baie de Seine (La Carosse et Grande rade) : de 1999 à 2007, et de 1999 à 2004 respectivement. Les températures indiquent une évolution similaire. Roscoff révèle des températures les plus froides, et Carnot, La Carosse et Grande rade enregistrent des températures les plus chaudes.*

***Figure 2-48** : Température enregistrée en continu en Manche orientale (Carnot) et en Manche occidentale (Roscoff) : de 2006 à 2007. Les températures révèlent une évolution similaire mais Roscoff possède plus d'inertie : températures les plus chaudes en hiver comparées à Carnot, et plus froides en été.*

***Figure 2-49**: L'écart de température $\Delta T = T_w - T_R$ (Wimereux et Roscoff) sur l'année 2007 : (A) l'amplitude thermique sur cette année montre deux tendance autour de ''0'', en dessous de $\Delta T = 0,$ Roscoff enregistré les températures les plus importantes et au dessus de $\Delta T = 0,$ Wimereux montre des températures plus élevées ; (B) l'amplitude thermique est très variable et varie de 0 à 3,84°C. L'écart est maximum en plein été (juin-juillet) et en plein hiver (décembre-janvier).*

***Figure 2-50** : Spectres d'énergie de la température pour les 4 sites de mesure : ceci montre une très bonne invariance d'échelle avec une pente proche de 5/3. Deux comportements se dessinent : pour les échelles supérieures à 100 jours, les 4 spectres sont superposables. Pour les échelles inférieures 100 jours, on note un décalage entre les spectres en baie de Seine et les deux sites en Manche.*

***Figure 2-51** : Les spectres d'énergie : (A) Carnot, (B) Grande rade, (C) La Carosse et (D) Honfleur. Cette figure montre un régime d'échelle avec un exposant spectrale du pH compris entre 1,5 et 1,2, comparé au scalaire passif turbulent (température).*

***Figure 2-52** : Spectre compensé : (A) Carnot, (B) Grande rade, (C) La Carosse et (D) Honfleur.*

***Figure 2-53**: Les co-spectres : (A) Carnot, (B) Grande rade, (C) La Carosse et (D) Honfleur. Les zones plates indiquent la gamme d'échelle pour laquelle les fluctuations du pH on la même propriété spectrale que celle de la température.*

***Figure 2-54** : L'évolution de l'oxygène dissous à l'équilibre (OD à l'équilibre) au cours du temps (en nombre de jours). On note une certaine cyclicité au cours du temps avec des fluctuations masquées par cette périodicité.*

***Figure 2-55** : Les spectres d'énergie de l'oxygène dissous mesuré (OD) et de l'oxygène dissous à l'équilibre calculé en zone côtière (MAREL Carnot) indiquant une invariance d'échelle avec une pente similaire de 1,2 et des pics à 12h, 24 h et 1 an.*

***Figure 2-56** : Les spectres d'énergie de l'oxygène dissous mesuré (OD) et de l'oxygène dissous à l'équilibre calculé en zone marine (MAREL Grande rade) montrant une invariance d'échelle avec une pente similaire de 1,4 et des pics à 24 h et 1 an.*

***Figure 2-57** : Les spectres d'énergie de l'oxygène dissous mesuré (OD) et de l'oxygène dissous à l'équilibre calculé en zone marine (MAREL La Carosse) montrant une invariance d'échelle avec une pente similaire de 1,2 et des pics à 24 h et 1 an.*

***Figure 2-58** : Les spectres d'énergie de l'oxygène dissous mesuré (OD) et de l'oxygène dissous à l'équilibre calculé en zone estuarienne (MAREL Honfleur) montrant une invariance d'échelle avec une pente similaire de 1,22 et des pics à 12 h, 24 h et 1 an. Un note un léger décalage pour les grandes échelles.*

***Figure 2-59** : La rivière du Wimereux, traversant les terres agricoles aux zones urbanisées ; l'évaluation de l'ensemble du milieu fait dans le cadre de l'Agence de l'eau Artois Picardie) (wimereux-milieu-annuaire-mxd-wguerin/jplefebve-04/10/2006).*

***Figure 2-60** : La rivière du Wimereux lors de la marée montante et lors du bloom (formation de mousse) de Phaeocystis en mars 2010 (source : Régis Sion ; LOG).*

***Figure 2-61** : Les séries temporelles de température, d'oxygène dissous, de turbidité et de salinité issues des mesures en Aval du Wimereux et en période de marée montante (phase de remplissage et de vidange de la rivière) sur une durée de 6 h. Des fluctuations brutales très localisées sont clairement visibles.*

***Figure 2-62** : Les spectres d'énergie de salinité, de température (T), d'oxygène dissous (OD) et de turbidité (Turb) en aval représentés en log-log. La salinité et la température présentent une invariance d'échelle avec une pente de 1,6 et 1,65 respectivement, alors que l'oxygène dissous et la turbidité sont invariants d'échelle avec une pente de 1,7.*

***Figure 2-63** : Les séries temporelles d'oxygène dissous, de température et de turbidité en amont du Wimereux issues des mesures s'étalant sur 4,5 jours. On note une certaine périodicité dans les données d'oxygène dissous et de température alors que la turbidité montre des fluctuations brutales pas clairement visibles.*

***Figure 2-64** : Un échantillon de données de turbidité en amont (sur 1 h). Des fluctuations brutales et très localisées sont clairement visibles.*

***Figure 2-65** : Les spectres d'énergie de turbidité, d'oxygène dissous (OD) et de température, mesures en amont du Wimereux. La température et la turbidité présentent une bonne invariance d'échelle avec une pente de l'ordre de 2, alors que la turbidité est invariante d'échelle seulement de 5 jours à 1 h 30.*

.

Chapitre III

***Figure 3-1**: Localisation des points SOMLIT et MAREL : le site SOMLIT est représenté par le « point C » et la station MAREL Carnot est située au bout de la digue. La distance entre les deux points côtiers est de l'ordre de 6 miles nautiques. (Source : Denis Marin ; LOG).*

***Figure 3-2**: Séries temporelles de température : superposition des données SOMLIT et MAREL. On constate une très bonne superposition à grande échelle.*

***Figure 3-3** : Superposition des données de température SOMLIT et MAREL sur l'année 2005. On constate que sur une échelle de 1 an (2005), les données SOMLIT indiquent une allure plus lissée comparées aux données MAREL.*

***Figure 3-4**: Evolution des séries de pH de SOMLIT et de MAREL.*

***Figure 3-5** : Superposition des données de température SOMLIT et MAREL sur une échelle de 1 an (2007). On constate que sur une échelle de 1 an, les données SOMLIT ont des valeurs comprises entre 8 et 8,4 UpH comparées aux données MAREL qui possèdent des fluctuations plus marquées avec des valeurs comprises entre 6,7 et 9,5 UpH.*

***Figure 3-6**: Séries temporelle de DO : superposition des données SOMLIT et MAREL. Les données MAREL possèdent de fortes fluctuations brutales comparées aux données SOMLIT qui indiquent une évolution plus lissée.*

***Figure 3-7** : Superposition des données de DO SOMLIT et MAREL sur une échelle de 1 an (2006). On constate que sur une échelle de 1 an, les données SOMLIT et MAREL indiquent tendance similaire avec néanmoins un décalage en amplitude.*

***Figure 3-8**: Séries temporelles de fluorescence (MAREL Carnot) et de Chla (SOMLIT). Les données MAREL indiquent une allure très fluctuante avec des blooms très localisés, qui sont indétectables par le programme SOMLIT.*

***Figure 3-9**: Séries temporelles de fluorescence (MAREL Carnot) et de Chla (SOMLIT) sur une échelle de 1 an (2006). Les séries indiquent une même évolution mais la fluorescence prend des valeurs bien plus élevées au moment du bloom printanier.*

***Figure 3-10**: Séries temporelles de l'azote total* $(NO_3^- + NO_2^-)$*, avec une superposition SOMLIT et MAREL. On constate une superposition globale mais de très fortes fluctuations à petite échelle pour MAREL.*

***Figure 3-11**: Séries temporelles de nitrates total, avec une superposition SOMLIT et MAREL sur une échelle de 1 an (2006). La tendance est approximativement comparable mais de fortes fluctuations localisées sont visibles sur les données MAREL.*

***Figure 3-12**: Superposition des données de l'acide silicique pour les 2 programmes SOMLIT et MAREL.*

***Figure 3-13**: Superposition des données du l'acide silicique pour les 2 programmes SOMLIT et MAREL sur une échelle de 1 an (2005). Les deux séries indiquent une même tendance. Il y a de nombreuses valeurs manquantes pour les données MAREL.*

***Figure 3-14** : Moyennes conditionnelles de l'oxygène dissous sachant : (A) la fluorescence (MAREL) ; (B) la chlorophylle a (SOMLIT). Les courbes de moyennes conditionnelles indiquent un comportement au sein des nuages de points. Dans la figure A, elle met en évidence une augmentation atteignant un pic autour de 11 mg/L d'oxygène suivi d'une baisse. Dans la figure B, on note une faible tendance à l'augmentation de la moyenne conditionnelle de la DO sachant la Chla.*

***Figure 3-15** : Moyennes conditionnelles de l'oxygène dissous sachant : (A) la fluorescence (MAREL) ; (B) la chlorophylle a (SOMLIT). La fluorescence est ici estimée en représentation logarithmique ce qui indique une tendance à l'augmentation plus nette de la moyenne conditionnelle de la DO sachant le log de la Fluo (fluorescence).*

***Figure 3-16** : Moyenne conditionnelle du pH sachant les COP (carbone organique particulaire) pour les données SOMLIT. La courbe de moyenne conditionnelle indique une tendance à l'augmentation suivie d'un seuil.*

***Figure 3-17** : Moyenne conditionnelle de la Chla (Chla : données SOMLIT) ou de Fluo (fluorescence : données MAREL Carnot) sachant l'azote. On observe un comportement assez semblable de la moyenne conditionnelle pour les deux systèmes. Des pics importants apparaissent dans ces courbes associés aux différentes concentrations d'azote.*

***Figure 3-18** : Moyenne conditionnelle de diatomées (diatomées : données SRN) sachant l'azote (ou N : données MAREL Carnot). On observe un premier pic associé à une faible concentration en azote (autour de 5 µmol/L) et un second pic de diatomées autours de 25 µmol/.*

***Figure 3-19** : Moyenne conditionnelle de Prymnésiophycées (ou Phaeocystis globosa : données SRN) sachant l'azote (ou N : données MAREL Carnot). On observe un pic de Phaeocystis autour de 10 µmol/L d'azote.*

***Figure 3-20** : Moyenne conditionnelle de dinoflagellés (données SRN) sachant l'azote (ou N : données MAREL Carnot). On observe un pic important de dinoflagellés autour de 25 µmol/L d'azote et un faible pic autour de 20 µmol/L.*

***Figure 3-21** : Evolution des séries d'azote (N) et de Chla pour les années 2000, 2003, 2004 et 2006. Ces 4 figures montrent que le pic de N est suivi de celui de la Chla avec un retard de 82 jours.*

***Figure 3-22** : Moyenne conditionnelle de la chlorophylle a sachant l'azote pour les données SOMLIT, pour un décalage de 3 mois dans les données de Chla.*

***Figure 3-23** : Moyenne conditionnelle du pH sachant l'oxygène dissous pour les deux systèmes (SOMLIT et MAREL). On constate dans les deux cas une tendance générale à l'augmentation du pH pour une augmentation du DO.*

***Figure 3-24** : Evolution du ratio N/P pour les données SOMLIT et MAREL de 1998 à 2008 et de 2004 à début 2009 respectivement.*

***Figure 3-25** : Evolution saisonnière du ratio moyen N/P, de la Chla des données SOMLIT et des dinoflagellés pour des données SRN, sur la période 2004-2006.*

***Figure 3-26** : Evolution du ratio Si/N pour les données SOMLIT et MAREL de 1998 à 2008 et de 2004 à début 2009 respectivement. On note une variabilité importante dans les teneurs en Si/N pour les deux types de mesure.*

***Figure 3-27** : Evolution du ratio Si/P pour les données SOMLIT et MAREL de 1998 à 2008 et de 2004 à début 2009 respectivement. Les données MAREL peuvent atteindre des fortes teneurs en Si/P.*

***Figure 3-28** : Evolution saisonnière des diatomées et du Phaeocystis globosa de 2004 à 2006 (données SRN). Cette figure met en évidence une succession d'espèces : les diatomées apparaissent avant Phaeocystis.*

***Figure 3-29**: Densités de probabilités du ratio N/P des données MAREL et SOMLIT. On note une distribution asymétrique avec les fortes teneurs en rapport pour les données MAREL.*

***Figure 3-30** : Densités de probabilités du ratio N/P en log-log, mettant en évidence une queue de probabilité avec un exposant de l'ordre de 2,0 pour les deux types de mesure.*

***Figure 3-31** : Densités de probabilités du ratio Si/N en log-log, mettant en évidence une queue de probabilité hyperbolique avec un exposant de l'ordre de 3 pour les deux bases de données (SOMLIT et MAREL Carnot). On observe un décalage pour les faibles teneurs en Si/N et une superposition pour les fortes teneurs en Si/N.*

***Figure 3-32** : Densités de probabilités du ratio Si/P en log-log, mettant en évidence une queue de probabilité hyperbolique avec un exposant de l'ordre de 3,0 pour les deux bases de données (SOMLIT et MAREL).*

***Figure 3-33**: les bassins oriental et occidental en Manche : Wimereux pour les eaux côtières de Boulogne-sur-mer en Manche orientale et Roscoff, pour les eaux côtières en Manche occidentale. (Source : Denis Marin ; LOG).*

***Figure 3-34** : Evolution de la température mesurée au point C (Wimereux) et au point Estacade (Roscoff) : on note une bonne superposition avec les températures.*

***Figure 3-35** : Evolution des teneurs de salinité de surface mesurées au point C (Wimereux) et au point Estacade (Roscoff), on note des teneurs en salinité élevées pour le point Estacade (A). La différence de salinité est visible de 2002 à 2008 dans les deux zones, elle varie de 0,4 à 2,5 PSU (B).*

***Figure 3-36** : Evolution des teneurs en Chla de surface mesurées au point C (Wimereux) et au point Estacade (Roscoff) : on note des teneurs très élevées au point C. Au point C (en Manche orientale), les teneurs en Chla sont très localement importantes (B). Le rapport (B) de Chla entre les deux zones montre que les données à Wimereux sont toujours supérieures, le plus souvent le rapport va de 5 à 20.*

***Figure 3-37** : Evolution des teneurs en COP mesurées au point C (Wimereux) et au point Estacade (Roscoff) : (A) on note des teneurs très variables dans les deux zone mais très élevées au point C ; Le rapport de COP entre les deux zones indique une certaine stabilité au cours du temps (B), avec une valeur souvent entre 2 et 5.*

***Figure 3-38**: Evolution des teneurs en NOP mesurées au point C (Wimereux) et au point Estacade (Roscoff) : on note des teneurs très élevées au point C (A) ; le rapport de NOP entre les deux zones indique une évolution irrégulière au cours du temps. Les plus forts pics sont rencontrés de 2003 à 2005.*

***Figure 3-39** : La relation entre les COP et NOP de chaque zone en log-log. Une relation décrite par une fonction puissance semble plus nette à Roscoff qu'a Wimereux ou le nuage de point s'éloigne de cette dernière.*

***Figure 3-40** : Evolution des sels nutritifs au point C (Wimereux) et au point Estacade (Roscoff) : l'azote, le phosphate et l'acide silicique. Les teneurs les plus élevées sont mesurées au point C (Wimereux) en Manche orientale). Le Phosphate indique des teneurs plus importantes à Roscoff au cours du temps.*

***Figure 3-41** : Evolution du ratio N/P au point C (Wimereux) et au point Estacade (Roscoff) : (A) on note de forte fluctuations, une variabilité interannuelle et des valeurs du rapport étant généralement supérieures au rapport de Redfield (N/P=16) ; (B) sur une échelle de 3 ans, les teneurs au point C se démarquent de celles mesurées au point Estacade.*

***Figure 3-42**: Evolution du ratio Si/P au point C (Wimereux) et au point Estacade (Roscoff): (A) 0n note de fortes fluctuations, une variabilité interannuelle avec des teneurs élevées au point C de 2004 à 2008. Des valeurs généralement supérieures au rapport de Redfield (Si/P=16) ; (B) cette figure indique une forte variabilité intra et inter sites.*

***Figure 3-43** : Evolution du ratio Si/N au point C (Wimereux) et au point Estacade (Roscoff) : (A) on remarque de fortes fluctuations, une variabilité interannuelle avec des teneurs élevées au point C de 2004 à 2008, avec des valeurs du rapport qui sont souvent supérieures au rapport de Redfield (Si/N=1) ; (B) sur une échelle de 3 ans (de 2006 à 2008) ces teneurs en rapport Si/N au point C sont largement au dessus de celles trouvées au point Estacade.*

***Figure 3-44** : Evolution des teneurs en COP et en NOP mesurées au point C (Wimereux) : on note des teneurs très élevées en COP comparées aux NOP.*

***Figure 3-45**: Evolution des teneurs en COP et en NOP mesurées au point Estacade (Roscoff) : on note des teneurs très élevées en COP comparées aux NOP.*

***Figure 3-46** : Evolution des valeurs du rapport COP/NOP au point C (Wimereux) et au point Estacade (Roscoff): on note des valeurs du rapport élevées au point Estacade mais avec une certaine stabilité, surtout pour le point Estacade.*

***Figure 3-47** : Evolution des valeurs du rapport COP/Chla au point C (Wimereux) et au point Estacade (Roscoff) : on note des teneurs localement très élevées du rapport au point Estacade.*

***Figure 3-48** : Densités de probabilité du rapport COP/Chla au point C (Wimereux) et au point Estacade (Roscoff). On note un décalage entre les deux distributions avec un mode autour de 100 au point C et un mode autour de 200 au point Estacade.*

***Figure 3-49** : Densités de probabilité du rapport N/P point C (Wimereux) et au point Estacade (Roscoff) : (A) la représentation en lin-lin indique une distribution asymétrique avec une bonne superposition pour les grandes valeurs, Des petites valeurs N/P ont une forte probabilité d'apparition au point C ; (B) la représentation en log-log indique un comportement proche de l'hyperbolique avec pour pentes 2.*

***Figure 3-50** : Densités de probabilité du rapport Si/P au point C (Wimereux) et au point Estacade (Roscoff): (A) la représentation en lin-lin indique une bonne superposition des deux pdfs avec un mode autour de 13 µmol/l, on note une faible probabilité d'apparition des fortes valeurs Si/P ; (B) la représentation en log-log révèle un comportement hyperbolique avec des pentes entre 3 et 4 (l'éparpillement apparent empêche d'être plus précis).*

***Figure 3-51**: Densités de probabilité du rapport Si/N en lin-lin au point C (Wimereux) et au point Estacade (Roscoff). On remarque une distribution asymétrique et le rapport au point Estacade indique un mode à 0,5 µmol/L.*

***Figure 3-52** : Densités de probabilité du rapport Si/N en log-log au point C (Wimereux) et au point Estacade (Roscoff). On note un comportement hyperbolique avec pour pentes 3 au point C et 1,7 au point Estacade.*

Chapitre IV

***Figure 4-1** : Le barrage de Poses en amont de l'estuaire de la Seine. (Source http//www.seine-aval.crihan.fr : C. Fisson).*

***Figure 4-2** : L'estuaire de la Seine du barrage de Poses à Honfleur : au Vieux-port : limite marée saline ; à Poses : limite marée dynamique (http//www. seine-aval.crihan.fr).*

***Figure 4-3** : Le nombre de jour moyen du transit fluvial en fonction de la distance au barrage de Poses, pour différents débits (de pK202 à pK340) (Thèse Guézennec, 1999, source SNS : http//www. seine-aval.crihan.fr).*

***Figure 4-4** : Evolution journalière du débit de la seine de 1941 à 2007 au barrage de Poses. Cette figure montre de fortes fluctuations interannuelles.*

***Figure 4-5** : Débit de la Seine à Poses de 1941 à 2007 : moyennes annuelles. Le débit moyen annuel en 2001 atteint les 900 m^3/s. Nous représentons également les débits maximaux et minimaux mesurés.*

***Figure 4-6** : Débit mensuel de 1996 à 2007 à Poses : les forts débits sont rencontrés de décembre à mars et les faibles débits de juin à octobre.*

***Figure 4-7** : Densité de probabilité en log-log du débit de la Seine tous les 10 ans de 1945 à 2007. L'allure des pdfs est analogue pour chaque section. On note que pour les faibles débits, les pdfs des périodes 1945-1955, 1955-1965 et 1965-1975 sont très proches. Pour les grandes valeurs, les 6 périodes de 10 ans chacun, les pdfs sont presque superposables.*

***Figure 4-8** : Densités de probabilité du débit de la Seine de 1941 à 1995 et de 1996 à 2007 : débit linéaire, on note une superposition des deux pdfs. En log-log, on note un décalage pour les faibles débits, mais une bonne superposition pour les forts débits.*

***Figure 4-9**: Densité de probabilité du débit de la Seine de 1996 à 2007 sur l'ensemble des données disponibles. Elle met en évidence une queue hyperbolique avec une pente de l'ordre de 2. Les valeurs les plus fortes ne suivent plus cette loi.*

***Figure 4-10** : Distribution de probabilité des valeurs du débit de la Seine de 1996 à 2007. Le percentile 90 correspond à 1059* m^3s^{-1} *et le percentile 10 à 208* m^3s^{-1}.

***Figure 4-11** : Histogramme de la durée cumulée des événements extrêmes sur une période de tous les 10 ans de 1945 à 2007. On note une tendance (moins marquée) à l'augmentation des extrêmes forts et une tendance à l'augmentation des extrêmes dans les faibles valeurs du débit.*

***Figure 4-12** : Durée de chaque événements extrêmes intra et inter-annuelle. On remarque une succession d'événements extrêmes de durée très variable. Les années 1996, et 2002 et 2003 indiquent des durées très importantes. Les extrêmes forts varient de 0 à 70 jours et les extrêmes dans les faibles valeurs du débit varient de 0 à 110 jours.*

***Figure 4-13** : L'évolution pluviométrique sur le bassin versant de la Seine de 1947 à 2003. Les classes correspondent aux seuils des percentiles 10, 25, 75, et 90. Pour les années 1999, 2000 et 2001, les valeurs de pluviométrie dépassent le seuil du percentile 90. (Klein et al., 2002) (http//www. seine-aval.crihan.fr : Klein et al., 2002).*

***Figure 4-14** : Densité de probabilité de la température de l'eau mesurée à Honfleur en période humide (fort débit) et en période sèche (faible débit). On note un décalage très net entre les deux distributions.*

***Figure 4-15** : Densité de probabilité de la salinité mesurée à Honfleur durant la période humide (fort débit) et durant la période sèche (faible débit). On note un décalage entre les deux distributions. Les deux pdfs se coupent à 18 °C.*

***Figure 4-16** : Densité de probabilité de l'oxygène dissous mesuré à Honfleur durant la période humide (fort débit) et durant la période sèche (faible débit). On note un décalage entre les deux distributions. Les deux pdfs se coupent à 7,8 mg/L. Lors des forts débits, les valeurs de OD sont les élevées comparées aux valeurs en période de faibles débits.*

***Figure 4-17** : Densité de probabilité de l'oxygène saturé mesuré à Honfleur en période humide (fort débit) et en période sèche (faible débit). Les deux pdfs sont superposables, cela est bien visible au niveau des extrêmes.*

***Figure 4-18** : Densité de probabilité en log-log de l'oxygène saturé mesuré à Honfleur en période humide (fort débit) et en période sèche (faible débit). On constate que pour les fortes teneurs en oxygène saturé, les deux pdfs montrent un décalage et qu'en période sèche (faibles débits), l'oxygène saturé montre des teneurs un peu plus importantes.*

***Figure 4-19** : Densité de probabilité du pH mesuré à Honfleur durant la période humide (fort débit) et durant la période sèche (faible débit). La pdf en période sèche (faible débit) est à l'intérieure de celle en période humide (fort débit).*

***Figure 4-20** : Densité de probabilité en log-lin du pH mesuré à durant la période humide (fort débit) et durant la période sèche (faible débit). On note que lors de la période humide (fort débit) on a une faible probabilité d'apparition des teneurs les plus faibles et en période sèche (faible débit), on note une faible probabilité d'apparition des fortes teneurs de pH. Les deux pdfs superposées à la gaussienne indiquent une décroissance encore plus rapides des valeurs.*

***Figure 4-21** : Densité de probabilité en log-lin et en log-log de la turbidité mesurée à Honfleur en période humide (fort débit) et en période sèche (faible débit). On note une forte probabilité d'apparition des teneurs élevées de turbidité en période humide (fort débit).*

***Figure 4-22** : Densités de probabilité de la température mesurée à Honfleur lors d'événements extrêmes (crues et étiages). Les deux pdfs montrent un décalage. Lors des crues, la température indique une distribution bimodale (des pics à 6,7°C et à 9.7°C). En période d'étiages, la température révèle une distribution unimodale avec un pic à 20,3°C.*

***Figure 4-23** : Densités de probabilité de la salinité mesurée à Honfleur en période d'événements extrêmes (crues et étiages) du débit de la Seine. La pdf de la salinité lors d'extrêmes d'étiages montre une distribution bimodale comparée à la pdf en période d'extrêmes de crues qui indique une distribution asymétrique.*

***Figure 4-24** : Densités de probabilité de l'oxygène dissous mesuré à Honfleur en période d'événements extrêmes (crues et étiages) du débit de la Seine. On note un décalage entre les pdfs. Pour les crues les eaux sont plus oxygénées.*

***Figure 4-25** : Densités de probabilité de l'oxygène saturé mesuré à Honfleur en période d'événements extrêmes (crues et étiages) du débit de la Seine. La différence est moins marquée que pour l'oxygène dissous : ceci indique que la différence en figure 4-23 est principalement due aux différences de température et de salinité.*

***Figure 4-26** : Densités de probabilité de l'oxygène saturé mesuré à Honfleur en période de crues et d'étiages. Les pdfs sont représentées en log-log. On note un décalage important entre les deux pdfs pour des teneurs en saturation inférieures à 60 %.*

***Figure 4-27** : Densités de probabilité du pH mesuré à Honfleur durant les crues et étiages. Un note un décalage entre les pdfs. La pdf en période d'extrêmes de crues indique une allure bimodale.*

***Figure 4-28** : Densités de probabilité du pH en log-linéaire (log-lin) mesuré à Honfleur pour les étiages et crues. En période de crues, la pdf du pH indique une distribution du type hyperbolique. Durant les étiages, le pdf du pH révèle une distribution proche d'une distribution gaussienne.*

***Figure 4-29** : Densités de probabilité de la turbidité mesurée à Honfleur durant les périodes de crues et d'étiages. Les pdfs sont représentées en log-log. On note une bonne superposition pour des teneurs en dessous de 1000 NTU et au dessus de cette valeur un léger décalage apparaît entre les deux pdfs.*

***Figure 4-30** : Les spectres d'énergie de la température mesurée à Honfleur durant les événements extrêmes (étiage en 2003 et de crues en 2000) du débit de la Seine. Les spectres montrent une bonne invariance d'échelle avec des pentes proche de 5/3. On note un décalage entre les spectres sur toute l'échelle considérée. Le pic à 12h est plus important lors des étiages.*

***Figure 4-31** : Les spectres d'énergie de la salinité mesurée à Honfleur en période d'événements extrêmes (étiage en 2003 et crues en 2001) du débit de la Seine. Les deux spectres sont assez proches. Une allure plate (se dessine pour les échelles supérieures à 50 jours) apparaît dans le spectre de salinité lors d'événements de crues. On note des pics plus importants lors des étiages.*

***Figure 4-32** : Les spectres d'énergie de l'oxygène dissous mesuré à Honfleur durant les événements extrêmes (étiage en 2003 et crues en 2001) du débit de la Seine. Les deux spectres sont assez proches. Une allure « plate » pour les échelles supérieures à 12h apparaît lors des événements d'étiage.*

***Figure 4-33** : Les spectres d'énergie d'oxygène saturé mesuré à Honfleur en période d'événements extrêmes (étiages en 2003 et crues en 2001) du débit de la Seine. Les deux spectres sont assez proches. Une allure « plate » pour les échelles supérieures à 12h apparaît lors d'extrêmes d'étiages. On note un décalage entre les deux spectres.*

***Figure 4-34** : Les spectres d'énergie du pH mesuré à Honfleur en période d'événements extrêmes (étiages en 2003 et crues en 2000) du débit de la Seine. Les deux spectres montrent un décalage. On observe une rupture de pente dans le spectre de pH en période d'étiages de 2003.*

***Figure 4-35** : Les spectres d'énergie de la turbidité mesurés à Honfleur durant les événements extrêmes (étiages en 2003 et crues en 2001) du débit de la Seine.*

***Figure 4-36** : La moyenne conditionnelle de la Chla sachant la F : C(F) correspond à la courbe d'ajustement et F l'ajustement de cette courbe (en « o » : données Ifremer ; en « • », données MAREL-SOMLIT).*

***Figure 4-37** : Evolution du percentile 10 (OD) sur les 6 ans de mesure (2004-2009). Une forte variabilité est bien visible dans cette figure mettant en évidence 2 niveaux : « TB » et « B ». Le critère « TB » semble plus présent que le « B » pour ce pas de temps de 1 semaine.*

***Figure 4-38** : Représentation du critère en pourcentage en fonction du mois (percentile 90), la qualité « TB » proche des 100% en automne et « B » en été (A) alors que les qualités « Mo » et « Me » et « Ma » (B) se retrouvent le plus souvent au printemps. Les critères « TB » et « B » apparaissent en premier en hiver suivis du critère « Mo ». Les critères les moins bon (« Me », « Ma ») apparaissent plus tard au printemps pour laisser place en début d'été aux critères « TB » et « B ».*

***Figure 4-39** : L'évolution du percentile 90 (Chla) de 2004 à 2009 pour un pas de temps de 1 semaine. Une forte variabilité est bien visible dans cette figure mettant en évidence les cinq niveaux : « TB », « B », « Mo », « Me » et « Ma ».*

***Figure 4-40** : Représentation des valeurs du percentile 10 de l'oxygène dissous sur une période de mesure de tous les 15 jours. « TB » : Très bon ; « B » : Bonne qualité.*

***Figure 4-41** : Représentation du critère en pourcentage en fonction du mois (percentile 90), la qualité « TB » proche des 100% en automne et « B » en été alors que les qualités « Mo » et « Me » et « Ma » se retrouvent le plus souvent au printemps. Les critères « TB » et « B » apparaissent en premier en hiver suivis du critère « Mo ». Les critères les moins bons (« Me », « Ma ») apparaissent plus tard au printemps pour laisser place en début d'été aux critères « TB » et « B ».*

***Figure 4-42** : Les valeurs du percentile 90 (chlorophylle). Une forte variabilité est bien visible dans cette figure mettant en évidence les cinq niveaux : « TB », « B », « Mo », « Me » et « Ma ».*

***Figure 4-43** : Percentile 10 (oxygène dissous) sur un pas de temps de un mois (de 2004 à 2009). Cette figure montre une variabilité dans le percentile 10 d'un mois à l'autre. Le percentile varie de 5,4 à 12,5mg/L OD. Le critère retenu dans cette figure est : « TB » (très bon).*

***Figure 4-44** : Représentation du critère en pourcentage en fonction du mois (percentile 90), la qualité TB est très proche des 100 % en automne et en hiver alors que les qualités « B » et « Mo » se retrouvent le plus souvent au printemps.(A) : les états «B » et « TB » ; (B) les états « Mo », « Ma » et « Me ».*

***Figure 4-45** : Evolution du percentile 90 (chlorophylle) pour un pas de temps de 1 mois. On note une forte variabilité mettant en évidence de forts pics au printemps (en mars, en avril et en mai). Trois niveaux se dessinent dans cette figure : « TB », « B » et « Mo ».*

***Figure 4-46** : Evolution du percentile 10 (oxygène dissous) tous les 3 mois mettant en évidence une forte variabilité au cours du temps. Le critère « TB » est le seul représenté par le percentile 10.*

***Figure 4-47** : Représentation du critère en pourcentage en fonction des 3 mois (percentile 90), la qualité « TB » est en nette croissance de fin printemps en hiver alors que les qualités « B » et « Mo » se retrouvent le plus souvent au printemps. (A) : les états « B » et « TB » ; (B) : les états « Me » ; « Ma » et « Mo ».*

Figure 4-48 *: Evolution du percentile 90 (Chla) tous les 3 mois.*

Figure 4-49 *: Evolution du percentile 10 de chaque année et sur la période de juin à septembre de chaque année. On note une tendance à l'augmentation du percentile de 2004 à 2008 et baisse en 2009 pour atteindre des valeurs supérieures à 5 mg/L d'OD.*

Figure 4-50 *: Evolution du percentile 90 sur l'année et sur la période de mars à octobre de 2004 à 2009. On note une variabilité interannuelle. On note tout de même une tendance à la baisse de ce percentile au cours du temps en passant du niveau « Me » à « B ».*

Figure 4-51 *: L'évolution du percentile 10* (P_{10}) *sur 6 ans de mesure (de 2004 à 2009) de juin à septembre de 7h (matin) à 17h tous les 15 jours. Les courbes de 7h à 9h et de 13h à 17h sont en dessous de valeur seuil du percentile 10 (estimée sur les 6 ans : 5,33 mg/L) du 1er au 10ème jour. Après le 10ème jour ces courbes sont dessus de cette valeur (5,33 mg/L).*

Figure 4-52 *: L'évolution des deux critères estimés en pourcentage sur 6 ans (de 2004 à 2009) de juin à septembre de 7h (matin) à 17h tous les 15 jours. Le critère « TB » atteint un pic important à 13h et le critère « B » de 11h à 12h. Les critères « TB » et « B » estimés en pourcentage en fonction du jour : du 1er au 6ème jour, le critère « B » est plus rencontré et à partir du 11ème jour le critère « TB » atteint les 100 %.*

Figure 4-53 *: L'évolution du percentile 90 de 7h à 17h tous les 15 jours au mois de mars à octobre sur 6ans. On note trois niveaux de critère « B » et « Me » qui sont très faiblement représentés et le critère « Mo » qui est majoritairement présent.*

Figure 4-54 *: L'évolution du percentile 90* (P_{90}) *de 7h à 17h tous les 15 jours au mois de mars sur les 6 ans de mesure. Les quatre niveaux apparaissent : « B », « Mo », « Me » et « Ma ». On note que du 1er au 7ème jour du mois, les courbes de 7h à 17h fluctuent autour de la valeur seuil (11,66 µg/L).*

Figure 4-55 *: L'évolution du pourcentage de chaque critère en fonction de l'heure (A) : on note ici une forte variabilité de chaque critère de 7h à 17h : le critère « Mo » est le plus rencontré à 11h et à 16h ; le critère «B » atteint son pic à 9h ; le critère « Me » voit son pourcentage atteindre des pics à 11h, à 13h et à 17h ; le critère « Ma » qui est très minoritaire en pourcentage possède un pic à 12h. L'évolution des critères estimés en pourcentage en fonction du jour indique que (B) : le critère « B » est plus rencontré du 1er au 3ème jour, le critère « Mo » du 4ème au 7ème jour, le critère « Me » du 8ème au 11ème jour et le critère « Ma » est dominant partir du 14ème jour.*

Figure 4-56 *: Le percentile 90 estimé de 7 à 17h tous les 15 jours au mois d'avril sur 6 ans. 3 niveaux apparaissent : « Mo », « Me » et « Ma ». Toutes les courbes sont au-dessus de la valeur seuil (11,66 µg/L).*

Figure 4-57 *: L'évolution du percentile 90 en pourcentage en fonction de l'heure et du jour aux mois d'avril : (A) le critère « Me » apparait avec un pourcentage très important comparé aux « Mo » et au « Ma » ; (B) les critères en fonction du jour indique que le critère « Ma » apparaît du 1er au 3ème jour, le critère « Me » du 4ème au 15ème jour et le critère « Mo » après le 15ème jour.*

Figure 4-58 *: L'évolution du percentile 90* (P_{90}) *de 7h à 17h tous les 15 jours sur les 6 ans. Deux niveaux majoritairement apparaissent : « Me » et « Ma », le « B » apparait dans les courbes de 7h et 10h. Presque la totalité des courbes sont au dessus de la valeur seuil.*

Figure 4-59 *: Les critères estimés en pourcentage en fonction de l'heure et jour : (A) de 7h à 10h apparait les 4 critères et de 11h à 17h les 3 critères « Ma », « Mo » et « Me » ; (B) les critères en pourcentage en fonction du jour : du 1er au 2ème jour le critère « Me », du 3ème au 4ème jour et du 7ème au 11ème jour le critère « Ma », le critère « B » le 12ème jour. Le critère « Mo » à partir du 13ème jour.*

Figure 4-60 *: Le percentile 90* (P_{90}) *de 7 h à 17h tous les 15 jours : 3 niveaux apparaissent « B », « Mo » et « Me » : le « Mo » apparait dans la courbe de 7h 12h et 16h et « B » dans la courbe de 10h. Du 5ème au 15ème jour les courbes de 7h à 12h fluctuent autour de la valeur seuil et du 5ème au 9ème jour les courbes de 13h à 17h sont très proches de la valeur seuil.*

Figure 4-61 *: L'évolution des critères estimés en pourcentage en fonction de l'heure et du jour de prélèvement : (A) le critère « Mo » indique une tendance à l'augmentation pour atteindre les 100 % à 16h, (B) le critère « Me » est majoritairement rencontré le 1er jour, le critère « Mo » présent majoritairement du 2ème au 15ème jour.*

Figure 4-62 *: Le percentile 90* (P_{90}) *estimé aux mois de juillet de 7 h a 17h tous les 15 jours : 2 niveaux apparaissent « B » et « Mo », la totalité des courbes sont au dessus de 5 µg/L.*

Figure 4-63 *: Le percentile 90 estimé au mois d'août de 7 h à 17h tous les 15 jours : 2 niveaux apparaissent « B » et « TB ». Les courbes de 7h à11h montrent une faible variabilité comparées aux courbes de 12h à 17h.*

Figure 4-64 *: Les critères « B » et « TB » estimés en pourcentage en fonction de l'heure et du jour de la mesure : (A) en fonction de l'heure, on remarque que le critère « B » atteint les 100 % de 7h à 8h, et le critère « TB » montre une variabilité avec des pourcentages très faible ; (B) en fonction du jour, le critère « B » est rencontré majoritairement du 1er au 6ème jour et le critère « B » du 7ème au 8ème jour.*

Figure 4-65 *: Le percentile 90 estimé au mois d'août de 7 h à 17h tous les 15 jours : 2 niveaux apparaissent « B » et « TB ». Les courbes de 7h à11h montrent une faible variabilité comparées aux courbes de 12h à 17h.*
Figure 4-66 *: Le percentile 90 estimé au mois d'octobre de 7h à 17h tous les 15 jours : 2 niveaux apparaissent « B » et « TB ».*

Figure 4-67 *: Evolution de chaque critère en pourcentage en fonction du nombre de jours. Le critère « B » apparaît jusqu'à 1 mois. Jusqu'à 3 mois le critère « TB » est dominant. Les autres critères se maintiennent jusqu'à 1 an.*

Figure 4-68 *: Evolution de chaque critère en pourcentage en fonction du nombre de jours de mars à octobre. Le critère « B » apparaît jusqu'à 1 mois. Jusqu'à 3 mois le critère « TB » est dominant. Les autres critères se maintiennent jusqu'à 1 an.*

Liste de Tableaux

Chapitre I

Tableau 1-1 *: Récapitulatif de toutes les stations de prélèvements SOMLIT implantées le long des trois façades maritimes françaises (http://obs-vlfr.fr/somlit).*

Tableau 1-2 *: La gamme et la précision de la mesure de chaque paramètre mesuré par MAREL Carnot. (*http://www.ifremer.fr/dif *Marel).*

Tableau 1-3*: Le début et la fin des mesures en baie de Seine (les bouées MAREL).*

Tableau 1-4 *: Caractéristiques techniques des capteurs de température, d'oxygène dissous et de salinité (In-Situ-Inc, 2006).*

Chapitre II

Tableau 2-1 *: Le nombre de données et le pourcentage d'acquisition pour les séries temporelles étudiées ici.*

Tableau 2-2 *: Les moyennes annuelles et valeurs minimales et maximales de chaque série (Température, Oxygène dissous, pH et fluorescence) du 24 mars 2004 (non complète) à 2008.*

Tableau 2-3 *: Valeurs de l'exposant spectral* β *et le rapport d'échelle pour chaque paramètre. Ce rapport d'échelle pour chaque série est estimé en prenant le rapport entre la plus grande et la plus petite échelle du régime en loi d'échelle.*

Tableau 2-4 *: Les paramètres biogéochimiques mesurés à Honfleur. Nombre de données et pourcentage d'acquisition de chaque série temporelle.*

Tableau 2-5 *: Les moyennes annuelles et valeurs minimales et maximales annuelles pour chaque paramètre (température, salinité et turbidité)*
Tableau 2-6 *: Les moyennes annuelles et valeurs minimales et maximales annuelles pour chaque paramètre (pH, oxygène dissous et saturé).*

Tableau 2-7 *: Les valeurs de* β *et le rapport d'échelle pour chaque paramètre. Ces rapports d'échelles sont très importants.*

Tableau 2-8 *: Les sites et les stations de mesure indiquant la durée des mesures.*

Tableau 2-9 *: Valeur de l'exposant spectral pour le pH et la température.*

Tableau 2-10 *: Paramètres mesurés dans la rivière du Wimereux de avril-mai 2009.*

Tableau 2-11 *: Moyenne et valeurs maximales et minimales de différents paramètres mesurés en période de marée montante (en aval de la rivière du Wimereux).*

Tableau 2-12 *: Moyenne et valeurs maximales et minimales pour chaque paramètre mesuré en amont du Wimereux.*

Chapitre III

Tableau 3-1 *: Nombre de données et moyenne annuelles de chaque série temporelle.*

Tableau 3-2 *: Les moyennes des rapports et les valeurs des pentes hyperbolique des pdfs pour chacun des ratios.*

Tableau 3-3 *: Les moyennes annuelles des sels nutritifs mesurés au point C et au point Estacade.*

Tableau 3-4 *: Les moyennes annuelles des ratios mesurés au point C et au point Estacade.*

Tableau 3-5 *: Les moyennes annuelles des ratios mesurés au point C et au point Estacade.*

Tableau 3-6 *: Les valeurs moyennes des rapports et valeurs des pentes de chaque pdf.*

Chapitre IV

Tableau 4-1 : Moyenne mensuelle du débit de la Seine de 1996-2007.

***Tableau 4-2** : La grille d'évaluation : les critères (ou indices) de qualité utilisés pour quantifier les masses d'eau à partir des quantiles. Ces valeurs sont reprises de celles préconisées dans le cadre de la DCE.*

***Tableau 4-3** : Les indices de qualité pour les analyses faites sur une semaine.*

***Tableau 4-4** : Les indices de qualité pour les analyses faites tous les 15 jours.*

***Tableau 4-5** : Les indices de qualité pour les analyses faites tous les mois.*

***Tableau : 4-6** : Les indices de qualité pour les analyses faites tous les 3 mois.*

***Tableau 4-7** : Les indices qualité pour les analyses faites tous les ans.*

***Tableau 4-8** : Un exemple de simulation faite pour l'heure égale à 7h.*

***Tableau 4-9** : Percentile 10 ; critères en fonction du jour et de l'heure de juin à septembre de 2004-2009.*

***Tableau 4-10** : Percentile 90 ; critères en fonction du jour et de l'heure de mars à octobre de 2004-2009.*

***Tableau 4-11** : Percentile 90 : critères en fonction de l'heure et du jour au mois de mars (de 2004 à 2009).*

***Tableau 4-12** : Percentile 90 : critères en fonction du jour et de l'heure au mois d'avril de 2004-2009.*

***Tableau 4-13** : Percentile 90 : critères en fonction du jour et de l'heure aux mois de mai de 2004-2009.*

***Tableau 4-14** : Percentile 90 : critère en fonction du jour et de l'heure aux mois de juin de 2004-2009.*

***Tableau 4-15** : Percentile 90 : critères en fonction du jour et de l'heure au mois de juillet de 2004-2009.*

***Tableau 4-16** : Percentile 90 : critère en fonction du jour et de l'heure au mois d'août de 2004-2009.*

***Tableau 4-17** : Percentile 90 : critères en fonction du jour et de l'heure au mois de septembre de 2004-2009.*

***Tableau 4-18**: Percentile 90 : critères en fonction du jour et de l'heure au mois d'octobre de 2004-2009.*

Liste des encadrés

Chapitre I

Encadré 1-1 : Code qualité établi par SOMLIT

Encadré 1-2 : Code de qualité établi par l'Ifremer

Encadré 1-3 : Niveau de traitement et les codes de qualité attribués à chacune des données (Lefebvre, 2008b)

Encadré 1-4: Un exemple de programme écrit en langage MATLAB (un script)

Chapitre IV

***Encadré 4-1** : La grille d'évaluation du « bon état général » des masses d'eaux (DCE) (http//www.ifremer.fr).*

Résumé

Cette thèse porte sur l'étude de séries temporelles biogéochimiques à moyen et long terme, de façon à caractériser leurs fluctuations à de multiples échelles, et en particulier leurs extrêmes. Les données analysées proviennent en grande partie des programmes MAREL et SOMLIT.

Le programme MAREL a été mis en œuvre par l'Ifremer et basé sur des mesures à haute fréquence. Le programme SOMLIT est un service d'observation labellisé depuis 1997 par l'INSU. Ces mesures sont effectuées tous les 15 jours, par prélèvement, en un point fixe dans les eaux côtières en Manche. Pour l'analyse de ces séries temporelles, les méthodes utilisées sont empruntées aux domaines de l'analyse numérique et de la turbulence. Cette étude est effectuée en 3 parties. Dans la première partie, l'analyse du spectre de Fourier a permis de mesurer l'influence du forçage physique sur la distribution des paramètres à haute fréquence. Dans la seconde partie, la comparaison entre des données SOMLIT et MAREL recueillies en des endroits très proches à Boulogne-sur-mer a pu montrer une complémentarité mais tout en mettant en évidence le caractère plus informatif du système MAREL. La comparaison entre deux sites distincts en Manche (orientale et occidentale) a permis de déceler les similitudes et les différences dans les teneurs des ratios (N : P : Si ; COP/Chla). Dans la troisième partie, on a pu mettre en évidence l'influence des événements extrêmes du débit de la Seine sur la distribution de certains paramètres biogéochimiques mesurés à Honfleur. Nous avons également mis en évidence dans le cadre de la DCE, l'influence de l'échelle d'étude sur les estimations de certaines métriques nécessaires à la définition du bon état écologique à partir des données issues de la haute fréquence.

Mots clés : série temporelle, haute fréquence, fluctuations, multi-échelles, extrêmes, turbulence, spectre de Fourier, forçage physique, rapports stoechiométriques.

Abstract

This thesis focuses on the study of biogeochemical time series in order to characterize the dynamics of their fluctuations on a wide range of scales, and in particular their extremes. The databases analyzed here are mainly provided by the MAREL and SOMLIT programmes.

The MAREL program is a network of automatic measuring devices monitoring coastal marine environments implemented by Ifremer. The SOMLIT is a French national program operated by INSU. The measurements are made once every two weeks on the fixed stations. In order to analyze these time series, methods have been borrowed from the fields of numerical analysis and turbulence. The study was conducted in three parts. In the first part, we consider the high frequency time series. The Fourier spectral analysis reveals the influence of physical forcing on the distribution of the parameters. The second part of the study compares SOMLIT and MAREL results recorded from sites near Boulogne-sur-mer. The comparison of the two measuring systems (manual and automatic) showed that while they are complementary, the automatic MAREL system is more informative. The probability density functions (pdfs) of some ratios reveal extreme values in their dynamics. These pdfs reveal in all cases a hyperbolic behavior in the tail probability of the ratios. In the third part, we consider the influence of extremes events of the Seine flow on the distribution of some biogeochemical parameters. This section is also concerned with the analysis of data at high frequency in order to estimate of water masses state in the English Channel within the context of the Water Framework Directive (WFD).

Keywords: time series, high frequency, fluctuations, multi-scales, extremes, turbulence, Fourier spectrum, physical forcing, stoichiometric ratios.

INTRODUCTION GENERALE

Introduction

La zone littorale est la zone maritime la plus productive. C'est un milieu particulièrement vulnérable en raison de la pression croissante des activités humaines. De nombreux travaux ont montré que la zone côtière répond très rapidement aux différentes perturbations qu'elle peut subir (Paerl, 2006 ; Gypens et al., 2007 ; Heisler et al., 2008 ; Spilmont et al., 2009 ; Richlen et al., 2010). Cette zone côtière montre des signes de pollution d'origine chimique, d'eutrophisation avec des efflorescences algales (toxiques et non toxiques) et des eaux rouges (Lancelot et al., 1987 ; Ménesguen, 2003). Sur les littoraux français, depuis 1983 on note plusieurs apparitions d'espèces toxiques. En 1984 le *Dynophysis* a affecté le littoral de Normandie et la Bretagne (Ménesguen et Salomon, 1988). Sur les côtes Bretonnes, on relève la prolifération estivale de macro algues vertes, *Ulva sp, Enteromorpha sp,* (Piriou, 1986). Dans le bassin d'Arcachon des apparitions successives de différentes espèces d'algues toxiques nuisent à l'activité des ostréiculteurs et des pêcheurs. Depuis les années 1980, on observe par exemple au printemps au niveau de la Manche orientale l'apparition d'efflorescences de micro algues, le *Phaeocystis globosa* (Sazhin et al., 2006 ; Lefebvre, 2004b, 2008a,b). Des études suggèrent que l'eutrophisation serait causée par des rejets de sels nutritifs (nitrates) dans les eaux marines par l'activité humaine (Ménesguen, 2001 ; Lefebvre, 2008a,b) ou que les conditions climatiques anormales seraient à l'origine de ces proliférations (Peperzak, 2003 ; Harley et al., 2006 ; Gómez and Souissi, 2008). Dans d'autres situations, l'activité de transport est également mise en cause avec les eaux de ballasts qui peuvent contenir des kystes d'espèces toxiques (Hallegraeff et Bolch, 1991 ; Boudouresque et Verlaque, 2002).

De nombreuses activités socio-économiques telles que la pêche (exemple, le colmatage de filets de pêche), la mytiliculture, la baignade, souffrent de ces nuisances d'où l'intérêt de plusieurs actions qui ont vu le jour dans le cadre de la protection des zones marines menacées. On retrouve aussi bien les Aires Marine Protégées (Boncoeur et al., 2007), que les zones Natura 2000 en mer.

Au niveau international plusieurs conventions ont été signées dans le cadre relatif aux aires marines protégées parmi lesquelles la convention sur le patrimoine mondial (27/06/1975) et le protocole sur les aires spécialement protégées et la diversité biologique en Méditerranée (16/04/2001). Au niveau national plusieurs lois ont vu le jour concernant les parcs nationaux et des réserves naturelles. La loi sur l'eau et les milieux aquatiques (Directive Cadre sur l'Eau, loi du 30/12/2006) ont pour objectif d'atteindre le résultat de « bon » état des eaux en 2015.

Dans cette optique, comprendre les causes et les conséquences des modifications qui peuvent survenir au niveau du littoral reste l'un des principaux objectifs des programmes de surveillance du milieu marin littoral. Plusieurs programmes ont vu le jour comme le PNOC (Programme National d'Océanographie Côtière) et le SOMLIT (Service d'Observation en Milieu Littoral de l'INSU[1]), dont l'objectif est le suivi de l'évolution de la qualité des eaux côtières (suivi de la température, de l'oxygène dissous, de la salinité, du pH, de la chlorophylle *a*, des sels nutritifs etc..) de façon à pouvoir détecter à quel moment des situations anormales sont rencontrées pour pouvoir par exemple prendre les mesures adéquates de restauration. L'objectif final de ces programmes de mesure est de comprendre quel est « l'état naturel » de ces écosystèmes. Pour identifier et caractériser cet état naturel, il est nécessaire de disposer de mesures à long terme, c'est-à-dire des mesures effectuées toujours au même endroit pendant une longue période pouvant aller jusqu'à quelques décennies. Les mesures doivent également être effectuées à haute fréquence, de façon à pouvoir détecter des événements épisodiques, comme les pollutions intervenant sur une courte période. L'intérêt des séries temporelles biogéochimiques ou hydrobiologiques est reconnu par des politiques publiques nationales et internationales, comme nous l'évoquerons dans ce manuscrit.

Les séries temporelles des stations d'observation permettent également de comprendre le rôle de l'océan dans le cycle de carbone et d'appréhender les réponses de l'océan aux pertubations climatiques (Steinberg et al., 2001 ; Lomas et al., 2002). Pour ces séries à long terme on peut citer le service d'observation DYFAMED (Dynamique des flux Atmosphériques en Méditerranée) (Marty et al., 2002 ; Marty et Chiavérini, 2010) qui a vu

[1] Institut National des Sciences de l'Univers.

le jour dans le cadre du programme JGOFS (Joint Global Ocean Flux Studies) en 1988 et labellisé en 1995 par l'INSU. Le site de prélèvement DYFAMED est situé en Méditerranée Nord Occidental en zone hauturière.

Au niveau international, il existe des services d'observations tels que BATS (Bermuda Atlantic Time Series) (Steinberg et al., 2001) ou HOT (Hawaii Ocean Time-series) (Karl et Lukas, 1996) mis en place également par le programme JGOFS.

La présente étude, qui intègre cette problématique, consiste à analyser des données de surveillance marine à long terme. Elle porte précisément sur l'étude de séries temporelles biogéochimiques, en se focalisant sur leur dynamique non-linéaire : extrêmes, propriétés multi-échelles. La zone côtière est soumise à un hydrodynamisme complexe et les phénomènes interagissant au sein de cet écosystème sont à la fois physiques, chimiques et biologiques. Ces interactions et couplages multiples ont lieu à de multiples échelles, ce qui fait que leur prise en compte demande de faire appel à des méthodes adaptées, pouvant décrire l'intensité des phénomènes, prendre en compte leur caractère aléatoire et les multiples échelles intervenant. La méthodologie utilisée est ainsi inspirée du domaine de la turbulence.

Cette étude se découpe en 4 chapitres : le chapitre I, Matériels et Méthodes, présente les réseaux d'observation analysés, la théorie de la turbulence et les autres méthodes d'analyses utilisées. Le chapitre II est consacré à l'analyse de la dynamique à haute fréquence des séries biogéochimiques, en considérant la Manche orientale, La Manche occidentale, la Baie de Seine, et la rivière de Wimereux (des mesures à haute fréquence faites à l'aide d'une sonde multiparamétrique). Le chapitre III est consacré à l'analyse des données SOMLIT et MAREL en parallèle. L'étude concerne la dépendance entre paramètres (la covariation) en utilisant une méthode adaptée du domaine de l'analyse numérique, faisant appel à une régression à l'aide d'un noyau gaussien (Wand et Jones, 1995). On estime également la pdf (*probability density function*) de certains ratios (N/P, Si/N et Si/P). Des données provenant de deux points côtiers SOMLIT sont également analysées (le point C et le point Estacade). Le chapitre IV est consacré à l'étude la dynamique des extrêmes qui est faite suivant deux axe: (i) dans le cadre du programme Seine Aval (ZOOSEINE), l'étude porte sur la relation entre le débit de la Seine et les

paramètres biogéochimiques mesurés à Honfleur, (ii) dans la Directive Cadre sur l'Eau (Directive 2000/06/CE), une étude de l'influence de l'échelle d'étude sur les estimations de certaines métriques nécessaires à la définition du bon état écologique, traduites en 5 classes : Très bon état, bon état, état moyen, état médiocre et mauvais état. Cette étude est une simulation faite à partir des données MAREL.

Chapitre I. MATERIELS & METHODES

Chapitre I. Matériels et Méthodes

A. Introduction

La zone côtière littorale est le siège d'échanges de matières et d'énergies importants entre le continent et l'océan ouvert et entre l'océan et l'atmosphère. Par sa richesse, le littoral est une zone de forte biodiversité. C'est une zone qui procure aussi d'importants biens et services. Le littoral est également la zone la plus active de la biosphère, affectée par des évolutions démographiques et écologiques. L'eutrophisation de certaines eaux littorales est l'une des conséquences du changement causé par des perturbations qui restent fortement couplées aux activités humaines (Billen et Garnier, 2007).

Pour une meilleure surveillance de l'état de santé biogéochimique ou biologique du milieu littoral, plusieurs réseaux d'observation ont été mis en place. L'INSU (Institut National des Sciences de l'Univers) a mis en place depuis 1997 le programme SOMLIT (Service d'Observation en Milieu Littoral) qui vise à contribuer à l'observation à moyen et long terme de l'évolution de l'environnement le long des côtes françaises. Ce programme consiste à effectuer toutes les deux semaines des mesures de nombreux paramètres biogéochimiques (oxygène, pH, température, chlorophylle *a*, matière en suspension, nitrate, nitrite, ammonium, salinité, etc). L'objectif général de ce réseau est orienté vers la détection des changements à long terme des variations et des forçages en zones côtières[2].

D'un autre côté, des stations de mesures automatisées à haute fréquence (échantillonnage tous les 10, 20, ou 60 minutes) ont été mises en place par différents instituts et en particulier par l'Ifremer : le système MAREL (Mesures Automatisées en Réseau de l'Environnement Littoral) mesure de façon automatique des paramètres tels que l'oxygène dissous, la température de l'eau, la salinité, la fluorescence, le pH, la direction du vent, etc[3].

Le programme SOMLIT et le système MAREL permettent tous deux l'acquisition d'importantes séries de données temporelles permettant de mieux comprendre les

[2] http://somlit.epoc.u-bordeaux1.fr.

[3] http://www.ifremer.fr/dtmsi/programmes/marel/marel.htm.

changements à long terme des écosystèmes. Nous présentons ici nos analyses effectuées à partir de ces données.

La Manche orientale et ses estuaires sont nos sites d'études avec les points fixes de prélèvements SOMLIT et MAREL. Des méthodes d'analyse classiques et novatrices sont utilisées pour caractériser la dynamique multi-échelle existant dans les séries biogéochimiques étudiées. L'analyse de la covariation est basée sur une approche de moyenne glissante. L'analyse spectrale et les fonctions de densité de probabilité sont des méthodes d'analyse empruntées aux domaines de l'analyse numérique et de la turbulence. Les événements extrêmes qui caractérisent l'apparition des valeurs rares sont également étudiés.

B. Présentation des réseaux analysés : mesures à moyen et long terme

1. SOMLIT (national et local)

Le service SOMLIT a été mis en place en 1997 sous l'égide de l'INSU. Ce service d'observation labellisé a pour fonction le suivi des paramètres biologiques, chimiques et physiques à long terme le long des côtes françaises. Ce réseau regroupe actuellement 8 Stations marines (Wimereux, Luc-sur-mer, Roscoff, Brest, Arcachon, Banyuls, Marseille et Villefranche-sur-Mer) implantées le long des côtes françaises. Il coordonne les activités d'observation des Stations marines sur l'ensemble des trois façades maritimes française (la Manche, l'Atlantique et la Méditerranée). L'objectif de ce programme est de recueillir à long terme de manière coordonnée au niveau national un ensemble de paramètres hydro-biogéochimiques communs à tous les sites de manière à comparer les séries temporelles entre elles (Cariou et al., 2002). Les aspects importants de ce réseau sont :

- Le choix des sites de prélèvement, tenant compte de la spécificité de chaque site afin d'étudier les variations saisonnière et interannuelles.
- Le choix des paramètres à mesurer : 15 paramètres sélectionnés constituent le corps des mesures partagées en commun par les sites SOMLIT.

- Le choix du protocole commun de mesure et d'analyse : des prélèvements bimensuels ou mensuels sont effectués à marée haute. Deux types de mesures sont réalisés : des prélèvements d'échantillons d'eau à différentes profondeurs de la colonne et des mesures par acquisition de profils (CTD). L'ouvrage de référence en ce qui concerne les protocoles de dosage et d'analyse est le '*Manuel des Analyses Chimiques en Milieu Marin'* d'Aminot et Chaussepied (1983) (voir aussi Aminot et Kérouel, 2004).
- L'assurance qualité : le réseau SOMLIT a mis au point une procédure de contrôle de qualité. Des outils développés permettent de maîtriser et de quantifier la qualité des mesures faites. Depuis décembre 2006, le réseau SOMLIT a choisi d'organiser son système qualité selon les prescriptions de la norme NF/EN ISO/CEI 17025. La calibration des appareils de mesure (pH, oxygène dissous, nutriments, COP, NOP, chlorophylle *a*) est faite lors d'exercices d'intercomparaisons entre les stations de services. Un code qualité est attribué aux données (encadré 1, voir le site web SOMLIT). L'attribution d'un code de qualité à chacune des données est faite par le personnel ayant réalisé le prélèvement et l'analyse des échantillons d'eau.

Encadré 1-1 : Code qualité établi par SOMLIT (inspiré du code WOCE[4](1994))

Les codes qualités inspirés du code WOCE et adaptés au réseau SOMLIT

0 ⇒ **Donnée en dessous de la limite de détection** (la mesure est en dessous de la limite de détection de l'appareil de mesure)

1 ⇒ **Prélèvement effectué mais mesure non réalisée** (le prélèvement a été effectué mais la mesure n'a pas été possible due à la perte de l'échantillon : la valeur manquante est indiquée par 999999)

2 ⇒ **Mesure bonne, échantillon non répliqué**

3 ⇒ **Mesure douteuse** (une mesure unique ou une moyenne de réplicats est faite mais sur laquelle un doute existe)

4 ⇒ **Mesure mauvaise**

5 ⇒ **Prélèvement effectué, mais la valeur n'est pas encore reportée**

6 ⇒ **Mesure bonne** (moyenne de plusieurs réplicats)

7 ⇒ **Mesure bonne** (valeur acquise hors protocoles SOMLIT)

8 ⇒ **Données non validée**

9 ⇒ Echantillon non prélevé

Plusieurs stations fixes de prélèvement SOMLIT sont réparties le long du littoral (Figure 1-1 et tableau 1-1). Sur la façade Manche orientale, le « point C » et le « point L » sont situés dans les eaux au large de Boulogne-sur-mer. Le « point C » se trouve sous l'influence des eaux continentales et le « point L » à l'écart de ces perturbations d'origine anthropiques. Le site « Luc-sur-mer » situé a proximité du port de Ouistreham à 175 m de la côte, est soumis à l'influence continentale. Sur la façade Manche occidentale (Station marine de Roscoff), le réseau SOMLIT possède deux sites caractéristiques de prélèvement. Le site « Estacade » est situé à proximité de la côte à l'extrémité de l'Estacade (longue de 500 m) du port de Roscoff. La profondeur varie de 3 à 1 m selon la marée et ce point peut

[4] WOCE : World Ocean Circulation.

être soumis à des influences continentales et anthropiques. Le site « Astan » est situé dans les eaux océaniques où la colonne d'eau peut atteindre 60 mètres. Le site de prélèvement « Portzic » est situé entre la mer d'Iroise et la rade de Brest à 200 m de la côte. Ce site est ouvert à l'influence océanique avec une profondeur de 5 à 10 m suivant le marnage. Sur la façade Atlantique, la station de mesure « Eyrac » est située devant la Station marine d'Arcachon : un site à la limite du partage entre les eaux néritiques internes et externes. Les prélèvements sont effectués à 1 m en dessous de la surface et à 1 m au dessus du fond. Au niveau de la Gironde, trois stations sont situées le long de l'estuaire, de l'amont en aval (les stations : « pK30 », « pK52 » et « pK86 »)[5] avec deux niveaux de prélèvement (1 m en dessous de la surface et 1 m au dessus du fond, en pleine mer, mi-jusant et basse-mer mi-flot). Au niveau de la façade méditerranéenne, le site « Sola » est situé en baie de Banyuls, à 1 km de la côte. La profondeur y est de 27 m et les prélèvements sont effectués en surface (3 m en dessous de la surface) et au fond (3 m au dessus du fond). Ce site est soumis à l'influence des apports du Rhône. La station « Frioul » est située dans la partie médiane du Golfe de Marseille ayant une profondeur de 60 m, et le « point B » est très proche de la Station marine de Villefranche-sur-mer. Les prélèvements sont effectués à plusieurs niveaux au « point B » (0, 10, 20, 30, 50 et 75 m sous la surface).

[5] pK : point Kilométrique.

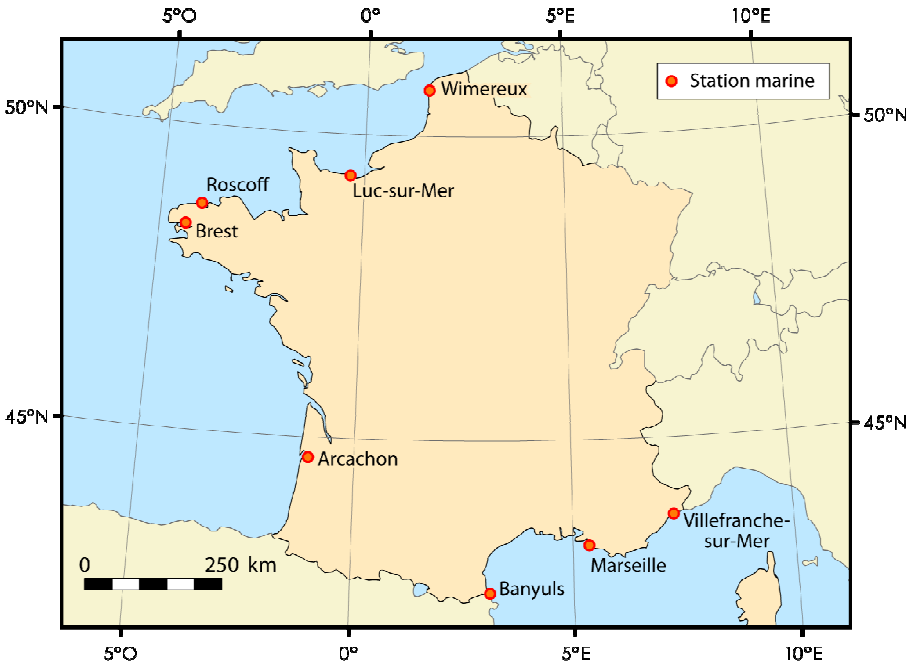

Figure 1-1 : Stations de prélèvements SOMLIT reparties le long des côtes françaises. Les prélèvements sont assurés par chacune des Stations marines : Wimereux, Luc-sur-mer, Roscoff, Brest, Arcachon, Banyuls, Marseille et Villefranche-sur-mer. (Source : Denis Marin ; LOG).

Tableau 1-1 : Récapitulatif de toutes les stations de prélèvements SOMLIT implantées le long des trois façades maritimes françaises (http://somlit.epoc.u-bordeaux1.fr)[6]

Station Marine	**Site de prélèvement**	**Coordonnées**	**Début de la série**[7]	**Fréquence d'échantillonnage**	**Niveau de prélèvement**	**Condition de marée**
Wimereux	Point C	1° 31' 17E 50° 40' 75 N	Novembre 1995	2 semaines	S/F- profils	PM-VE coef 95 +/-25
	Point L	1° 24' 60 E 50° 40'75 N				
Roscoff	Estacade	3° 58' 58 W 48° 43' 56 N	Janvier 1985	2 semaines	S	PM-ME
	Astan	3° 56' 15 W 48° 46' 40N	Janvier 2000		S/F-profils	
Brest	Portzic	4° 33' 07.19 W 48° 21' 32.13 N	Mars 1998	1 semaine	S	PM-coef 70 +/-10
Arcachon	Eyrac	1° 10' 00W 44° 40' 00N	Décembre 1996	2 semaines	S/F	PM, BM, ME
Gironde	Pk 86	0° 57' 000W 45°31'000N	Mars 1997	1 mois	S/F	PM, BM ME
	Pk52	0° 43' 50 W 45° 14' 80N	1978	1 mois	S/F	PM, BM ME
	Pk30	0° 40' 54 W 45° 06' 04N	1984	1 mois	S/F	PM, BM ME
Banyuls	Sola	03° 8' 700 E 42° 29' 300N	Mars 1997	1 semaine	S/F-profils	
Marseille	Frioul	05° 17' 30 E 43° 14' 30N	Mars 1994	2 semaines	S/F max fluo-profil	
Villefranche	Point B	7° 19' 00 E 43° 41' 00N	Août 1991	1 semaine	S-profil	

[6] S : surface ; F : fond, PM : pleine mer ; VE : vive eau ; BM : basse mer ; ME : morte eau ;
coef 95 : coefficient de marée 95 avec une précision de +/-25 ;
coef 70 : coefficient de marée 70 avec une précision de +/-10.

[7] A noter que le programme SOMLIT a été mis en place en 1997. Les Stations se sont donc engagées à fournir les données à tout demandeur, à partir de 1997. Les éventuelles données antérieures ne sont donc par fournies dans le cadre du service d'observation.

Les sites les plus étudiés dans cette étude sont situés en Manche orientale au sud ouest de Boulogne-sur-mer. Une sortie tous les 15 jours à bord du N/O SEPIA II est assurée par le personnel du laboratoire LOG en deux points caractéristiques :

- Le point C (point côtier : 1°31'17 E ; 50°40'75N) est situé à 1 mile de la côte. La profondeur y atteint 21 m et les prélèvements d'échantillons d'eau sont effectués en surface (1 m en dessous) et sub-surface (1,5 m en dessous). Ce point littoral est à proximité du port de Boulogne et est soumis à l'influence continentale (fleuve côtier) ou anthropique.
- Le point L (point au large), est situé à 5 miles de la côte (1°24'60 E; 50°40'75N). La profondeur de la colonne d'eau y atteint 50 m. Ce site est à l'écart de perturbations d'origine continentale. Les prélèvements sont effectués à 1 m sous la surface et à 1,5 m au dessus du fond.

Ces deux stations (point C et L) de prélèvement SOMLIT sont considérées comme représentatives de la Manche orientale notamment des eaux côtières (du fleuve côtier) et des eaux plus au large (Figure 1-2).

Les prélèvements d'échantillons d'eau sont faits en pleine mer à l'aide de bouteilles Niskin et les échantillons sont transportés au laboratoire pour l'analyse.

Les paramètres communs mesurés par l'ensemble des points d'appui SOMLIT sont : la température, la salinité, l'oxygène dissous (OD), le pH, l'ammonium, le nitrate, le nitrite, le phosphate, l'acide silicique, la chlorophylle *a* (Chla), le carbone organique particulaire (COP), l'azote organique particulaire (NOP), matière en suspension (M.E.S ou seston).

Les mesures de température et de salinité sont faites à l'aide d'une sonde de type Seabird SBE 19 ou SBE 25. La précision minimale demandée est en centième de degré pour la température et en centième d'unité (ou au minimum 0,5 %) pour la salinité. L'analyse de l'oxygène dissous est réalisée selon la méthode classique de Winkler modifiée par Carritt et Carpentier (1966). Les échantillons sont analysés au moins 24 h après le prélèvement, au plus tard 1 mois après. Les mesures du pH sont réalisées à l'aide d'un pHmètre équipé d'une électrode combinée ayant une précision de mesure de $\pm 0{,}01$ après étalonnage avec des solutions standard à pH = 7 et pH = 9 ou 10. Les mesures d'ammonium sont effectuées selon la méthode de Koroleff (1969) basée sur la réaction de Berthelot. Les mesures sont

réalisées 24 h après le prélèvement à l'aide d'un spectrophotomètre Perkin Elmer lambda 10 dans des cuves de trajet optique de 10 cm. Les mesures sont faites avec une précision de $\pm 0{,}03\,\mu$mol/L. Les nitrites et les nitrates sont mesurés selon la méthode de Bendschneider et Robinson (1952) et de Wood et al. (1967). Les mesures sont effectuées en analyse automatique sur des chaînes d'analyse AAII Technicon. Les précisions de mesures sont de $\pm 0{,}01$ µmol/L au niveau de 0,25 µmol/L pour le nitrite et de $\pm 0{,}1\,\mu$mol/L au niveau de 10 µmol/L pour le nitrate. L'acide silicique est mesuré selon la méthode de Mullin et Riley (1955) adaptée par Strickland et Parsons (1972), en utilisant l'autonalyse du type Technicon ou Skalar avec une précision de mesure de $\pm 0{,}1\,\mu$mol/L. Quant au phosphate, les mesures sont effectuées selon la méthode de décrite par Murphy et Riley (1962) ; les mesures sont effectuées par analyse automatique sur des chaînes d'analyses AAII Technicon avec des précisions de mesures de $\pm 0{,}40$ µmol/L de phosphate. Les teneurs en carbone et azote particulaire sont déterminées par combustion de la matière organique retenue sur un filtre du type Whatman (GF/F) de 25 mm de diamètres pré-calciné au four pendant 4 h à 450 °C. Les mesures de matière en suspension (MES) sont effectuées par filtration, le volume filtré est fonction de la charge en particules du milieu. La précision de la mesure est de $\pm 0{,}4$ mg/L. La mesure de la chlorophylle *a* est réalisée selon la méthode fluorimétrique de Yentsch et Menzel (1963) à l'aide d'un fluorimètre Turner Designs. Les précisons de mesures sont de $\pm 0{,}05$ µg/L de chlorophylle *a*. Les protocoles d'analyse détaillés sont disponibles sur le site web du SOMLIT National.

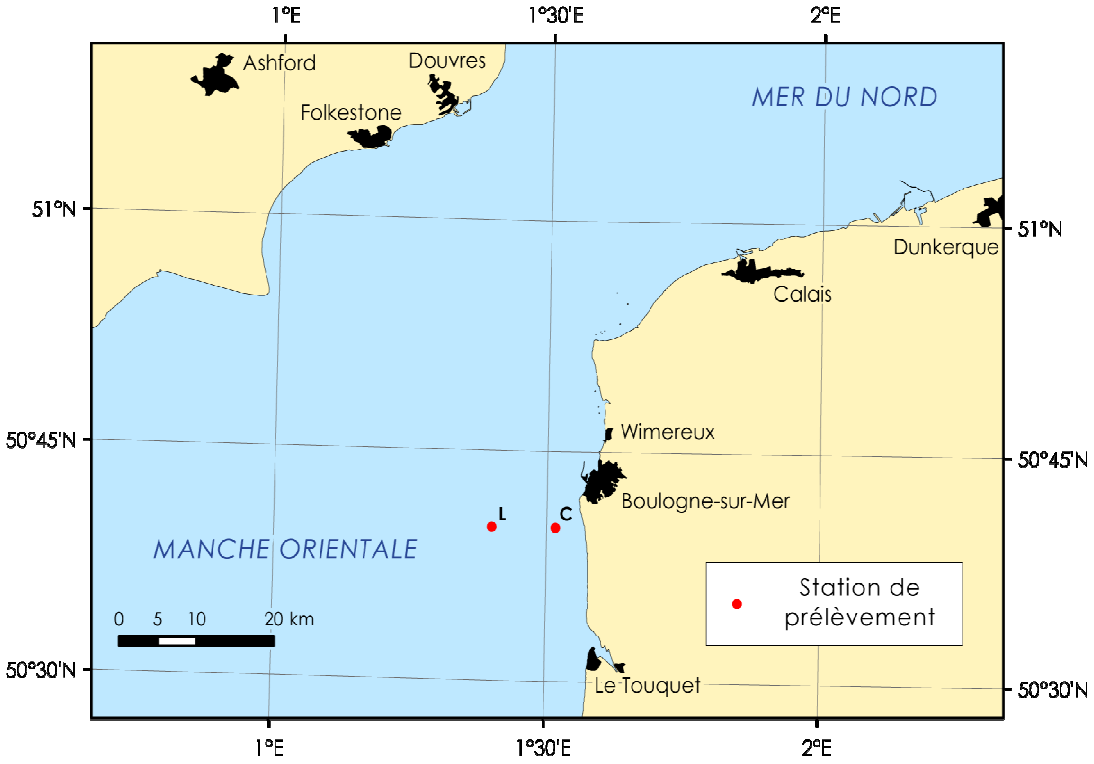

Figure 1-2 : Stations de prélèvement SOMLIT en Manche orientale dans les eaux proches de Boulogne-sur-mer. Le point C (le point côtier est soumis aux apports continentaux) et le point L (le point au large est à l'écart des perturbations anthropiques) (Source : Denis Marin ; LOG).

2. MAREL (ROSLIT)

L'Ifremer (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer) et ces multiples partenaires (INSU, l'Etat via le CNRS (Centre National de Recherche Scientifique) et les universités) ont mis en place un système pour effectuer des mesures à haute fréquence en zone Littorale, baptisé MAREL (Mesure Automatisée en Réseau pour l'Environnement Littoral). Plusieurs stations de mesures MAREL sont déployées dans différents sites le long du littoral (Figure 1-3). Une gamme de systèmes de mesures est proposée pour s'adapter aux sites d'implantation. Les produits MAREL existent sous forme de bouées, de pylônes ou de pontons flottants instrumentés. La gamme de produits est adaptée aux conditions environnementales. On retrouve des produits adaptés aux sites

exposés comme les estuaires (MAREL Honfleur, MAREL Carnot) avec des contraintes environnementales fortes (la houle, le courant) ; des produits qui sont adaptés aux sites protégés (l'écloserie d'Argenton) et aux Stations marines (des bouées). On retrouve également des grosses bouées avec flexibles de prélèvement pour la zone côtière exposée (MAREL Baie de Seine). Les petites bouées sont déployées en zone côtière et en zone abritée (MAREL Baie de Vilaine).

Le réseau ROSLIT (Réseau d'Observation et de Surveillance du Littoral) regroupe l'ensemble des stations MAREL. Les objectifs de ce réseau sont multiples : tout d'abord, assurer la coordination technique des sites avec la gestion des équipements (une équipe opérationnelle pour la maintenance en conditions opérationnelles). Ensuite, ce réseau assure une cohérence dans les méthodes d'acquisition, avec un suivi métrologique sous assurance qualité. Le réseau ROSLIT gère également les procédures d'étalonnage, de calibration des capteurs, de protection des capteurs contre le biofouling par chloration, de communication par GSM, de télémaintenance, de maintenance trimestrielle des capteurs.

D'autre part le réseau ROSLIT assure la gestion du flux de données en regroupant dans une base de données nationale les mesures de l'ensemble des réseaux MAREL. Les données sont disponibles sur le site web de l'Ifremer. L'évolution technique est également l'un des objectifs de ROSLIT, avec une mutualisation des retours d'expérience. De nouveaux produits sont mis au point, qui simplifieront le travail en mer avec une réduction des coûts et une baisse de la consommation électrique (réduction de la taille). Les dernières évolutions MAREL sont la bouée légère le MAREL_SMATCH pour la zone côtière ayant un poids de 10 kg, le système MAREL_ESTRAN sur tables ostréicoles adapté à l'estran avec un poids de 20 kg, la bouée MAREL_SWING pour la zone côtière avec un poids de 120 kg et la bouée MAREL_MOLIT avec un ombilical pour l'ancrage et le prélèvement au fond également adapté à la zone côtière avec un poids de 10 tonnes.

Les données acquises automatiquement au niveau des stations de surveillance sont transmises à une station de gestion où elles sont validées, traitées, archivées et diffusées vers les utilisateurs. Les données MAREL sont dotées d'un niveau de qualité allant de 0 à 9 (voir encadré 1-2 et 1-3).

En parallèle aux réseaux nationaux, l'Ifremer a mis en place des réseaux de surveillance régionaux en collaboration avec des partenaires locaux. Ces réseaux sont au nombre de 5 :

- Le SRN (Suivi Régional des Nutriments) sur le Littoral Nord Pas-de-Calais/ Picardie ;
- Le RHLN (Réseau Hydrologique du Littoral Normand) sur le littoral Normand ;
- Le ARCHYD (Arcachon Hydrologie), pour le Bassin d'Arcachon ;
- Le RSL (Réseau de Suivi Lagunaire) ;
- Le RLC (Réseau de Lagunes Corses) pour les lagunes méditerranéennes.

Tableau 1-2 : La gamme et la précision de la mesure pour chacun des paramètres mesuré par MAREL Carnot. (http://www.ifremer.fr/dtmsi/programmes/marel/marel.htm)

Paramètres physico-chimiques	**Gamme**	**Incertitude**
Température de l'eau	-5 à +30°C	0,1°C
Conductivité	0 à 70 mS/cm	0,3 mS/cm
Oxygène dissous	0 à 20 mg/L	0,2 mg/L
pH	6,5 à 8,5 UpH	0,02 UpH
Turbidité	0 à 4000 NTU	10%
Chlorophylle	0 à 50 FFU	10%
Paramètres conditionnels		
Nitrates	0,1 à 100 µmol/L	5%
L'Acide silicique	0,1 à 100 µmol/L	5%
Phosphates	0,1 à 100 µmol/L	5%
Azote ammoniacal	0,05 à 100 µmol/L	5%
Fugacité du CO2	200 à 1000 µatm	1 µatm



Figure 1-3 : Localisation des stations de mesures MAREL le long des côtes françaises : la façade Manche (orientale et occidentale), la façade Atlantique et la façade Méditerranéenne. (Source : Michel Répécaud ; Ifremer).

Encadré 1-2 : Code de qualité établi par l'Ifremer

Niveau de qualité pour les données MAREL

0 ⇒ **Non qualifié**
1 ⇒ **Bon**
2 ⇒ **Hors statistique**
3 ⇒ **Douteux**
4 ⇒ **Faux**
9 ⇒ **Manquant**

2.1. MAREL Carnot

Dans le cadre d'un programme CPER[8] (Contrat de Plan Etat-Région) de la Région Nord-Pas-de-Calais, une station de mesure MAREL a été installée à Boulogne-sur-mer en 2004. Cette station, cofinancée par l'Etat, Ifremer, le FEDER, le conseil Régional Nord-Pas-de-Calais, l'Agence de l'Eau Artois Picardie et l'INSU, a été installée au bout de la digue Carnot dans le port de Boulogne, d'où son nom de « MAREL-Carnot ». Son inauguration a eu lieu en novembre 2004, mais certains capteurs sont opérationnels depuis mars 2004. Cette station marque la sortie du port de Boulogne-sur-mer (Figures 1-4 et 1-5). Elle effectue des mesures à 1,5 m sous la surface : la température de l'air et de l'eau, la salinité, la concentration en oxygène dissous et le pourcentage de saturation, le pH, la turbidité, la concentration en nitrate, phosphate et l'acide silicique, la fluorescence (chlorophylle *a*), la direction et la vitesse du vent, l'humidité relative, la pression atmosphérique et les radiations disponibles pour la photosynthèse (P. A. R). La mesure est effectuée toutes les 20 minutes pour la plupart des paramètres et toutes les 12 h pour les nutriments. Le cœur du système est constitué d'une cellule de mesure regroupant plusieurs capteurs. L'originalité du système est le pompage de l'eau à travers la zone où elle est analysée (Figure 1-5), avec une chloration de celle-ci lorsqu'il n'y a pas de cycle de mesure. La chloration de l'eau de mer par électrolyse protège les capteurs contre le développement de biofouling (Lefebvre, 2008b). Ce système ce situe au niveau de la chambre de mesure.

Les spécifications techniques des capteurs utilisés sont les suivantes. Le capteur de température mesure sur une gamme de -5 à +30 °C avec une précision de 0,1 °C. Le capteur d'oxygène fournit une mesure d'oxygène dissous à salinité zéro qui est ensuite corrigée de la salinité ; il varie sur une gamme de 0 à 20 mg/L avec une incertitude de 0,2 mg/L. Le capteur de pH effectue des mesures sur une gamme de 6,5 à 8,5 unités de pH avec une précision de 0,2 unités de pH. Les mesures de fluorescence sont exprimées en FFU (Fluorescéine Fluorescence Unit) correspondant à un étalonnage du capteur par une solution de fluorescéine de 0 à 50 FFU avec une incertitude de 10 %. Les concentrations en sels

[8] Contrat de Plan Etat Région (CPER) 1999-2006, région Nord-Pas-de-Calais, programme Environnement, Axe Ecosystèmes perturbés du littoral. Projet intitulé « Le bloom de *Phaeocystis* en Manche orientale : forçages, dynamique et effets sur l'écosystème côtier ».

nutritifs portent sur une gamme allant de 0,1 à 100 µmol/L avec une incertitude de 5 % (voir Tableau 1-2)

L'ensemble des données[9] est transmis deux fois par jour au centre Ifremer Manche-mer du Nord de Boulogne-sur-mer, par liaison GSM. Ensuite, une validation est effectuée, et les données sont soumises à un ensemble de procédures de contrôle de qualité (encadré 1-3). Un premier contrôle automatique est effectué, un contrôle du format des fichiers et la comparaison des valeurs obtenues aux valeurs de références est également réalisé (T0,5). Un second contrôle visuel est fait (T1,0) et le dernier contrôle concerne les rapports de métrologie (T2,0). Selon les rapports de métrologie, un niveau de qualité est attribué à chacune des données (Lefebvre, 2008b) (encadré 1-3). Toutes ces procédures et techniques sont présentées dans Berthome (1994) et Woerther (1998). Les systèmes MAREL fournissent d'importantes bases de données, qui restent encore trop peu exploitées.



Figure 1-4 : Station de mesure MAREL-Carnot (tube à demi-immergé au premier plan, en bas à gauche du phare) installée sur la digue Carnot de Boulogne-sur-mer, (Photo F.G. Schmitt).

[9]Les données sont accessibles sur le site: http://www.ifremer.fr/difMarelCarnot.

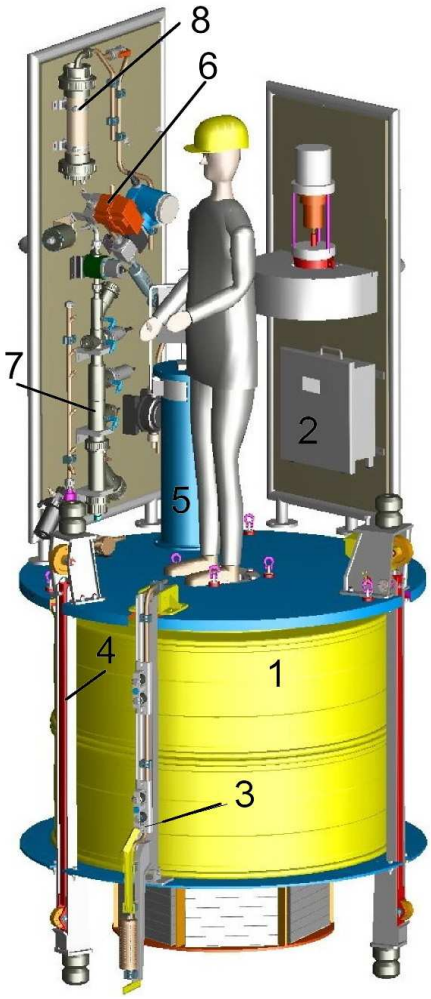

Figure 1-5 : Représentation schématique de l'intérieur du tube de prélèvement. Le flotteur coulisse à l'intérieur du tube au gré des marées grâce à un système de roulements. Le flotteur est immergé jusqu'au 2/3 de la partie haute du cylindre jaune. Le prélèvement d'eau se fait 1,5 m sous la surface via une perche sortant du tube support. (1) Flotteur (partie immergée) ; (2) automate de gestion de la station de mesures ; (3) perche de prélèvement ; (4) système de roulement ; (5) analyseur de nutriments ; (6) vanne et débitmètre ; (7) chambre de mesures des paramètres physico-chimiques et système anti-fouling ; (8) débulleur. (Source : Ifremer).

Encadré 1-3 : Niveau de traitement et les codes de qualité attribués à chacune des données (Lefebvre, 2008b)



2.2. MAREL Baie de Seine (Honfleur, Grande rade, La Carosse)

A la fin des années 1990, l'Ifremer, en collaboration avec le Conseil d'Aménagement du Bassin Parisien (CABP) et l'Agence de l'Eau Seine-Maritime (AESN) a mis en place un réseau de surveillance adapté aux contraintes de la Baie de Seine. Les conditions environnementales sont très complexes au niveau de l'estuaire de la Seine : le marnage peut atteindre 8 m en période de vive eau avec une forte turbidité. La vitesse de marée atteint les 1,5 m/s avec un courant d'environ 4 nœuds. Le vent est supérieur à 17 m/s, avec un fond sableux et vaseux (Woerther, 1998). La Baie de la Seine a possédé quatre stations de surveillance MAREL, trois stations marines identiques (des bouées) installées en Baie de Seine et une station estuarienne (pylône). Les trois stations marines sont représentées en (Figure 1-6) :

- Banc de Seine (29°28'320N-0°10'620W)
- La Carosse (49°29'110N-0°01'600 E)

- Grande-rade (49°31’330N-0°00’600W).

La Grande rade était la première station MAREL implantée dans la Baie. Elle était située au Nord du chenal du Havre. Les stations du Banc de Seine et de la Carosse avaient été installées en automne 1998 à une distance entre 5 et 20 km des côtes. De l’eau était pompée entre 1,0 et 1,5 m en surface, à mi-profondeur et au fond de la colonne d’eau toute les 60 minutes par des capteurs dans la chambre de mesure installés dans la structure flottante. Les dimensions de la bouée étaient de 4 m de diamètre avec un poids de 10 tonnes environ. L’équipement électrique était composé de batterie de 24V et de nombreux panneaux solaires. La bouée (Figure 1-7) était ancrée sur 3 corps morts de 40 tonnes pour lest, un corps mort de 5 tonnes pour le flexible. Cet équipement permettait à la bouée de fonctionner dans les conditions les plus difficiles. La station estuarienne était implantée à Honfleur au pK355 sur une passerelle située près du radar (Figure 1-8). Cette station de mesure avait été mise en route début décembre 1996, les mesures étaient effectuées toutes les 10 minutes. La station de mesure MAREL Honfleur était de la même structure que celle de MAREL Carnot (section MAREL Carnot : Figure 1-5). Elle était installée sur une structure flottante coulissante dans un tube afin de suivre les variations de hauteur d’eau liées à la marée et aux crues (Woerther, 1998). Lors d’assèchement à marée basse, au niveau de Honfleur les mesures n’étaient pas effectuées durant environ 10 % du temps.

Le choix des capteurs physico-chimiques installés sur les trois stations marines et sur la station estuarienne a été dicté par leur aptitude à fonctionner en milieu agressif sur de longues périodes. Les paramètres physico-chimiques mesurés étaient la température de l’eau, la conductivité, l’oxygène dissous, le pH, la turbidité et la vitesse du courant. En plus de ces paramètres, les trois stations marines mesuraient la fluorescence (chlorophylle) et le nitrate. Les capteurs météorologiques et océanographiques installés sur les trois stations marines mesuraient la pression atmosphérique sur une gamme de mesure de 900 à 1100 hPa avec une précision de 0,5 hPa, la température de l’air sur une gamme de -20 à +40 °C, la vitesse du vent sur une gamme de 0 à 40 m/s avec une précision de 1 m/s, et la direction du vent sur une gamme de 0 à 360° avec une précision de 10°. Les capteurs océanographiques mesuraient la vitesse du courant sur une gamme de 0 à 10 nœuds, la direction du courant, la hauteur de la houle et la direction de la houle. La transmission de données s’effectuait 3 fois

par jour ; les données étaient validées quotidiennement et sont encore accessibles sur le site web MAREL. La station de gestion du réseau MAREL en baie de Seine était située dans les locaux de la station Ifremer de Port en Bessin.

Actuellement, les stations MAREL en baie de Seine ne sont plus opérationnelles et le tableau 1-3 indique la période de fonctionnement des stations de mesures.

Tableau 1-3: Le début et la fin des mesures en baie de Seine (les bouées MAREL)

Station	Début de mesures	Fin de mesures	Pas de temps
La Carosse	8 septembre 1999	19 avril 2007	60 minutes
Grande-rade	2 février 1999	19 mai 2004	60 minutes
Honfleur	3 décembre 1996	2 avril 2007	10 minutes

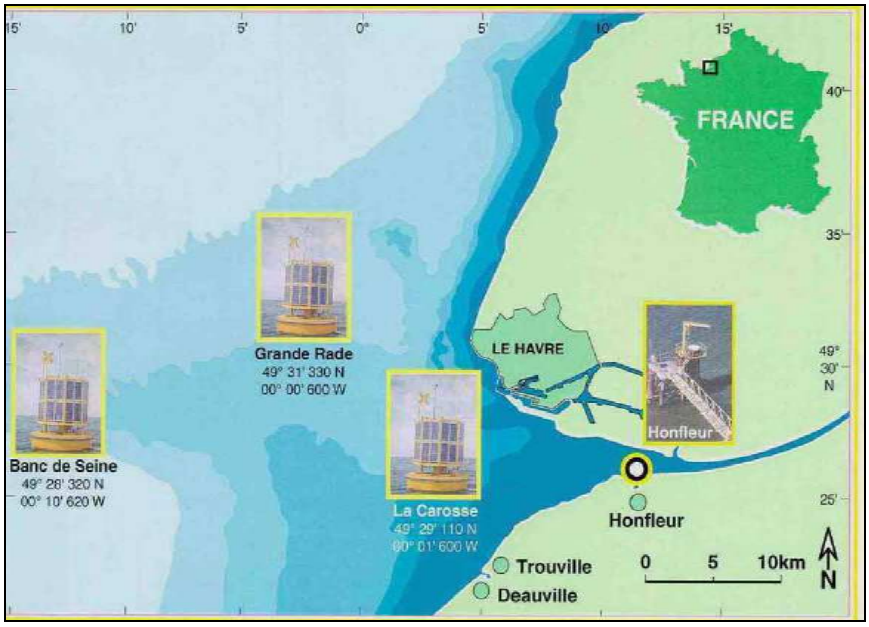

*Figure 1-6 : Les 3 stations marines MAREL (La Carosse, Grande rade et Banc de Seine) installées dans la baie de Seine et la station estuarienne Honfleur (source : Ifremer, **http://www.ifremer.fr/marel**).*



Figure 1-7 : La bouée MAREL (Grande rade) qui était installée en baie de Seine (source : Michel Répécaud ; Ifremer).



Figure 1-8 : Station de mesures MAREL Honfleur dans l'estuaire de la Seine, implantée sous la passerelle (source : Michel Répécaud ; Ifremer).

3. Roscoff : la sonde Seabird SBE39

Nous présentons dans cette étude des données provenant de la station de l'Observation Océanologique de Roscoff, qui nous ont été envoyées par Pascal Morin. Les chercheurs de la Station Marine de l'Observation Océanologique de Roscoff ont installé une station de mesure haute fréquence en Manche occidentale dans un site côtier, plus précisément au point Estacade[10]. Cette station est financée par l'Observatoire Océanologique de Roscoff. Les mesures de température et de pression sont effectuées depuis janvier 2005 à l'aide d'une sonde Seabird SBE 39. Les mesures sont effectuées toutes les 10 minutes près du fond et le capteur de température mesure sur une gamme de -5 à +35 °C avec une précision de 0,005 °C. La transmission de données se fait en temps différé ; les données sont récupérées tous les 2 mois par des plongeurs de la Station marine de Roscoff.

4. S.R.N (Suivi Régional des Nutriments)

Nous utilisons aussi ici des données d'un réseau mis en place par l'Ifremer, données aimablement fournies par Alain Lefebvre (Ifremer, Boulogne-sur-mer).

L'Agence de l'Eau Artois Picardie et l'Ifremer ont mis en place en 1992 le SRN (le Suivi Régional des nutriments) sur la façade du littoral Nord Pas-de-Calais, Picardie. Le SRN a été mis en place également sur la base du réseau REPHY (le Réseau de surveillance du phytoplancton et des phycotoxines). L'objectif du SRN est d'évaluer l'influence des apports continentaux sur le milieu littoral (les sels nutritifs : azote, phosphate et l'acide silicique). Des prélèvements sont réalisés sur trois radiales de trois stations (au large de Dunkerque, de Boulogne sur Mer et de la Baie de Somme) une fois par mois et 2 fois par mois de mars à juin.

- La radiale de Dunkerque possède trois stations ; elle est sous influence de la mer du Nord, une zone partiellement eutrophisée.
- La radiale de Baie de Somme permet l'étude de l'influence de la dynamique du fleuve.

[10] http://somlit.epoc.u-bordeaux1.fr/fr-roscoff-les-sites-de-prélèvements.html.

- La radiale de Boulogne permet de s'intéresser à l'impact anthropique du bassin versant boulonnais.

13 paramètres sont mesurés : la température, la salinité, la turbidité, les MES (minérales et organiques), l'ammonium, le nitrite, le nitrate, le phosphate, l'acide silicique, la chlorophylle a, les phéopigments et la flore (phytoplancton) totale. Les données collectées sont saisies dans la base de données Quadrige de l'Ifremer.

Dans notre étude, nous utilisons des données provenant uniquement de la radiale de Boulogne-sur-mer, plus précisément de la station 1 (la radiale de Boulogne-sur-mer possède 3 stations numérotées de 1 à 3 selon la distance par rapport à la côte). Les paramètres analysés ici sont : concentrations cellulaires en diatomées, dinoflagellés, dictyochophycées et en prymnésiophycées (*Phaeocystis*).

Le protocole de prélèvement en mer et d'analyse des échantillons sont détaillés dans le rapport Lefebvre et Caboche (2008c). Nous présentons ici succinctement le protocole d'analyse inspiré donc ce rapport. Le dénombrement de chaque cellule d'espèce phytoplanctonique est fait selon la méthode de Utermöhl (322/ 89CSRU/ BCM). Dans le cadre du SRN et donc dans le cadre des réseaux de surveillance phytoplanctonique de l'Ifremer, la procédure de dénombrement des cellules phytoplanctonique présentes dans les échantillons d'eau prélevés est celle recommandée par Belin (2001).

Les observations sont effectuées le plus rapidement possible, au moins pour les espèces cibles et sur deux types d'échantillon après le prélèvement en mer (les échantillons d'espèces vivants et fixes). Les échantillons analysés le plus vite possible permettent d'identifier les espèces potentiellement responsables de toxicité (*Alexandrium*, *Dinophysis* et *Pseudonitzschia*). Ceci permet de prélever des coquillages qui feront l'objet d'analyses complémentaires destinées à doser les phycotoxines. Cette étape se fait dans le cadre du REPHY qui a été crée par l'Ifremer en 1984.

Les méthodes de fixation seront différentes selon le type d'observation (immédiate et ultérieurement après le prélèvement). Pour une observation immédiate (le jour même du prélèvement), les échantillons sont fixés au lugol (2,5 ml/L) et la solution mère de lugol est à conserver au noir (la durée de vie en flacon brun est limitée à quelques mois). Pour une

observation qui se fera ultérieurement (par exemple le lendemain), les échantillons sont fixés au lugol, et pour la conservation des formes fragiles, il y a ajout de formol.

Une cuve à sédimentation de 10 mL est utilisée pour l'observation des cellules, et la décantation des cellules se fait au minimum pendant 6 h. Après 2 h environ, au moins 80 % des espèces sont observées sur le fond de la cuve. Ensuite la cuve est parcourue entièrement lorsqu'il n'y a aucune espèce dominante. Un sous échantillonnage est effectué lorsqu'il y a une ou plusieurs espèces dominantes. Les diamètres de la cuve sont alors numérotés ou des champs choisis de manière aléatoire dans la cuve. En fonction du grossissement, du nombre de diamètres ou des champs observés, le nombre de cellules phytoplanctonique est observé. A partir d'un coefficient multiplicateur, le nombre de cellule est estimé. Le résultat est ramené à un volume de 1 litre et donc le résultat est estimé en nombre de cellules par litre.

5. Le Wimereux : mesures utilisant une sonde multiparamétrique

Un déploiement des capteurs autonomes *in situ* de mesure de température de l'eau, d'oxygène dissous, d'oxygène saturé et de turbidité a été effectué dans la rivière du Wimereux d'avril à mai 2009. Ce déploiement utilisant une sonde multi-paramètres (TROLL 9500) (Figure 1-9). Cette sonde possède des capteurs de petite taille ayant une longueur maximale d'environ 16 cm. D'après les constructeurs, les capteurs sont performants et bénéficient des dernières avancées et innovations techniques, notamment dans le domaine de l'optique. Les capteurs physico-chimiques sont donc conçus pour fonctionner directement sur le terrain quel que soit le type d'environnement. Cette sonde fonctionne à l'aide de deux piles (1,5 Volt). Les capteurs n'ont pas besoin d'étalonnage fréquent et ne demandent pas de conditionnement particulier ou de stockage délicat. La sonde peut mesurer plus de 8 paramètres, la température, l'oxygène dissous, le pH, la turbidité, la conductivité, l'ammonium, le nitrate, le chlore, la pression.

Le capteur autonome *in situ* a été déployé en amont et en aval de la rivière du Wimereux (Figure 1-10).

Les mesures de température, d'oxygène dissous, de turbidité avaient été faites *in situ* et à haute fréquence (fréquence d'acquisition de 10 secondes). D'après le manuel de

l'opérateur (In-Situ Inc, 2006), le capteur d'oxygène utilise le principe de mesure optique par fluorescence. La température est mesurée à l'aide d'un thermomètre à résistance de platine, spécifié par l'ITS-90 (International Temperature Scale of 1990). Les caractéristiques techniques de chacun des capteurs utilisés sont exposées dans le tableau 1-4. Ces mesures ont été faites dans le cadre d'un stage sous ma codirection (le stage a été effectué par Pauline Lejeune sur la période mars à juin 2009).

Tableau 1-4 : Caractéristiques techniques des capteurs de température, d'oxygène dissous et de salinité (In-Situ-Inc, 2006)

Paramètre	Plage de mesure	Précision	Fréquence d'étalonnage
Température	-5°C à 50°C	± 0,1°C	Non-disponible
Oxygène dissous	0 à 10 mg/L 10 à 20 mg/L	± 0,1 mg/L ± 0,2 mg/L	12 mois
Turbidité	0-2.000 NTU	0,1 NTU	Non-disponible



Figure 1-9 : La sonde multiparamétrique : le TROLL 9500. A son extrémité une variété de capteur de couleur noire. Les piles sont insérées dans la partie blanche de la sonde (Source : http://www.in-situ.com).



Figure 1-10 : Déploiement de la sonde multiparamétrique en amont du Wimereux. Le support de la sonde est flottant et maintenue par une perche qui est fixé sur berge (photo F. G. Schmitt).

6. Les paramètres biogéochimiques analysés

La température, la salinité, la fluorescence, l'oxygène, le pH, la turbidité et les sels nutritifs sont des paramètres biogéochimiques couramment analysés dans le cadre des programmes de surveillance de la qualité des eaux (Aminot et Chaussepied, 1983 ; Aminot et al., 1998 ; Aminot et Kérouel 2004). Ils permettent de diagnostiquer l'état de santé d'un écosystème marin, lacustre ou saumâtre.

6.1. La température et la salinité

La température et la salinité de l'eau sont considérées comme des paramètres essentiels et importants dans l'évaluation des caractéristiques des masses d'eaux (Dauvin et al., 1989; Sournia et Birrien, 1995; Aminot et Kérouel, 2004; Lee et Lwiza, 2005). En océanographie, elles sont utilisées ou considérées comme étant des descripteurs de base pour la connaissance du milieu (Guilyardi, 2001 ; Aminot et Kérouel, 2004). A l'échelle annuelle, la température des eaux marines suit le cycle des saisons. Au printemps, les eaux de surface généralement se réchauffent comparé à l'hiver. Dans les milieux à fort courant de

marées, la colonne d'eau reste quasi-homogène et si les courants ne sont pas suffisamment intenses, une couche moins dense se crée. Ce phénomène est souvent rencontré aux embouchures fluviales, causé par les processus de dessalures (les apports d'eaux douces) (Aminot et Kérouel, 2004).

Les diagrammes température-salinité sont souvent utilisés pour caractériser les masses d'eaux (Guilyardi, 2001 ; Newton et Mudge, 2003). Ces deux paramètres jouent un rôle important dans la variabilité des cycles biologiques des espèces vivants (Devreker et al., 2004 ; Zhao et Shichum, 2006). La température est le facteur fondamental qui assure les conditions de vie adéquates à diverses catégories d'organismes vivants, en constituant également un critère de répartition des espèces vivants (Mazumder et al., 2006). Les phénomènes météorologiques (climatiques) peuvent induire des variations rapides de température et de salinité des eaux de surface (Peperzak, 2003). La salinité peut être modifiée en surface par des phénomènes de dilution-concentration liés aux flux d'eau douce apportés par les fleuves ou par les précipitations. Elle peut être également modifiée en surface par les processus d'évaporation. La salinité permet de suivre le mélange des masses d'eaux au large, comme à la côte et notamment dans les estuaires (Le Hir et Silva-Jacinto, 2001). En milieu côtier et estuarien, la salinité est le traceur ou descripteur idéal des mélanges entre l'eau douce et l'eau de mer (Aminot et Kérouel, 2004). C'est un traceur qui a une influence importante sur les processus physiologiques des espèces aquatiques (Devreker et al., 2004). La température et la salinité sont nécessaires à l'interprétation de la plupart des autres paramètres environnementaux. Par exemple, l'oxygène soluble est fonction ou dépend de ces deux paramètres. La mesure du pH dépend également de la connaissance de la température du milieu (Aminot et Kérouel, 2004).

6.2. L'oxygène dissous et saturé

La concentration en oxygène dissous dans l'eau est un paramètre souvent utilisé pour mesurer la qualité d'un milieu marin (Sournia et Birrien, 1995). Sa concentration est liée à différents paramètres physico-chimiques : la température, la salinité, le vent, la turbulence, le brassage, la lumière disponible, la turbidité, la profondeur. Elle est liée également à

l'activité biologique, telles que la photosynthèse, la respiration, et la dégradation de la matière organique (Aminot et Kérouel, 2004). La mesure de l'oxygène dissous concerne exclusivement l'oxygène moléculaire O_2 en solution. Rappelons que l'oxygène est un paramètre très important pour la vie dans le milieu aquatique (Lee et al., 1991). Et que sa mesure régulière est conseillée lorsqu'il s'agit de zones sensibles qui peuvent recevoir des rejets urbains (des zones telles que les estuaires, des zones semi-fermées) (Aminot et Kérouel, 2004). L'oxygène dissous est l'un des éléments de qualité lorsqu'il s'agit de caractériser la qualité des masses d'eau, en particulier de la zone côtière Manche.

Des seuils ont été avancés pour définir la qualité des eaux en relation avec les problèmes rencontrés par la faune en fonction de la concentration en oxygène dissous (Aminot et Kérouel, 2004 ; Best et al., 2007). On retrouve dans Aminot et Kérouel (2004) deux niveaux de seuils critiques définis par Guillaud et Souchu (2001), voisin de 5 mg/L et de 2 mg/L. Par exemple en dessous de 2 mg/L, il y a mortalité massive de la faune et au dessus de 5 mg/L il n'y a pas d'effet négatif, et entre les deux niveaux, une réaction d'évitement de la faune est observée. Ces valeurs seuils sont considérées comme indicateur de l'eutrophisation. Pour diagnostiquer l'état d'eutrophisation de leurs eaux côtières, plusieurs pays européens prennent ainsi compte de la concentration en oxygène dissous et proposent des seuils en relation avec l'effet des hypoxies sur la faune (Directive 2000/60/CE ; Ménesguen, 2001). L'oxygène peut être exprimé sous plusieurs formes. Diaz et al. (1995) considèrent que c'est la variable environnementale qui a le plus évolué au cours de ces dernières décennies dans l'écosystème côtier :

- on le retrouve sous forme d'oxygène dissous à saturation ou de solubilité maximum de l'oxygène dans l'eau (ou appelée encore oxygène dissous à l'équilibre), ce terme correspond à la concentration d'équilibre lorsque l'atmosphère et l'eau sont en contact. Elle dépend de plusieurs facteurs : la température, la salinité et la pression partielle (Aminot et Kérouel, 2004). Des échanges d'oxygène à l'interface air-eau (gains ou pertes), se font par diffusion et ensuite par mélange (diffusion moléculaire) au sein de la masse d'eau. Il n'existe pas d'expression théorique générale pour calculer la solubilité de l'oxygène, on utilise donc en pratique une expression ajustée par une approche polynomiale en 1/T. Des équations ont été

écrites par Weiss (1970) et améliorées par Benson et Krause (1984) ce qui a permis d'établir des tables océanographiques internationales (Unesco, 1986). Benson et Krause (1984) fournissent une équation[11], soit exprimée en micromole par kilogramme d'eau, soit exprimée en micromole par litre. Les valeurs des constantes utilisées dans le calcul de la concentration à l'équilibre de l'oxygène dissous sont données dans le tableau 1-5. L'échange de l'oxygène entre l'eau et l'atmosphère et *vice-versa* est influencée principalement par des processus physiques. La vitesse de l'échange dépend pour une large part de l'importance de la surface de contact entre l'eau et l'air. Ainsi une eau agitée et brassée (courants, turbulences, cascades, vents, vagues) sera mieux oxygénée.

- on le retrouve également en taux de saturation ; c'est lorsqu' à l'équilibre, l'oxygène dissous atmosphérique ramène l'oxygène dissous au taux de saturation, on parle alors de pourcentage de saturation. Le pourcentage de saturation SaO_2 dépend de l'oxygène dissous à l'équilibre[12]. Dans le cas où $SaO_2 > 100$, cela correspond à la sur-saturation (ou super-saturation), c'est-à-dire que l'oxygène dissous qui est produit par le phytoplancton lors de la photosynthèse est très importante comparé à la quantité d'oxygène consommé. Il peut y avoir aussi sur-saturation par turbulence. Et lorsque $SaO_2 < 100$, cela correspond à la sous-saturation, dans ce cas l'oxygène dissous qui est consommé par exemple par le plancton lors de la respiration, par les bactéries lors de la dégradation de la matière organique est supérieur à la quantité produite (Aminot et Kérouel, 2004).

[11] L'équation générale s'écrit :

$$C_0^* = A_0 + A_1T^{-1} + A_2T^{-2} + A_3T^{-3} + A_4T^{-4} + S(B_0 + B_1T^{-1} + B_2T^{-2})$$

Où T représente la température (en Kelvin), S la salinité (en PSU), avec A_i, B_i des constantes.

[12] $SaO_2 = 100 \times \frac{DO}{DOSE}$

Avec DO pour l'oxygène dissous et DOSE = C_o^* (Dissolved Oxygen Saturated at Equilibrium) pour l'oxygène dissous à l'équilibre.

Tableau 1-5 : Constantes de Benson et Krause (1984) et utilisées par l'Ifremer

	Benson et Krause (1984)	Ifremer (http://www.ifremer.fr)
A0	-135,99996	-135,90205
A1	1,572288^{e}5	1,575701^{e}5
A2	-6,637149^{e} 7	-6,642308^{e}7
A3	1,243678^{e}10	1,243800^{e}10
A4	-8,621061^{e}11	-8,621949^{e}11
B0	0,020573	0,017674
B1	-12,142	-10,754
B2	2363,1	2140,7

6.3. La turbidité

La turbidité des eaux est exprimée en Unités de Turbidité Néphélométrique (NTU). Sa teneur peut varier d'un milieu à l'autre ; la différence de variabilité peut être importante d'une rivière à un milieu marin. En somme, elle varie selon la nature du milieu. C'est un paramètre qui est souvent utilisé pour caractériser la qualité d'une rivière, un lac, un estuaire ou un océan (Deloffre et al., 2006 ; Vangriesheim et al., 2009). Elle est définit par Aminot et Kérouel (2004) comme étant liée à la présence de fines particules en suspension, qui peuvent être composées de diverses matières organiques, minérales, végétales ou animales. Les teneurs importantes en turbidité empêchent la propagation de la lumière dans la colonne d'eau et donc pourrait éventuellement conditionner l'épaisseur de la couche photosynthétique.

6.4. La fluorescence

La fluorescence permet au mieux une estimation de la biomasse chlorophyllienne (la teneur en chlorophylle *a*). Les données MAREL permettent de suivre l'évolution d'un « proxy » de ce paramètre exprimé en FFU (Fluoresceine Fluorescene Unit). La fluorescence est émise par la chlorophylle *a* présente dans le phytoplancton. La chlorophylle est considérée comme étant un indicateur de l'enrichissement du milieu, elle est exprimée en µg/L et est indispensable à la photosynthèse des algues. Elle est souvent utilisée pour estimer la biomasse phytoplanctonique du milieu aquatique (Neal et al., 2006). Le développement du phytoplancton dépend de l'énergie lumineuse, de la concentration en sels nutritifs, et de la stabilité des masses d'eaux (Aminot et Kérouel, 2004). La chlorophylle *a* est un élément de qualité qui permet aussi de diagnostiquer le bon état biologique et écologique des eaux côtières (Directive 2000/60/CE).

6.5. Le pH

Dans le passé, le pH n'était pas considéré comme un paramètre chimique important qui pouvait influencer les processus biotiques ou abiotiques. Depuis quelque années, certaines études ont montré que le pH et le carbone inorganique particulaire peuvent être importants dans la régulation du taux de croissance et la distribution des algues marines (Hansen, 2002 ; Hinga, 2002). Le pH ou potentiel hydrogène, est un paramètre servant à définir si un milieu est acide ou basique, il correspond à l'activité de l'ion hydrogène (H^+) dans une solution. Il s'écrit : $pH = \log_{10}[H^+]$. On peut lire dans Aminot et Kérouel (2004), que le pH peut être affecté par les processus naturels qui déplacent les équilibres des systèmes des carbonates comme la photosynthèse ou la reminéralisation de la matière. Plusieurs travaux ont également montré que le pH est influencé par l'échange de CO_2 entre l'air et l'eau (Wootton et al., 2008). Selon certain chercheurs, l'augmentation du CO_2 atmosphérique (d'origine anthropique) entrainerait une baisse du pH marin (Caldeira et al., 2005 ; Blackford et Gilbert, 2007 ; Wootton et al., 2008 ; Blackford, 2010). La baisse du pH

a pour conséquence la calcification de certain organismes marins comme les algues calcaires (coccolithophoridés), les coraux, les foraminifères (Riebesell et al., 2000 ; Iglesias-Rodriguez, 2008).

C'est également un indicateur de qualité des eaux et sa mesure sert à détecter des anomalies qui peuvent survenir lors d'une pollution ou lors d'un changement important des caractéristiques physico-chimiques du milieu aquatique. Dans les estuaires, le pH peut varier dans une large gamme comparée aux milieux océaniques. Les apports en eaux douces dans les estuaires peuvent causer une variabilité importante dans les teneurs du pH mesurées (Aminot et Kérouel, 2004). Ainsi le pH des eaux marines (moyen) est de 8,2 tandis qu'il est plus basique pour les eaux estuariennes.

6.6. Les nutriments

Les nutriments sont l'ensemble de substances nutritives (sels nutritifs) qui comprennent : le nitrate, le nitrite, l'ammonium, le phosphate et l'acide silicique. On les retrouve sous formes organiques en solution ou dans le matériel particulaire (Aminot et Kérouel, 2004). La production phytoplanctonique dans la plupart des eaux est contrôlée par la disponibilité en azote (Lefebvre, 2008b ; Gentilhomme et Lizon, 1998) mais le rôle du phosphore est pris également en considération (Thingstadt et al., 1993). Les différentes formes de l'azote sont le résultat chimique et biologique d'une succession de modifications subies[13] (voir Figure 1-11). Parmi ce groupe azoté, l'ammonium (NH_4^+) est la forme la plus assimilée pour beaucoup d'espèces de macroalgues. Il est présent en faible concentration dans les eaux marines comparé au nitrate (NO_3^-) (Aminot et Kérouel, 2004). Le nitrate est retrouvé en grande quantité dans les eaux côtières (Lefebvre, 2008a). Les nutriments azotés ont pour principale origine le lessivage des terres agricoles et de la dégradation *in situ* de la

[13] $2NH_4^+ + 3O_2 \rightarrow 2NO_2^- + 2H_2O + 4H^+$
ammonium nitrites
$2NO_2^- + O_2 \rightarrow 2NO_3^-$
nitrites nitrates

matière organique. La variation des teneurs en nitrate est importante et est liée aux développements du phytoplancton (Gentilhomme et Lizon, 1998).

Les concentrations en nitrite (NO_2^-) sont extrêmement basses en milieu marin mais des concentrations importantes peuvent être rencontrées lorsque la chaîne microbienne est affectée par une détérioration (Rodier, 1996).

L'acide silicique est un élément nutritif qui entre dans la composition des squelettes de certaines espèces phytoplanctoniques (diatomées) et limite aussi la croissance des diatomées et des silicoflagéllés (Martin-Jézéquel et al., 2000 ; Gilpin et al., 2004). La régénération de l'acide silicique dans l'eau de mer provient de la dégradation du silicium organique particulaire. Sa concentration s'élève progressivement lorsque l'on s'approche des côtes et en particulier des estuaires.

La concentration en phosphate dépend de phénomènes physiques (mélange, adsorption, diffusion) et biologiques (par la consommation par le phytoplancton, par l'excrétion par le zooplancton et par la régénération de la matière organique). Le phosphore comme l'azote sont des nutriments clés du phénomène d'eutrophisation (John et Dunstan, 1971 ; Smith et al., 1999 ; Ménesguen, 2001). La présence du phosphore en excès est l'une des principales causes de l'eutrophisation (généralement rencontré dans les lacs). En condition normales le phosphore est un élément rare dans le milieu aquatique terrestre, ce qui limite le développent des algues. L'enrichissement du milieu par le phosphore se fait par les rejets urbains et la pollution d'origine agricole (Aminot et Kérouel, 2004).

L'analyse de ces paramètres effectuée dans cette thèse fournit une interprétation biogéochimique pour déterminer la qualité des masses d'eau. Généralement les échelles d'interprétation de ces paramètres sont basées sur de la basse fréquence. La variabilité à haute fréquence de l'ensemble de ces paramètres est encore largement inconnue. Leur analyse ici est l'une des contributions de cette thèse. Certains paramètres comme la température, la salinité, l'oxygène dissous et le pH ont été étudiés en Méditerranée par Bensoussan et al. (2004) (avec une fréquence de mesure de 30 minutes de 1998 à 2000). On s'intéresse ici à la variabilité des ces paramètres dans un milieu côtier et estuarien soumis à un très fort forçage physique (la Manche).

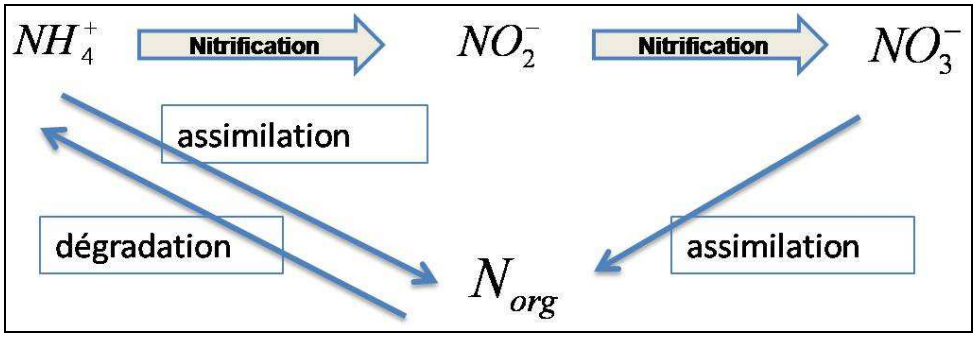

Figure 1-11 : Schématisation succincte de la transformation successive des composés azotés. Les étapes de la nitrification se font uniquement par les bactéries, d'assimilation par les bactéries, les champignons et par les algues et la dégradation de l'azote organique (N_{org}) *libère de l'ammonium* (NH_4^+)*. L'ammonium* (NH_4^+) *se transforme en nitrites* (NO_2^-) *par nitrification et les nitrites en nitrate* (NO_3^-) *par nitrification également (adapté de Frontier et al., 2008).*

C. Présentation succincte de la théorie de la turbulence homogène et isotrope

Dans la suite, au cours des analyses de données, nous faisons appel à certains résultats provenant du domaine de la turbulence. Nous rappelons ici certains de ces résultats sans vouloir entrer dans les détails de ce domaine, qui peut être complexe. Le lecteur désirant creuser ceci de façon plus approfondie peut consulter Frisch (1995) et Pope (2000).

1. Kolmogorov 1941 et cascade de Richardson

La turbulence est connue comme étant le dernier domaine de la physique classique, non résolu. Les équations sont connues ; ce sont les équations de Navier-Stockes établies depuis le XIXe siècle (voir Pope, 2000). Mais elles ne sont pas résolues mathématiquement. Des approches statistiques, simplifiées existent néanmoins. La plus connue est la loi de Kolmogorov (1941). Nous présentons ceci ci-dessous.

Au début du XXe siècle, le météorologue Richardson a écrit un couplet qui se trouve dans son livre *Weather forecasting by numerical processes* (1922) :

Les gros tourbillons ont de petits tourbillons,
Qui se nourrissent de leur vitesse,
Et les petits tourbillons en ont de plus petits,
Et c'est ainsi jusqu'à la viscosité.

La signification de ces lignes est la suivante : en turbulence développé, l'énergie est injectée à grande échelle, puis les tourbillons à une échelle se scindent en tourbillons plus petits, et ainsi de suite jusqu'aux échelles de la viscosité (voir Figure 1-12).

Plus tard, ceci a inspiré le mathématicien André Kolmogorov, qui a écrit en 1941 plusieurs très courts articles, qui sont devenus des classiques. Dans un de ses articles, Kolmogorov s'intéresse aux fluctuations de vitesse que l'on peut écrire $\Delta V_\ell(x) = V(x+\ell) - V(x)$ où V est la vitesse, x la position et ℓ une échelle de longueur. Il suppose alors que la quantité ΔV_ℓ ne dépend statistiquement que de l'échelle ℓ et de la

dissipation ε (il s'agit d'une quantité classique en turbulence, la dissipation d'énergie par unité de masse, qui a des dimensions m^2/s^3). La relation de Kolmogorov s'écrit alors (Kolmogorov, 1941) :

$$\Delta V_\ell = C\varepsilon^{1/3}\ell^{1/3} \quad (1)$$

Cette relation indique que les fluctuations de vitesse s'écrivent en fonction d'une constante C et ε supposé constant pour un écoulement donné, et de l'échelle ℓ : c'est une loi d'échelle.

Cette relation suppose que l'on est en situation de turbulence développé, c'est-à-dire à grand nombre de Reynolds :

$$\mathrm{Re} = \frac{UL}{\nu} \quad (2)$$

où U est une vitesse typique, L une échelle typique et ν la viscosité ($\nu \approx 1{,}510^{-6} m^2/s$ pour l'eau de mer à 10°C). Ce nombre sert à quantifier un écoulement : lorsqu'il est grand (supérieur à 1000), on est en situation de turbulence. Dans l'océan, ce nombre peut aisément atteindre 10^8.

La relation de Kolmogorov 1941 (souvent appelée '' K41'') suppose également qu'on est dans une turbulence homogène et isotrope. Le terme ''homogène'' indique qu'on se trouve loin d'une paroi, et ''isotrope'' indique que toutes les directions sont identiques statistiquement.

La relation K41 est valable pour les échelles ℓ appartenant à un domaine bien identifié : on les appelle les ''échelles inertielles'' :

$$\eta \le \ell \le L \quad (3)$$

où L est l'échelle d'injection de l'énergie : il s'agit d'une grande échelle pouvant être de l'ordre de 10 à 1000 m dans les océans. L'échelle η est appelée « échelle de Kolmogorov », il s'agit de la plus petite échelle du régime inertiel, elle s'écrit (Tennekes et Lumley, 1972) :

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon}\right)^{1/4} \quad (4)$$

Dans l'océan, η est souvent de l'ordre de 0,5 mm à quelques cm. En dessous de η, on se trouve dans les échelles dites ''visqueuses'' où la viscosité domine. Au dessus de η, on se trouve dans le régime turbulent.

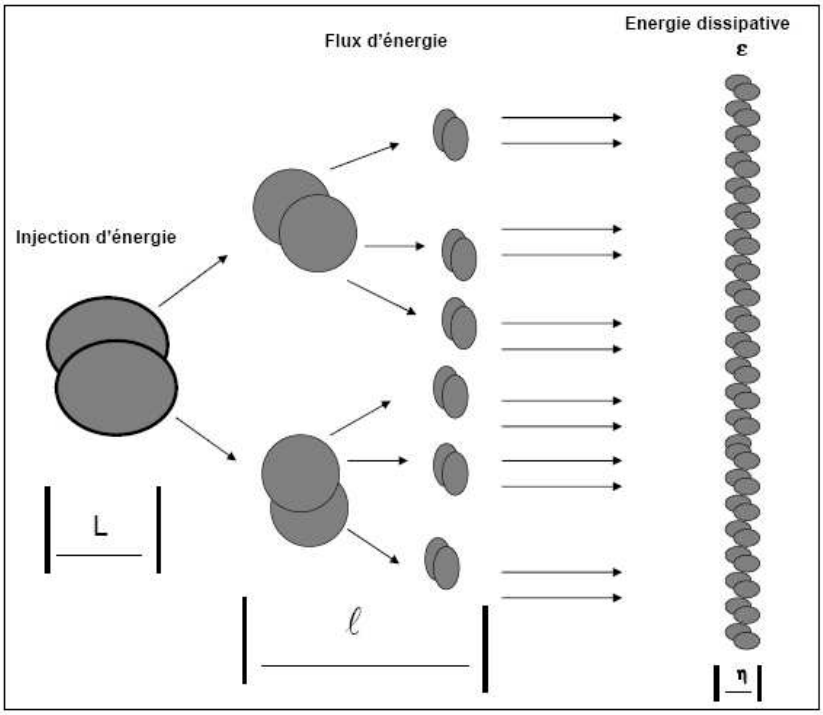

Figure 1-12 : Cascade de Richardson, le transfert d'énergie des grandes échelles (L) *vers les petites échelles* (η) *, via les échelles intermédiaires* (ℓ)*. Les gros tourbillons se scindent en petits tourbillons et ainsi de suite jusqu'à l'échelle de la viscosité.*

2. Spectres d'énergie en turbulence

Kolmogorov avaient plusieurs étudiants célèbres, dont Obukhov et Yaglom. Ceux-ci ont formé ce qu'on appelle ''l'école Russe'' de la turbulence, qui a dominé ce domaine jusque dans les années 1960 (Monin et Yaglom, 2007). A la suite de K41 écrit dans l'espace physique, Obukhov a écrit cette relation dans l'espace spectral. La densité spectrale d'énergie (en Fourier) s'écrit (Obukhov 1941) :

$$E_V(k) = C_1 \varepsilon^{2/3} k^{-5/3} \qquad (5)$$

Où $E_V(k)$ est la densité spectrale d'énergie (voir Preumont, 1990), C_1 une nouvelle constante, k le nombre d'onde[14], l'exposant 5/3 provient du 1/3 dans l'espace physique.

La relation (5) est la forme la plus utilisée de nos jours pour tester la loi K41 (mais formellement elle a été établie par Obukhov). On appelle ceci le ''spectre en -5/3''. Ceci signifie que le spectre obéit à une loi d'échelle. Les échelles k pour lesquelles (5) est vérifié correspondent aux échelles inertielles. On a en fait le schéma représenté en Figure 1-13.

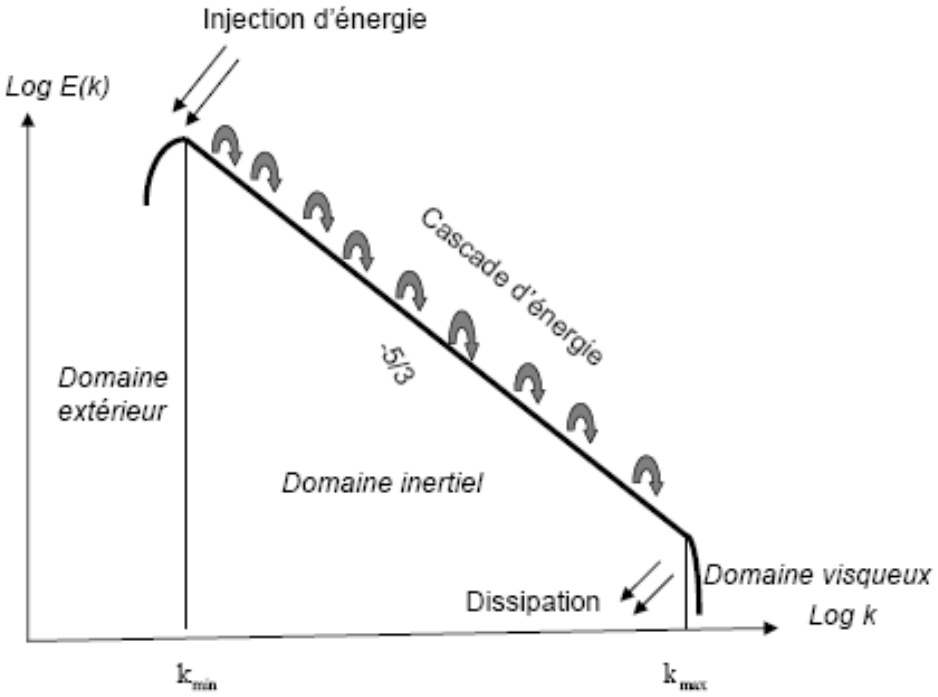

Figure 1-13 : Illustration schématique de la cascade d'énergie de Kolmogorov-Obukhov dans l'espace de Fourier ; le spectre d'énergie suit une loi de puissance $E_v(k) \approx k^{-5/3}$ *dans le domaine inertiel.*

3. Scalaires passifs : Obukhov-Corrsin

On appelle ''scalaire passif'' une quantité qui caractérise le milieu (''scalaire''), qui est transporté par le milieu turbulent, de façon passive, sans influencer la vitesse. Pour un

[14] Nous expliquons plus en détail dans la prochaine section le spectre d'énergie et sa signification.

scalaire passif, les équations de Navier Stockes mentionnées plus haut doivent être étendues en ajoutant une équation pour l'advection de scalaire, noté θ. En océanographie, deux scalaires passifs classiques sont $\theta = T$ (température) et $\theta = S$ (salinité) (Thorpe, 2007).

De façon analogue à la vitesse, on a des lois statistiques en turbulence homogène et isotrope. Celles-ci ont été mises en avant de façon presque simultanée par Obukhov (1949) et aux Etats Unis par Corrsin (1951) :

$$\Delta\theta_\ell = C_\theta \chi^{1/2} \varepsilon^{-1/6} \ell^{1/3} \quad (6)$$

Où $\Delta\theta_\ell = \theta(x+\ell) - \theta(x)$ est la fluctuation de scalaire passif dans les échelles inertielles, C_θ est une constante et χ est une quantité analogue à ε, pour le scalaire passif : il s'agit de la ''dissipation de variance de scalaire passif'' : c'est aussi une constante pour un écoulement donné.

La relation (6) peut également s'écrire dans l'espace spectral, on obtient :

$$E_\theta(k) = C_{1\theta} \chi \varepsilon^{-1/3} k^{-5/3} \quad (7)$$

Où $C_{i\theta}$ est une nouvelle constante. Ce spectre d'énergie est aussi une loi d'échelle. χ et ε étant constants pour un écoulement donné, le spectre $E_\theta(k)$ a la même dépendance en échelle que le spectre $E_V(k)$ pour la vitesse : une loi en ''-5/3''

La loi en ''-5/3'' pour un scalaire passif est importante pour nous dans la suite de cette thèse : il s'agit d'un scalaire passif de référence. Chaque fois que nous obtiendrons un spectre en $k^{-\beta}$ avec β proche de 5/3, ceci indique une possible dominance de la turbulence dans les fluctuations de la quantité considérée.

4. Fonction de structure et intermittence

Nous mentionnons ici, bien que ce ne soit pas beaucoup exploité dans cette thèse, les fonctions de structures et intermittence.

Les lois (1) et (6) correspondant à K41 et KOC49-51 (Kolmogorov-Obukhov-Corrsin) sont écrites pour ε et χ constants. Or, il est connu qu'en fait ε et χ sont très variables : ceci est appelé intermittence. Pour prendre en compte

l'intermittence les moments d'ordre $q \geq 0$ des fluctuations de vitesse ΔV_ℓ et de scalaire passif $\Delta\theta_\ell$ sont considérés, et obéissent à des lois d'échelle :

$$\overline{(\Delta V_\ell)^q} \propto \ell^{\zeta_v(q)} \qquad (8)$$

$$\overline{(\Delta\theta_\ell)^q} \propto \ell^{\zeta_\theta(q)}$$

Où '' $\propto$ '' veut dire proportionnel, '' $\bar{}$ '' est le symbole de la moyenne, $\overline{A^q}$ est le moment[15] d'ordre q de A et $\zeta_v(q)$ et $\zeta_\theta(q)$ sont des fonctions de q. Les lois (8) sont des lois d'échelle dans l'espace physique. Pour les quantités non intermittentes on a :

$$\zeta_v(q) = \frac{q}{3} \qquad (9)$$

$$\zeta_\theta(q) = \frac{q}{3}$$

Mais l'intermittence se traduit par des non-linéarités : $\zeta_v(q)$ et $\zeta_\theta(q)$ sont concaves et non linéaires (voir Schertzer et al., 1997 ; Frisch, 1995 ; Schmitt, 2005).

Dans l'environnement marin, une quantité X (par exemple la température, l'oxygène dissous ou le pH) peut être étudié (i) via son spectre $E_x(k)$ et (ii) via les fonctions de structures $\zeta_x(q)$:

$$E_x(k) \propto k^{-\beta} \qquad (10)$$

$$\overline{(\Delta X_\ell)^q} \propto \ell^{\zeta_x(q)}$$

β caractérise la loi d'échelle de X dans l'espace spectral et $\zeta_x(q)$ son intermittence : si $\zeta_x(q)$ est non-linéaire, le processus est multifractal (Schertzer et al., 1997 ; Frisch, 1995).

[15] $q = 1$ correspond à la moyenne, $q = 2$ à la variance, $q = 3$ à l'étirement (skewness).

D. Méthodes utilisées dans la thèse

Nous présentons ici les méthodes statistiques utilisées dans la thèse, faisant appel à des approches telles que la densité de probabilité, spectres d'énergie, fonctions de structures ou covariation.

1. Densités de probabilité et extrêmes

La densité de probabilité décrit la distribution des fluctuations d'une variable aléatoire. Il s'agit d'un histogramme normalisé, qui peut être estimé sous forme d'une courbe continue ou discontinue. Pour une variable aléatoire pouvant prendre des valeurs de façon continue, on définit une densité de probabilité (pdf) de la façon suivante : il s'agit d'une fonction $p(x)$ (Figure 1-14) telle que :

$$\begin{aligned} &p(x) \geq 0 \\ &\int_{-\infty}^{+\infty} p(x)dx = 1 \end{aligned} \tag{11}$$

A partir de la pdf $p(x)$, on peut estimer plusieurs autres quantités. Par exemple, la probabilité pour que la variable soit dans l'intervalle $[a,b]$ est l'intégrale $\int_a^b p(x)dx$; la probabilité est l'aire sous la courbe de la pdf (Figure 1-15). Les probabilités des valeurs prises par x sont complètement déterminées par la courbe $p(x)$. On peut également caractériser les probabilités en utilisant d'autres fonctions qui s'écrivent à partir de la pdf : par exemple on définit la distribution de probabilité $F(x)$:

$$F(x) = \Pr(X \leq x) = \int_{-\infty}^{x} p(t)dt \tag{12}$$

On définit également la fonction de distribution complémentaire ou fonction de survie souvent utile pour les extrêmes :

$$F_c(x) = \Pr(X \geq x) = \int_{x}^{\infty} p(t)dt = 1 - F(x) \tag{13}$$

La loi de probabilité la plus connue est la loi gaussienne. La pdf pour une loi gaussienne centrée (moyenne = 0 ; variance = 1) s'écrit :

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} \tag{14}$$

Les grandes valeurs de la pdf d'une loi gaussienne ont une probabilité qui décroît extrêmement vite (e^{-x^2} tend très vite vers 0), autrement dit, la probabilité des évènements extrêmes est très faible (Figure 1-16).

Il existe un corpus théorique décrivant les extrêmes (voir Gumbel, 1958 ; Embrechts et al., 1997). Parmi ces lois, qui forment différentes familles théoriques, nous considérons principalement les lois du type Fréchet, appelé aussi lois de Pareto ou lois hyperboliques. Pour ce type de loi, on a la queue de probabilité obéissant à la densité de probabilité correspondante, qui s'écrit sous la forme :

$$G(x) = \frac{C}{x^{\mu}}, x >> 1 \tag{15}$$

avec $\mu > 0$ et C étant une constante. Ce type de distributions mène à des extrêmes très fréquents par la propriété de la fonction puissance. L'indice μ caractérise la distribution des événements extrêmes ; plus μ est grand, plus les extrêmes sont rares et lorsque μ est petit, les valeurs extrêmes sont fréquentes, donnant à la série une apparence 'violente' et extrêmement variable.

L'estimation du paramètre μ peut se faire en représentant la pdf en log-log ; une estimation directe par une droite décrivant la pente de la queue de probabilité donne μ. Il existe également une méthode quantitative utilisant un estimateur, introduite par Hill (1975), l'estimateur de l'index des valeurs extrêmes (Beirlant et al., 1996). Ceci s'écrit :

$$\mu(k) = \frac{1}{\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k} \ln \frac{x[i]}{x[k+1]}} \tag{16}$$

Où on note $x[1].....x[n]$ les valeurs d'une série temporelle, classées du plus grand au plus petit : $x[1] \geq x[2] \geq x[3] \geq .... \geq x[n]$.

La figure 1-17 représente une simulation : on voit que pour k assez grand, l'estimateur $\mu(k)$ tend vers la valeur recherchée (ici 3).

Dans la suite, nous utilisons les pdfs lorsque le nombre de valeurs d'une série temporelle est suffisamment grand. Lorsqu'on dispose de plusieurs dizaines ou centaines de milliers de points (comme pour MAREL), on peut estimer $p(x)$ de façon quasi-continue.
A l'aide d'un histogramme normalisé très serré, nous estimons une courbe continue $p(x)$, en représentation, éventuellement, log-lin ou log-log, pour mettre en évidence les faibles valeurs.

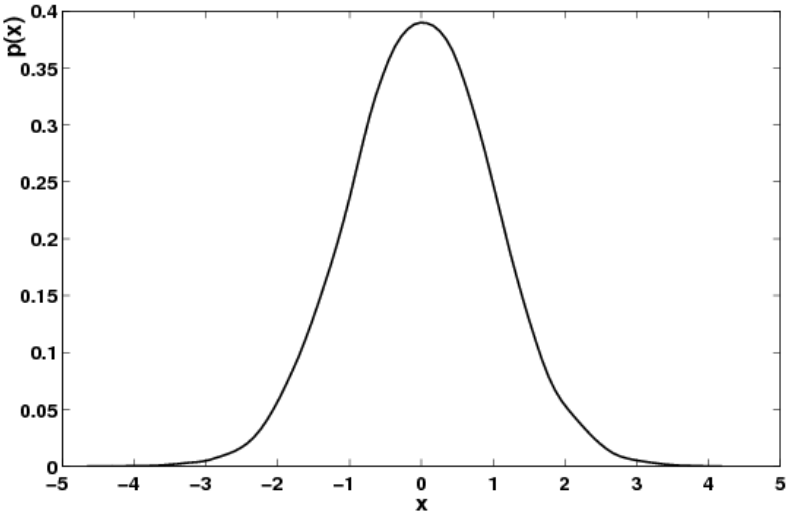

Figure 1-14 : Exemple de densité de probabilité (ici loi Gaussienne).

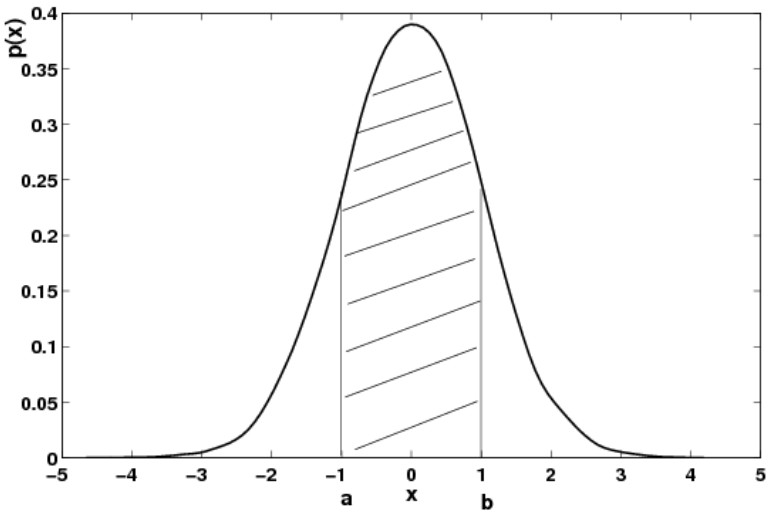

Figure 1-15 : Ici la probabilité d'être entre a et b est la zone hachurée, $\int_a^b p(t)dt$;

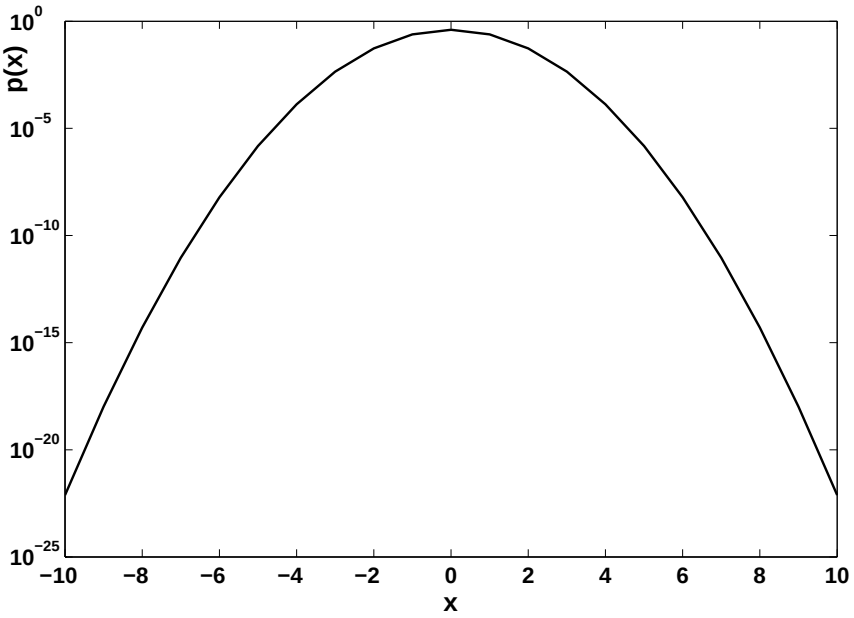

Figure 1-16 : PDF de la distribution gaussienne en log-lin : il s'agit d'une parabole. Ceci illustre le fait que les grandes valeurs ont une probabilité très faible (ici 10^{-20} *pour* $x = \pm 9$*).*

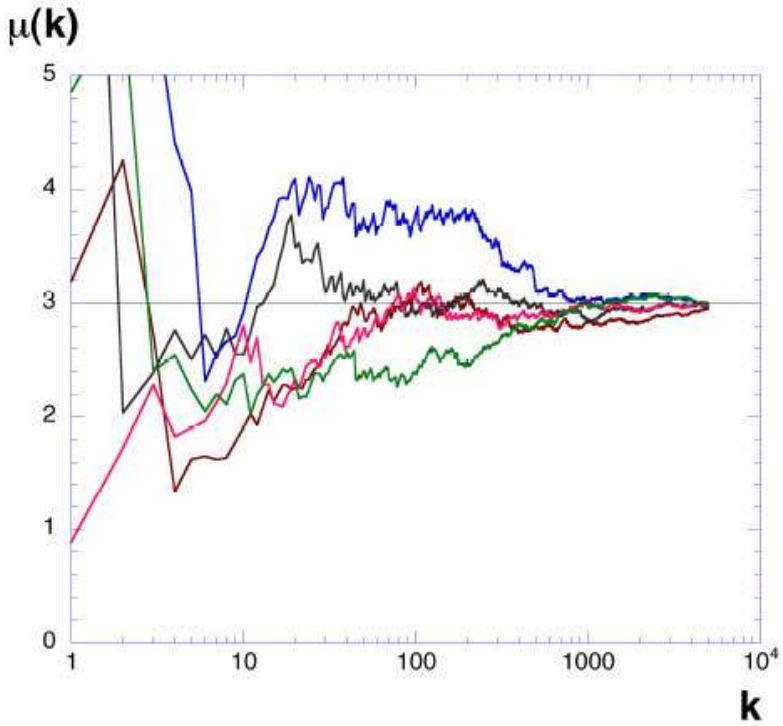

Figure 1-17 : L'estimateur de Hill pour trouver la valeur de μ *pour une distribution en loi de puissance (Eq.(15)). Ici* μ *est estimé selon l'équation (16).*

2. Densité spectrale d'énergie

L'analyse spectrale est souvent utilisée dans l'environnement marin en écologie marine (Legendre et Legendre, 1998 ; Platt et Denman, 1975 ; Seuront et al., 1996a,b ; Schmitt et al., 2008). Pour une série $X(t)$, le spectre d'énergie $E_X(f)$ indique comment l'énergie ou la variance de la série est distribuée selon la fréquence f. La définition directe est la suivante, correspondant en un module au carré d'une transformation de Fourier :

$$E_X(f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \overline{\left| \int_{-\infty}^{\infty} e^{-2\pi f t} X(t) dt \right|^2} \tag{17}$$

Mais une définition alternative existe, qui est plus simple :

$$E_x(f) = 2\int_0^{\infty} R(\tau) \cos 2\pi f \; d\tau \tag{18}$$

Où $R(\tau) = \overline{x(t)x(t+\tau)}$ est la fonction d'autocorrélation et (18) exprime la relation de Wiener-Khinchine, indiquant que le spectre est la transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation (voir par exemple Bendat et Piersol, 2000).

Habituellement le spectre d'énergie est estimé en utilisant la transformée de Fourier rapide (Fast Fourier Transform, FFT) pour des données ayant un pas d'échantillonnage régulier. Les données que nous analysons ici montrent un grand nombre de valeurs manquante et le FFT ne peut être directement appliquée aux données (Dur et al., 2007 ; Schmitt et al., 2008). Pour remédier à cela, on peut utiliser le théorème de Wiener-Khinchine pour estimer la fonction d'autocorrélation en tenant compte des valeurs manquantes, puis effectuer une FFT (Dur et al., 2007). S'il n'y a pas trop de valeurs manquantes, on peut aussi remplacer celles-ci par des '0' et effectuer une FFT sur la série reconstituée (Schmitt et al., 2008).

Le spectre d'énergie est une approche utile pour mettre, en particulier, en évidence les 2 propriétés ci-dessous (voir Figure 1-18) :

- un bruit, où une plage d'échelle pour lesquelles les données sont bruitées : le spectre est plat $E(f) = cte$ (constante).

- un forçage périodique, pour lequel le spectre a localement une forte valeur $E(f) = E_0$ avec E_0 très grand.

Le spectre d'énergie est représenté généralement en log-log ce qui permet une bonne visualisation de la dépendance en échelle. On considère également l'invariance d'échelle, pour laquelle le spectre d'énergie peut être écrit sous la forme :

$$E(f) \approx f^{-\beta} \tag{19}$$

où f est la fréquence, β est l'exposant spectral caractérisant la zone invariante d'échelle. Pour la turbulence, on obtient une pente proche de $\beta = 5/3$ comme prédit pour la turbulence homogène et localement isotrope en turbulence de vitesse (Kolmogorov, 1941; Obukhov, 1941) et de scalaire passivement advecté (Obukhov 1949; Corrsin 1951). D'autre part, un bruit correspond à $\beta = 0$, le cas $\beta = 2$ est également classique, et correspond au mouvement Brownien.

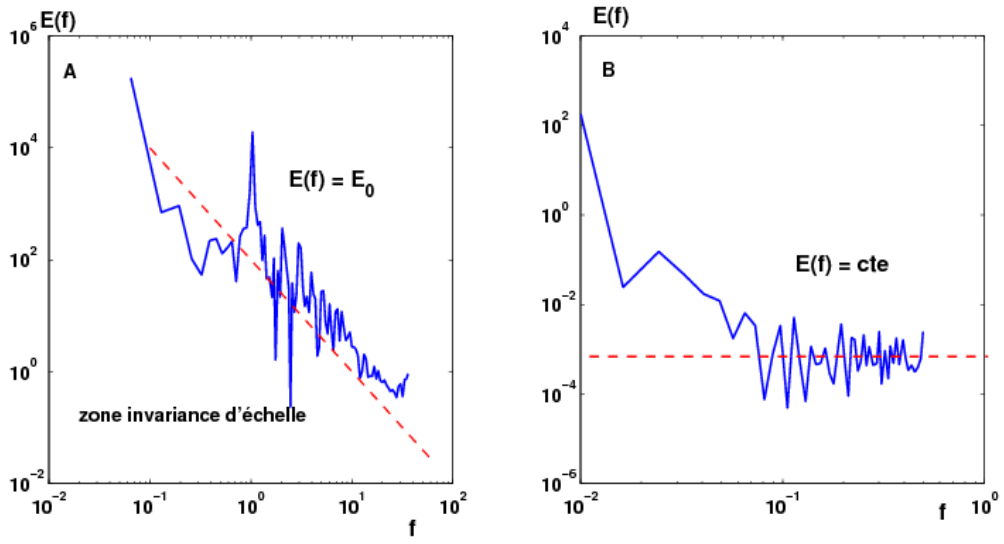

Figure 1-18 : Illustration du spectre d'énergie mettant en évidence : (A) un forçage périodique $(E(f) = E_0)$*, la zone d'invariance d'échelle et (B) un bruit* $(E(f) = cte)$.

3. Fonction de structure

Les fonctions de structure ont été introduites en turbulence par Kolmogorov (1962). Il s'agit de caractériser les fluctuations d'une série temporelle non stationnaire, mais dont les incréments sont stationnaire (leur moyenne est indépendante du temps). Par exemple la figure 1-19 montre une série représentant le mouvement Brownien $B(t)$ et son incrément $g(t) = B(t) - B(t-1)$. On voit que B n'est pas stationnaire (il y a une dérive) tandis que g, qui est un bruit gaussien, est stationnaire.

La fonction de structure d'ordre 2, qui est aussi comme sous le nom de ''corrélogramme'' s'écrit :

$$S_2(\tau) = \overline{(x(t+\tau) - x(t))^2} = \overline{\Delta x_\tau^2} \tag{20}$$

Pour un mouvement Brownien, on a $S_2(\tau) = C\tau$; en général on peut écrire pour une série temporelle invariante d'échelle :

$$S_2(\tau) = C\tau^{\zeta(2)} \tag{21}$$

où ζ(2) est l'exposant d'ordre 2 de la fonction de structure. En turbulence, ζ(2)=2/3 (Monin et Yaglom, 2007 ; Frisch, 1995).

Depuis les années 1980, dans le cadre des modèles multifractals, on généralise ceci et considère des moments d'ordre q (Frisch, 1995) :

$$S_q(\tau) = \overline{\Delta x_\tau^q} = \overline{|x(t+\tau) - x(t)|^q} \tag{22}$$

$q = 2$ est le moment d'ordre 2 classique.

Pour un processus invariant d'échelle, on a :

$$S_q(\tau) = C_q\tau^{\zeta(q)} \tag{23}$$

La fonction $\zeta(q)$ caractérise la série analysée $x(t)$. Pour un mouvement Brownien on a $\zeta(q) = q/2$; pour un processus fractal $\zeta(q) = qH$ avec $H = \zeta(1)$ et pour un processus multifractal $\zeta(q)$ est non-linéaire et concave.

Notons également que plus q est élevée, plus cette approche utilisant $\overline{\Delta x^q}$ caractérise les fortes fluctuations.

Rappelons aussi le résultat provenant du théorème de Wiener-Khinchine :

$$\beta = 1 + \zeta(2) \tag{24}$$

où β est la pente spectrale de la série x : $E_x(f) = cf^{-\beta}$.

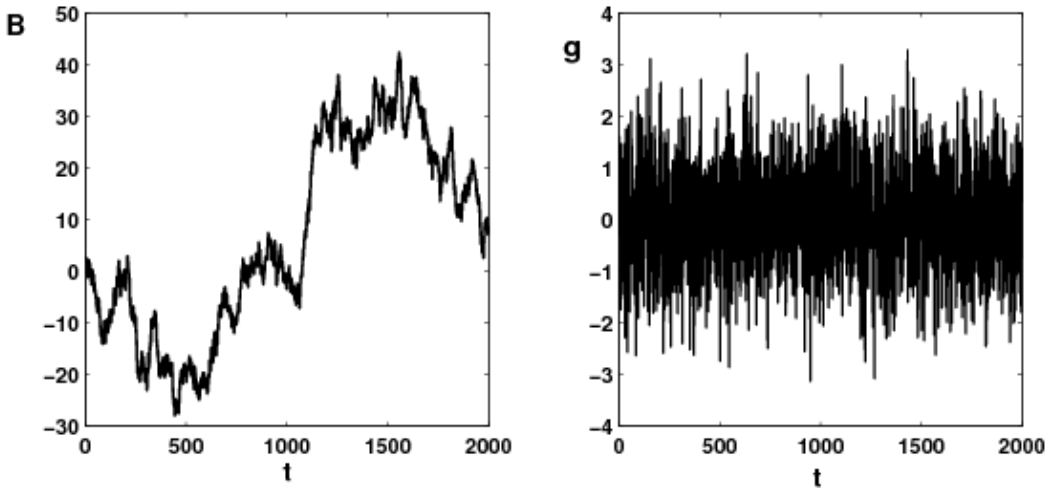

Figure 1-19 : Représentation du mouvement Brownien $B(t)$ et son incrément $g(t)$.

4. Covariation par une moyenne conditionnelle

On considère ici la dépendance entre deux variables X et Y. Une façon classique d'analyser cette dépendance est d'effectuer une régression linéaire de Y en fonction de X (Figure 1-20A). Cette approche est en fait très souvent employée en écologie marine. Ici nous utilisons une régression non-linéaire permettant de représenter une fonction non-linéaire (Figure 1-20B) donnant en fait la moyenne conditionnelle de Y par rapport à X :

$$m(x) = \overline{Y \middle| X = x} \tag{25}$$

(lire : ''moyenne de Y sachant que $X = x$'').

L'approche que nous utilisons ici est adaptée du domaine de l'analyse numérique, faisant appel à une régression à l'aide d'un noyau gaussien (Wand et Jones, 1995). Ce type d'estimateur permet d'obtenir une courbe lisse représentant la dépendance entre paramètres.

On estime la moyenne conditionnelle d'une quantité Y en fonction d'une quantité X qui sont produits simultanément. En notant (x_i, y_i) les mesures, on peut supposer une relation de la forme (Wand et Jones, 1995) :

$$y_i = m(x_i) + \varepsilon_i \tag{26}$$

Avec $i = 1.....n$ où il y a n points et ε une variable aléatoire avec pour moyenne zéro.

L'approche classique dans le domaine de l'écologie marine se contente généralement d'une régression linéaire et d'un coefficient, forcément imparfaite, car on obtient une droite de régression qui n'est pas toujours très proche du nuage de points. La méthode utilisées ici tient compte du poids de tous les points (nuage de points) et donne une relation non-linéaire $m(x)$ au sein du nuage de points.

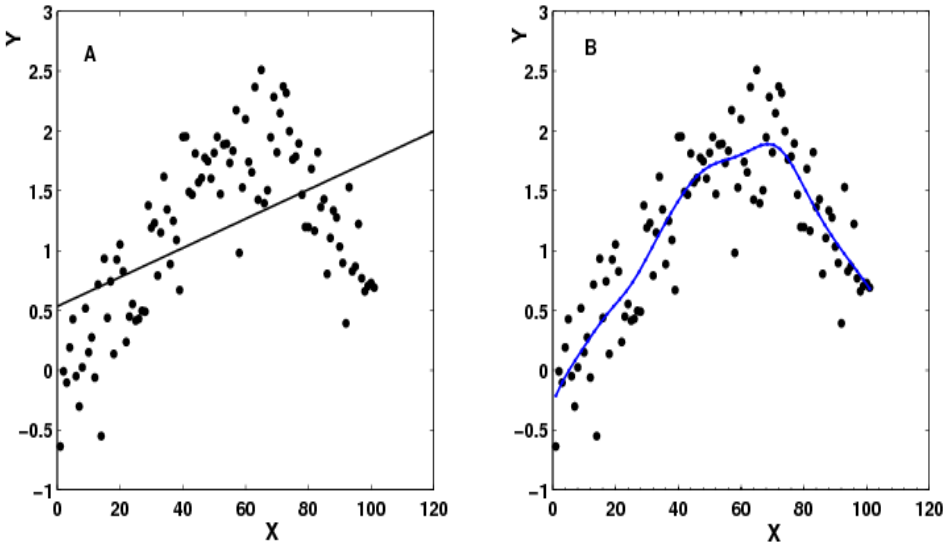

Figure 1-20 : Exemple d'illustration de la dépendance entre deux variables X et Y : (A) régression linéaire, (B) la moyenne conditionnelle de Y sachant X .

E. Le logiciel de programmation MATLAB

Les données téléchargées sur les sites Web de l'Ifremer (du programme MAREL) et de SOMLIT sont analysées avec logiciel MATLAB. MATLAB est un logiciel de calcul qui inclut le traitement matriciel, la programmation et la visualisation graphique. MATLAB possède une fenêtre de ‘‘Commande’’, une fenêtre ‘‘Graphique’’, une fenêtre ‘’Workspace (espace de travail)’’ (voir Figure 1-21).

Concernant la programmation qui est le cœur de ce type d'analyse, des programmes sont écrit en langage MATLAB. Les programmes été ont écrit par Dr François Schmitt et sont modifiés en fonction du type d'utilisation, donc du type de données. Les bases de données sont transformées pour être exploitables par les programmes MATLAB.

Ces paramètres biogéochimiques sont obtenus sous forme de séries temporelles (chaque série est représentée sous forme de fichier).

Les programmes écrits sont structurée de la manière suivante (voir un exemple de script dans l'encadré 3): un ou des paramètres d'‘Entrée’’, ensuite une condition est exécutée (qui joue le rôle de programme principal). Pour exécuter une séquence d'instruction répétée, une boucle est alors nécessaire, la boucle ‘‘for’’ ou ‘‘while’’ et ‘‘end’’ pour la fin de la boucle. Et à la fin du programme un ou des paramètres de ‘‘sortie’’ sont parfois nécessaires.

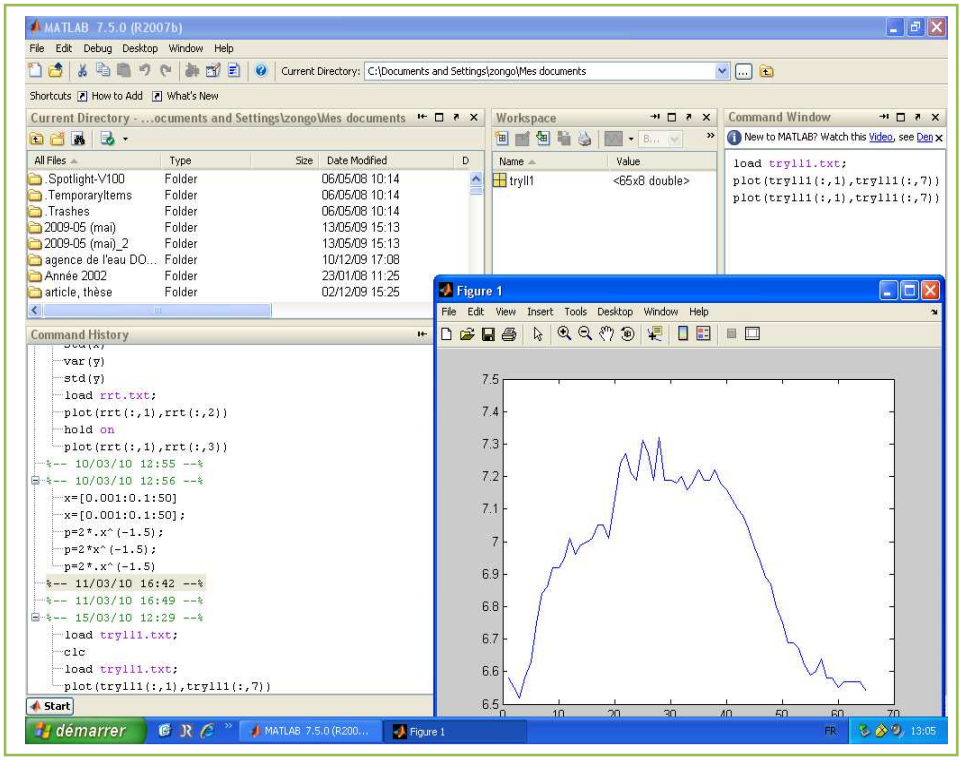

Figure 1-21: MATLAB; les fenêtres MATLAB, current directory, command history, workspace and command window.

Encadré 1-4: Un exemple de programme écrit en langage MATLAB (un script)

```
%lecture de pexp
%objectif du programme: simuler des valeurs
Z qui auront la même pdf

function z=simulrejet2(xx,N)
pexp=xx;
num=N;
x1= fix(rand(num,1)*10+50);
y=rand(num,1)*65;
X=[x1 y];
ii=1;
for k=1:num
a=X(k,1);
b=X(k,2);
c=pexp(a,2);
if(b<c)
z(ii)=a;
ii=ii+1;
end
end
```

Chapitre II. Analyses spectrales des séries biogéochimiques à haute fréquence

Chapitre II. Analyses spectrales des séries biogéochimiques à haute fréquence

A. Introduction

La Manche est une mer située entre la France et l'Angleterre, plus précisément dans le nord ouest de l'Europe. Elle est limitée à l'ouest par la mer Celtique et l'Atlantique et à l'est par le détroit du Pas de Calais et la mer du Nord. C'est une mer peu profonde et très complexe de par sa variété de forçages, comme la marée (le marnage peut atteindre les 7,5 à 8 m à Roscoff et à Boulogne-sur mer et atteindre les 14 m dans la baie du Mont-Saint-Michel par des forts coefficients), les courants de marée, le vent, les apports d'eau douce par les fleuves (Dauvin, 2008).

Nous considérons ici des mesures à haute fréquence qui sont nécessaires pour une meilleure compréhension des couplages physico-biologiques existants à micro-échelles (Schmitt et al., 2008). Les sites étudiés sont localisés en zone côtière de la Manche comme illustré aux chapitre I : nous considérerons le bassin Manche orientale et deux de ses affluents (l'estuaire de la Seine et la rivière du Wimereux) et le bassin Manche occidentale dans cette étude.

La Seine est le plus grand affluent en Manche orientale (Dauvin, 2008) et possède de loin le plus fort débit, suivi de la Somme. On compte également comme affluent, l'Authie, la Canche, la Liane, le Wimereux, le Slack, l'Aulne et l'Elorn qui se jettent également sur les côtes françaises en Manche, avec des débits plus faibles. La station estuarienne MAREL Honfleur implantée en baie de Seine est soumise à l'influence couplée des apports marins et des apports fluviaux. Le Wimereux, quant à lui est une petite rivière qui présente l'avantage d'être située à proximité du laboratoire LOG, nous permettant d'effectuer les mesures très aisément. Ce site est utilisé en tant qu'illustration méthodologique de l'application des méthodes utilisées ici, à une petite rivière.

L'analyse du spectre de Fourier a été effectuée sur des séries biogéochimiques à haute fréquence provenant de ces stations de mesures. L'analyse spectrale permettra de

mieux mettre en évidence le lien existant entre forçage régulier (périodique ou apériodique) ou occasionnel et les réponses de l'écosystème (Schmitt et al., 2008).

B. MAREL Carnot

1. La Manche orientale

La Manche orientale est une mer épicontinentale caractérisée par un fort hydrodynamisme. Elle s'étend sur 77.000 km^2 et possède une profondeur maximale de 174 m dans la partie Nord Est du Cotentin (Dauvin, 2008). Cette mer à forts courants de marée présente une alternance du flot et du jusant. Des vents assurent également le transport des masses d'eaux dans cette partie de la Manche. De forts courants de marée sont également parallèles à la côte (Dauvin, 2006). A marée haute les courants sont convergents (la ligne de rencontre des courants se forme lorsque les masses d'eau venues de la Mer du Nord rencontrent celles provenant de l'Atlantique), alors que, à marée basse, les courants sont divergents ; on assiste à une remontée des masses d'eaux vers la Mer du Nord et une descente des masses d'eaux vers l'Atlantique.

Les eaux côtières sont influencées par l'apport en eaux douces des fleuves tels que le Seine, la Somme, formant ainsi un « fleuve côtier » (Figure 2-1). Ce fleuve côtier est séparé des eaux océaniques par une zone frontale (Brylinski et Lagadeuc, 1990). Cette masse d'eaux côtière est caractérisée par une turbidité élevée, une faible salinité mais une biomasse phytoplanctonique élevée (Brylinski et Lagadeuc, 1990 ; Brylinski et al., 1991).

En Manche orientale, la stratification et la déstratification ont été observées durant les cycles de marée (Brylinski et Lagadeuc, 1990 ; Lagadeuc et al., 1997). Lagadeuc et al. (1997) ont montré que la durée de la stratification verticale des eaux est fortement corrélée à l'intensité de la marée et à une durée plus longue pendant les marées de mortes eaux au cours du printemps. La déstratification apparaît lorsque les courants de marée sont très forts et lorsque la profondeur est la plus faible (Lagadeuc et al., 1990).

Cette zone de la Manche est caractérisée par la prédominance d'un sable mêlé de graviers (Dauvin, 1997). Ce bassin du littoral montre une grande diversité d'espèces, à la

fois benthiques (Dauvin et al., 2003 ; Dauvin et al., 2004), et pélagiques (Brylinski et al., 1988 ; Brylinski et al., 1996 ; Hoch et Garreau, 1998 ; Breton et al., 1999 ; Cotonnec et al., 2001), avec une succession printanière de diatomées et de *Phaeocystis sp*.

La station de mesure à haute fréquence considérée ici est MAREL Carnot (voir chapitre I) qui est soumise en grande partie à l'influence de la marée mais également aux apports fluviaux. La Liane est la rivière la plus proche de cette station de mesure. Son bassin versant est de 250 km^2, son débit moyen de 5,2 m^3/s (Lefebvre, 2008a). L'entrée des eaux douces de la Liane dans le port de Boulogne-sur-mer (en aval de la Liane) est régulée par l'ouverture et la fermeture des vannes d'un barrage (''le barrage Marguet''). La fonction primaire de ce barrage est de réguler le débit de la rivière pour ne pas perturber les activités de tourisme du port.

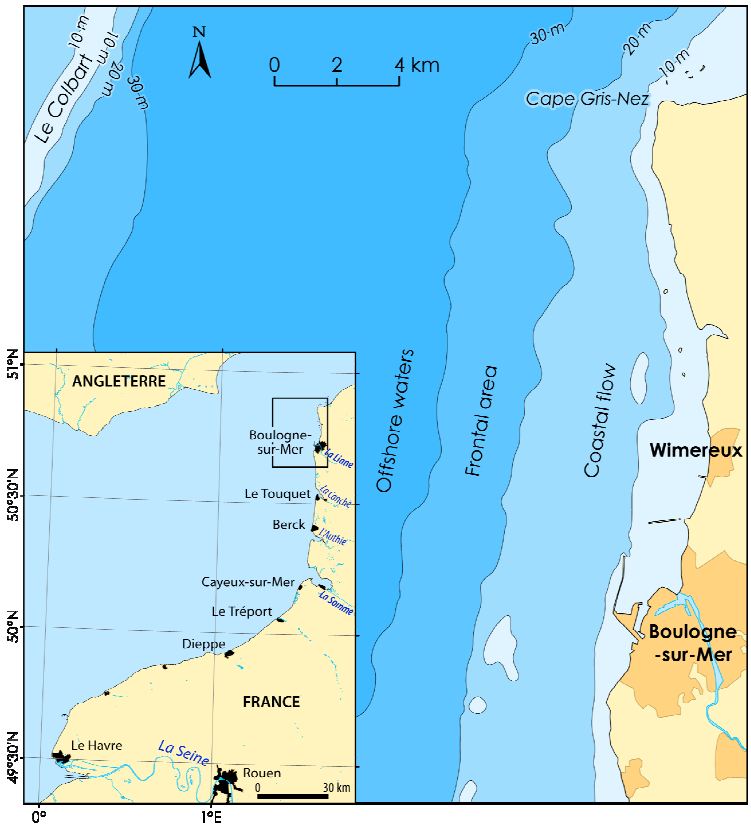

Figure 2-1 : La Manche orientale montrant la limite du fleuve côtier, la zone frontale et les eaux océaniques. (Source : Denis Marin ; LOG).

2. Dynamique journalière, saisonnière et valeurs manquantes

Les séries temporelles MAREL Carnot présentent un taux relativement élevé de valeurs manquantes. Selon les séries, le nombre de valeurs acquises varie entre 50.000 et 112.000 avec un pourcentage d'acquisition variant de 40 à 87 % (Tableau 2-1). Pour chaque série, on constate un pourcentage de valeurs manquantes non négligeable, correspondant aux périodes de maintenance et aux pannes. La figure 2-2 représente la densité de probabilité de la durée des interruptions à MAREL Carnot. Un pic à 16 h indique la durée des interruptions qui sont associées à la maintenance pour les 4 paramètres (la fluorescence, l'oxygène dissous, le pH et la température).

Tableau 2-1 : Le nombre de données et le pourcentage d'acquisition pour les séries temporelles étudiées ici

	MAREL Carnot	
Capteur	**Nombre de données**	**% d'acquisition**
Température	111.570	87
pH	56.979	40
Oxygène dissous	81.975	70
Fluorescence	106.054	83
Nitrates	2.788	48
Acide silicique	2.884	48
Phosphates	2.424	45

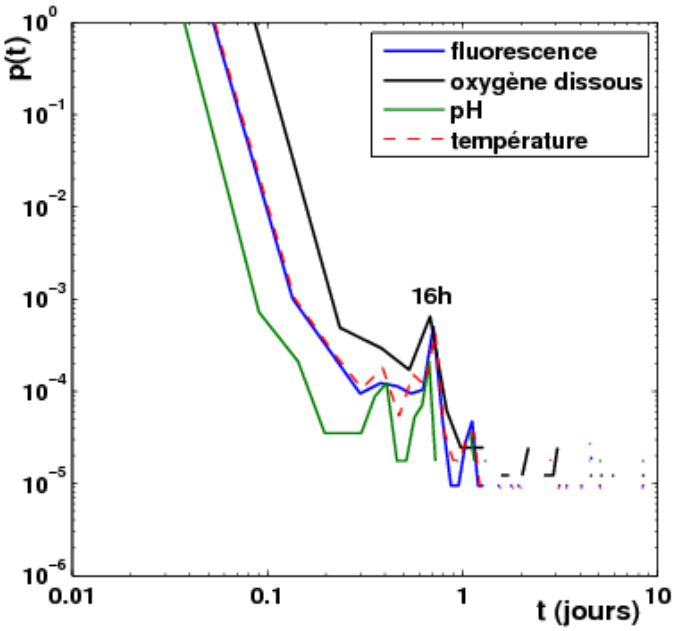

Figure 2-2 : Densité de probabilité des intervalles de temps des valeurs manquantes pour les séries de fluorescence, d'oxygène dissous de pH et de température, mesurés à MAREL Carnot. La durée d'interruption est estimée à 16 h pour les 4 paramètres.

En considérant les données de température sur la période de mars 2004 à février 2009, on note un maximum de température de 21,4 °C enregistré le 22 juillet 2006 à 15 h 16 et un minimum de 3,6 °C enregistré le 6 mars 2005 à 6 h 36. En moyenne annuelle, elle varie entre 12 et 14 °C suivant l'année (Tableau 2-2). Une stabilité saisonnière apparait dans la série température de 2004 à début 2009 (Figure 2-3). On constate une dynamique saisonnière moyenne, avec une température qui varie de 13-14 °C au printemps, 3-8 °C en hiver, jusqu'à 19-21 °C en été. A plus petites échelles, une dynamique journalière très marquée apparait également dans les données de température. Et en guise d'illustration, la figure 2-4 indique l'évolution journalière des valeurs minimales et maximales de température pour l'année 2004. Les amplitudes varient de 0 à 2,1 °C, sur une moyenne de 0,69 °C.

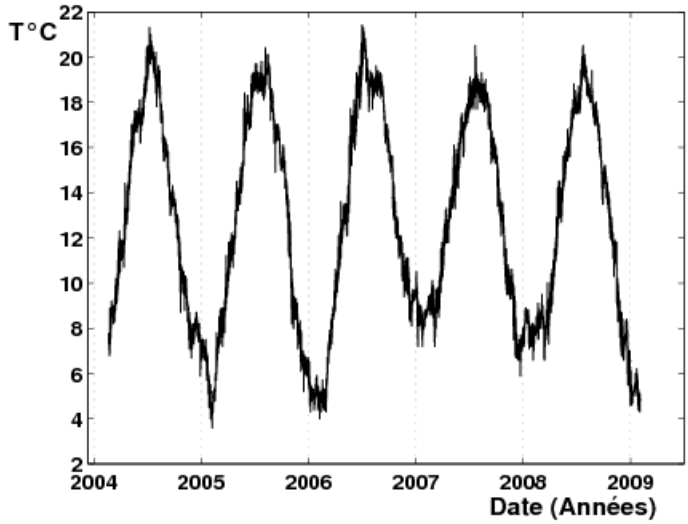

Figure 2-3 : Evolution temporelle de la température de l'eau (°C). On note une certaine cyclicité de la température au cours de ces 5 ans (2004-2009). Des fluctuations bien marquées apparaissent dans cette évolution périodique. Le maximum de température enregistré est compris entre 20 et 22 °C. Le minimum de température enregistré est de l'ordre de 4 °C. Ceci montre aussi que certains hivers sont bien plus doux que d'autres : autour de 8 °C en 2007, 4° de plus que 2006 et 2009.

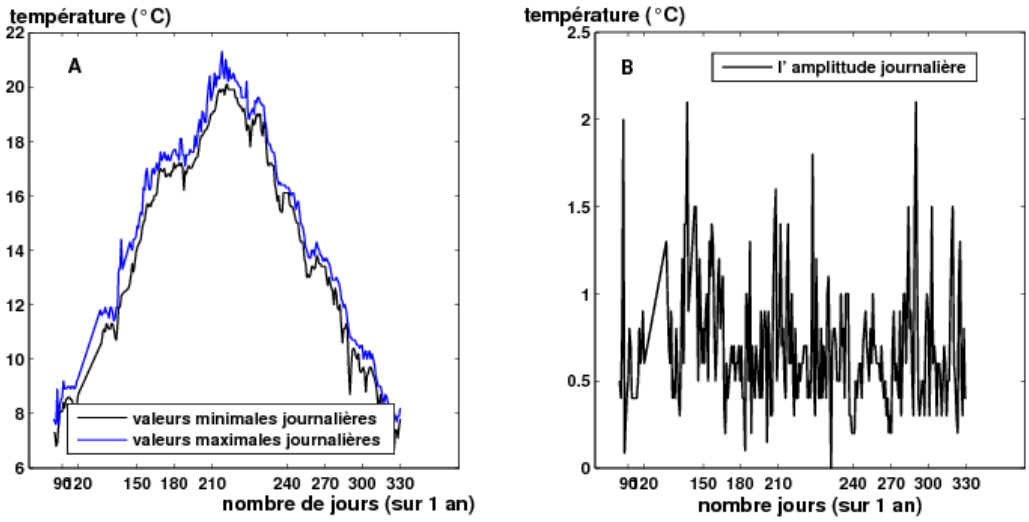

Figure 2-4 : (A) : variation des valeurs minimales et maximales journalière, (B) : Amplitude journalière $(t_{max} - t_{min})$ *de la température de l'eau, montrant une grande variabilité (année 2004).*

La figure 2-5 montre la durée de deux événements extrêmes pour des valeurs seuils fixées à 18,6 °C et à 6,9 °C correspondant aux percentiles 90 (P_{90}) et 10 (P_{10}) respectivement. Pour des valeurs supérieures et inferieures à ces seuils, la figure 2-5 indique des durées variables au cours de ces 6 ans (de 2004 à 2009). La durée de la période lors de laquelle les températures sont supérieures à 18,6 °C varie de 12 à 55 jours. En ce qui concerne la durée de la période lors de laquelle les températures sont inférieures à 6,9°C, elle est nettement variable entre les années (de 2004 à 2009) et varie de 2 (en 2007) à 78 jours (en 2006). Ces graphes (des valeurs $< P_{10}$) montrent que la durée des événements froids est très variable.

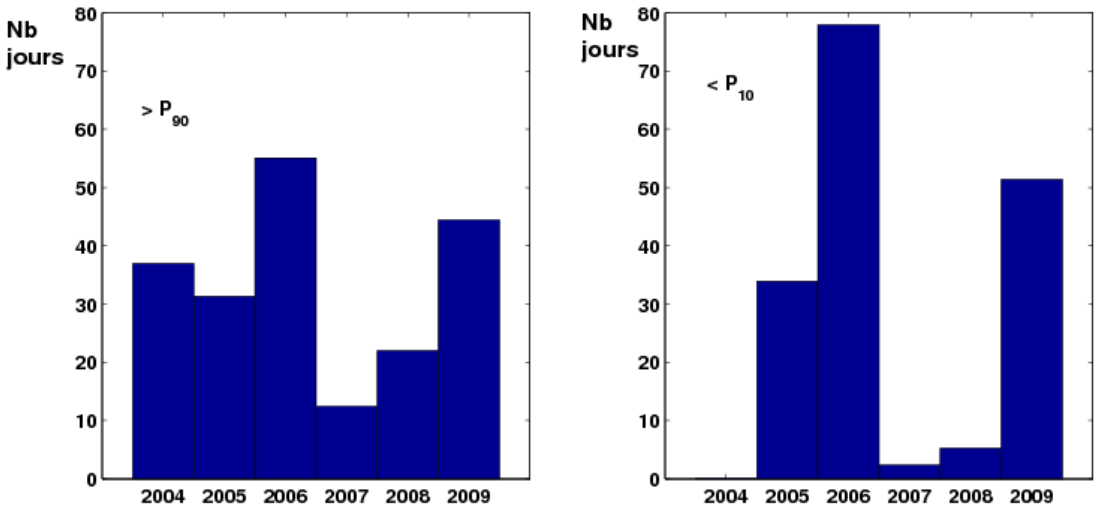

Figure 2-5 : Les durées en jours de deux événements extrêmes (des valeurs de température supérieures à P_{90} *(percentile 90), 18,6 °C et inférieures à* P_{10} *(percentile 10), 6,9 °C de 2004 à 2009). Pour les températures les plus chaudes* $(> P_{90})$*, la durée varie de 12 à 55 jours. Pour les températures les plus froides* $(< P_{10})$ *la durée varie de 0 à 78 jours et l'année 2006 étant la plus froide. Ceci indique une forte variabilité interannuelle de cet indicateur, et ne révèle pas de tendance au réchauffement sur ces 5 années.*

L'oxygène dissous montre une variabilité temporelle importante et une variabilité journalière bien marquée (Figures 2-6, 2-7). L'année 2004 indique de faibles valeurs d'oxygène dissous avec un maximum de 10,94 mg/L en avril et un minimum de 3,95 mg/L en juillet. De 2004 à février 2009, on constate des chutes et des augmentations brusques consécutives de l'oxygène dissous. Une variabilité très marquée apparaît dans les valeurs minimales et maximales journalières (Figure 2-7A). L'amplitude journalière moyenne est de l'ordre de 0,81 mg/L d'oxygène dissous, avec une amplitude maximale journalière de 5,65 mg/L (Figure 2-7B). Les données brutes d'oxygène dissous visuellement ne révèlent pas nettement une évolution saisonnière, à l'inverse de celles de la température. Une moyenne hebdomadaire sur l'ensemble des années montre une évolution saisonnière, avec des concentrations qui sont importantes au printemps (Figure 2-8).

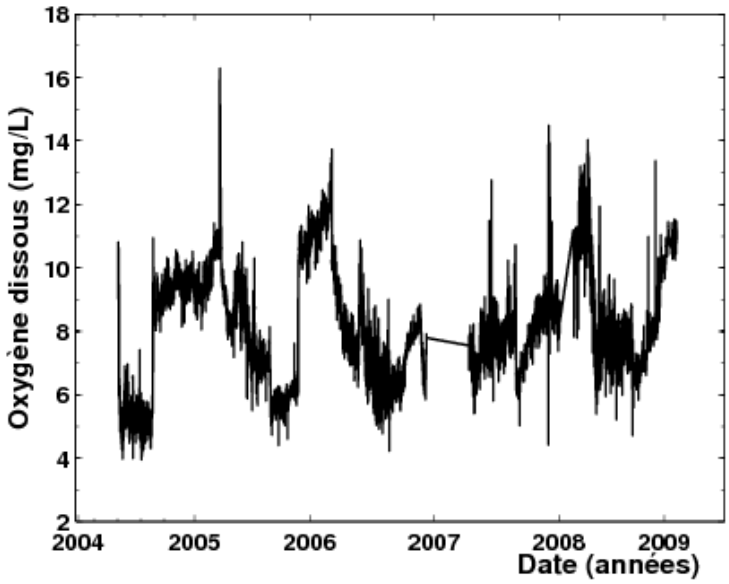

Figure 2-6 : L'évolution de la concentration en oxygène dissous de 2004 à début 2009. La série d'oxygène dissous possède une allure fortement fluctuante, une forte intermittence. Une évolution saisonnière se dessine difficilement à travers ces fortes fluctuations. On note un pic important en d'oxygène dissous en 2005, de l'ordre de 16 mg/L. Les plus faibles valeurs d'oxygène enregistrées sont de l'ordre de 4 mg/L.

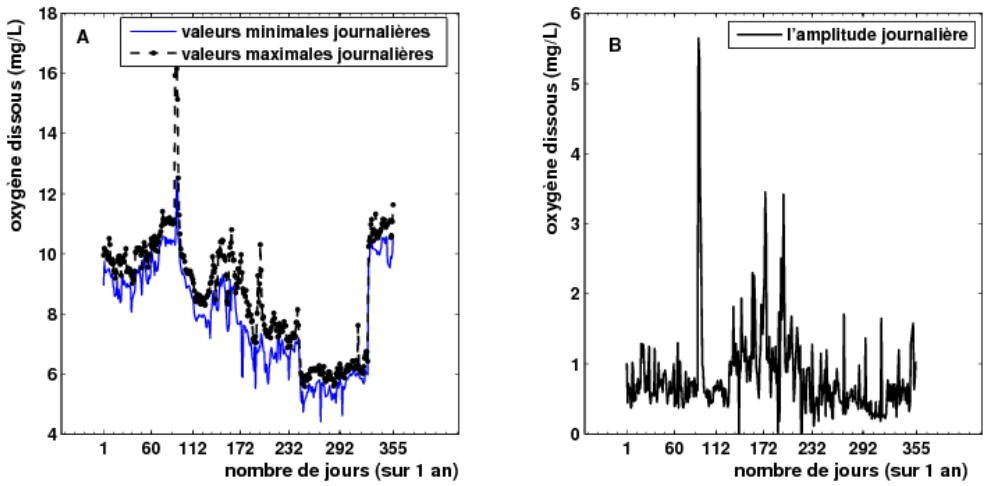

Figure 2-7 : (A) : cycle annuel des valeurs minimales et maximales de la concentration en oxygène dissous (l'année 2005), montrant une variabilité avec des teneurs maximales journalières non négligeable, (B) : l'amplitude journalière de la teneur en oxygène dissous, on note une grande variabilité avec un ordre moyen de 0,81 mg/L.

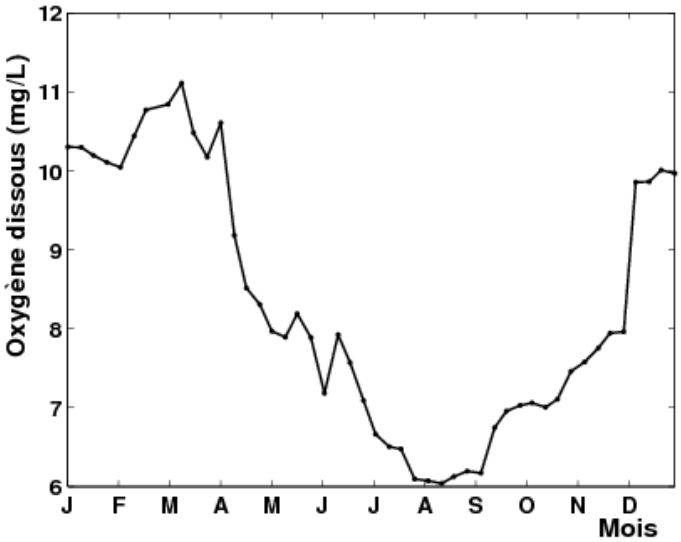

Figure 2-8 : Moyenne hebdomadaire estimée sur la période de 2004-2009 de l'oxygène dissous montre une diminution importante en été. Des concentrations très importantes apparaissent au printemps et en hiver sur les 5 ans d'étude.

Le pH moyen de l'eau de mer est basique de l'ordre de 8,2-8,3 UpH (Aminot et Kérouel, 2004). Dans la série de 2004 à début 2009 (Figure 2-9), la valeur maximale

enregistrée est de 9,17 UpH le 2 mai 2007 contre une valeur minimale de 6,59 UpH le 21 février 2007. Les moyennes annuelles de pH sont présentées dans le tableau 2-2. On constate également que les valeurs supérieures à 8,3 UpH sont enregistrées la plupart du temps au printemps. L'amplitude journalière moyenne est de l'ordre de 0,43 UpH. Les valeurs minimales et maximales journalières enregistrées sont de l'ordre de 7,78 et 8.21 UpH respectivement. La figure 2-10 est un exemple type de l'évolution du pH sur une journée du mois d'avril. Le pH fluctue fortement avec une variation journalière comprise entre 0,01 et 0,42 UpH. On note une valeur minimale de 8,55 UpH et des valeurs maximales de l'ordre de 8,73 UpH sur une durée de 3 h. Dans cette figure 2-10, de 12 h à 15 h, le pH atteint son maximum et baisse lorsque l'intensité lumineuse baisse. L'intensité lumineuse adéquate favorise l'activité photosynthétique par la consommation de CO_2 par les algues ce qui entraine une augmentation du pH du milieu (Hansen, 2002). Le pH en milieu marin change au cours de la journée, ce qui pourrait résulter de l'activité phytoplanctonique (périodes de bloom) ou de l'influence de la marée (périodes hors bloom).

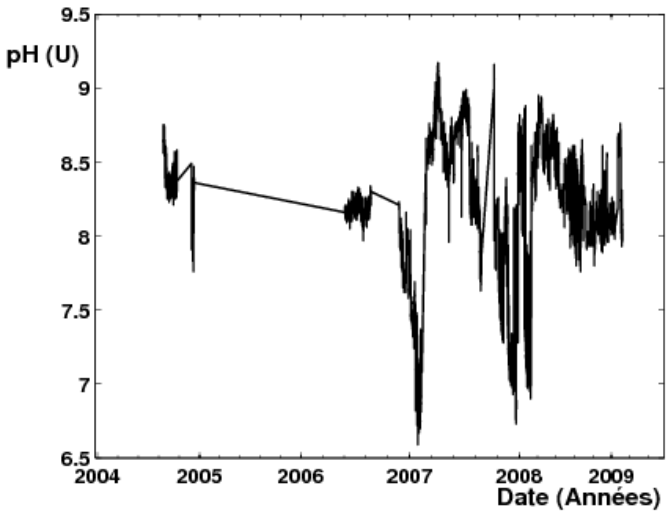

Figure 2-9 : L'évolution de la teneur en pH de 2004 à 2009, mettant en évidence une très forte variabilité. L'année 2005 est marquée par l'absence de donnée. Cette figure indique des fluctuations brusques des teneurs en pH. L'année 2008 révèle des concentrations de pH qui varient entre 8 et 9 UpH. Les très brusques variations peuvent être liées à des dessalures lors de l'ouverture des vannes du barrage sur la Liane, au niveau du port, mais situé assez loin du capteur, puisque celui-ci se trouve à l'extrémité de la digue Carnot longue de plus de 1 km.

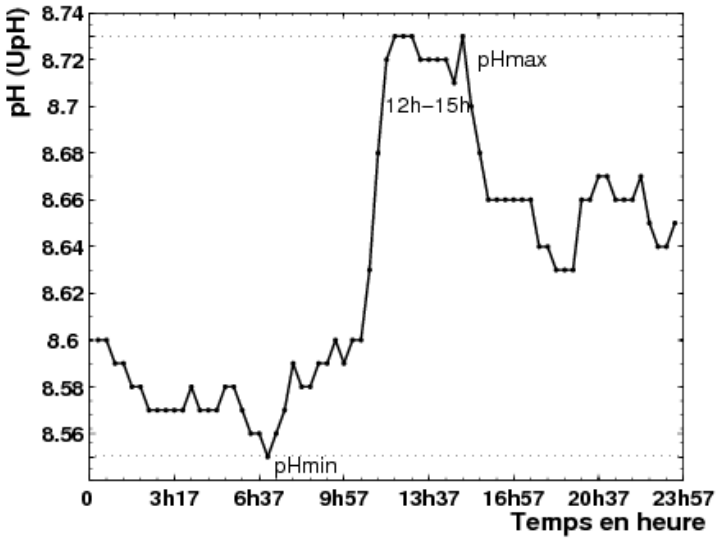

Figure 2-10 : Un exemple type d'évolution de la teneur en pH sur une journée au mois d'avril 2007. Les faibles teneurs en pH sont enregistrées entre minuit et 9 h du matin et les teneurs élevées sont enregistrées entre 12 h et 15 h. Les teneurs baissent à partir de 16 h.

La fluorescence mesurée montre une évolution annuelle avec des valeurs très importantes en 2004 et en 2006 (Figure 2-11). Les forts pics de fluorescence au printemps sont de l'ordre de 58 FFU en mars 2006, et de 49 FFU en avril 2004. Une baisse importante de la teneur en fluorescence apparaît en 2005, en 2007 et en 2008. Concernant l'année 2005, Gómez et Souissi (2008) montrent que c'est une année marquée par l'absence du *Phaeocystis globosa* et que cela est peut être due à l'apparition tardive du froid en hiver. Si on considère la figure 2-5 qui indique la durée des événements extrêmes on constate que la durée des périodes pendant lesquelles les températures les plus froides et les plus chaudes est identique et autour de 30 jours (en 2005). En 2007 et en 2008 les durées des températures extrêmes chaudes sont de l'ordre de 12 et de 22 jours environ, ce qui pourrait ne pas favoriser l'apparition explosive de certaines espèces phytoplanctoniques. L'année 2006 indique une durée de températures extrêmes chaudes de 2 mois, ce qui coïncide bien avec des fortes teneurs de fluorescence cette année. La fluorescence maximale enregistrée en mai 2008 est de l'ordre de 24,59 FFU, et celle enregistrée en février 2008 de l'ordre de 0,01 FFU (Tableau 2-2). La variabilité journalière de la fluorescence est très importante (Figure 2-12A). L'amplitude journalière varie de 1,21 à 64,48 FFU sur une moyenne de

15,64 FFU pour l'année 2005 (Figure 2-12B). La moyenne hebdomadaire annuelle montre une variation saisonnière de la fluorescence. Cette variation saisonnière présente une évolution connue avec une augmentation régulière au printemps et une diminution de l'été à l'hiver (Figure 2-13).

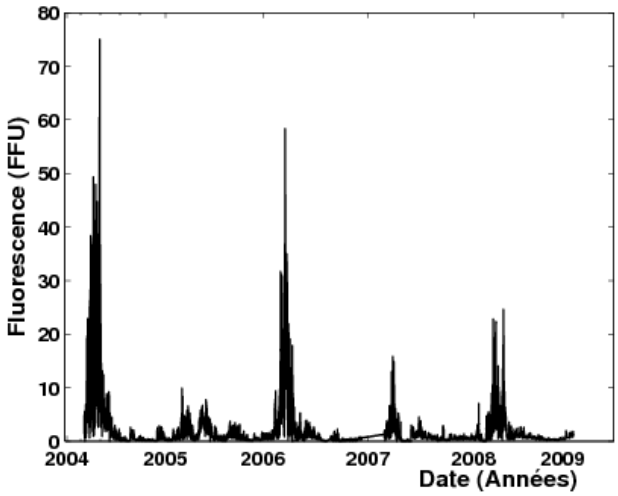

Figure 2-11: L'évolution de la teneur en fluorescence de 2004 à février 2009. La série de fluorescence montre une allure intermittente avec de fortes fluctuations. Les années 2004 et 2006 montrent des teneurs en fluorescence importantes comparées aux autres. Ceci correspond à des blooms printaniers, en particulier les blooms de Phaeocystis.

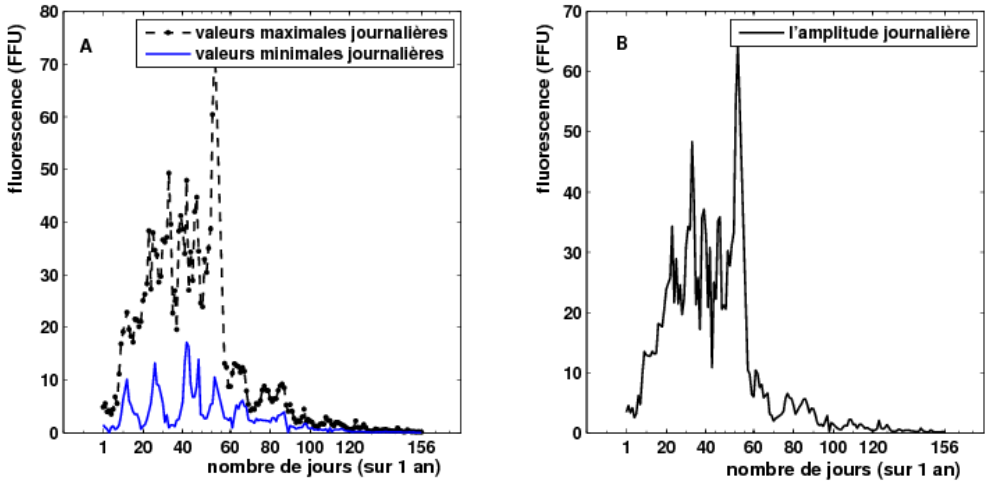

Figure 2-12: (A) : variation dans les valeurs minimales et maximales journalières sur 156 jours (l'année 2005), (B) : l'amplitude journalière de la teneur en fluorescence montrant une variabilité importante.

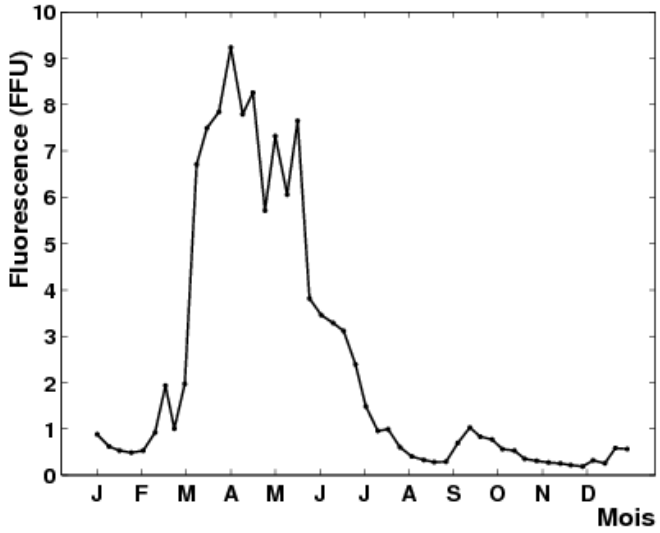

Figure 2-13 : Cycle saisonnier (moyenne hebdomadaire sur les 5 ans d'étude) de la teneur en fluorescence avec des valeurs importantes au printemps et une chute progressive jusqu'en hiver. Cette figure est un exemple type du cycle saisonnier de la fluorescence. Le bloom printanier apparaît nettement.

Tableau 2-2 : Les moyennes annuelles et valeurs minimales et maximales de chaque série (Température, Oxygène dissous, pH et fluorescence) du 24 mars 2004 (non complète) à 2008

	Température (°C)			**Oxygène dissous (mg/L)**			**pH (U)**			**Fluorescence (FFU)**		
	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max
2004	14,19	6,70	21,30	7,39	3,95	10,94	8,37	7,76	8,75	3,75	0,01	75,05
2005	12,37	3,60	20,40	8,24	4,40	16,28				1,32	0,02	9,89
2006	12,48	4,00	21,50	8,21	4,23	13,73	8,15	7,65	8,34	2,48	0,20	58,31
2007	13,09	6,60	20,50	7,61	5,03	12,76	8,25	6,59	9,17	1,05	0,01	15,80
2008	12,37	5,50	20,50	8,59	4,42	14,48	8,15	6,73	8,95	1,45	0,01	24,59

3. Spectre d'énergie

La comparaison entre ces paramètres biogéochimiques est discutée ici au travers de l'analyse spectrale. Les spectres sont représentés en log-log (logarithme de base 10) de façon à détecter de possibles plages d'échelle en loi de puissance (Eq. (18)) et des forçages déterministes sous forme de pics. Les spectres d'énergie de la température, du pH, de l'oxygène dissous et de la fluorescence révèlent tous une invariance d'échelle avec un exposant spectral variable selon le paramètre (Tableau 2-3).

Tableau 2-3 : Valeurs de l'exposant spectral β et le rapport d'échelle pour chaque paramètre. Ce rapport d'échelle pour chaque série est estimé en prenant le rapport entre la plus grande et la plus petite échelle du régime en loi d'échelle

	β	Rapport d'échelle
Turbulence	5/3	Régime inertiel
Température	1,6	50.10^4
Oxygène dissous	1,2	3.10^3
pH	1,5	10^4
Fluorescence	1,2	9.10^3

Le tableau 2-3 ci-dessus donne les pentes spectrales et les rapports d'échelle. Ce rapport d'échelle pour chaque série est estimé en prenant le rapport entre la plus grande et la plus petite échelle du rapport d'échelle. Les rapports d'échelle sont très élevés, de 10^3 à 10^5.

- Le spectre d'énergie de la température (Figure 2-14) révèle une pente de l'ordre de 1,6, ceci qui s'accorde avec l'hypothèse de scalaire passif de Obukhov (1949) et de Corrsin (1951). Ce résultat est en accord avec celui obtenu par Seuront et al. (1996b), pour des données température recueillies durant 2 h à 15 m de profondeur au printemps.

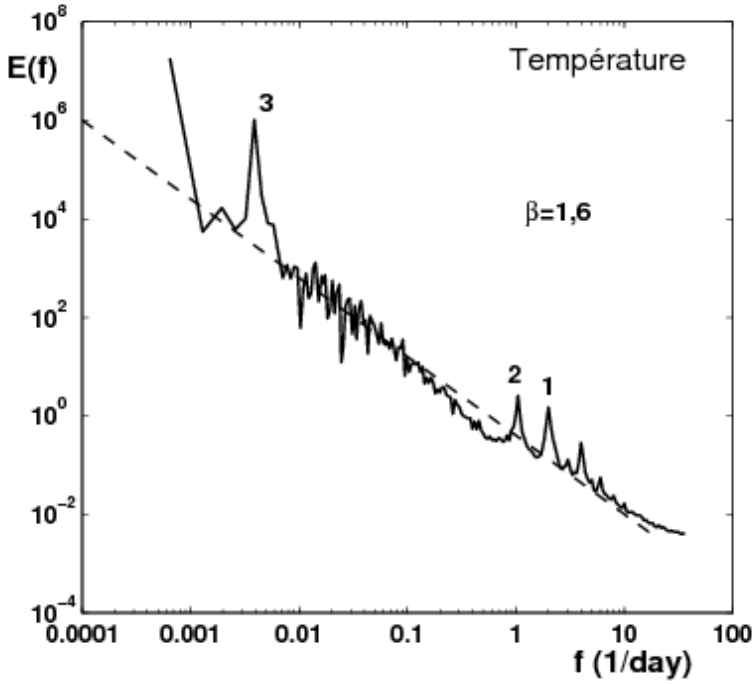

Figure 2-14 : Le spectre d'énergie de la température : on constate une invariance d'échelle avec une pente de l'ordre de 1,6 et des pics (1) à 12 h, à (2) 24 h et à (3) 1 an, correspondant à la marée, au cycle diurne et au cycle annuel respectivement.

- Le spectre d'énergie du pH possède un seul régime d'échelle avec une pente de 1,5 (Figure 2-15). Cette valeur de pente du spectre de pH est similaire à celle trouvée par Schmitt et al. (2008) pour des données recueillies dans l'estuaire de la Seine. On suppose alors que le pH pourrait être fortement influencé par la turbulence mais également par des réactions chimiques à toutes les échelles. Cette pente de 1,5 est différente du celle du scalaire passif (5/3) et correspondrait à un « scalaire actif ».

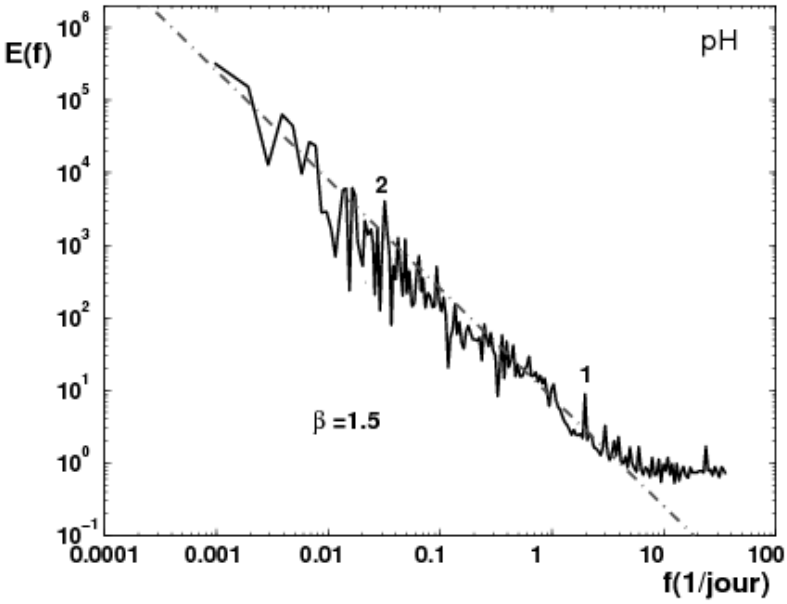

Figure 2-15 : Le spectre d'énergie du pH montrant une invariance d'échelle, avec une pente de 1,5 et des pics (1) à 12 h et (2) à 30 jours environ.

- Le spectre d'énergie de la fluorescence (Figure 2-16) met en évidence un exposant spectral de l'ordre 1,2. Cette valeur est identique à celle de l'oxygène dissous. Ce résultat est similaire à celui trouvé en Mer du Nord (les conditions hydrodynamiques et hydrologiques en Mer du Nord sont similaires celles trouvées Manche orientale) : à partir d'une série temporelle de fluorescence plus courte, Seuront et al. (1996a) trouvent un spectre d'énergie de fluorescence avec une pente de l'ordre de 1,22. Ce spectre révèle également un pic assez fort et localisé à l'échelle de 12 h correspondant à la marée, et un forçage plus diffus (indiqué ''2'' sur la figure 2-16) et un pic à une échelle proche de 1 mois, qui peut correspondre à une échelle caractéristique associé au cycle de vie de certaines espèces phytoplanctoniques (Pannard et al., 2008).

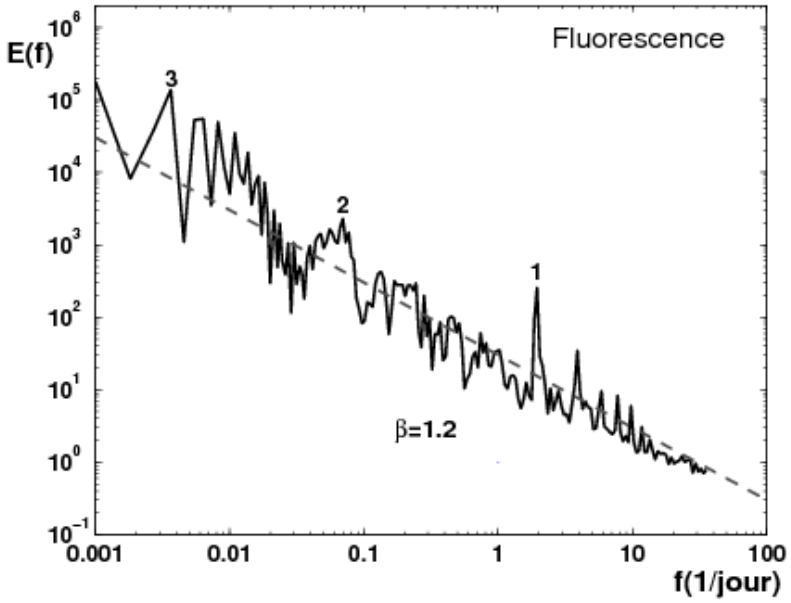

Figure 2-16 : Le spectre d'énergie de la fluorescence mettant en évidence une invariance d'échelle avec un pic (1) à 12 h, un pic (2) à 1 mois et un pic (3) correspondant au cycle annuel.

- La figure 2-17 présente le spectre d'énergie de l'oxygène dissous. Ce spectre d'énergie met en évidence une invariance d'échelle qui s'étend de 334 jours à 2 h avec un exposant spectral de l'ordre de 1,2. Cette valeur de pente est identique à celle du spectre de fluorescence. On constate qu'en dessous de 2 h, le spectre d'oxygène dissous possède une allure plate indiquant que le signal est bruité. Ce bruit à petite échelle peut correspondre à une limitation du capteur plus qu'a un véritable signal (les autres paramètres ne montrent pas cela). On voit un net forçage par la marée, un pic (1) à 12 h, un pic (3) annuel et un pic (2) à 10 jours environ.
- La figure 2-18 montre la superposition du spectre de fluorescence et celui de l'oxygène dissous. On note une assez bonne superposition avec un décalage pour les échelles inferieures à 2 h. Ceci peut laisser entendre que la dynamique de l'oxygène dissous est ici déterminée par le phytoplancton.

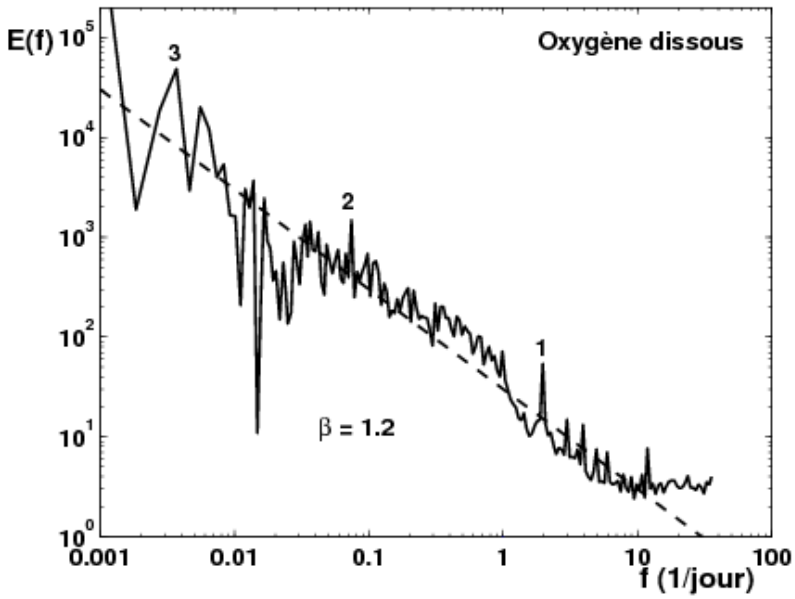

Figure 2-17 : Le spectre d'énergie de la teneur en oxygène dissous montrant une invariance d'échelle, un pic (1) à 12 h, un pic (2) à 10 jours et un pic (3) à 1 an.

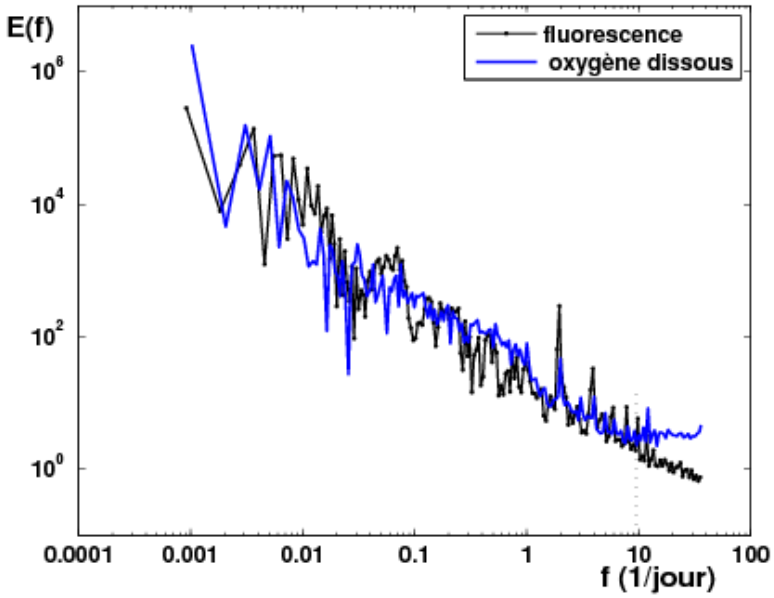

Figure 2-18 : Superposition du spectre de fluorescence et de l'oxygène dissous, on note une assez bonne superposition avec un décalage pour les échelles inferieures à 2 h.

- La figure 2-19 représente le spectre compensé de la fluorescence par celui de la température $(E_{fluo}(f)/E_T(f)$. On note une allure assez plate pour les échelles supérieures à 1 jour, ce qui suppose une allure identique des deux spectres dans ces fréquences d'échelles. Et en dessous de ces fréquences échelles, une relation différente se dessine. Ceci semble indiquer que sur une échelle plus fine, la relation entre la fluorescence et la température devient plus faible au profit des processus biologiques et chimiques (Cloern et Jassby, 2010).

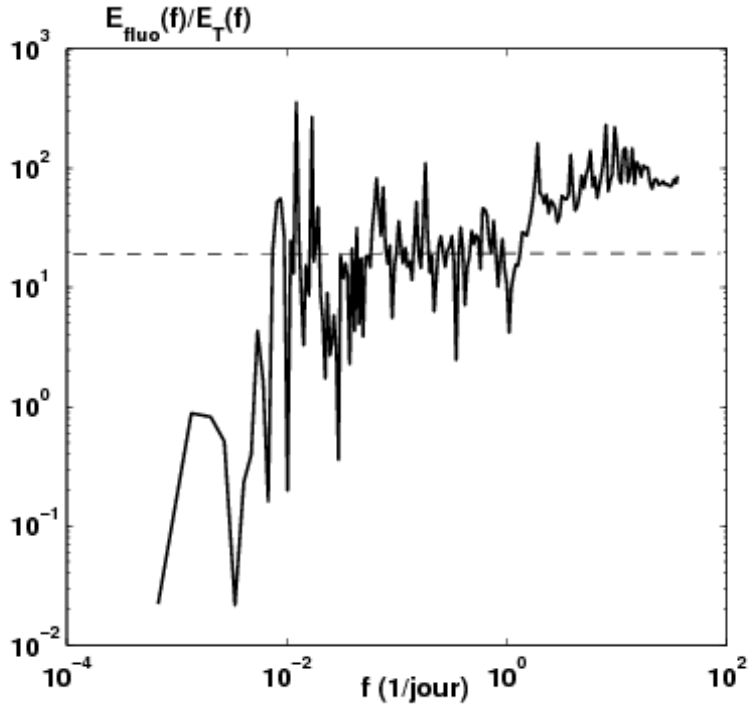

Figure 2-19: Le spectre compensé de la fluorescence par la température indiquant deux comportements : pour les échelles supérieures à 1 jour, un spectre compensé plat, ce qui suppose une distribution temporelle identique. Alors que pour les échelles en dessous de 1 jour, la relation est différente. Soulignons que si le spectre compensé est plat (horizontal) ceci indique que les deux spectres ont une pente spectrale identique.

- Le spectre compensé de l'oxygène dissous est représenté dans la figure 2-20. Cette figure met en évidence deux comportements. Une première phase montrant une allure plate pour les fréquences d'échelles supérieures à 12 h, ce qui laisse supposer l'existence d'une covariabilité entre ces deux spectres à ces échelles. Une deuxième phase apparaît montrant une allure non-plate pour les échelles inférieures à 12 h, ce qui suppose qu'à ces fréquences d'échelles, le niveau de covariabilité entre ces deux spectres est très faible. Cela suppose également qu'à courte échelle, l'oxygène dissous est plus influencé par les processus chimiques et biologiques et qu'à grande échelle, le forçage physique se fait ressentir dans la variabilité de l'oxygène dissous (Chatelain et Guizien, 2010).

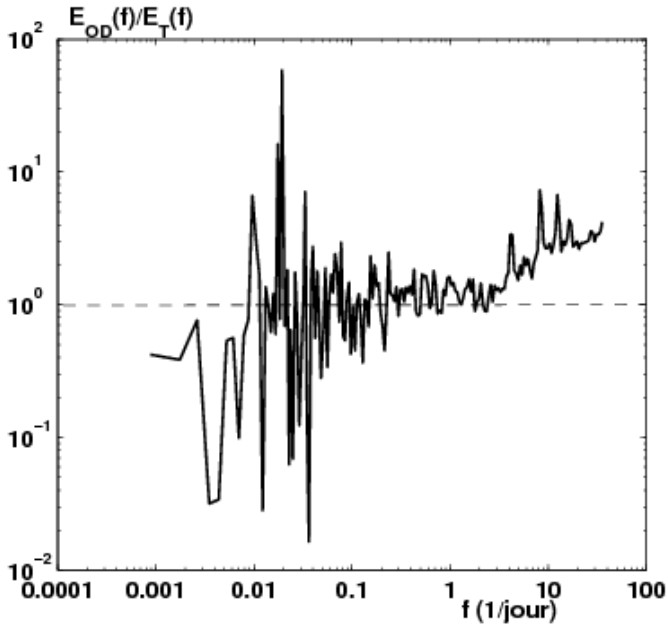

Figure 2-20 : Le spectre compensé de l'oxygène dissous par la température : deux comportements bien net se dessinent avec pour les échelles supérieures à 12 h, un spectre compensé plat pour les échelles inférieures à 12 h, une relation différente apparaît.

C. MAREL Honfleur

Rappelons que MAREL Honfleur est la station estuarienne implantée en baie de Seine, au niveau de l'embouchure de l'estuaire de la Seine.

1. La Baie de Seine

La baie de Seine est une baie située dans le Nord de la France, elle s'étend sur une superficie de 5000 km^2; la profondeur de la baie est d'environ 40 m (Dauvin, 2008). Elle est soumise aux apports d'eaux douces importants de la Seine et aux eaux marines de la Manche. Elle est délimitée à l'ouest par la presqu'île du Cotentin, au sud par la côte de Normandie (Calvados) et à l'est par l'estuaire de la Seine au Havre (le pays de Caux). L'estuaire de la Seine est situé plus précisément dans la partie sud-est de la baie qui est le siège de l'activité économique. La baie de Seine révèle un enrichissement en sels nutritifs favorable à la production primaire phytoplanctonique (Aminot et al., 1998 ; Guillaud, 1993 ; Billen et Garnier, 1999). Cet enrichissement des eaux est dû à l'apport d'eaux chargées en sels nutritifs du fleuve, du fait de l'activité agricole et industrielle sur le bassin versant de la Seine (Dauvin, 2008). Seize millions d'habitants occupent ce bassin, et sa superficie est de l'ordre de 79.000 km^2 (Figure 2-21) ; on y retrouve trois villes majeurs (Rouen, le Havre et Paris).

Les caractéristiques hydrologiques et hydrodynamiques de la baie de Seine sont très complexes. Des forts vents et courants de marée sont également rencontrés dans cette zone, et créent des houles au large (Le Hir et Silva-Jacinto, 2001). Les vents provenant du nord entraînent une agitation dans la baie de Seine. Les courants de marée peuvent atteindre les 2,5 $m.s^{-1}$ en vive eau dans la baie et le marnage peut atteindre les 3 m en mortes eaux et près de 8 m en vives eaux au Havre. Une double pleine mer et une double basse mer sont caractéristiques de cette zone macrotidale (une marée de type semi-diurne).

L'estuaire de la Seine s'étend du barrage de Poses en amont jusqu'à la partie orientale de la baie. Cet estuaire présente une morphologie sinueuse (Figure 2-22), et le lit du fleuve possède une largeur et une profondeur variables. Dans sa partie amont à Rouen, la

largeur de la Seine est plus stable et de plus faible profondeur. Une succession de fosses d'une profondeur de 12 m est rencontrée entre Rouen et Caudebec. En Amont de Caudebec, on rencontre des fosses mais de taille rétrécie ; la largeur de la Seine dans cette zone est de l'ordre de 140 m (GIP Seine-Aval, 2008a).

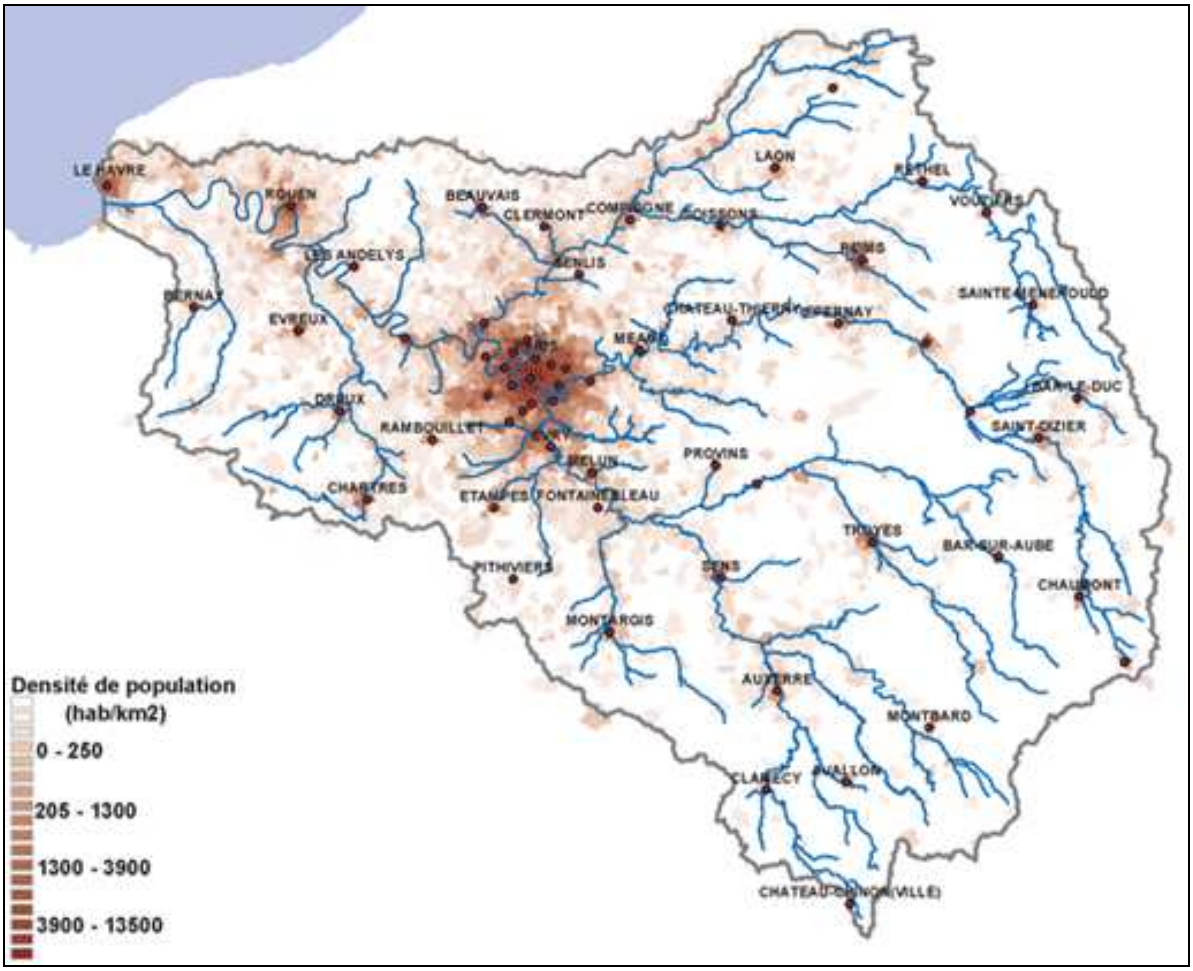

Figure 2-21 : Le bassin de la Seine, densité de la population (nombre d'habitant au km^2*). (Source : Seine-Aval, http://seine-aval.crihan.fr).*

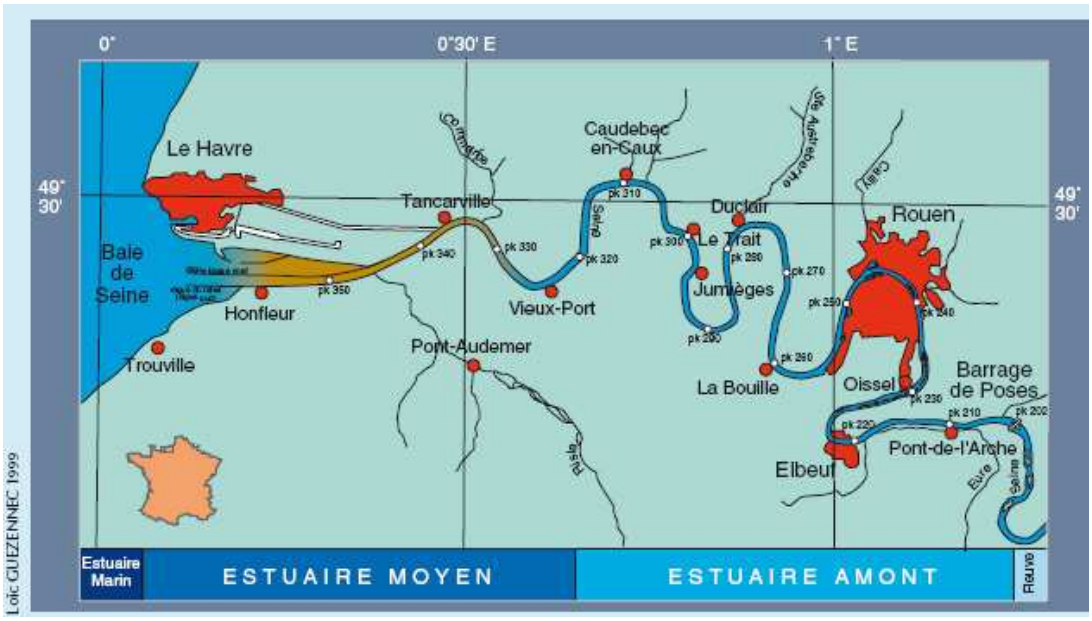

Figure 2-22 : L'estuaire de la Seine et son embouchure : une morphologie sinueuse de l'estuaire à partir de Poses jusqu'à Tancarville. L'estuaire est découpé en 3 zones : l'estuaire aval ; l'estuaire moyen à partir du Vieux port jusqu'à Honfleur et l'estuaire amont du Vieux port à Poses. (Source : Guézennec, 1999).

Les marées, le vent et les apports d'eaux douces sont des forçages caractéristiques de cet estuaire. Les courants de marées provenant de la Manche se propagent dans l'embouchure et l'onde de marée subit des modifications lors de sa propagation dans l'estuaire (Avoine et al., 1985a). La figure 2-23 de Guézennec (1999) illustre bien la propagation de l'onde de marée dans l'estuaire de la Seine, lors d'un faible débit et lors d'un coefficient de marée de 101. Guézennec (1999) montre que du fait sa bathymétrie (de la forme de l'estuaire de la Seine), l'estuaire de la Seine produit une déformation de l'onde de marée lors de son parcours dans l'ensemble de l'estuaire.

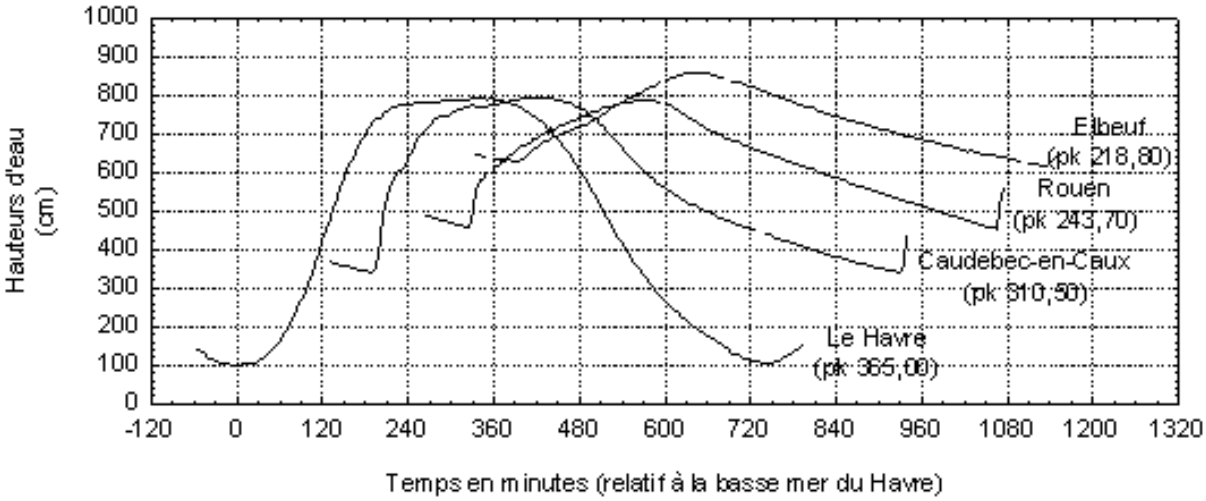

Figure 2-23 : La propagation de l'onde de marée : déformation de l'onde de marée au cours de sa pénétration dans l'estuaire de la Seine ; au Havre, elle possède une allure sinusoïdale et une allure asymétrique à Rouen (le 5 mai 1996, coefficient de 101 et un débit de 200 m^3/s).(Source : Seine-Aval, http// www. seine-aval.crihan.fr).

La variabilité du volume d'eau dans l'estuaire est très marquée du fait de la succession variable des basses mers et des pleines mers. L'influence du débit du fleuve est également très forte en raison de ses grandes variations (Le Hir et Silva-Jacinto, 2001 ; Huang et al., 2009).

L'estuaire est découpé en trois zones distinctes (Fairbridge, 1980) (Figure 2-22) : l'estuaire en amont de Poses au Vieux Port où les eaux douces sont soumises à la marée ; l'estuaire moyen (du Vieux Port à Honfleur), zone de variation de la salinité ; et l'estuaire aval ou estuaire marin de Honfleur à la partie orientale de la baie de Seine.

Au niveau de l'estuaire amont, l'hydrodynamisme est fluvial, le marnage atteint les 3 ou 4 m en vives eaux. Dans l'estuaire moyen, le fleuve est soumis à l'alternance de la marée (lors des forts courants). Au niveau de l'estuaire aval se trouve ce qu'on appelle le « bouchon vaseux », qui constitue un lieu de stockage provisoire pour les matières en suspension (MES) apportées par les rivières (Avoine et Crevel, 1985b). Le bouchon vaseux est mobile, et le flot, le jusant ou le débit du fleuve gouvernent son déplacement de l'amont en aval de l'estuaire. De fortes turbidités sont donc rencontrées dans cet estuaire.

La baie de Seine, y compris son estuaire, ne laissent les scientifiques ou la population locale indifférents face aux problèmes que rencontre cette zone de la Manche :

des problèmes liés aux aménagements avec la mis en place des infrastructures portuaires, des dragages (Guézennec et al., 1999) ou liés aux pollutions (Minier et Amara, 2009), avec le développements de certaines toxines (toxines diarrhéiques, paralysantes ou amnésiantes) par les *Dinophysis*, *Alexandrium* et *Pseudo nitzschia* (des algues). La Seine révèle une contamination métallique en composés organiques : en Polychlorobiphényles (PCB), en Pesticides Organochlorés, en Herbicides du groupe des Triazines, et en Hydrocarbures Aliphatiques Polycycliques (HAP) (Cachot et Dégremont, 2009). Certaines actions environnementales sont menées par les gestionnaires de l'environnement, tels que les associations de pêcheurs et chasseurs, les collectivités territoriales, la réserve naturelle, le parc naturel régional, dans l'estuaire de la Seine. Ces actions visent à la restauration de la faune, la flore, les écosystèmes.

Le programme de recherche scientifique pluridisciplinaire Seine-aval et le GIP (Groupement d'Intérêt Public) qui fédère les collectivités publiques et les partenaires privés permettent d'organiser et de développer les recherches concernant le fonctionnement de l'estuaire de la Seine.

2. Dynamique journalière, saisonnière et valeurs manquantes

Les données provenant de la station MAREL Honfleur possèdent, comme c'est le cas en général, un taux relativement élevé de valeurs manquantes. Le nombre de données de chacune des séries varie de 270.000 à 370.000 avec un pourcentage de valeurs manquantes proche de 50 % (Tableau 2-4). La figure 2-24 représente la densité de probabilité de la durée des interruptions à Honfleur. Un pic à 3 h et 7 minutes est clairement visible, indiquant les interruptions régulières associées à la maintenance. Il faut noter également que des interruptions régulières de mesure surviennent à marée basse à Honfleur. Lorsque la hauteur d'eau est insuffisante sous la station de mesure, la station se met en arrêt. Les mesures se font à marée basse lorsque le coefficient de marée est supérieur ou égal à 54. Et « la côte minimale pour qu'il y'ait une mesure est de 2m 60 C M » (CETMEF[16], 2005).

[16] CETMEF : Centre d'Etudes Techniques Maritimes et Fluviales.

Tableau 2-4 : Les paramètres biogéochimiques mesurés à Honfleur. Nombre de données et pourcentage d'acquisition de chaque série temporelle

	MAREL Honfleur	
Capteur	**Nombre de données**	**% d'acquisition**
Température	369.335	65
pH	296.644	53
Oxygène dissous	275.689	48
Turbidité	358.986	63
% saturation en oxygène	275.944	48
Salinité	297.260	52

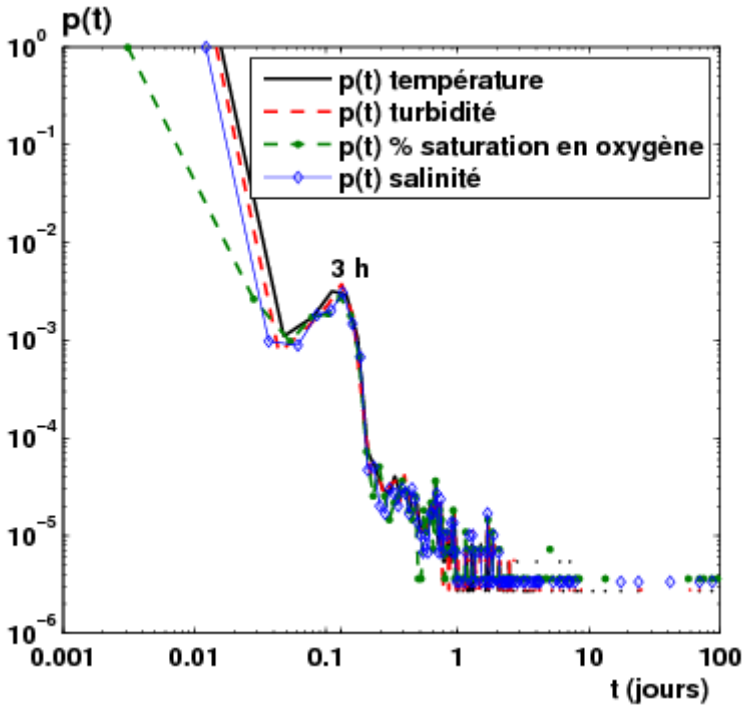

Figure 2-24 : Densité de probabilité des durées d'interruption pour les séries de température, de turbidité, du pourcentage de saturation en oxygène et de salinité mesurées à Honfleur. Les allures sont similaires pour toutes les séries. La bosse a le même maximum pour chaque série, pour une durée d'environ 3 h, correspondant à des activités de maintenance.

La température de l'eau de mer mesurée à Honfleur possède une évolution visuellement périodique (Figure 2-25). La forte variabilité dans les données de température est en partie masquée par cette périodicité récurrente (annuelle). La comparaison des températures moyennes de surface de la série entre 1996 et 2007 est représentée dans le tableau 2-5. La série des températures moyennes annuelles montre une stabilité au cours de ces 10 années (Figure 2-26). L'année 1996 est une année incomplète (début de la série le 3 décembre 1996). Seule l'année 1997 se démarque des autres avec la valeur moyenne la plus élevée (à 15,01 °C). Les valeurs maximales journalières les plus élevées sont enregistrées en 2003 et en 2006.

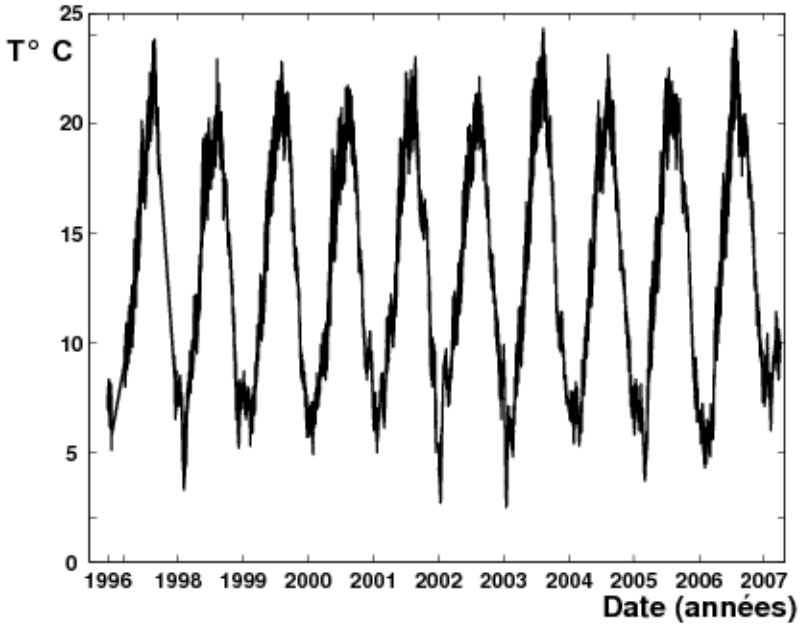

Figure 2-25 : La série de température de 1996 à 2007. Une périodicité est visible dans l'évolution de la température de 1996 à 2007.

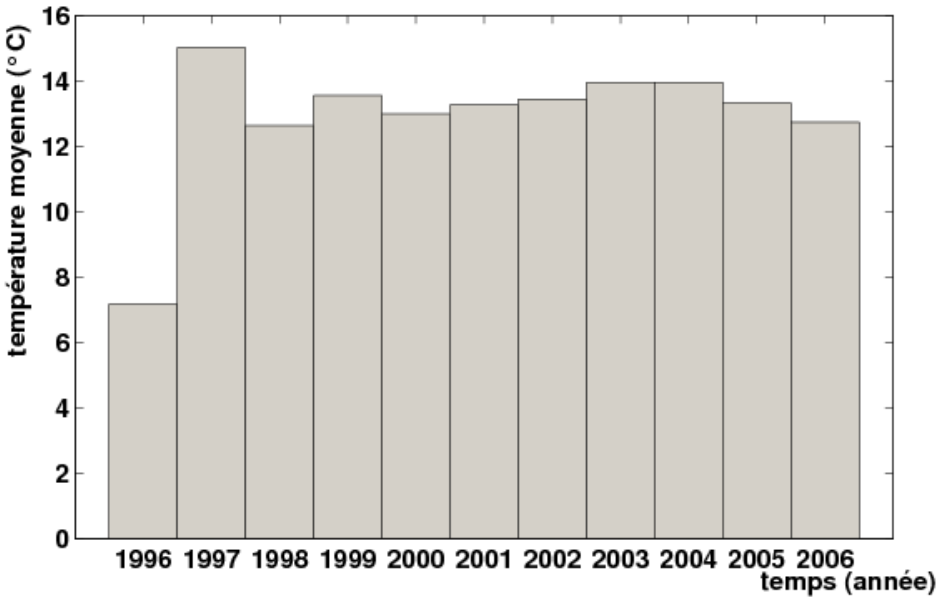

Figure 2-26 : L'évolution des températures moyennes annuelles de 1996 (année incomplète) à 2006. On constate une stabilité de la température moyenne. Depuis 2003, il y a une légère tendance à la décroissance.

La figure 2-27 représente la durée en jour de deux événements extrêmes : les valeurs supérieures et inférieures aux percentiles 90 et 10 respectivement. Les seuils estimés sont de l'ordre de 20 °C et de 6,5 °C correspondants aux percentiles 90 (pour les températures les plus chaudes) et 10 (pour les températures les plus froides) respectivement. Pour les valeurs de température supérieures au percentile 90, on constate que la durée des événements est très variable (de 1997 à 2006) comparé aux valeurs inférieures au percentile 10, où la durée des températures les plus froides est en nette augmentation de 1996 à 2006 (Figure 2-27).

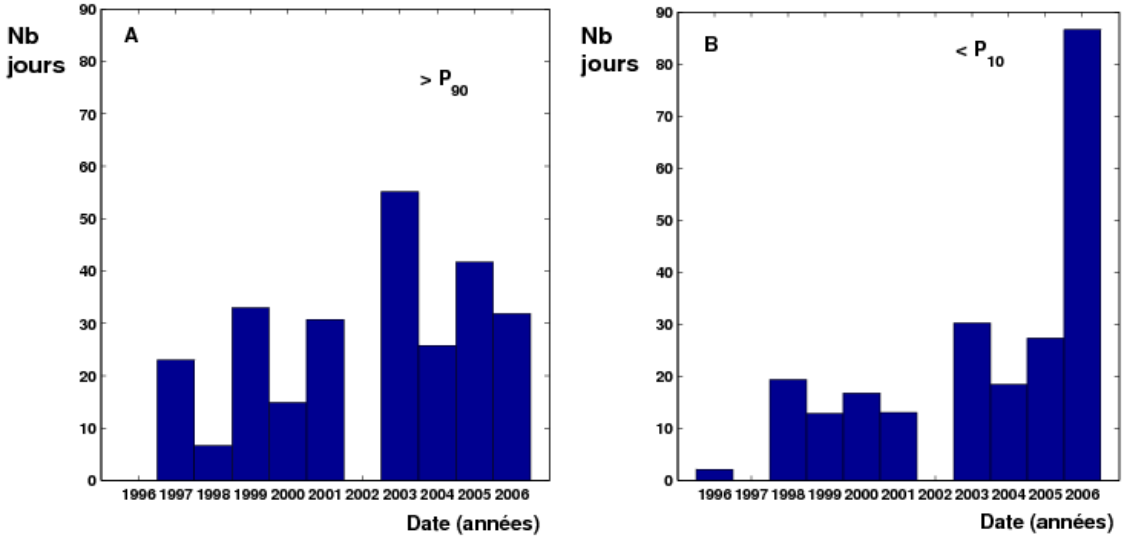

Figure 2-27 : L'évolution de la durée en jours de temps de résidence dans des événements extrêmes de 1996 à 2007. Le percentile 90 (P_{90}) *est de 20 °C et le percentile 10* (P_{10}) *est de 6,5 °C. Ces graphes indiquent donc pendant combien de temps il a fait « très chaud » et « très froid », chaque année. La première figure (A) possède comme on pouvait s'y attendre un pic pour l'année 2003 ; d'une année sur l'autre on constate une assez forte variabilité, et pas de tendance claire. La figure B indique par contre une forte augmentation en 2006 de la durée des événements « très froids ». Globalement sur la série, on constate une tendance à l'augmentation de la durée de ces périodes froides.*

La salinité mesurée possède de fortes fluctuations et une très forte variabilité interannuelle (Figure 2-28). La comparaison des teneurs moyennes de salinité entre 1996 et 2006 (voir Tableau 2-5), donne pour l'année 2005 une valeur moyenne la plus élevée (de l'ordre de 28,02). Les valeurs minimales et maximales journalières de salinité varient très fortement et en guise d'illustration la figure 2-29A représente l'évolution des valeurs minimales et maximales journalières pour l'année 1998. La valeur moyenne des valeurs maximales journalières est de l'ordre de 21,43 et la valeur moyenne des valeurs minimales journalières est de l'ordre de 3,28. L'amplitude (Figure 2-29B) moyenne est de l'ordre de 18,14 avec une valeur d'amplitude minimale et maximale de 3,2 et 26,2 respectivement.

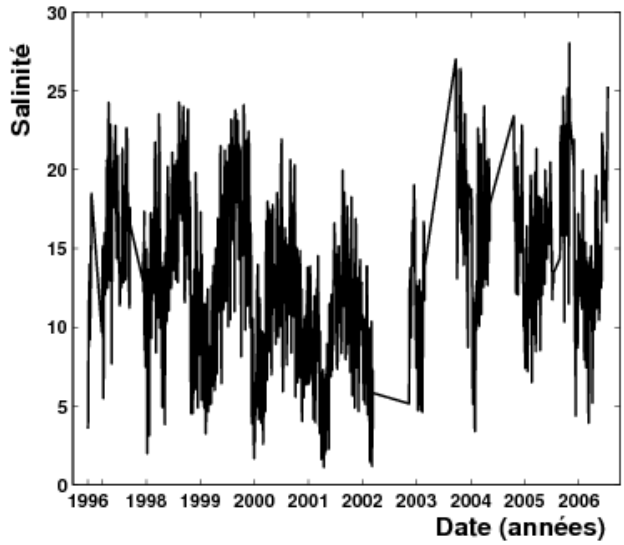

Figure 2-28 : La série temporelle de salinité de 1996 à 2006. Cette figure indique de fortes fluctuations de la salinité.

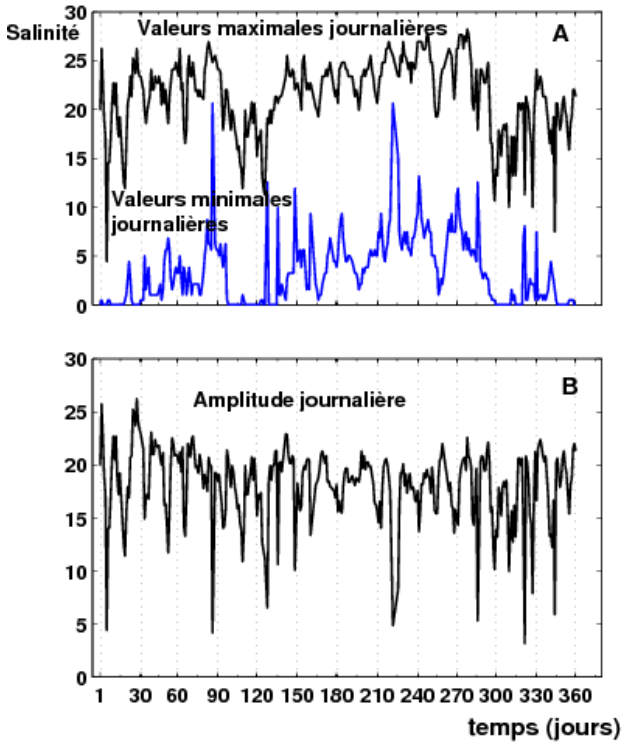

Figure 2-29 : (A) : la variation des valeurs minimales et maximales journalières, (B) : variation de l'amplitude journalière $(salinité_{max} - salinité_{min})$ *de l'année 1998. La forte valeur de l'amplitude journalière (en moyenne proche de 20) est caractéristique d'un estuaire.*

La figure 2-30 représente l'évolution au cours du temps de la turbidité : elle met en évidence une évolution annuelle avec des valeurs très importantes de 1996 à 2007. Les données de turbidité ne révèlent pas une évolution saisonnière, à l'inverse de la température. La figure 2-31 montre une variabilité de la turbidité sur une échelle de 16 jours. Les valeurs moyennes de turbidité entre 1996 et 2007 varient de 130 à 250 NTU (voir Tableau 2-5). On observe également une variabilité et tout de même une périodicité dans les valeurs minimales et maximales journalières (Figure 3-32). Des valeurs minimales journalières sont comprises entre 1 et 69 NTU contre des valeurs maximales qui sont comprises entre 11 et 2.800 NTU (Figure 2-32A). L'amplitude journalière est très forte et varie de 1 à 2.700 NTU (Figure 2-32B).

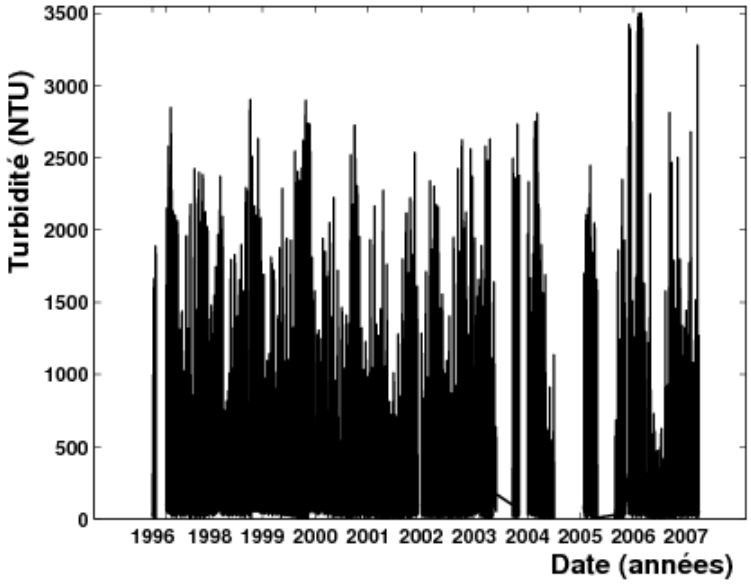

Figure 2-30: Evolution du paramètre turbidité de 1996 à 2007. De fortes fluctuations sont visibles dans cette figure.

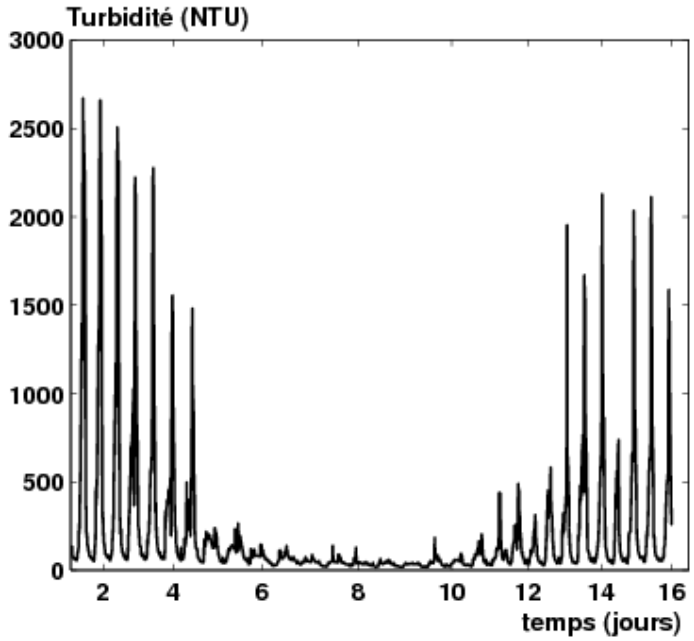

Figure 2-31 : Evolution de la turbidité sur une durée de 16 jours : on note une variabilité importante indiquant une très forte composante périodique associé à la marée et le cycle vive eau et morte eau (VE/ME).

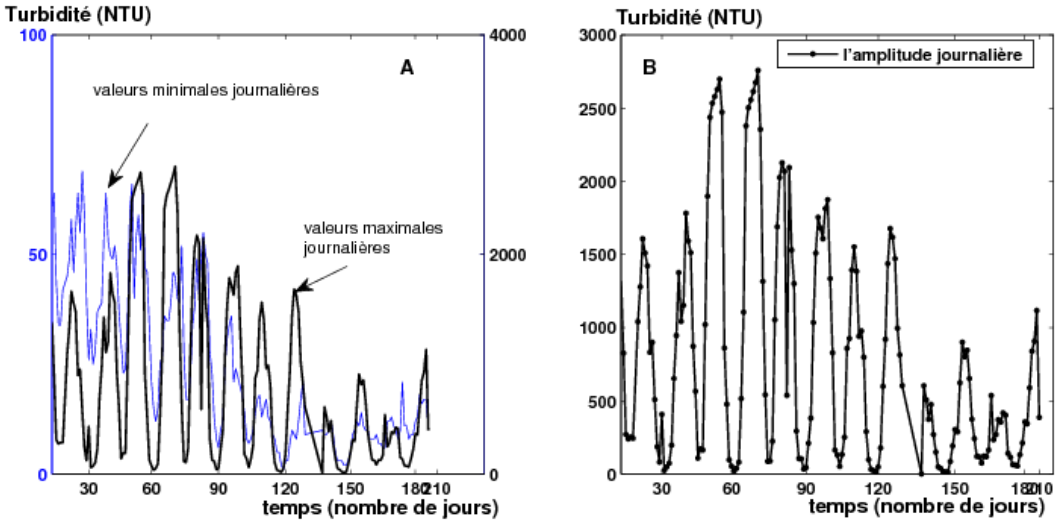

Figure 2-32 : (A) : les valeurs minimales et maximales journalières de turbidité (estimée pour l'année 2004), montrant une variabilité mais également une certaine périodicité, (B) : l'amplitude journalière montrant également une périodicité.

Tableau 2-5 : Les moyennes annuelles et valeurs minimales et maximales annuelles pour chaque paramètre (température, salinité et turbidité)

	Température °C			**Salinité**			**Turbidité (NTU)**		
	Mean	**Min**	**Max**	**Mean**	**Min**	**Max**	**Mean**	**Min**	**Max**
1996	7,16	5,10	8,30	11,38	3,60	18,50	248,70	24,00	1889
1997	15,01	6,50	23,80	15,98	5,50	24,30	193,80	2,00	2845
1998	12,63	3,30	22,90	15,53	1,90	24,30	192,90	14,00	2901
1999	13,55	5,30	22,80	14,36	2,50	24,10	209,90	1,00	289,5
2000	12,99	4,90	21,70	11,44	1,70	21,90	146,80	8,00	2728
2001	13,26	5,00	23,00	9,87	1,10	19,90	130,10	1,00	2535
2002	13,43	2,70	22,10	9,67	1,20	19,00	147,30	8,00	2621
2003	13,95	2,50	24,30	15,62	4,60	26,90	200,30	4,00	2731
2004	13,95	5,30	23,10	15,99	3,40	24,00	156,50	1,00	2804
2005	13,32	3,70	22,50	15,73	4,40	28,00	157,30	3,00	3421
2006	12,74	4,30	24,20	14,34	3,90	25,30	132,80	5,00	3500

Généralement, les eaux de l'estuaire sont très tamponnées, les carbonates et les bicarbonates régulent la concentration du pH. Les eaux les plus proches de l'embouchure enregistrent un pH moins alcalin à cause de la bonne oxygénation de la masse d'eau océanique, moins chargée en matière organique. La série de pH entre 1996 et 2007 révèle de fortes fluctuations (Figure 2-33) analogues à celle registrées par MAREL Carnot (Figure 2-9). On observe de nombreuses fluctuations irrégulières à de multiples échelles (Figure 2-34). Sur la période d'étude, la moyenne annuelle varie de 7,70 à 8,25 UpH, avec des valeurs maximales annuelles qui sont comprises entre 8,0 et 9,6 UpH (Tableau 2-6).

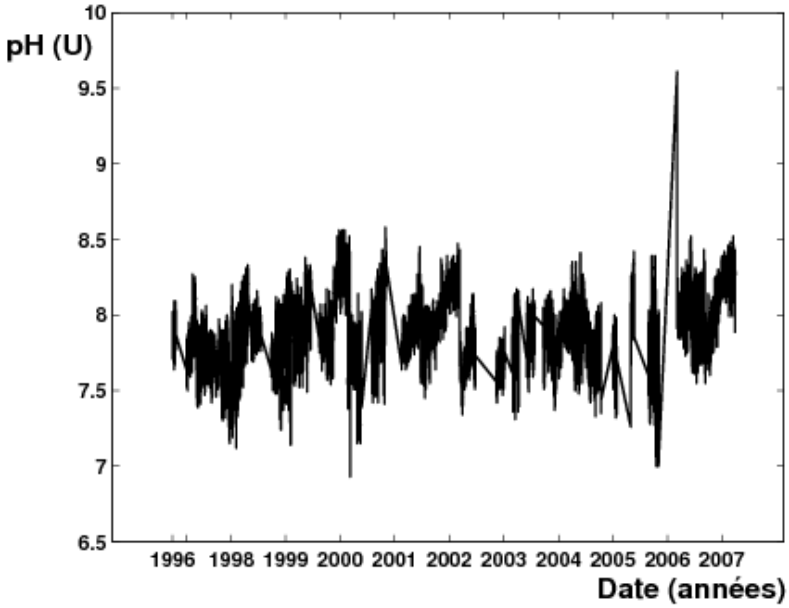

Figure 2-33 : La série de pH de 1996 à 2007. De fortes fluctuations sont visibles dans cette figure.

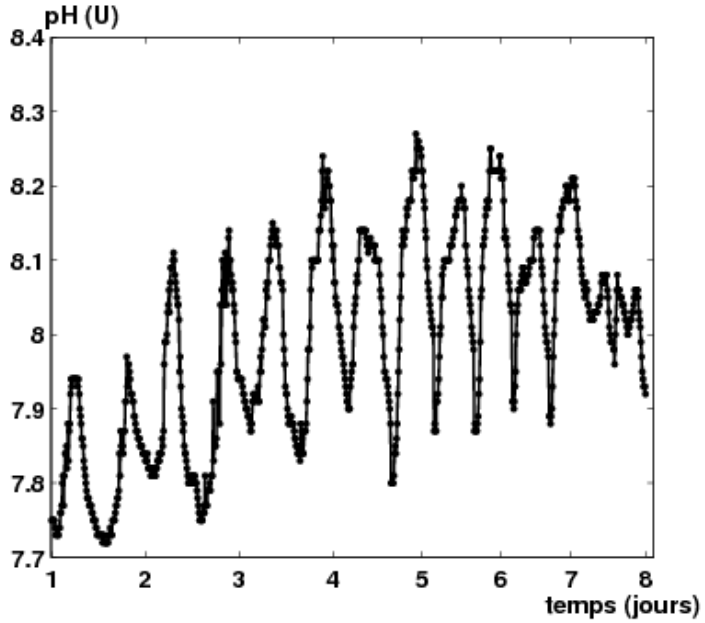

Figure 2-34: Evolution du pH sur une échelle de 8 jours : on constate que sur une période d'une journée, on a typiquement des fluctuations de pH de plus de 0,3 unités.

L'oxygène dissous et le pourcentage de saturation en oxygène (Figure 2-35) possèdent également de fortes fluctuations qui ont des allures analogues. La comparaison des moyennes annuelles montre une faible variabilité interannuelle en 1996 et en 2007 (Tableau 2-6). La figure 2-36 représente l'évolution du pourcentage en saturation sur échelle de 8 jours : on peut noter une évolution approximativement périodique, qui peut être associée au cycle de marée et à l'alternance nuit et jour. Sur une échelle de 12 h (Figure 2-37), les deux paramètres décrivent une même tendance avec des faibles et fortes teneurs pendant la nuit et pendant le jour respectivement. La figure 2-38 présente l'évolution des valeurs minimales et maximales journalière sur une échelle de 31 jours au mois de juillet 1997 du pourcentage de saturation en oxygène. Cette figure révèle une variabilité non négligeable entre les deux tendances et l'amplitude journalière varie de 10 à 48 % en pourcentage de saturation.

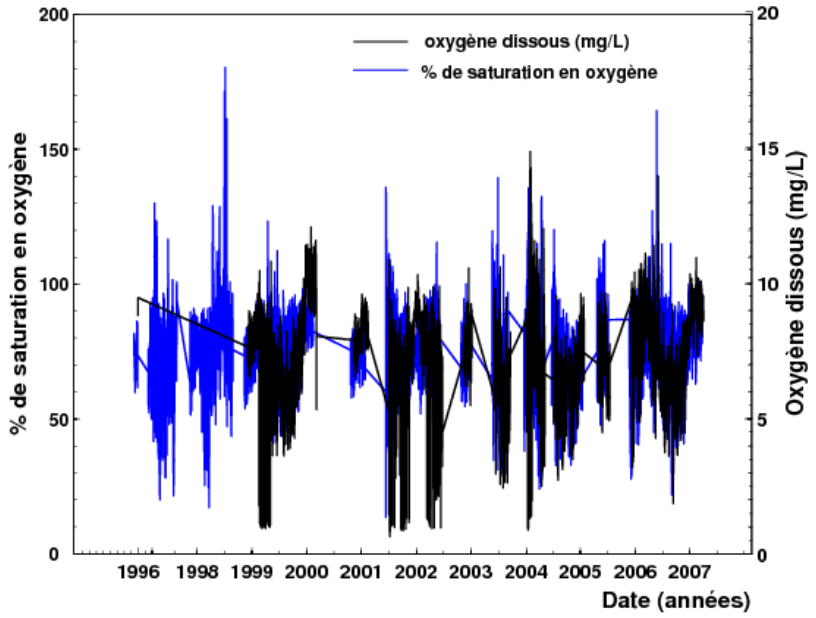

Figure 2-35 : Les séries d'oxygène dissous et saturé. De fortes fluctuations sont visibles dans cette figure.

Tableau 2-6 : Les moyennes annuelles et valeurs minimales et maximales annuelles pour chaque paramètre (pH, oxygène dissous et le pourcentage de saturation en oxygène)

	pH (UpH)			**Oxygène dissous (mg/L)**			**% saturation en oxygène**		
	Mean	**Min**	**Max**	**Mean**	**Min**	**Max**	**Mean**	**Min**	**Max**
1996	7,80	7,64	8,09	9,06	8,79	9,45	73,73	59,80	86,20
1997	7,74	7,15	8,27				74,09	19,90	130,00
1998	7,88	7,12	8,33	7,80	6,47	8,96	78,94	17,00	180,40
1999	7,99	7,14	8,56	7,39	0,95	11,40	76,93	38,60	123,30
2000	7,99	6,93	8,58	9,16	5,33	12,10	80,91	57,80	98,80
2001	7,93	7,45	8,45	7,41	0,64	10,90	76,01	13,30	135,90
2002	7,87	7,34	8,47	7,79	0,94	10,50	75,22	32,40	115,50
2003	7,86	7,31	8,17	6,41	2,43	10,60	75,90	28,80	139,50
2004	7,88	7,33	8,41	7,55	0,89	14,80	77,19	23,90	135,70
2005	7,78	7,00	8,42	7,61	3,19	10,40	77,81	27,60	116,20
2006	8,01	7,55	9,61	7,82	1,87	13,90	79,33	21,70	164,30
2007	8,25	7,88	8,52	9,24	7,31	10,90	85,50	62,90	100,70

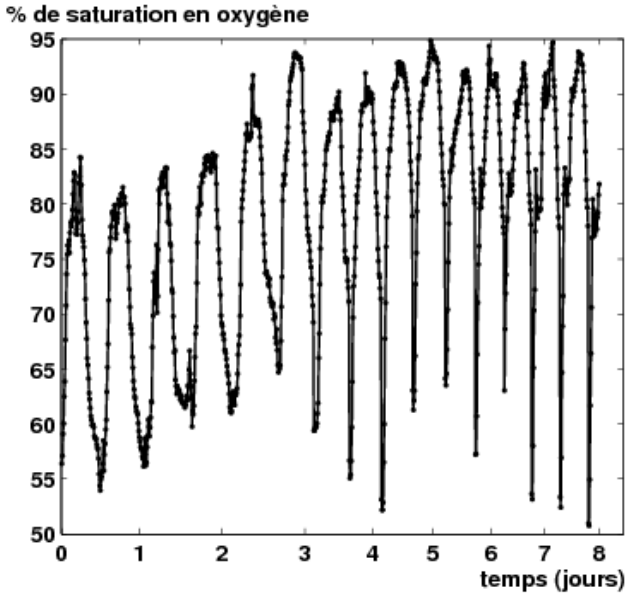

Figure 2-36 : Evolution du pourcentage de saturation en oxygène sur une échelle de 8 jours.

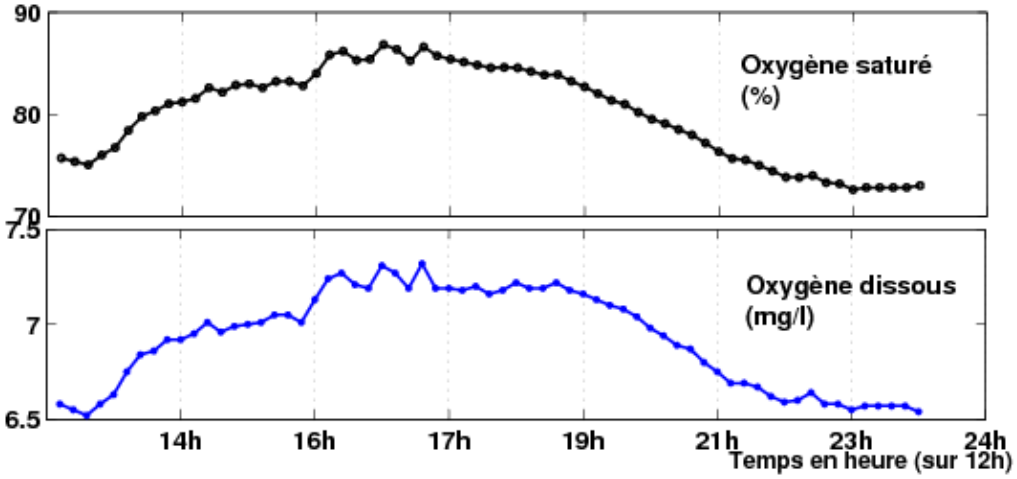

Figure 2-37 : Les séries d'oxygène dissous et du pourcentage de saturation sur une échelle de 12h, indiquant une évolution similaire, avec des fortes teneurs pendant la journée et des faibles teneurs pendant la nuit.

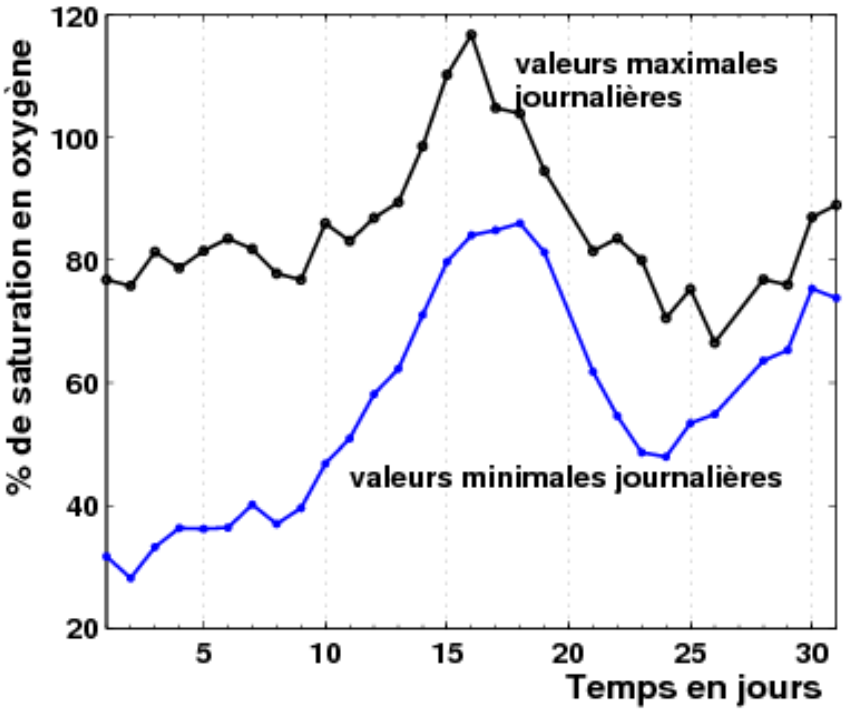

Figure 2-38 : La série du pourcentage de saturation en oxygène sur une échelle de 31 jours, indiquant l'évolution des valeurs minimales et maximales journalières. On note une allure similaire bien visible entre les deux tendances. L'amplitude journalière est non négligeable.

3. Les spectres d'énergie

De par sa localisation dans la baie, la station de Honfleur est soumise à une alternance d'influences marines et continentales selon l'importance des apports d'eaux douce. Ce système complexe se fait ressentir dans la distribution à plusieurs échelles des certains paramètres biogéochimiques (Dur et al., 2007 ; Schmitt et al., 2008). La représentation spectrale (spectre d'énergie de Fourier) des différents paramètres mesurés à Honfleur met en évidence différents régimes et forçages. Le forçage déterministe ou périodique est très visible dans les spectres : par exemple on retrouve dans les spectres des pics importants correspondants au cycle de marée et au cycle annuel.

Afin de séparer les forçages déterministes et périodiques et la variabilité stochastique sous-jacente, nous avons appliqué une méthode permettant d'enlever au signal brut la composante périodique, même lorsque cette composante n'apparaît pas sous la forme d'un pic très net sur le spectre, mais un forçage plus diffus (une « bosse » sur le spectre) (Jeng et Huang, 2004). Cette méthode a été proposée par Dr Yongxiang Huang et inspirée de Jeng et Huang (2004). Il s'agit de la méthode des moindres carrés faisant appel à une fonction gaussienne. Cette méthode repose en fait sur une méthode de lissage avec une moyenne mobile. La moyenne mobile ici est d'ordre 12 (le lissage est effectué sur une échelle de 12h). Nous présentons ici les spectres de données brutes et les spectres des données lissées.

La figure 2-39 représente le spectre d'énergie (données brutes) de la salinité sur une échelle allant de 10 ans à 10 minutes. Il apparaît dans ce spectre d'énergie deux régimes d'échelle :

- ✓ un régime à grande échelle s'étalant de 1 an à 1 jour mettant en évidence un exposant spectral de l'ordre de 1,6.
- ✓ Pour le régime inferieur à 1 jour, l'exposant spectral est de l'ordre de 1,7.

Les pentes de chaque côté du forçage sont très proches. Cela se confirme dans la figure 2-40 (les spectres de données lissées). Cette figure révèle l'influence du forçage stochastique, mettant en évidence un exposant spectral de l'ordre de 5/3 (spectres de température et de salinité). Ceci s'accorde avec l'hypothèse de scalaire passif (de la salinité et de la température) de Obukhov (1949) et de Corrsin (1951) dans le cadre d'une turbulence homogène et isotrope. Ces résultats sont également en accord avec ceux trouvés par

Lovejoy et al. (2001) dans l'estuaire du Saint Laurent. Ils montrent une valeur de l'exposant spectral de la salinité très proche de celui de la turbulence.

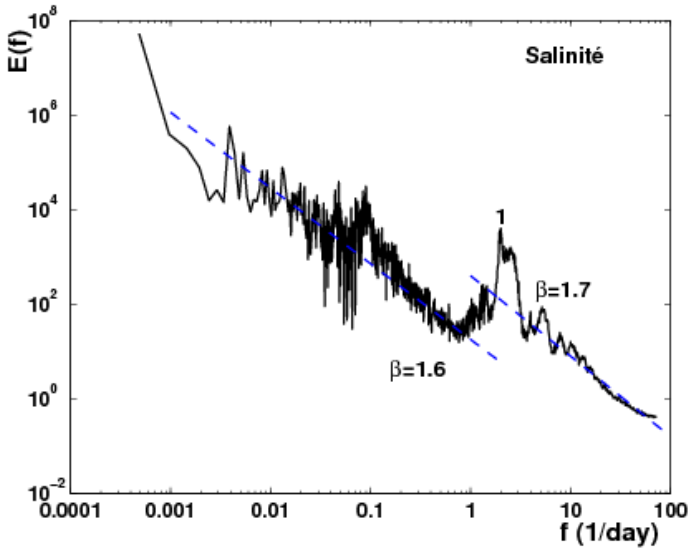

Figure 2-39 : Le spectre d'énergie de la salinité sur une échelle de 10 ans à 10 minutes. On note 2 régimes d'échelle. Un régime pour les échelles inférieures à 1 jour avec une pente de l'ordre de 1,7 et un régime supérieur à 1 jour avec une pente de l'ordre de 1,6. Les deux pentes sont très proches.

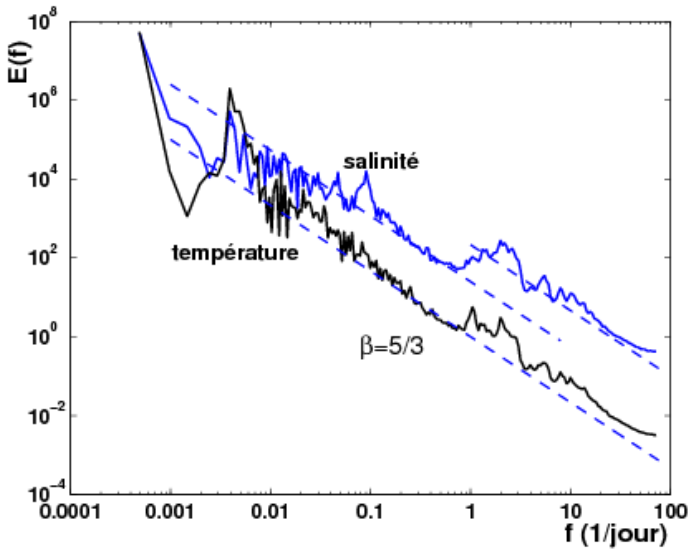

Figure 2-40 : Les spectres d'énergie des données filtrées pour la salinité et de la température sur une échelle de 10 ans à 10 minutes. On note une pente similaire pour les 2 paramètres, qui correspond au scalaire passif. Le spectre de salinité indique une rupture d'échelle à 1 jour.

La figure 2-41 représente les spectres d'énergie (données brutes) de l'oxygène dissous et le pourcentage de saturation en oxygène. Leur comportement spectral indique une rupture de pente. Pour les échelles supérieures à 1 jour, l'exposant spectral est de l'ordre de 1,6. Cette valeur est similaire à celle trouvée par Lovejoy et al. (2001) dans l'estuaire du Saint Laurent (1,66). Pour des échelles inférieures à 1 jour, l'exposant spectral est de 1,22 (Schmitt et al., 2008) pour l'oxygène dissous et 1,7 pour le pourcentage en saturation. On peut supposer que pour les échelles plus fines le pourcentage en saturation est plus influencé par la turbulence. Ces spectres mettent en évidence des forçages périodiques, on note des pics : à 12 h (1) et à 24 h (2), qui correspondent au cycle de marée. Les figures 2-42 et 2-43 représentent les spectres d'oxygène (données lissées) pour le forçage stochastique, on note une bonne invariance d'échelle, avec un exposant spectral de 1,22 (Schmitt et al., 2008).

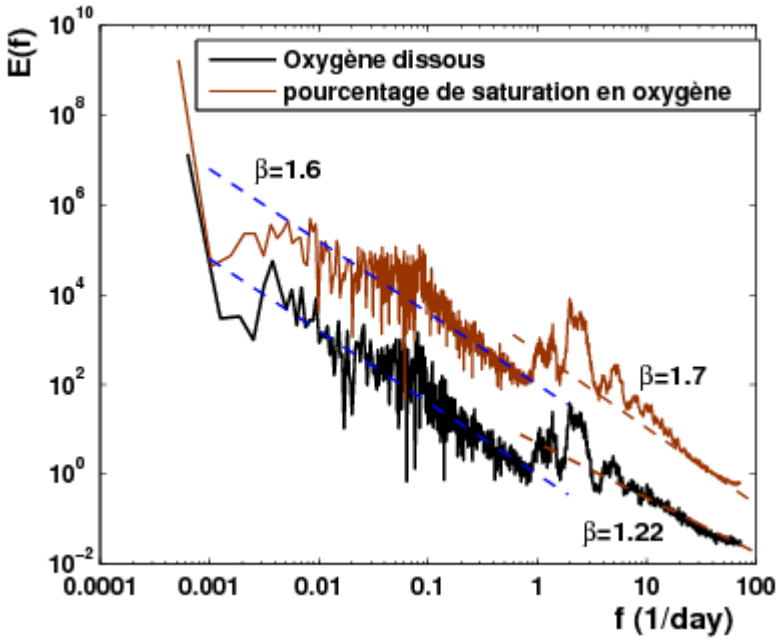

Figure 2-41 : Les spectres d'énergie de l'oxygène dissous et saturé sur une échelle de 10 ans à 10 minutes. On observe 2 régimes d'échelle.

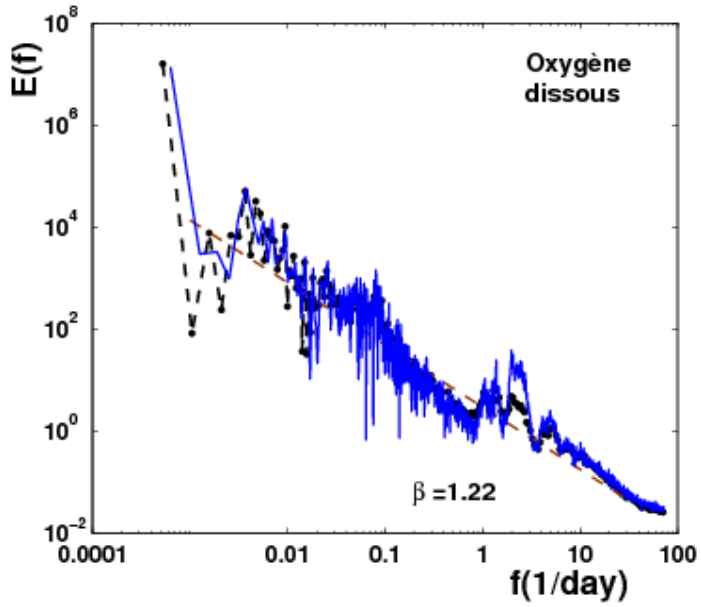

Figure 2-42 : Les spectres d'énergie de l'oxygène dissous des données brutes (trait plein) et des données filtrées ou lissées (trait pointillé) révélant une invariance d'échelle avec un exposant spectral de 1,22.

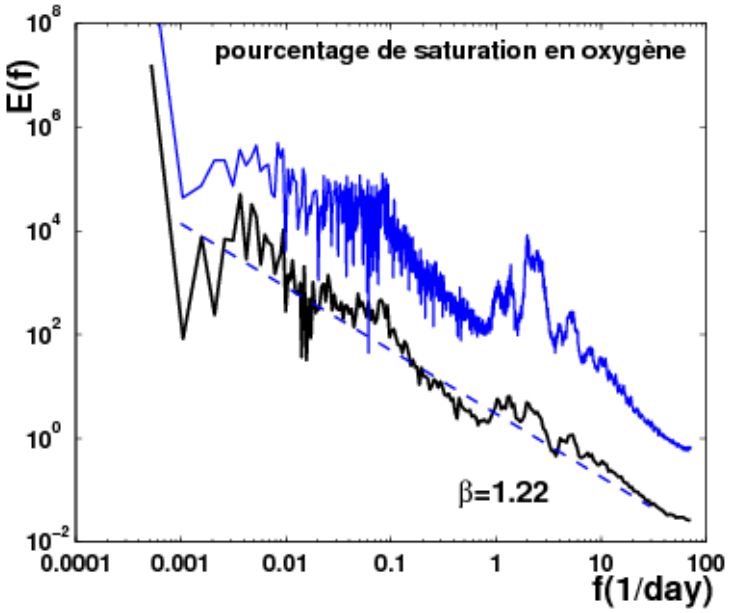

Figure 2-43 : Les spectres d'énergie des données brutes (trait clair) et filtrées ou lissées (trait foncé) de l'oxygène saturé. Le spectre de données lissées montre une invariance d'échelle avec un exposant spectral de l'ordre de 1,22.

Le spectre de turbidité (données brutes) indique également une rupture d'échelle (Figure 2-44), cette rupture de part et d'autre indique une invariance d'échelle avec une pente de l'ordre de 1,5. Les forçages périodiques sont également bien visibles dans ce spectre, on note des pics à 12 h (1), à 27,6 jours et à 1 an. La figure 2-45 représente le spectre de turbidité (données lissées) pour le forçage stochastique. Ce spectre de données lissées révèle une bonne invariance d'échelle avec une pente de 1,5 (Schmitt et al., 2008). Cette pente est différente, mais proche de celle de la turbulence : on peut supposer que la variabilité dans les teneurs de la turbidité est due d'une part principalement à la turbulence mais également au débit du fleuve.

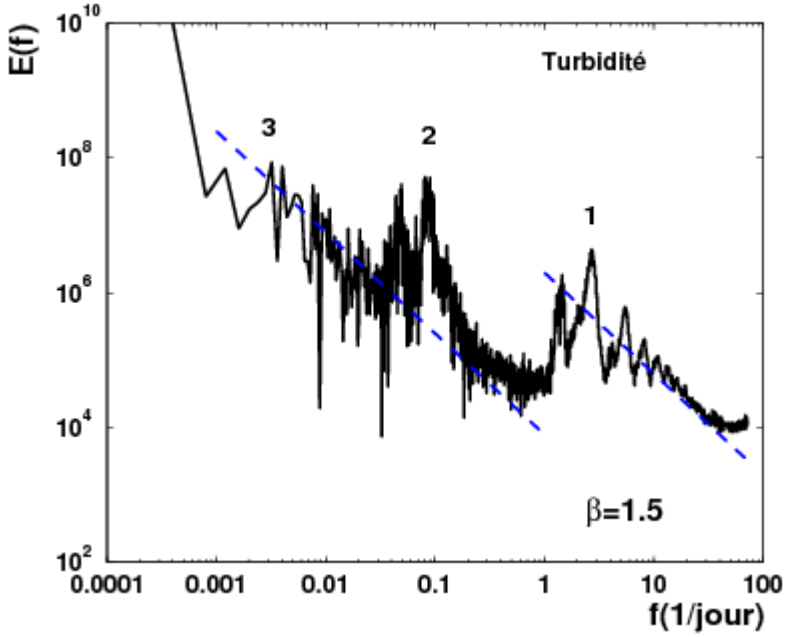

Figure 2-44 : Le spectre d'énergie de la turbidité indique 2 régimes d'échelle, et des pics importants à 12 h (1), à 10 jours (2) et à 1 an (3) qui correspondent aux forçages périodiques.

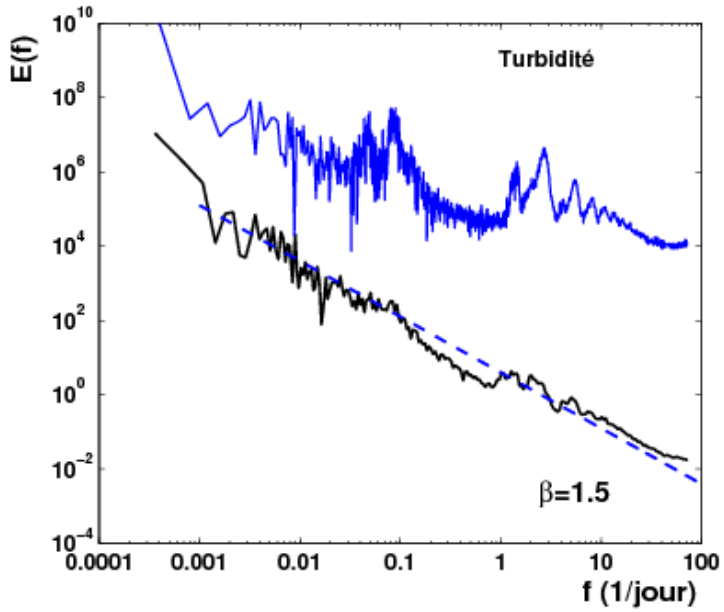

Figure 2-45 : Les spectres d'énergie des données brutes (trait clair) et lissées (trait foncé) de la turbidité ; le spectre de données lissées révèle une invariance d'échelle avec une pente de l'ordre de 1,5.

Le tableau 2-7 donne les rapports d'échelle pour chaque série : ceci permet de récapituler sur quelle gamme s'échelle les lois d'échelles mentionnées ici ont été détectées. Les rapports en question sont en fait très élevés, confirmant que ces fluctuations environnementales ont des comportements invariants d'échelles, superposés à des forçages périodiques.

Tableau 2-7 : Les valeurs de β et le rapport d'échelle pour chaque paramètre. Ces rapports d'échelles sont très importants

	Valeur de β	**Rapport d'échelle**
	Grandes échelles	Régime inertiel
Salinité	1,6	36.10^3
Oxygène dissous (mg/L)	1,6	29.10^3
% de saturation en oxygène	1,6	36.10^3
Turbidité (NTU)	1,5	72.10^3

D. Comparaison multi-sites : cas de la température, du pH et de l'oxygène dissous

Dans cette section, nous comparons plusieurs sites situés le long du littoral de la Manche. Nous considérons pour cela les séries de température, du pH, et de l'oxygène dissous à l'équilibre. Les sites considérés sont (Figure 2-46) :

- La baie de Seine (les deux stations « marines » du réseau MAREL Baie de Seine, La Carosse et la Grande rade) ;
- L'estuaire de la seine (la station MAREL Honfleur) ;
- La zone côtière en Manche orientale (la station MAREL Carnot);
- La zone côtière en Manche occidentale (la station de mesure à Roscoff, sur le site Estacade).

La longueur de chaque série varie selon la période des mesures pour chaque site (Tableau 2-8).

Tableau 2-8 : Les sites et les stations de mesure indiquant la durée des mesures

Zone	**Baie de Seine**			**Bassin oriental**	**Bassin occidental**
Station de mesure	**La Carosse**	**Grande Rade**	**Honfleur**	**MAREL Carnot**	**Roscoff (Estacade)**
Période de la mesure	7,5 ans Du 8/09/1999 au 19/04/2007	5,3 ans 2/02/1999 au 19/05/2004	10,5 ans Du 3/12/1996 au 2/04/2007	5 ans Du 24/03/2004 au 24/03/2009	3,5 ans Du 13/07/2005 au 19/11/2008

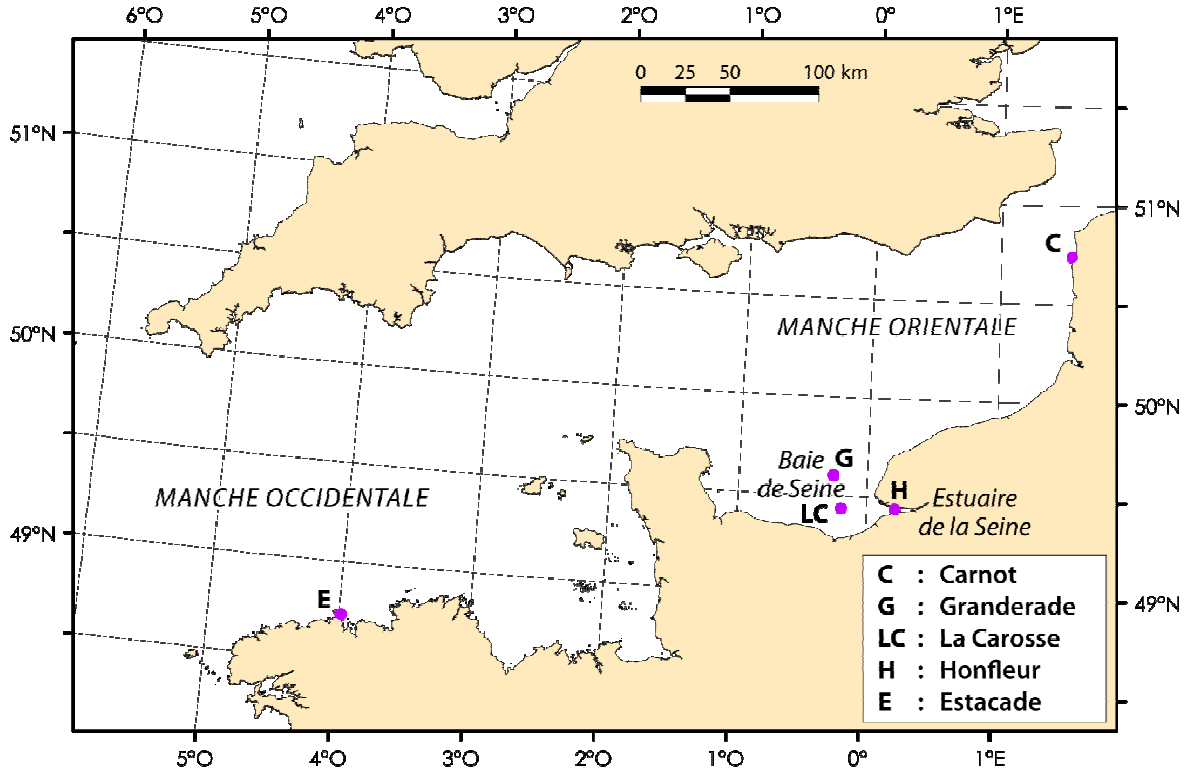

Figure 2-46 : La Manche : le bassin oriental avec la baie de Seine, ouvert vers la Mer du Nord; le bassin occidental ouvert vers l'Atlantique (Source : Denis Marin ; LOG).

1. La température, scalaire passif

La figure 2-47 représente l'évolution de la température, avec une superposition pour les 4 sites. Pour des raisons de visualisation, les séries sont superposées sur une période plus réduite de 2 ans (2006 et 2007) en figure 2-48. Pour mettre en évidence l'écart thermique entre les 2 stations situées aux 2 extrêmes de la Manche (Roscoff et Wimereux), on représente la différence de température $(T_w - T_R)$ en figure 2-49A. Cette figure indique que l'amplitude thermique sur l'année est toujours plus importante à Wimereux (Manche orientale) qu'à Roscoff (Manche occidentale). Ceci provient sans doute d'un effet d'inertie plus marqué à Roscoff en raison de l'influence de l'océan Atlantique. Comparées aux mêmes périodes, on constate que de l'automne à l'hiver, les températures les plus élevées sont enregistrées à Roscoff. Ce constant avait déjà été fait par Dauvin et al. (1991), pour les

séries de température hivernales à Roscoff de 1989 et 1990, qui montraient des températures constamment supérieures à 10,30 °C. Dauvin et al. (1989, 1991) expliquaient que ces hivers doux étaient dû au fait que les eaux côtières de Roscoff sont soumises aux conditions climatiques locales mais également à influence des mouvements océaniques généraux. En outre on constate que les périodes du printemps à l'été, les températures les plus importantes sont enregistrées à Wimereux (Figure 2-49A). La figure 2-49B représente la différence $T_w - T_R$ en valeurs absolues. L'écart maximal de température est de l'ordre de 3,84 °C. L'écart de température (Wimereux et Roscoff) devient parfois nul : les courbes de différence de température se croisent. Les croisements ont été constatés en 2007 en avril et en octobre.

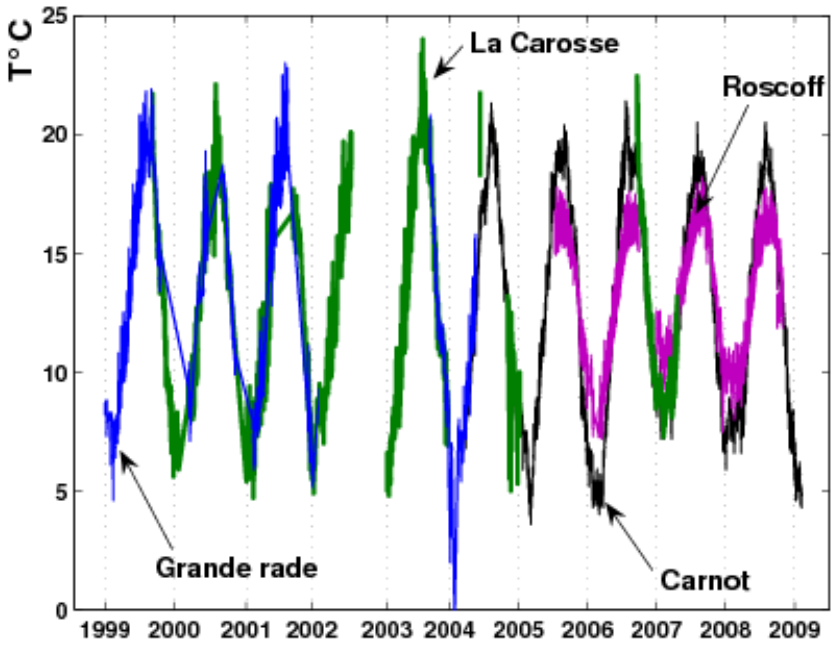

Figure 2-47 : Température enregistrée en continu en Manche orientale (Carnot) : de 2004 à 2009 ; en Manche occidentale (Roscoff) : 2004 à 2008 ; et en baie de Seine (La Carosse et Grande rade) : de 1999 à 2007, et de 1999 à 2004, respectivement. Les températures indiquent une évolution similaire. Roscoff (Estacade) révèle les températures les plus froides, et Carnot, La Carosse et Grande rade enregistrent les températures les plus chaudes.

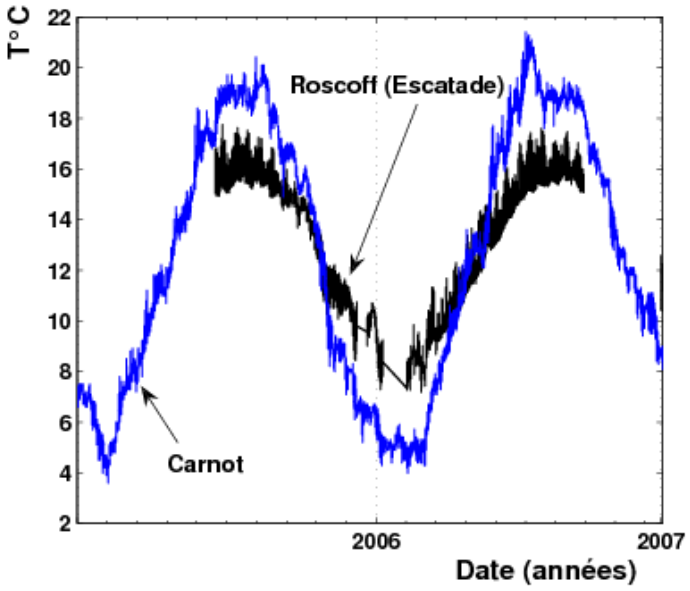

Figure 2-48 : Température enregistrée en continu en Manche orientale (Carnot) et en Manche occidentale (Roscoff) : de 2006 à 2007. Les températures révèlent une évolution similaire mais Roscoff (Estacade) possède plus d'inertie : températures les plus chaudes en hiver comparées à Carnot, et plus froides en été.

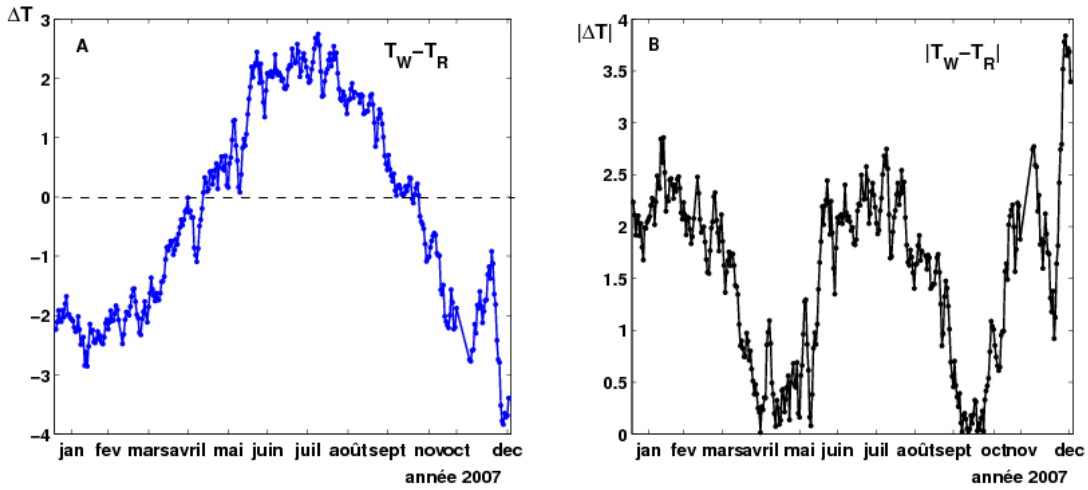

Figure 2-49: L'écart de température $\Delta T = T_w - T_R$ (Wimereux (Carnot) et Roscoff (Estacade)) sur l'année 2007 : (A) l'amplitude thermique sur cette année montre deux tendance autour de ''0'', en dessous de $\Delta T = 0$, Roscoff enregistré les températures les plus importantes et au dessus de $\Delta T = 0$, Wimereux indique des températures plus élevées ; (B) l'amplitude thermique est très variable et varie de 0 à 3,84 °C. L'écart est maximum en plein été (juin-juillet) et en plein hiver (décembre-janvier).

Les valeurs de température les plus élevées et les plus faibles sont enregistrées en Manche orientale (MAREL Carnot). En baie de Seine, les températures sont quasi identiques dans les deux sites. Les eaux en baie de Seine sont les plus chaudes et notamment au niveau de la station La Carosse (station implantée à l'entrée de l'embouchure de l'estuaire de la Seine).

La comparaison des spectres d'énergie entre stations de mesure met en évidence une invariance d'échelle pour chacune des séries (Figure 2-50). Pour les grandes échelles supérieures à 3 mois, les 4 spectres sont superposables. Deux groupes sont clairement visibles dans cette figure, pour les échelles inferieures à 3 mois ; un premier groupe pour les eaux marines en baie de Seine et un deuxième groupe pour les eaux marines en Manche (Carnot et Roscoff). On note qu'à une échelle plus fine, la distribution de la température diffère d'un site à l'autre.

Les spectres d'énergie en baie de Seine sont quasi superposables avec un décalage pour des échelles inférieures à 1 jour. Les stations situées en Manche orientale et en Manche occidentale ont des spectres de température assez proches. L'énergie associée au cycle de marée apparaît différente selon les sites considérés. Ces spectres indiquent 2 pics importants à 12 h et à 24 h. Le spectre de température en Manche occidentale possède des pics plus importants qu'en Manche orientale, indiquant que ces forçages y sont plus importants.

Les spectres de ces quatre sites révèlent un exposant spectral proche de celui de la turbulence, ce qui confirme l'hypothèse de scalaire passif de la température (Monin et Yaglom, 2007).

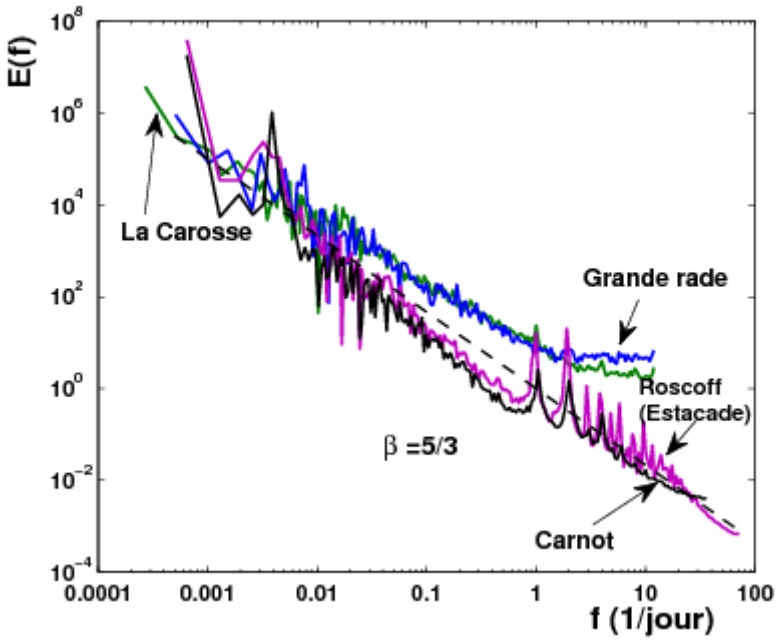

Figure 2-50 : Spectres d'énergie de la température pour les 4 sites de mesure : ceci montre une très bonne invariance d'échelle avec une pente proche de 5/3. Deux comportements se dessinent : pour les échelles supérieures à 100 jours, les 4 spectres sont superposables. Pour les échelles inférieures 100 jours, on note un décalage entre les spectres en baie de Seine et les deux sites en Manche.

2. Le pH, scalaire actif

Nous comparons ici les séries temporelles de pH et nous effectuons la superposition des deux spectres d'énergie (température et pH) pour chaque site (Carnot, Grande rade, La Carosse et Honfleur) (Figure 2-51). Le spectre de température est pris ici comme référence en tant que scalaire passif. Les spectres d'énergie de pH obtenus montrent un assez bon régime d'échelle avec un exposant spectral de l'ordre de 1,5 pour Carnot, La Carosse et Grande rade et 1,2 pour Honfleur (Tableau 2-9). L'exposant spectral de Honfleur est en dessous de celui des trois autres stations.

La différence de pente de la température et celle du pH ($\beta_T - \beta_{pH}$) est comprise entre 0 et 0,2 pour les trois stations « marines » et de 0,45 pour la station estuarienne (Tableau 2-9) : la différence de pente est plus importante dans les eaux estuariennes.

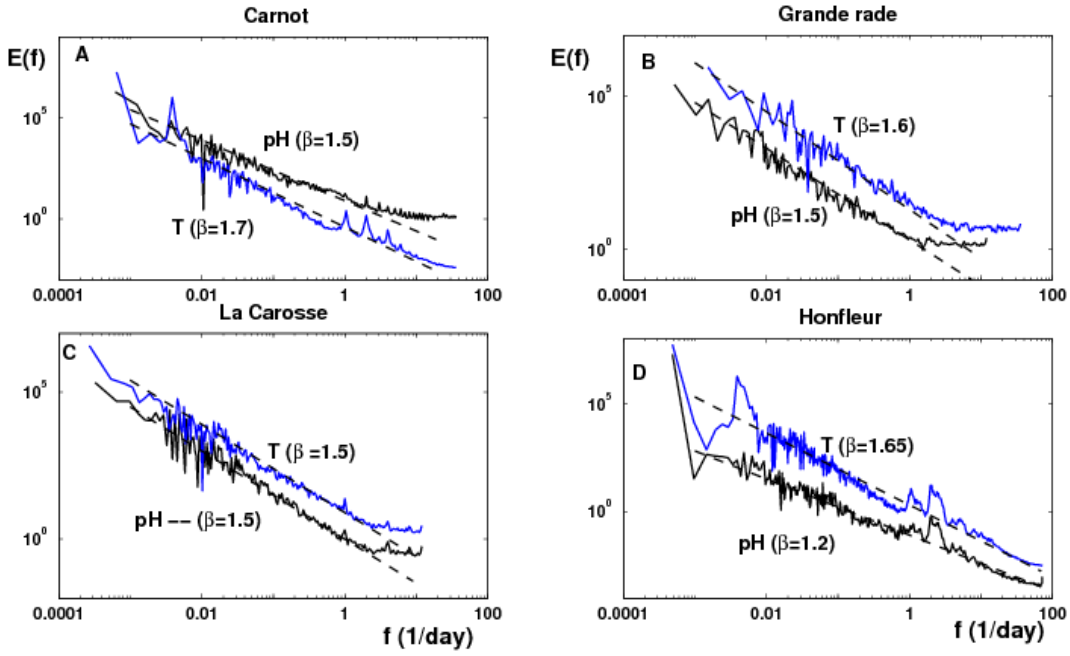

Figure 2-51 : Les spectres d'énergie : (A) Carnot, (B) Grande rade, (C) La Carosse et (D) Honfleur. Cette figure montre un régime d'échelle avec un exposant spectrale du pH compris entre 1,5 et 1,2, comparé au scalaire passif turbulent (température).

Tableau 2-9 : Valeur de l'exposant spectral pour le pH et la température

β	Carnot	Grande rade	La Carosse	Honfleur
pH	1,5	1,5	1,5	1,2
Température	1,7	1,6	1,5	1,65

La figure 2-52 représente les spectres compensés $(E_{pH}(f)/E_T(f))$ pour les 4 stations. Ces spectres compensés mettent en évidence un comportement autour d'une constante (allure plate) pour les 2 stations marines en baie de Seine (Figure 2-52 B et C). MAREL Carnot en zone côtière indique un changement de pente pour les échelles autour de 2 jours et le spectre de Honfleur met en évidence une allure quasiment non plate (Figure 2-52 A et D).

Les co-spectres ou encore appelés spectres croisés permettent de mettre en évidence le niveau de covariabilité entre le spectre de pH $(E_{pH}(f))$ et le spectre de

température ($E_T(f)$). On considère plus précisément la cohérence spectrale $R_{pH,T}$ (Bendat et Piersol, 2000):

$$R_{pH,T}(f) = \frac{\left|E_{pH,T}(f)\right|}{\sqrt{E_{pH}(f)E_T(f)}} \quad (27)$$

où $\left|E_{pH,T}(f)\right|$ correspond au module du co-spectre et $\sqrt{E_{pH}(f)E_T(f)}$, la racine carrée du produit des deux spectre. Lumley (2007) montre que lorsqu'il y a une relation linéaire entre deux entités la cohérence R est égale à 1. Donc si R est plat on peut supposer que la dépendance entre série est linéaire. Ceci permet donc de voir s'il y a dépendance, et si oui à quelles échelles.

La figure 2-53 révèle que deux comportements apparaissent dans chacun des co-spectres. Pour les deux stations marines en baie de Seine (Figure 2-53 B et C), des co-spectres révèlent une non-cohérence entre les deux séries pour des échelles inférieures à 33 jours (pour Grande rade) et 1 jour (pour La Carosse). La station côtière (Carnot) et la station estuarienne (Honfleur) (Figure 2-53 A et D) indiquent un comportement similaire avec une dépendance pour les deux séries pour les échelles inférieures à 10 jours. On peut supposer que le niveau de covariabilité entre les données de température et celui du pH dépend du type d'environnement donc de l'ensemble des forçages qui s'y exercent.

Ces différents résultats apportent différents renseignements concernant le pH :

- le pH possède de fortes fluctuations à toutes les échelles, de 20 minutes à plusieurs années ;
- ces fluctuations obéissent à des lois d'échelle avec un exposant spectral proche de 1,5, sauf pour le cas estuarien où la pente est proche de 1,2 ;
- la différence avec la température et sa loi d'échelle est en général assez faible, sauf pour le cas estuarien ;
- les co-spectres montrent une dépendance non-linéaire faisant entrevoir le pH comme un scalaire actif fortement influencé par la turbulence.

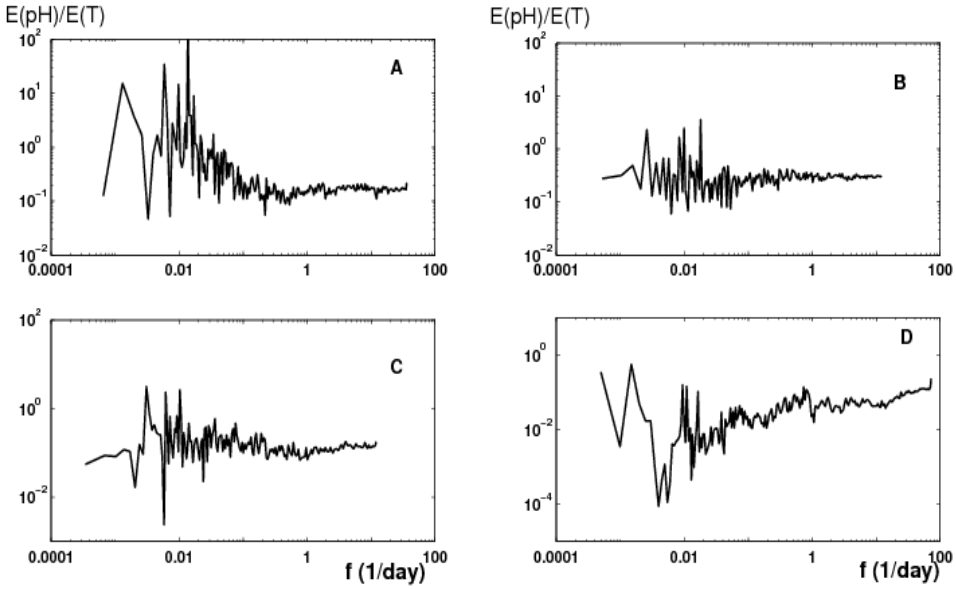

Figure 2-52 : Spectre compensé : (A) Carnot, (B) Grande rade, (C) La Carosse et (D) Honfleur.

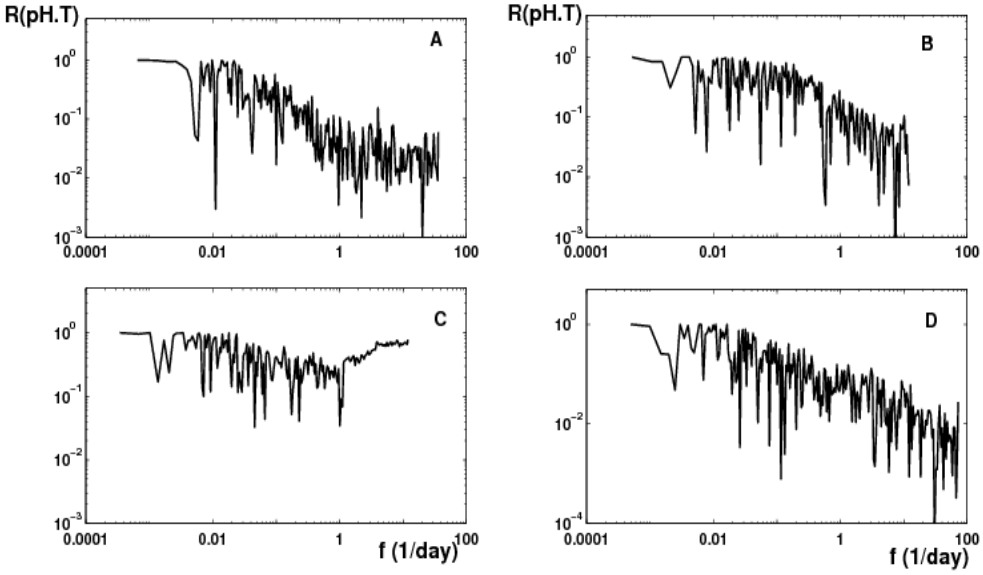

Figure 2-53: Co-spectres : (A) Carnot, (B) Grande rade, (C) La Carosse et (D) Honfleur. Les zones plates indiquent la gamme d'échelle pour laquelle les fluctuations du pH ont la même propriété spectrale que celle de la température.

3. L'oxygène dissous à l'équilibre[17]

La figure 2-54 représente une illustration de l'évolution de l'oxygène dissous à l'équilibre calculé à partir des concentrations de température et de salinité (selon la relation donnée en section 6-2 du chapitre I). Elle révèle l'évolution sur 1500 jours, en mettant en évidence une périodicité au cours du temps. Les spectres d'énergies de l'oxygène dissous à l'équilibre calculé sont représentés pour les 4 stations MAREL (Carnot, Grande rade, La Carosse et Honfleur).

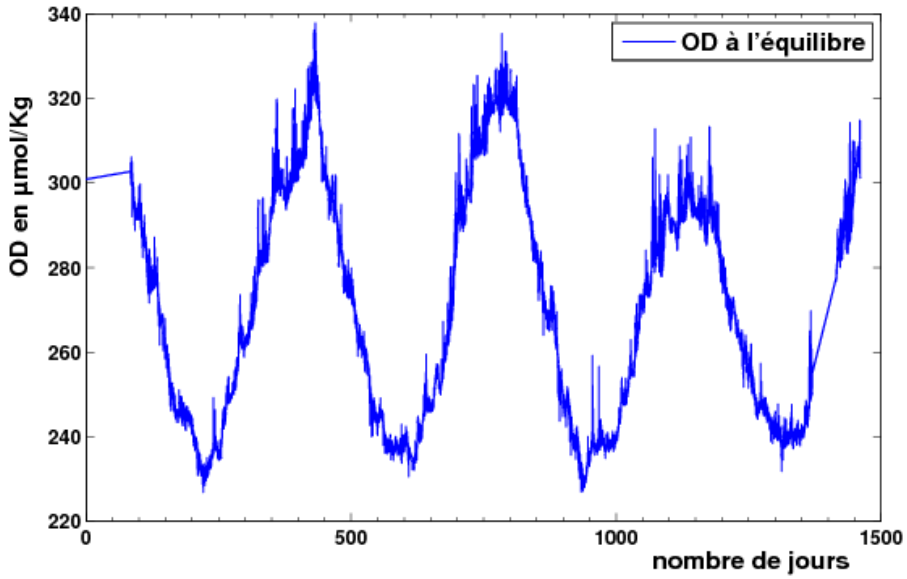

Figure 2-54 : Evolution de l'oxygène dissous à l'équilibre (OD à l'équilibre) au cours du temps (en nombre de jours). On note une cyclicité au cours du temps avec des fluctuations masquées par cette périodicité

Les figures de 2-55 à 2-58 représentent le spectre de l'oxygène dissous à l'équilibre calculé superposé à celui de l'oxygène dissous mesuré. Ces spectres d'énergie montrent une loi de puissance et une très bonne superposition. On observe tout de même qu'à une échelle inferieure à 2 h, l'oxygène dissous à l'équilibre calculé à partir des données de MAREL Carnot possède une allure plate (Figure 2-55). Cette allure plate est également observée

[17] Résultats obtenus dans le cadre du stage de M2P de Issam El Aich « Analyse de données de station de mesure automatisées MAREL dans la baie de Seine et à Boulogne-sur-mer : la dynamique de l'oxygène » en 2008 (janvier –juin) sous ma codirection.

dans le spectre au niveau de MAREL Grande rade, pour des échelles inferieures à 12h (Figure 2-56), mais elle est absente dans les spectres de La Carosse et d'Honfleur (Figures 2-57 et 2-58). La bonne superposition des spectres d'oxygène dissous mesuré et de l'oxygène dissous à l'équilibre calculé suggère une distribution temporelle similaire pour les deux paramètres. Les exposants spectraux également sont quasi-identiques (1,22) pour les deux paramètres et pour les 4 stations MAREL.

Ces résultats suggèrent

- que la valeur de l'exposant spectral du spectre d'énergie de l'oxygène dissous à l'équilibre indique une certaine universalité en ce qui concerne les eaux des côtes françaises et pour un échantillonnage eulérien.
- la reconstruction à partir de la température et de la salinité de l'oxygène dissous à l'équilibre amène à un changement de pente spectrale avec un spectre très proche de celui de l'oxygène dissous mesuré directement. Ce résultat étonnant serait à confirmer avec des données simulées.

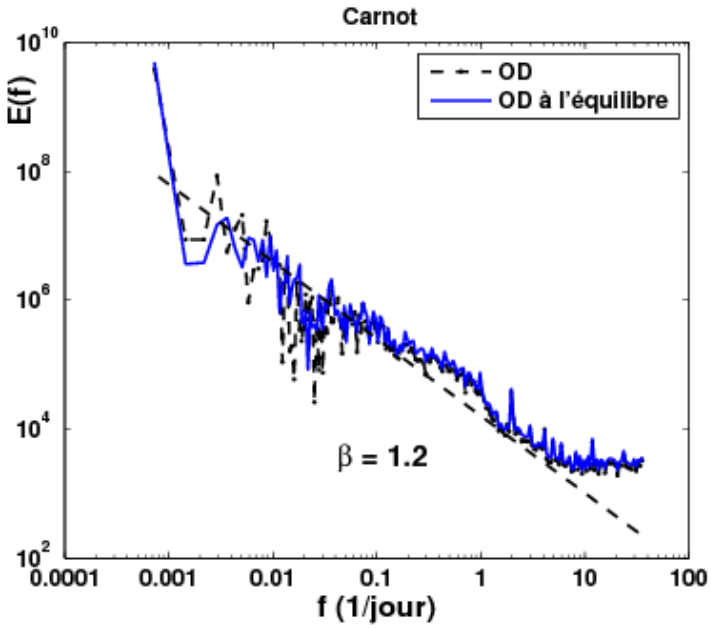

Figure 2-55 : Les spectres d'énergie de l'oxygène dissous mesuré (OD) et de l'oxygène dissous à l'équilibre calculé en zone côtière (MAREL Carnot) indiquant une invariance d'échelle avec une pente similaire de 1,2 et des pics à 12 h, 24 h et 1 an.

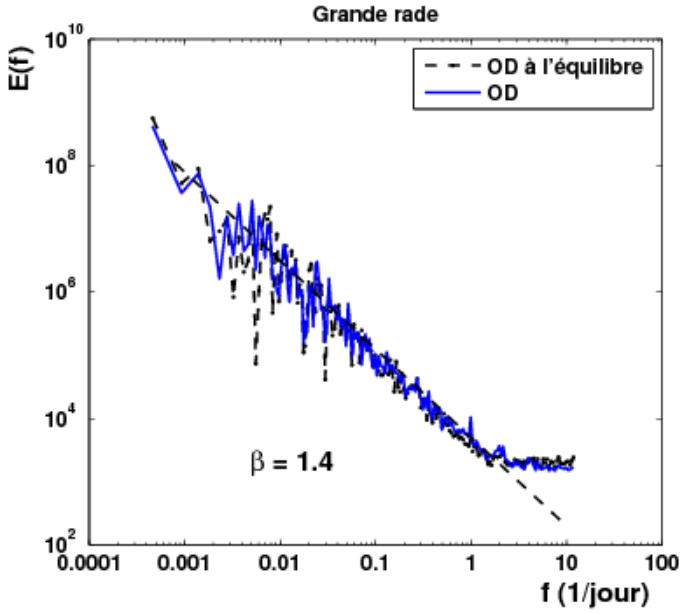

Figure 2-56 : Les spectres d'énergie de l'oxygène dissous mesuré (OD) et de l'oxygène dissous à l'équilibre calculé en zone marine (MAREL Grande rade) montrant une invariance d'échelle avec une pente similaire de 1,4 et des pics à 24 h et 1 an.

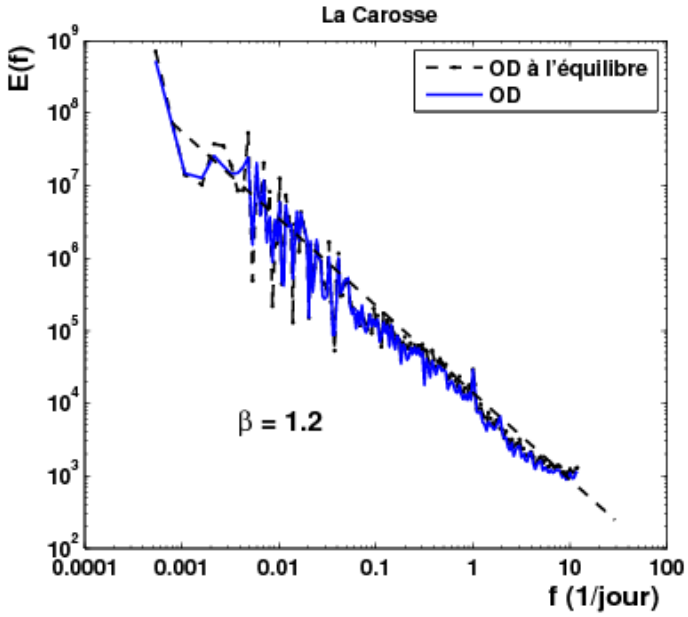

Figure 2-57 : Les spectres d'énergie de l'oxygène dissous mesuré (OD) et de l'oxygène dissous à l'équilibre calculé en zone marine (MAREL La Carosse) montrant une invariance d'échelle avec une pente similaire de 1,2 et des pics à 24 h et 1 an.

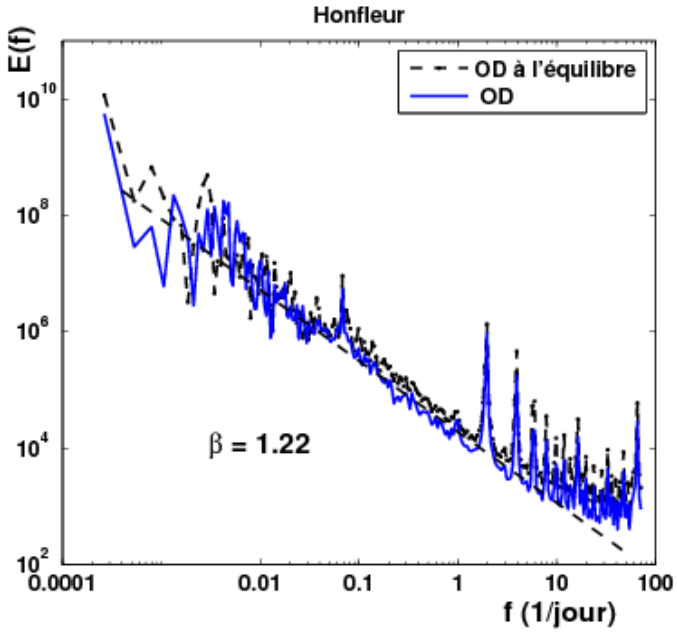

Figure 2-58 : Les spectres d'énergie de l'oxygène dissous mesuré (OD) et de l'oxygène dissous à l'équilibre calculé en zone estuarienne (MAREL Honfleur) indiquant une invariance d'échelle avec une pente similaire de 1,22 et des pics à 12 h, 24 h et 1 an. Un note un léger décalage pour les grandes échelles.

E. Fluctuations locales à micro-échelle à l'aide d'un capteur autonome

1. Le Wimereux

Le Wimereux est un petit fleuve côtier qui coule dans le département du Pas-de-Calais, et se jette dans la Manche (Huang et al., 2009). La longueur de son cours d'eau est de 22,1 km. Il prend sa source à Colembert, passe à Belle-et-Houllefort, Conteville-lès-Boulogne, Pernes, Pittefaut, Wimille et se jette dans la Manche à Wimereux (Figure 2-59). Sa pente moyenne est de 5,2 %. Le débit interannuel moyen du fleuve à Wimille est de 1,06 m^3/s. Il présente cependant des fluctuations saisonnières importantes : hautes eaux en hiver et basses eaux en été. Ce petit affluent montre des signes de pollution avec un apport important en nitrate dû aux rejets domestiques et industriels (Lefebvre, 2008a). Des apparitions d'efflorescences algales du type *Phaeocystis globosa* sont rencontrées dans ce cours d'eau au niveau de son embouchure (Figure 2-60) (Lefebvre et Delpech, 2004a).

La partie estuarienne de la rivière du Wimereux est sous l'action de deux phases, dont l'une remplit la rivière à marée montante, tandis que l'autre la vidange lors de la marée descendante. Cependant la durée du jusant et celle du flot ne sont pas égales. La durée de remplissage est légèrement plus longue que celle de vidange.

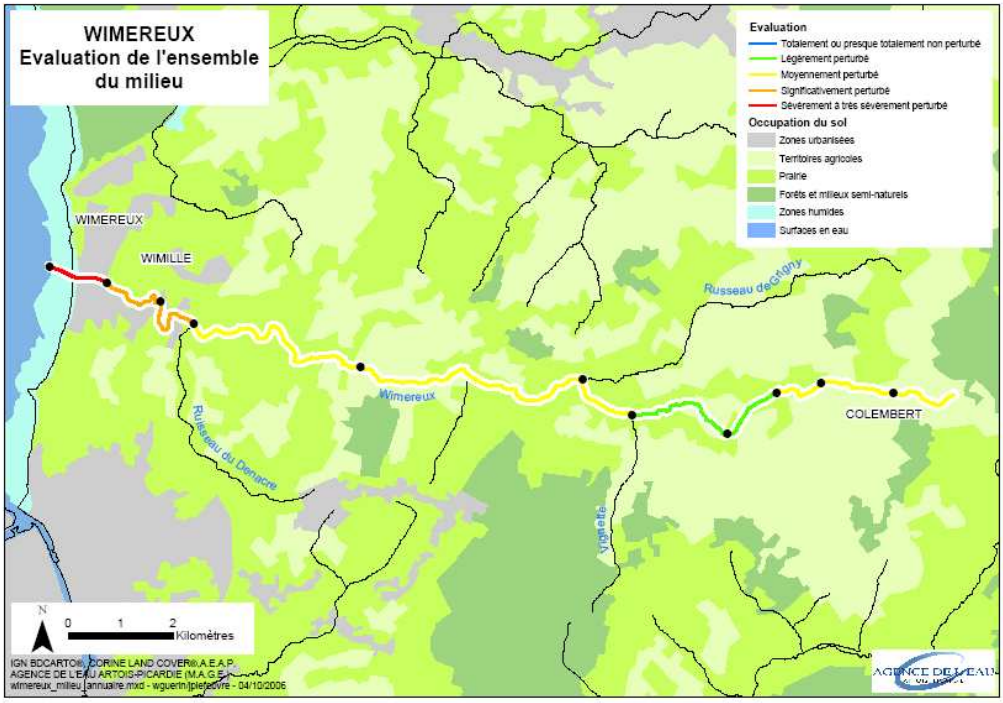

Figure 2-59 : La rivière du Wimereux, traversant les terres agricoles aux zones urbanisées ; l'évaluation de l'ensemble du milieu fait dans le cadre de l'Agence de l'eau Artois Picardie) (wimereux-milieu-annuaire-mxd-wguerin/jplefebve-04/10/2006).



Figure 2-60 : La rivière du Wimereux lors de la marée montante et lors du bloom (formation de mousse) de Phaeocystis globosa en mars 2010 (source : Régis Sion ; LOG).

2. La dynamique en amont et en aval du Wimereux

Les données obtenues par déploiement de la sonde multiparamétrique dans la rivière du Wimereux sont représentées dans le tableau 2-10. Le nombre de valeurs acquises en amont est de l'ordre de 40.000 données sur une durée de mesure de 4,5 jours (en mai 2009). Les valeurs acquises en aval sont de l'ordre de 2.185 sur une durée de mesure de 6 h au mois d'avril 2009. Rappelons que la fréquence d'acquisition est de 10 secondes.

Tableau 2-10 : Paramètres mesurés dans la rivière du Wimereux de avril-mai 2009

Capteur	**Nombre de données (rivière Wimereux)**	
	En Aval	**En amont**
Température (°C)	2.185	40.262
Oxygène (mg/L)	2.185	40.262
Turbidité (NTU)	2.185	40.262
Salinité	2.185	0

2.1. Déploiement en aval

Tout d'abord les mesures ont été effectuées en aval du Wimereux (à 5 m environ de l'embouchure). Ces eaux plus en aval sont soumises à une influence fluviale et marine. Des mesures ont été réalisées en période de vives eaux, période pendant laquelle les eaux marines atteignent le lit de la rivière. Ces mesures ont été enregistrées le 29 avril 2009 de 13 h à 19 h, lors d'un coefficient de marée de 77 (marée relativement forte). La figure 2-61 représente l'évolution de la concentration en oxygène dissous, de la température, de la turbidité et de la salinité. L'oxygène dissous varie ici de 11,5 à 12,3 mg/L et la température de 11,5 à 15,2 °C (Tableau 2-11). Lejeune et al. (2009) ont pu montrer une tendance à l'augmentation de ces deux paramètres de 13 h à 14 h 45 avec le flux lumineux. La concentration en oxygène dissous diminue ensuite pour fluctuer fortement autour de 12 mg/L entre 14 h 45 et 16 h, période pendant laquelle les eaux marines se mélangent aux eaux douces de la rivière. A marée montante, la salinité en aval passe de 0,3 à 25 (Figure 2-61).

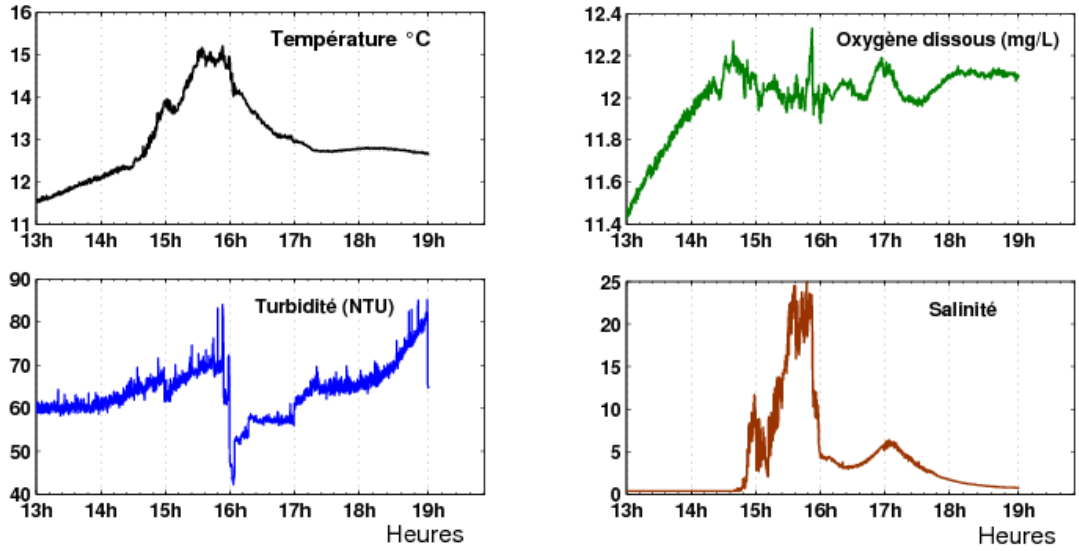

Figure 2-61 : Les séries temporelles de température, d'oxygène dissous, de turbidité et de salinité issues des mesures en aval du Wimereux et durant la marée montante (phase de remplissage de la rivière) sur une durée de 6 h. De fortes fluctuations sont très localisées et sont clairement visibles.

Tableau 2-11 : Moyenne et valeurs maximales et minimales de différents paramètres mesurés durant la marée montante (en aval de la rivière du Wimereux)

	Oxygène dissous (mg/L)	% saturation en oxygène	Température (°C)	Turbidité (NTU)	Salinité
Min	11,42	105,80	11,52	42,20	0,35
Max	12,33	141,60	15,21	85,20	24,90
Moyenne	12,00	117,50	13,00	63,92	4,00
Ecart-type	0,16	35,81	0,90	5,99	5,30

Dans ces eaux plus vives, les spectres d'énergie de l'oxygène dissous, de la température de la salinité et de la turbidité (Figure 2-62) possèdent une invariance d'échelle. Le spectre de température représenté en log-log indique une loi de puissance de l'ordre de

1,65. Cette valeur est proche de celle de la turbulence (5/3) ce qui s'accorde avec l'hypothèse de passivité de la température de Obukhov (1949) et de Corrsin (1951). Le spectre de salinité possède une pente de l'ordre de 1,6. Cette valeur est également proche de celle de la turbulence. Les variations de la salinité ici dépendent de la turbulence et du mélange eau douce-eau salée. Les spectres de turbidité et d'oxygène dissous mettent en évidence une loi de puissance avec une pente de l'ordre de 1,7. Malgré cette bonne invariance d'échelle concernant la turbidité, on observe une allure plate du spectre pour des échelles inférieures à 3 minutes.

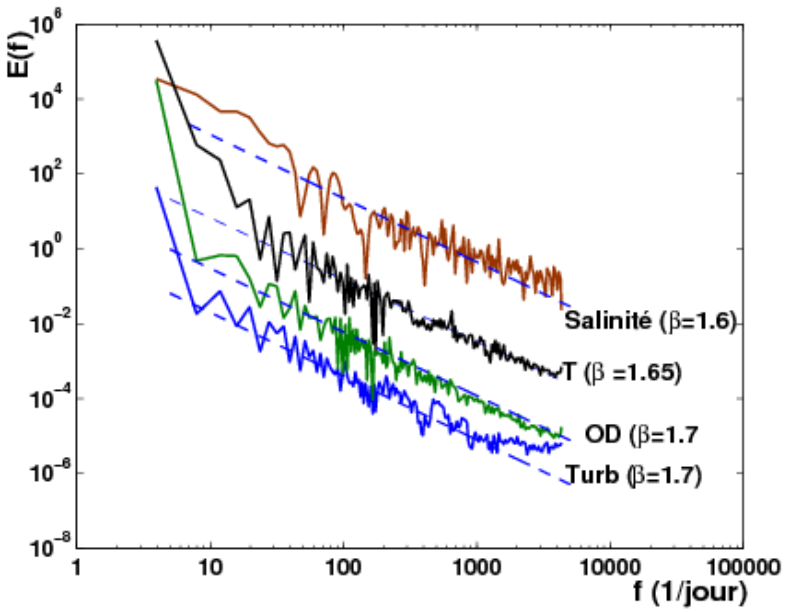

Figure 2-62 : Les spectres d'énergie de salinité, de température (T), d'oxygène dissous (OD) et de turbidité (Turb) en aval représentés en log-log. Les 4 paramètres indiquent une invariance d'échelle. La salinité et la température possèdent des pentes de 1,6 et 1,65 respectivement, alors que l'oxygène dissous et la turbidité ont une pente de 1,7 chacun.

2.2. Déploiement en amont

Des mesures ont été également effectuées en amont du Wimereux (à 2 km environ de l'embouchure), du 6 mai 2009 à 17 h 15 au 11 mai 2009 à 9h00, afin d'observer l'évolution journalière des différents paramètres mesurés (Tableau 2-12). Les eaux plus en amont sont soumises à une influence principalement fluviale, possédant des teneurs en

oxygène dissous relativement faibles. On note une évolution similaire de la concentration en oxygène dissous et de la température. La présence d'un cycle journalier est bien marquée avec des baisses et des augmentations successives (Figure 2-63). La concentration en oxygène varie de 7,3 à 13,0 mg/L et la température de 10,2 à 14,0 °C (Tableau 2-12). La figure 2-64 présente l'évolution de la turbidité sur 1 h, on note une forte variabilité de la turbidité.

Tableau 2-12 : Moyenne et valeurs maximales et minimales pour chaque paramètre mesuré en amont du Wimereux

	Oxygène dissous (mg/L)	% saturation en oxygène	Température (°C)	Turbidité (NTU)
Min	7,27	67,3	10,23	27,7
Max	13,34	126,9	13,94	773,80
Moyenne	11,16	95,4	12,37	88,17
Ecart-type	1,61	15,9	0,88	71,81

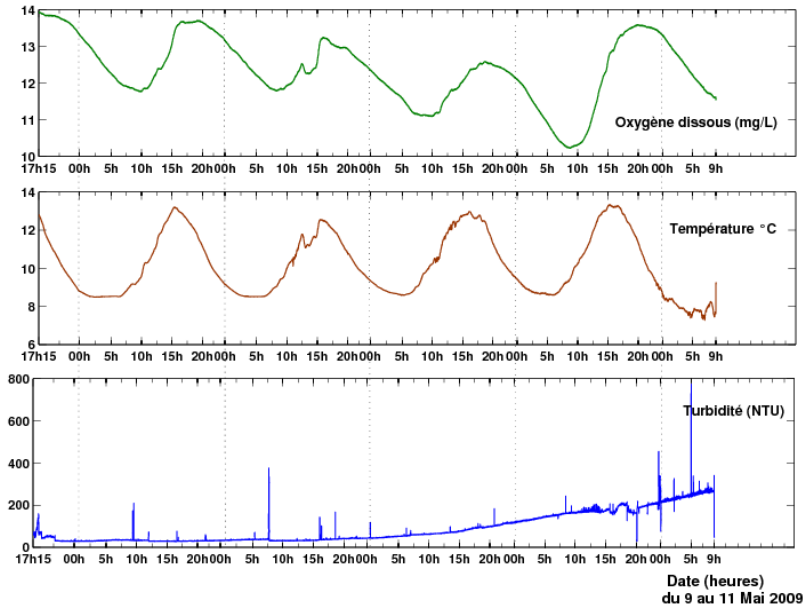

Figure 2-63 : Les séries temporelles d'oxygène dissous, de température et de turbidité en amont du Wimereux issues des mesures sur 4,5 jours. On note une certaine périodicité dans les données d'oxygène dissous et de température alors que la turbidité indique de fortes fluctuations qui ne sont pas clairement visibles. Pour la turbidité, la dernière portion de valeurs qui sont relativement très élevées peuvent être dues à la dérive du capteur.

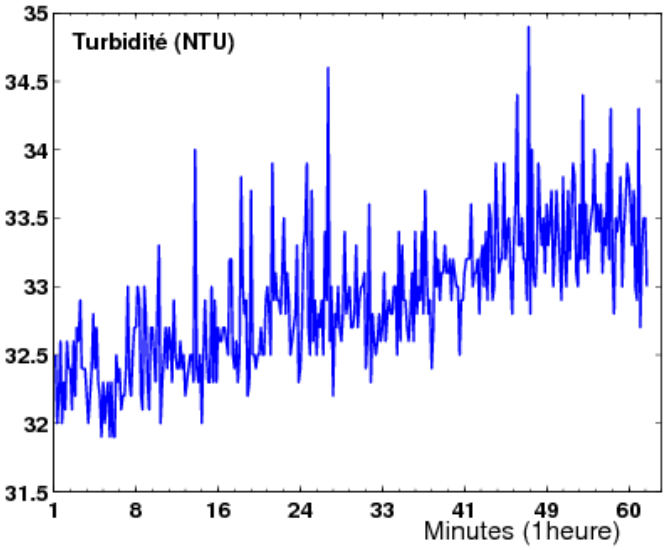

Figure 2-64 : Un échantillon de données de turbidité en amont (sur 1h). De fortes fluctuations sont très localisées et sont clairement visibles.

A partir d'observation à haute fréquence réalisées, l'analyse spectrale des données de température, d'oxygène dissous et de la turbidité (Figure 2-65) indique une invariance d'échelle. Cette invariance d'échelle est bien marquée dans les données de température et d'oxygène. Ces spectres indiquent une énergie de fluctuation sur une gamme d'échelles allant de 4,5 jours à 10 secondes.

Les spectres d'énergie de la température et d'oxygène dissous (Figure 2-65), représentés en log-log, révèle un seul régime d'échelle en -2. Quand au spectre de turbidité, il met en évidence une invariance d'échelle avec une pente de 1,3 (valeur similaire à celle trouvée dans l'estuaire de la Seine pour les échelles supérieures à 1 jour). On constate que les échelles en dessous de 3 minutes (spectre de turbidité), le spectre tend vers des valeurs constates, il s'agit d'un bruit blanc $(\beta = 0)$ causé par l'appareil (la dérive du capteur).

Dans cette eau calme, les spectres de l'oxygène dissous et de la température présentent une même pente égale à 2. La dynamique de ces deux paramètres est donc identique. La température est un scalaire passif, c'est-à-dire qu'elle n'est influencée par aucun processus chimique ou biologique. De ce fait, les variations de concentration en oxygène dissous sont influencées par les variations de la température. On note également

dans les spectres de température et d'oxygène dissous un pic important à 1 jour, ce qui correspond au cycle journalier. Nous relevons ici que le régime de la rivière était nettement turbulent. Un tel spectre avec une pente de -2 très nette pour ces micro-échelles est ici assez étonnant. A notre connaissance ce résultat n'a pas encore été reporté dans la littérature.

Généralement la pente de -2 du spectre d'énergie est observée dans divers domaines des mathématiques appliquée et simulations numériques. Cette valeur de pente est obtenue pour un mouvement connu, le processus Brownien. Ce mouvement Brownien est un processus stochastique qui fait l'objet de nombreuse études ces dernières années dans le domaine des sciences de la nature (Sornette, 2000 ; Bakunin, 2008). Mais il faut bien voir qu'une pente de -2 peut aussi être obtenue pour d'autres processus, qui peuvent être non-linéaires.

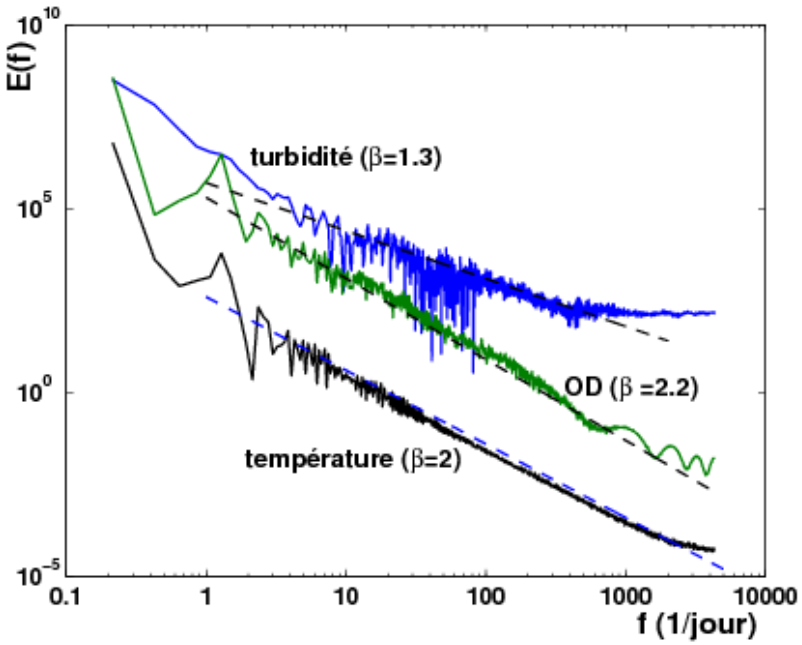

Figure 2-65 : Les spectres d'énergie de turbidité, d'oxygène dissous (OD) et de température, mesures en amont du Wimereux. La température et la turbidité présentent une bonne invariance d'échelle avec une pente de l'ordre de 2, alors que la turbidité est invariante d'échelle seulement de 5 jours à 1 h 30.

F. Discussion

L'analyse spectrale est une méthode d'analyse très utilisée dans les sciences de la nature (Schmitt et al., 1994 ; Tessier et al., 1996), et en particulier en écologie (Platt et Denman, 1975 ; Seuront et al., 1997 ; Legendre et Legendre, 1998 ; Seuront et Schmitt, 2004 ; Franks, 2005, Tzella et Haynes, 2007). Cette méthode a été également étendue à l'étude de la répartition de certains paramètres biogéochimiques. Dans ce contexte, on peut citer les travaux de Seuront et al. (2002) qui concernent la distribution des sels nutritifs en Manche, ceux de Schmitt et al. (2008) appliqués à l'estuaire de la Seine et les travaux de Lovejoy et al. (2001) qui sont appliqués à l'estuaire du Saint Laurent.

Dans notre étude, l'analyse spectrale a été appliquée aux différents paramètres biogéochimiques mesurés à haute fréquence dans trois zones en Manche : les eaux côtières de Boulogne-sur-mer ; l'estuaire de la Seine et la rivière Wimereux. Nous avons également comparé différents sites de la Manche par le biais de l'analyse spectrale de température, de pH et de l'oxygène dissous à l'équilibre. Cette analyse a permis de mettre en évidence le couplage existant entre les paramètres environnementaux et le forçage physique aux différentes échelles de temps.

Les données brutes des paramètres biogéochimiques considérées présentent de fortes fluctuations à toutes les échelles, qui sont similaires visuellement aux fluctuations de la turbulence. Une allure intermittente dans leurs dynamiques est clairement visible. L'analyse spectrale de ces séries temporelles met en évidence des régimes invariants d'échelle, avec des pics associés à des forçages localisés en fréquence : forçage dû à la marée, forçages journaliers ou annuels. Les exposants spectraux sont quelquefois différents pour chaque paramètre (Lovejoy et al., 2001). Ces valeurs de pente indiquent pour certains d'entre eux une possible influence de la turbulence. D'un autre côté, des pentes spectrales différentes de celle de la turbulence indiquent le caractère « biologiquement ou chimiquement actif » (Seuront et al., 1996a,b ; Schmitt et al., 2008).

Nos premiers résultats concernant les eaux côtières en Manche orientale mettant en évidence la forte variabilité de l'ensemble des paramètres biogéochimiques quelles que soient les échelles abordées avec des fluctuations sur des échelles de 20 minutes à quelques

mois. L'analyse du spectre de Fourier indique un seul régime en échelle pour la plupart des paramètres biogéochimiques.

On remarque dans le spectre de **température** une bonne invariance d'échelle avec une pente proche de -5/3, indiquant une dynamique en accord avec les « scalaires passifs » en turbulence (Obukhov, 1949 ; Corrsin, 1951).

Le **pH** révèle également une forte variabilité et on remarque par le biais de l'analyse spectrale que la variabilité du **pH** est fortement influencée par les forçages physiques (la turbulence et la marée) car son spectre indique une pente assez proche de celle de la turbulence. Nous obtenons une valeur de 1,5 assez universelle pour les eaux côtières, résultat apparemment nouveau et qui forme une des originalités de cette thèse. La valeur de la pente spectrale légèrement différente de celle de la température permet de voir le pH comme un « scalaire actif ».

La **fluorescence** révèle une variabilité journalière et surtout saisonnière bien marquée. La variabilité de l'**oxygène dissous** est particulière. Les spectres d'énergie de **fluorescence** et d'**oxygène dissous** mettent en évidence une bonne invariance d'échelle avec des pentes similaires : ce qui suppose une dynamique ayant des caractéristiques communes. Leur exposant spectral est différent de celui de la turbulence, et indique le caractère « biologiquement actif » des deux paramètres (Seuront et al., 1996a,b ; Schmitt et al., 2008). La valeur de la pente spectrale, souvent proche de 1,2 semble être une caractéristique peut être universelle de ces séries.

En ce qui concerne l'estuaire de la Seine, certains résultats sont différents. La rupture de pente bien visible à l'échelle de la journée pourrait être due à l'influence conjuguée des eaux marines et des eaux douces apportées par le fleuve. Le forçage déterministe est très marqué dans les spectres : de forts pics correspondent aux cycles de marée, saisonnier et annuel. Les spectres de données filtrées correspondant au forçage stochastique qui possèdent des pentes différentes de celle de données brutes. Les spectres de données filtrées de **salinité** et de **température** indiquent une valeur de pente proche de $\beta = 5/3$, en accord avec la théorie de turbulence de scalaire passif (Thorpe, 2007). Les spectres d'**oxygène dissous** et du pourcentage en saturation indiquent des pentes similaires et identiques à celle trouvée dans les eaux côtières. Le spectre de données filtrées de **turbidité** met en évidence

une pente assez proche de celle de la turbulence et supérieure à celle de l'oxygène (Schmitt et al., 2008). A travers ce résultat on suppose une forte influence de la turbulence dans la distribution de la turbidité comparée à l'influence du débit de la Seine.

L'analyse spectrale appliquée aux paramètres biogéochimiques mesurés dans la rivière Wimereux nous a permis d'appréhender le rôle joué par la marée (Huang et al., 2009). L'analyse spectrale a été récemment appliquée aux données du débit de cette rivière par Huang et al. (2009) qui a pu démontrer le caractère intermittent du débit. Nous avons effectué une analyse spectrale sur les différents paramètres biogéochimiques mesurés. Les spectres d'énergie de la **température**, de la **salinité**, de l'**oxygène dissous** et de la **turbidité** possèdent une bonne invariance d'échelle sur une large gamme de fréquence. Les spectres de **température** et de **salinité** indiquent le caractère scalaire passif des deux paramètres durant la marée montante (Thorpe, 2007). Les spectres d'**oxygène dissous** et de **turbidité** possèdent des pentes identiques très proches de celle de la turbulence. On suppose que, lors de la marée montante, la dynamique des différents paramètres mesurés est dominée par un fort brassage, correspondant à une injection d'énergie turbulente par la marée. La turbulence des eaux, surtout à marée montante et lors des vives-eaux permet une homogénéisation de ces eaux plus en aval. On remarque qu'en amont du Wimereux, dans la zone non soumise à la marée montante (les eaux sont sous la dépendance des eaux douces) l'exposant spectral de d'**oxygène dissous** est identique à celui de la **température** avec une valeur de l'ordre de 2. Une pente de β égale à 2 correspondre à l'une des lois des processus non-linéaires (Bakunin, 2008).

La comparaison entre sites en Manche (les eaux marines) a permis de mettre en évidence le caractère de « scalaire passif » de la **température**. Les spectres d'**oxygène dissous** à l'équilibre indiquent des pentes similaires et une bonne superposition de l'**oxygène dissous** mesuré et celui de l'**oxygène dissous à l'équilibre**. Concernant le **pH**, les spectres indiquent pour les eaux marines des pentes identiques mais différentes de celle des eaux estuariennes.

En conclusion, la distribution des paramètres biogéochimique mesurés en Manche et dans ces affluents (qui constituent ici les zones de transition) est contrôlée par les événements physiques qui affectent ce milieu. La turbulence permet une distribution

structurée et contribue à la variabilité à haute fréquence de ces paramètres biogéochimiques. Ces résultats nous ont permis de vérifier l'hypothèse de « scalaire passif » de la température et de la salinité. En revanche, on a pu détecter les différentes échelles d'implication du forçage physique dans la variabilité des autres paramètres considérés dans cette étude.

Chapitre III. Les données SOMLIT en Manche : comparaisons avec des données MAREL, covariation et rapports stoechiométriques

Chapitre III. Les données SOMLIT en Manche : comparaisons avec des données MAREL, covariation et rapports stoechiométriques

A. Introduction

Dans ce chapitre, l'analyse porte dans un premier temps sur des données du programme SOMLIT et du système MAREL (voir chapitre I). Cette approche est basée sur l'analyse en parallèle (simultanée) des données issues de la haute fréquence (MAREL Carnot) et de la basse fréquence (SOMLIT : le point C). La comparaison est faite entre les deux types de mesures par le biais d'une part, des covariations entre paramètres biogéochimiques et d'autre part par l'analyse de la dynamique des ratios N/P, Si/P et Si/N, via leurs densités de probabilité.

L'analyse porte dans un second temps sur des données uniquement de SOMLIT. Il s'agit de la comparaison de deux stations côtières SOMLIT en Manche, provenant des bassins oriental et occidental. La Manche orientale est représentée par le point C et la Manche occidentale par le point Estacade. La Manche orientale est un système brassé peu profond, alors que la Manche occidentale est un système brassé profond ouvert sur l'Atlantique. La comparaison de ces deux bassins de la Manche est faite par l'analyse de données d'azote, d'acide silicique, de phosphate, de carbone et d'azote organique particulaire et de chlorophylle *a*[18].

B. Les séries temporelles MAREL et SOMLIT en Manche orientale

En Manche orientale, le programme SOMLIT a débuté en 1997 comme mentionné au chapitre I. Les mesures considérées dans cette étude sont faites au point C SOMLIT en surface et à haute mer toutes les deux semaines dans les eaux côtières. Les analyses des échantillons d'eaux sont effectuées au laboratoire (à la Station Marine). Pour le système

[18] Ici et dans la suite du chapitre, « Chla » est utilisé comme synonyme de « chlorophylle *a* ».

MAREL, la station Carnot a été implantée en 2004 sur la digue de Boulogne-sur mer. Cette station MAREL est équipée d'un dispositif capable de mesurer automatiquement, en continu et à haute fréquence les même paramètres physico-chimiques et biologiques clés que SOMLIT. Ces deux points de prélèvement et de mesure (point C et Carnot) sont situés dans les eaux côtières de Boulogne-sur-mer et sont soumis aux apports continentaux. La distance séparant le point côte SOMLIT et la station MAREL Carnot est de l'ordre de 6 milles marin (Figure 3-1). Les séries temporelles biogéochimiques communes considérées dans cette étude sont : l'oxygène dissous[19], la fluorescence, la Chla, la température, le pH et les nutriments (le nitrate, le phosphate et l'acide silicique).

La longueur des séries considérée ici varie de 150 à 500 données pour le programme SOMLIT (du 17 décembre 1997 au 8 juillet 2008) tandis que le programme MAREL possède un nombre de données plus important compris entre 2.900 et 112.000 selon les séries (du 3 décembre 2004 au 9 février 2009).

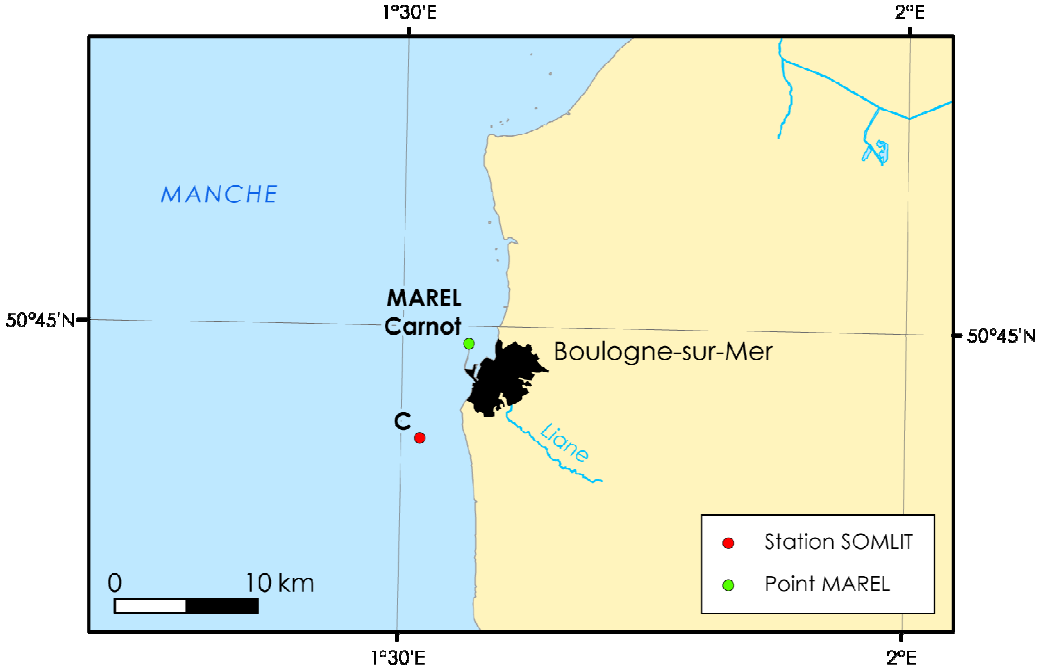

Figure 3-1: Localisation des points SOMLIT et MAREL : le site SOMLIT est représenté par le « point C » et la station MAREL Carnot est située au bout de la digue. La distance entre les deux points côtiers est de l'ordre de 6 milles marin. (Source : Denis Marin ; LOG).

[19] Ici et dans la suite du chapitre, « OD » ou « DO » est utilisé comme synonyme de « oxygène dissous ».

1. La dynamique annuelle

Les données brutes de SOMLIT (point C) et de MAREL Carnot sont représentées en figures 3-2 à 3-13. La variabilité multi-échelle est bien visible pour chaque paramètre biogéochimique. Les données MAREL révèlent de fortes fluctuations à petites échelles temporelles, indétectables par le programme SOMLIT (Blain et al., 2004).

Les données de température (Figure 3-2), indiquent une évolution presque périodique à grande échelle pour les deux types de mesure. La moyenne de température de chacune des séries est de l'ordre de 12 °C (Tableau 3-1). Les valeurs minimales de température enregistrées par MAREL et par SOMLIT sont de l'ordre de 3,6 °C et de 5 °C respectivement. Les valeurs maximales de température journalières les plus élevées sont enregistrées par la station MAREL Carnot. L'évolution des températures enregistrées par les deux types de mesure sur une échelle de 1 an pour l'année 2005 montre que les données MAREL possèdent des fluctuations marquées comparées aux données SOMLIT qui sont plus lissées (Figure 3-3).

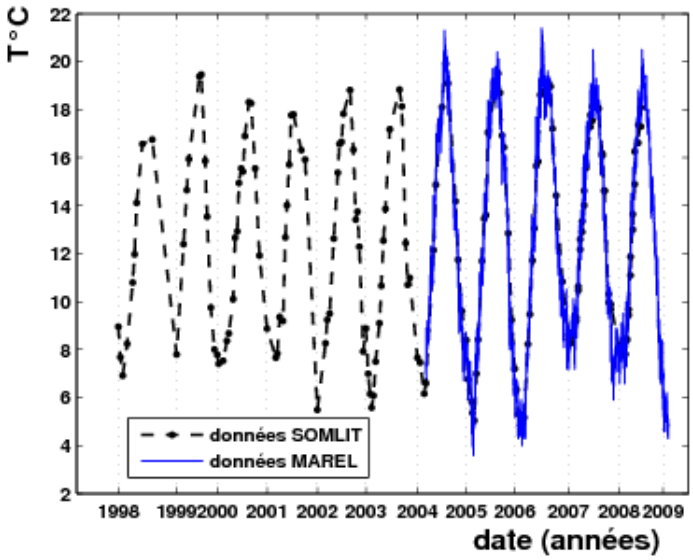

Figure 3-2: Séries temporelles de température : superposition des données SOMLIT et MAREL. On constate une très bonne superposition à grande échelle.

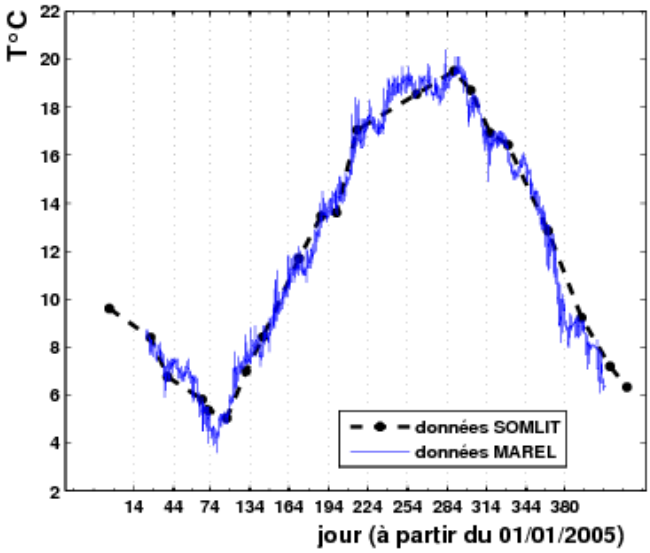

Figure 3-3 : Superposition des données de température SOMLIT et MAREL sur l'année 2005. On constate que sur une échelle de 1 an (2005), les données SOMLIT indiquent une allure plus lissée comparées aux données MAREL.

L'évolution temporelle du pH (Figure 3-4) met en évidence également une régularité à grande échelle dans les données SOMLIT avec des valeurs maximales de l'ordre de 8,6 UpH et minimales de 7,87 UpH. Les données de pH enregistrées par MAREL reflètent une allure plus fluctuante et varient de 6,59 à 9,17 UpH. La moyenne de pH sur l'ensemble des années reste quasi-identique pour les deux types de mesure (Tableau 3-1). Nous représentons en figure 3-5, un exemple d'évolution du pH sur une échelle de 1 an pour les deux types de mesure. On peut remarquer la présence de très fortes fluctuations du pH avec beaucoup de valeurs en dessous de 8 UpH. On constate également dans cette figure que les fortes valeurs de pH sont enregistrées par MAREL à partir de 3 mois (ce qui pourrait correspondre ici à un changement de capteur).

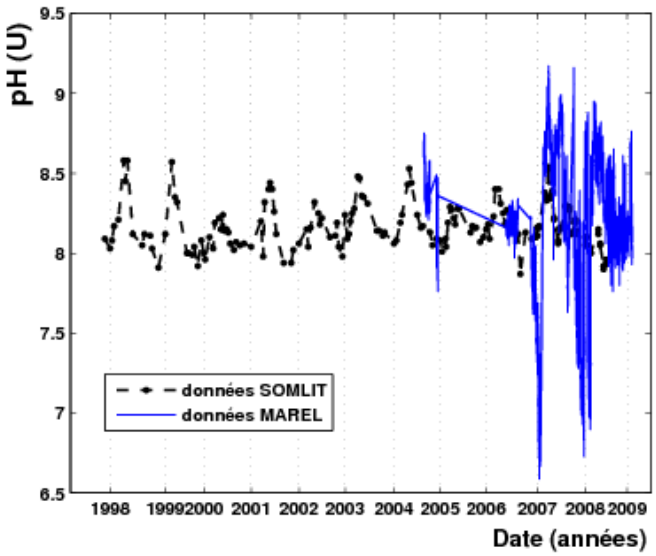

Figure 3-4: Evolution des séries de pH de SOMLIT et de MAREL.

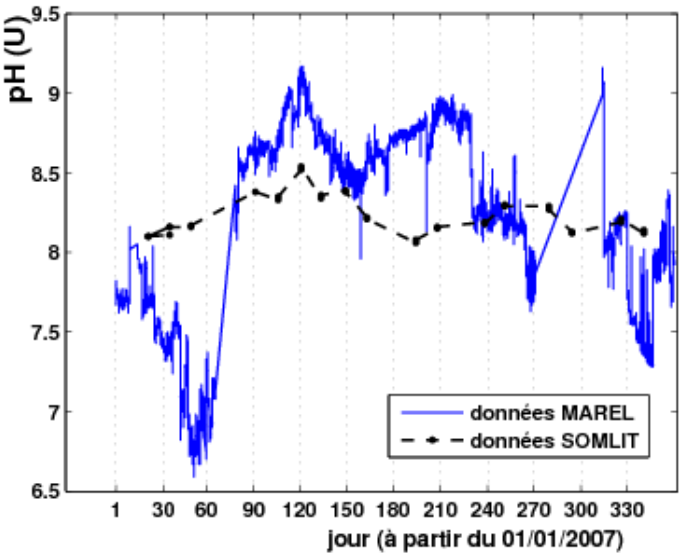

Figure 3-5 : Superposition des données de pH SOMLIT et MAREL sur une échelle de 1 an (2007). On constate que sur une échelle de 1 an, les données SOMLIT ont des valeurs comprises entre 8 et 8,4 UpH comparées aux données MAREL qui possèdent des fluctuations plus marquées avec des valeurs comprises entre 6,7 et 9,5 UpH. Des teneurs plus élevées apparaissant à l'échelle de 3 mois ce qui pourrait correspondre au changement de capteur.

La série DO (Figure 3-6) indique des valeurs journalières maximales et minimales de l'ordre de 10,16 mg/L et 2,88 mg/L pour SOMLIT contre 16,28 mg/L et 3,95 mg/L enregistrées par MAREL Carnot. La moyenne annuelle de DO est de 6,57 mg/L pour SOMLIT et de 8 mg/L pour MAREL Carnot (Tableau 3-1). Sur une échelle annuelle (en 2006), la superposition des données MAREL et SOMLIT indique une tendance similaire (Figure 3-7) avec un décalage vertical entre les 2 séries.

Les données brutes de Chla mesurées par SOMLIT et de fluorescence (l'estimateur de la biomasse phytoplanctonique) enregistrées par MAREL Carnot sont représentées en figure 3-8. Pour pouvoir comparer les 2 séries, les valeurs de ces deux paramètres sont divisées par leur moyenne sur l'ensemble des données, d'où l'absence d'unité. La moyenne (qui est effectuée avant de normaliser) de Chla est de l'ordre de 5,52 mg/L et celle de la fluorescence est de 1,93 FFU (Tableau 3-1). La série de fluorescence possède une allure plus fluctuante contrairement à la série de Chla issue du point SOMLIT. Cette allure très fluctuante est également relevée sur une échelle annuelle (pour un exemple de l'année 2006) en figure 3-9. Les fortes teneurs en fluorescence sont mesurées à partir du 60e jour jusqu'au 120e jour de l'année.

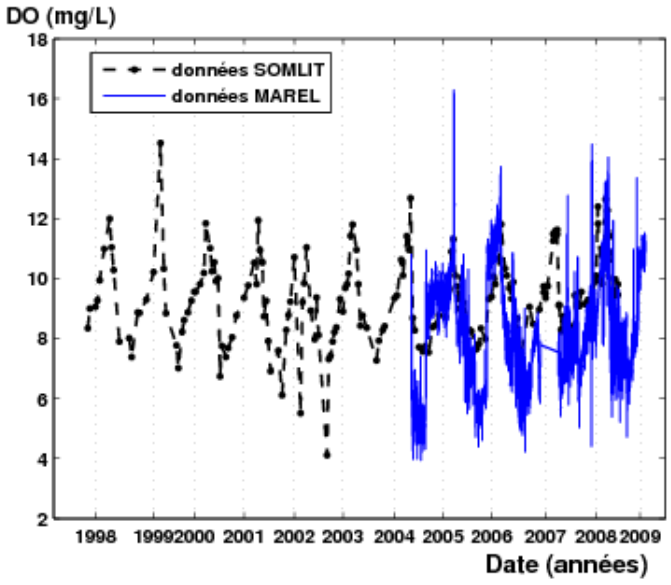

Figure 3-6: Séries temporelle de DO : superposition des données SOMLIT et MAREL. Les données MAREL possèdent de fortes fluctuations brutales comparées aux données SOMLIT qui indiquent une évolution plus lissée.

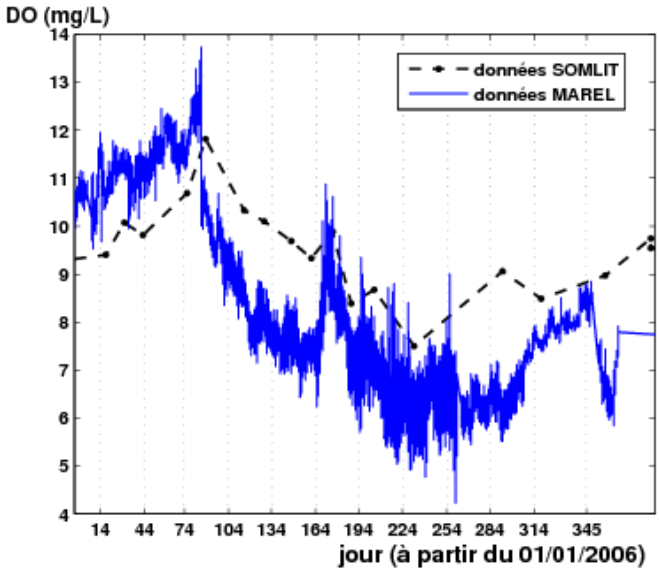

Figure 3-7 : Superposition des données de DO SOMLIT et MAREL sur une échelle de 1 an (2006). On constate que sur une échelle de 1 an, les données SOMLIT et MAREL indiquent tendance similaire avec néanmoins un décalage en amplitude.

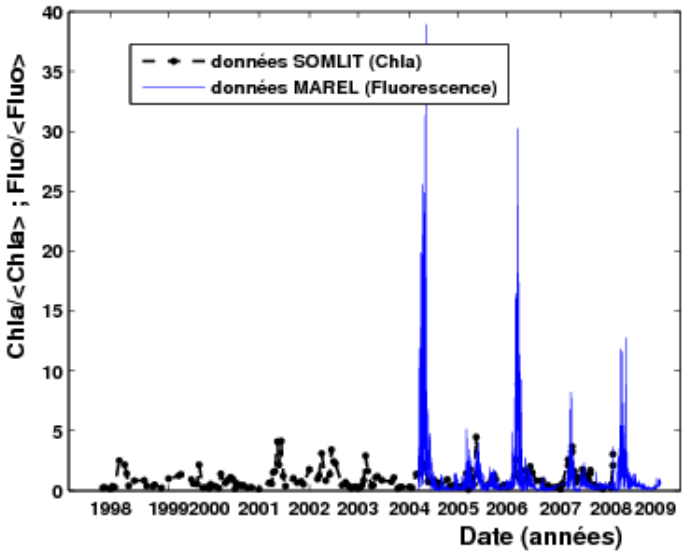

Figure 3-8: Séries temporelles de fluorescence (MAREL Carnot) et de Chla (SOMLIT). Les données MAREL indiquent une allure très fluctuante avec des blooms très localisés, qui sont indétectables par le programme SOMLIT.

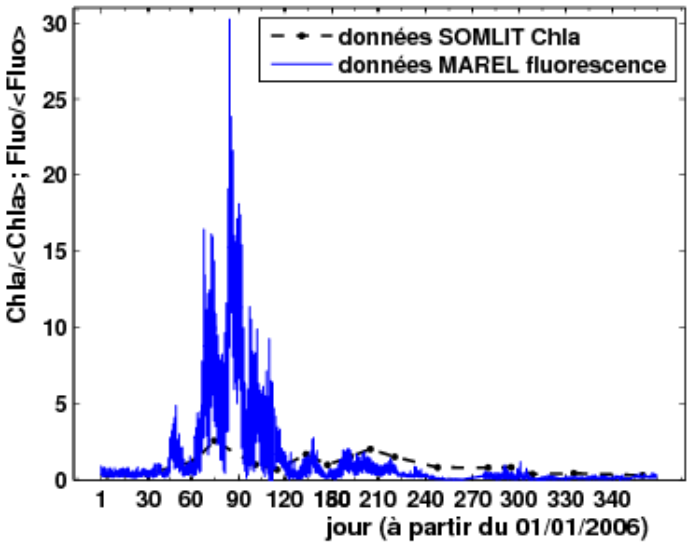

Figure 3-9: Séries temporelles de fluorescence (MAREL Carnot) et de Chla (SOMLIT) sur une échelle de 1 an (2006). Les séries indiquent une même évolution mais la fluorescence prend des valeurs bien plus élevées au moment du bloom printanier.

La figure 3-10 présente l'évolution de la teneur en azote $(NO_2^- + NO_3^-)$ pour les deux types de mesure. Les teneurs en azote enregistrées par MAREL Carnot sont relativement importantes comparées aux teneurs mesurées par le point SOMLIT (Tableau 3-1). Les teneurs maximales et minimales en azote mesurées varient de 0,02 µmol/L à 31,27 µmol/L pour SOMLIT et de 0,02 µmol/L à 163,98 µmol/L pour MAREL Carnot. Sur une échelle annuelle (pour l'année 2006), on constate que la concentration de l'azote total fluctue énormément montrant des concentrations très importantes (Figure 3-11). Les données SOMLIT indiquent une évolution annuelle confirmant d'autres études (Gentilhomme et Lizon, 1998 ; Herut et al., 2000) avec les plus faibles teneurs mesurées au printemps et en été et des fortes teneurs mesurées en hiver.

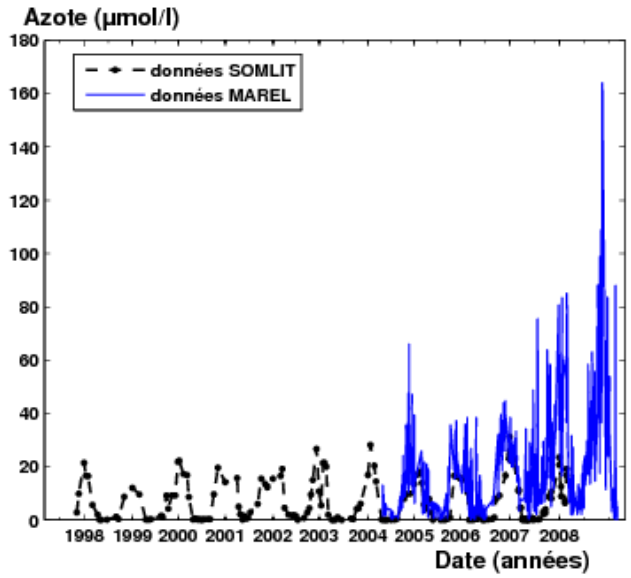

Figure 3-10: Séries temporelles de l'azote total $(NO_3^- + NO_2^-)$*, avec une superposition SOMLIT et MAREL. On constate une superposition globale mais de très fortes fluctuations à petite échelle pour MAREL (plus d'apports par la Liane).*

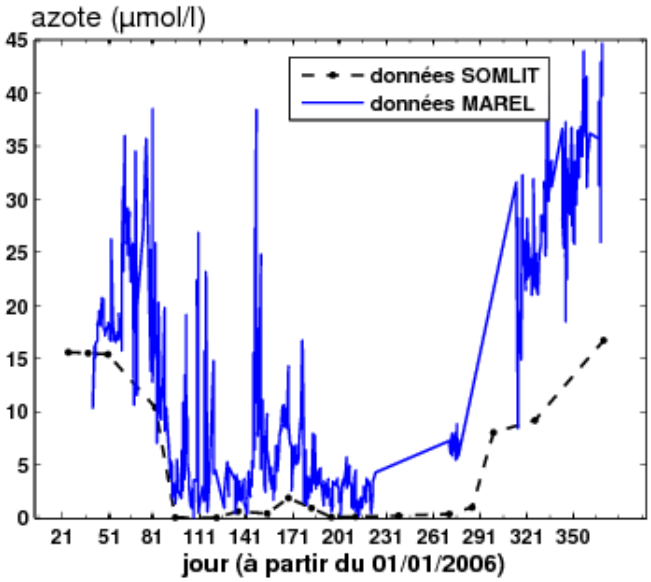

Figure 3-11: Séries temporelles de nitrates total, avec une superposition SOMLIT et MAREL sur une échelle de 1 an (2006). La tendance est approximativement comparable mais de fortes fluctuations localisées sont visibles sur les données MAREL.

Quant à l'acide silicique représentés en figure 3-12, la moyenne annuelle est très proche pour les deux types de mesures (Tableau 3-1). Les valeurs maximales et minimales de l'acide silicique sont comprises entre 31,13 et 0,01 µmol/L pour SOMLIT et entre 39,25 et 0,01 µmol/L enregistrées par MAREL Carnot. La série de MAREL Carnot met en évidence des fluctuations brutales et très localisées qui sont clairement visibles. La figure 3-13 représente l'évolution de l'acide silicique sur une échelle annuelle (en 2005). On remarque que la courbe de SOMLIT suit la série de MAREL, même si cette dernière présente de fortes fluctuations.

Ces fortes fluctuations rencontrées au point fixe MAREL peuvent être expliquées par la position de cette station. Cette station est soumise à l'influence des eaux côtières mais aussi à l'influence directe des apports fluviaux de la Liane.

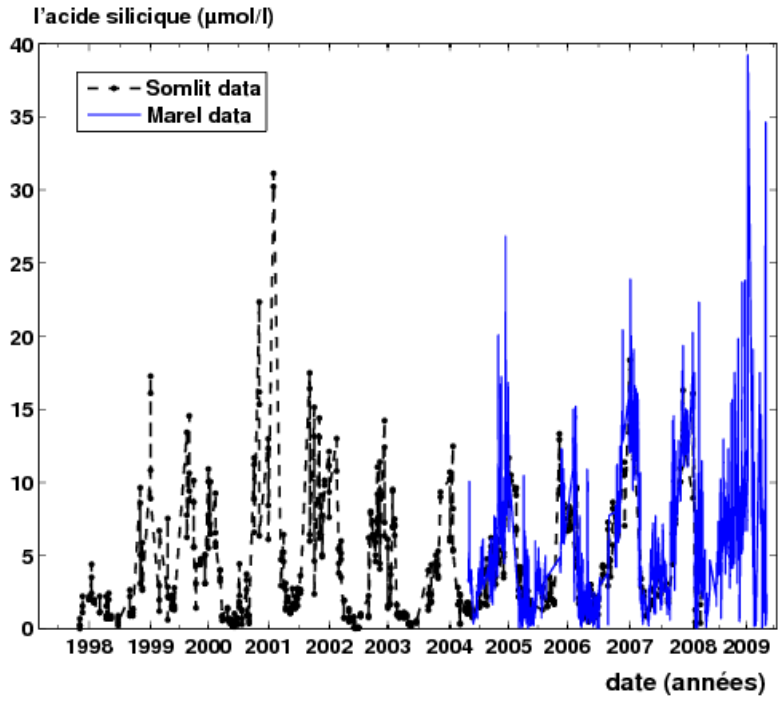

Figure 3-12: Superposition des données de l'acide silicique pour les 2 programmes SOMLIT et MAREL.

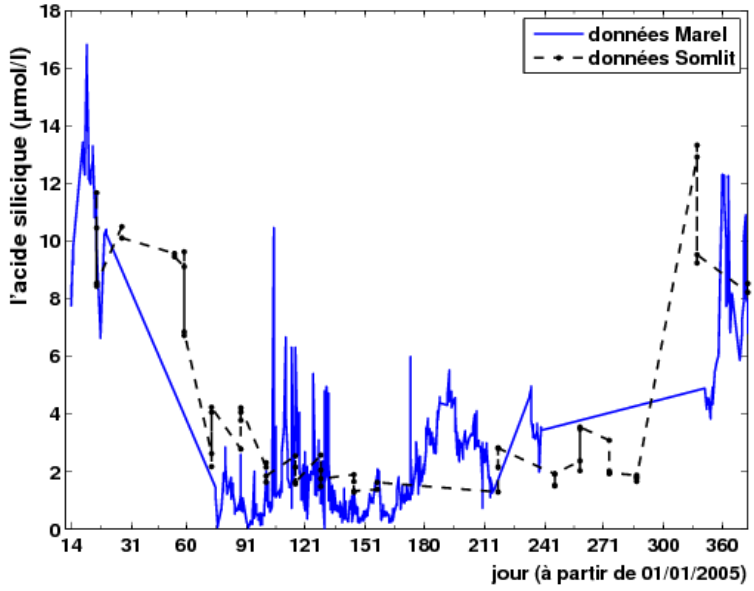

Figure 3-13: Superposition des données d'acide silicique pour les 2 programmes SOMLIT et MAREL sur une échelle de 1 an (2005). Les deux séries indiquent une même tendance. Il y a de nombreuses valeurs manquantes pour les données MAREL.

Tableau 3-1 : Nombre de données et moyenne annuelles de chaque série temporelle

Station de mesure	**MAREL Carnot**		**SOMLIT**	
Paramètres	Nombre de données	Moyenne	Nombre de données	Moyenne
Température	111.570	12,9 (°C)	178	12,41 (°C)
pH	56.979	8,23 (U)	176	8,17 (U)
Oxygène dissous (DO)	81.975	8 (mg/L)	191	6,57 (mg/L)
Chla			173	5,52 (µg/L)
Fluorescence	106.054	1,92 (FFU)		
Azote total $(NO_2^- + NO_3^-)$	2.788	15,65 (µmol/L)	176	7,20 (µmol/L)
Acide silicique	2.884	5,29 (µmol/L)	517	4,17 (µmol/L)
Phosphate	2.424	0,71 (µmol/L)	154	0,33 (µmol/L)

2. Covariations entre paramètres

On considère ici la covariation entre paramètres, en utilisant la méthode présentée au chapitre I. Cette méthode d'analyse fait appel à une régression à l'aide d'un noyau gaussien (la méthodologie est expliquée au chapitre I, page 54).

La figure 3-14 représente la moyenne conditionnelle de DO sachant la fluorescence (Fluo) (Figure 3-14A) et la Chla (Figure 3-14B). La courbe de régression représentée au sein du nuage de points décrit l'évolution de DO (données SOMLIT et MAREL Carnot). L'observation de la courbe pour les données types MAREL indique une augmentation de la DO associée à celle de la fluorescence. Un maximum de DO est atteint, qui correspond à la période de bloom phytoplanctonique, observé fréquemment au printemps en Manche orientale (Sazhin et al., 2006). Une faible baisse de la concentration de DO est observée après ce maximum. Cela montre aussi qu'après la floraison printanière, les concentrations en oxygène dissous sont très loin de celles pouvant entrainer le phénomène d'anoxie. Ceci s'explique par le fait que la DO est renouvelé de manière permanente dans cette zone, car en dépit de la forte matière organique, les eaux restent bien oxygénées tout au long de l'année, en raison de l'important brassage des eaux par la turbulence générée par les courants de marée et par le vent.

Dans les données SOMLIT (Figure 3-14B), la moyenne conditionnelle de DO indique une tendance progressive à l'augmentation. Cette moyenne conditionnelle est comprise entre 8,8 et 10,6 mg/L dans les données SOMLIT. Comme beaucoup de points de la figure 3-14A sont groupés vers les faibles valeurs de fluorescence, nous avons aussi considéré la relation entre DO et la fluorescence avec une échelle logarithmique pour cette dernière (Figure 3-15). La moyenne conditionnelle dans ce cas est approximativement linéaire qui correspond à une relation logarithmique (le fit linéaire est aussi représenté). Nous obtenons ainsi :

$$DO = A + B\ln\frac{F}{< F >} \tag{28}$$

Avec ici $A = 8$ mg/L et $B = 0{,}5$ mg/L. Cet ajustement indique une augmentation de DO avec la concentration en phytoplancton, mais cette augmentation est assez lente, étant logarithmique.

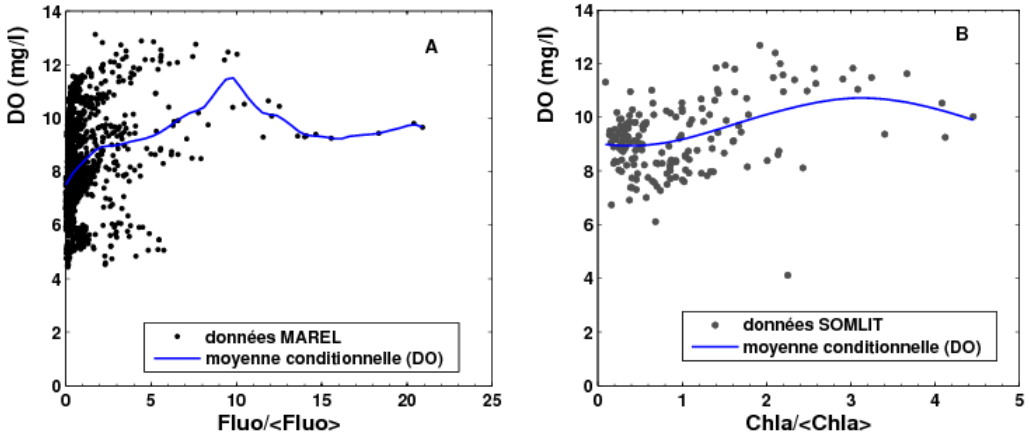

Figure 3-14 : Moyennes conditionnelles de l'oxygène dissous sachant : (A) la fluorescence (MAREL) ; (B) la chlorophylle a (SOMLIT). Les courbes de moyennes conditionnelles indiquent un comportement au sein des nuages de points. Dans la figure A, elle met en évidence une augmentation atteignant un pic autour de 11 mg/L d'oxygène suivi d'une baisse. Dans la figure B, on note une faible tendance à l'augmentation de la moyenne conditionnelle de la DO sachant la Chla.

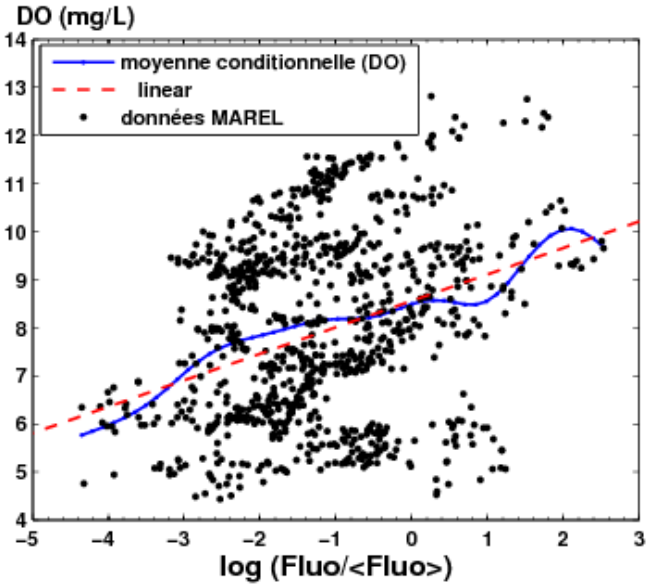

Figure 3-15 : Moyennes conditionnelles de l'oxygène dissous sachant : la fluorescence (MAREL). La fluorescence est ici estimée en représentation logarithmique ce qui indique une tendance à l'augmentation plus nette de la moyenne conditionnelle de la DO sachant le log de la Fluo (fluorescence).

La figure 3-16 représente la relation entre le pH et le carbone organique particulaire (COP), seulement pour les données SOMLIT (les COP sont absents de la base de données MAREL). Un comportement global au sein du nuage de points se dessine, et la moyenne conditionnelle du pH décrit cette relation entre le pH et les COP. Des travaux antérieurs ont montré que les concentrations en COP en Manche sont très élevées du fait de la forte production primaire rencontrée (Bodineau et al., 1999). Ici malgré une dispersion des points, nous observons une relation quasi linéaire entre le pH et les COP. A partir d'un certain seuil, le pH semble saturer mais cela demande confirmation car nous n'avons ici qu'un seul point. La relation obtenue confirme que plus les eaux sont acides, plus le COP est consommé.

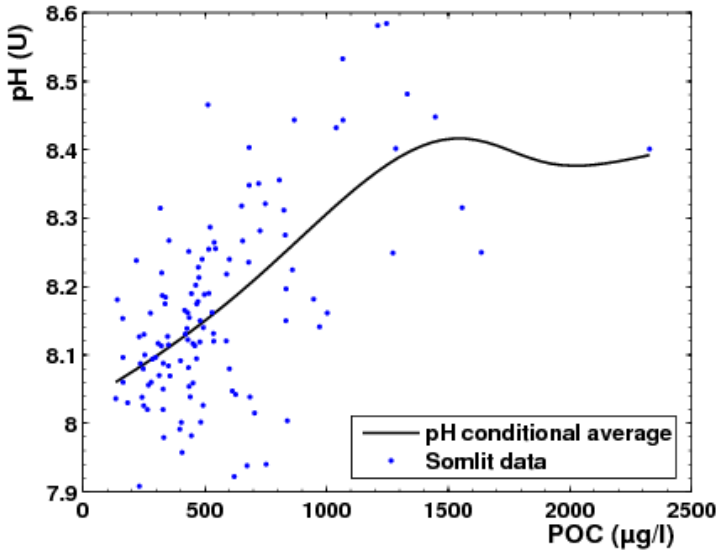

Figure 3-16 : Moyenne conditionnelle du pH sachant les COP (carbone organique particulaire) pour les données SOMLIT. La courbe de moyenne conditionnelle indique une tendance à l'augmentation suivie d'un seuil.

La relation quantitative entre la biomasse chlorophyllienne et la teneur en azote $(NO_2^- + NO_3^-)$ pour les deux types de mesure est décrite en figure 3-17. La relation entre ces 2 paramètres illustre l'interaction entre nutriments et la production phytoplanctonique. La moyenne conditionnelle décrit un comportement moyen au sein de ce nuage de points. Les courbes continues représentent les moyennes conditionnelles de la Chla pour le point C de SOMLIT et de fluorescence pour MAREL Carnot. Cette figure montre quelques pics

pouvant correspondre aux poussées phytoplanctoniques. Un premier pic est observé (de Chla ou fluorescence) et est associé à 5 µmol/L d'azote. Ce pic est suivi d'une baisse progressive de la moyenne conditionnelle (Chla et fluorescence). Les faibles teneurs en Chla et en fluorescence sont associées aux forts taux d'azote. La comparaison des courbes de moyennes conditionnelles indique dans les données SOMLIT un pic de Chla associé à 20 µmol/L d'azote. Cette valeur est comparable à celle obtenue dans la même zone en hiver en 1994 par Gentilhomme et Lizon. (1998). Ce pic est absent dans les données MAREL Carnot.

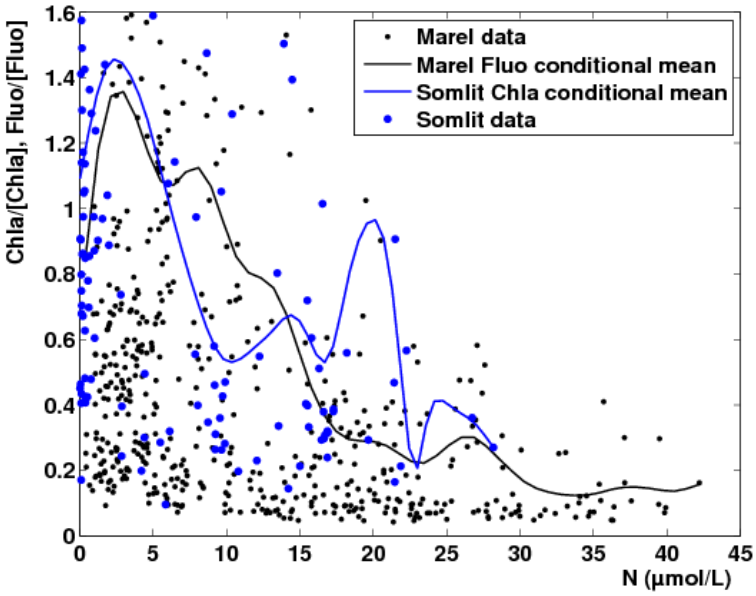

Figure 3-17 : Moyenne conditionnelle de la Chla (Chla : données SOMLIT) ou de Fluo (fluorescence : données MAREL Carnot) sachant l'azote. On observe un comportement assez semblable de la moyenne conditionnelle pour les deux systèmes. Des pics importants apparaissent dans ces courbes associés aux différentes concentrations d'azote.

Au niveau qualitatif, les données des différentes communautés de phytoplancton (données du SRN) ont été utilisées. Les moyennes conditionnelles de diatomées, de *Phaeocystis globosa* et de dinoflagellés (données SRN) sachant l'azote (données MAREL Carnot) sont représentées en figures 3-18 à 3-20. Ces figures révèlent une succession dans la communauté phytoplanctonique en fonction de taux d'azote. On constate que le premier pic observé en figure 3-17 (autour de 5 µmol/L) correspond à celui des diatomées en figure

3-18. Le second pic correspond à celui du *Phaeocystis globosa* qui apparait autour de 10 µmol/L (Figure 3-19). Et les derniers pics correspondant à ceux de diatomées et à ceux des dinoflagellés (Figure 3-20) autour de 20 à 25 µmol/L (ces valeurs correspondent aux valeurs rencontrées en hiver et en automne). On note dans ces figures que malgré les blooms de diatomées et de dinoflagellés le milieu reste fortement enrichit en azote. On pourrait supposer que ces espèces répondent moins au fort enrichissement ou que l'azote est régénéré rapidement dans la colonne d'eau (Maguer et al., 1998 ; Gentilhomme et Lizon, 1998).

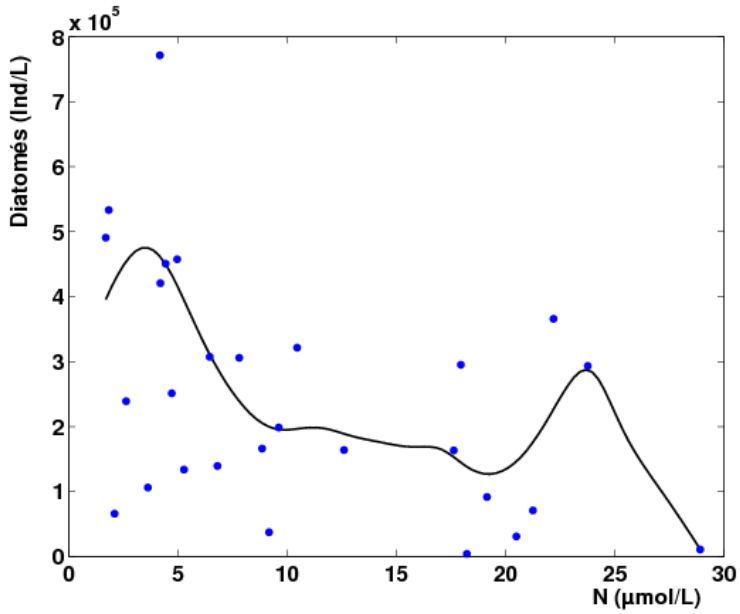

Figure 3-18 : Moyenne conditionnelle de diatomées (diatomées : données SRN) sachant l'azote (ou N : données MAREL Carnot). On observe un premier pic associé à une faible concentration en azote (autour de 5 µmol/L) et un second pic de diatomées autours de 25 µmol/.

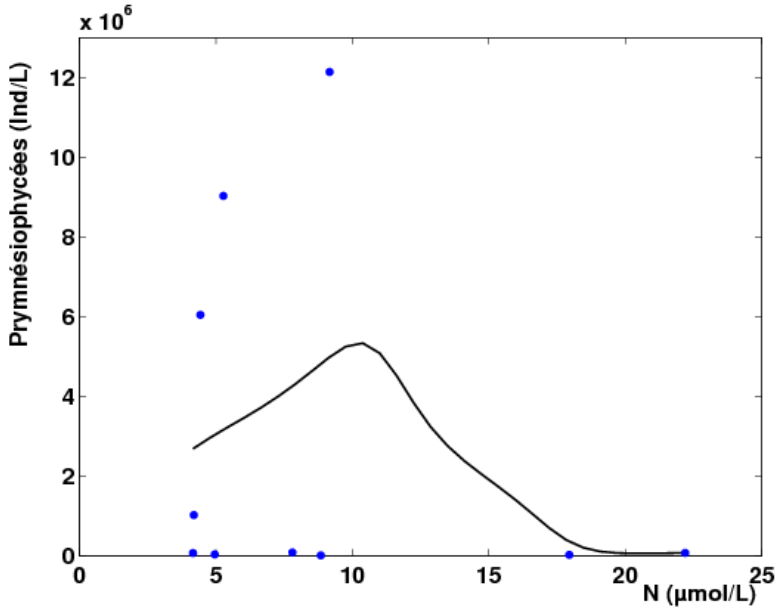

Figure 3-19 : Moyenne conditionnelle de Prymnésiophycées (ou Phaeocystis globosa : données SRN) sachant l'azote (ou N : données MAREL Carnot). On observe un pic de Phaeocystis autour de 10 µmol/L d'azote.

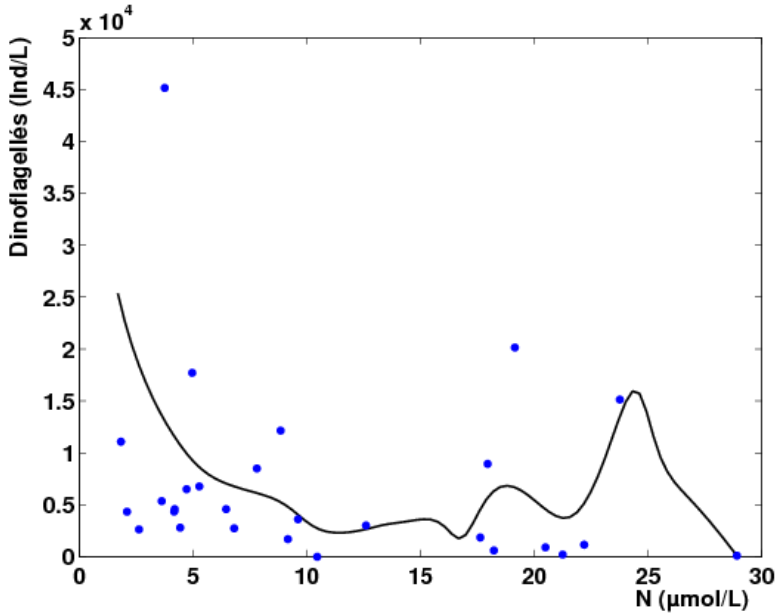

Figure 3-20 : Moyenne conditionnelle de dinoflagellés (données SRN) sachant l'azote (ou N : données MAREL Carnot). On observe un pic important de dinoflagellés autour de 25 µmol/L d'azote et un faible pic autour de 20 µmol/L.

La figure 3-21 illustre l'évolution de la Chla et d'azote pour les années 2000, 2003, 2004 et 2006 des données SOMLIT : on remarque que les concentrations en azote atteignent leur pic en hiver et le pic de Chla apparaît avec un délai moyen de 82 jours (+/- 26 jours) par rapport à celui de l'azote. Nous avons donc représenté la Chla avec un décalage de 3 mois (Figure 3-22) par rapport aux sels nutritifs. On constate ici une augmentation préliminaire, suivie par un plateau et une baisse. Cette baisse peut correspondre aux conditions hivernales : pendant l'hiver en effet le stock d'azote est important mais l'activité photosynthétique reste faible. Nous voyons donc ici que ceci n'est pas visible par les données simultanées mais devient plus clair lorsque les données sont représentées avec un décalage temporel.

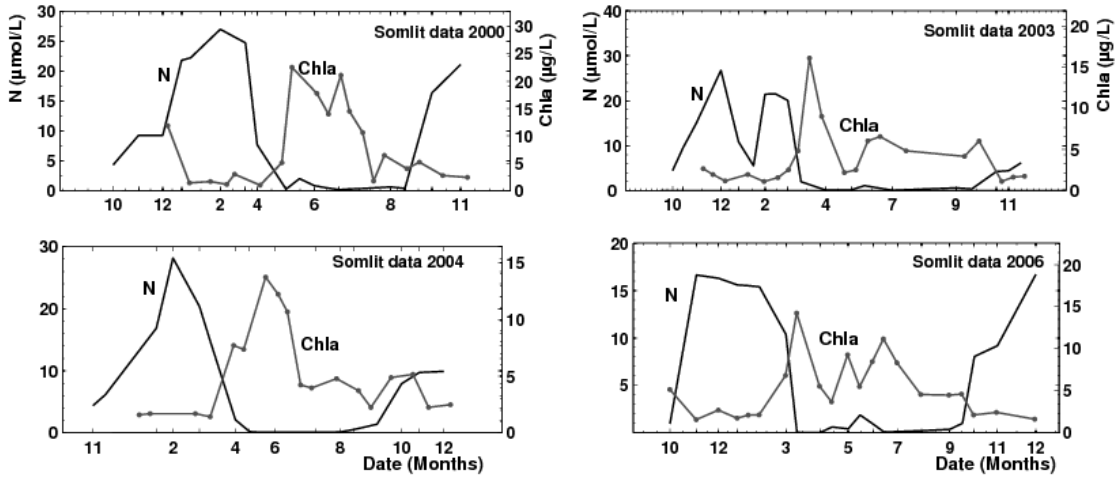

Figure 3-21 : Evolution des séries d'azote (N) et de Chla pour les années 2000, 2003, 2004 et 2006. Ces 4 figures montrent que le pic de N est suivi de celui de la Chla avec un retard de 82 jours.

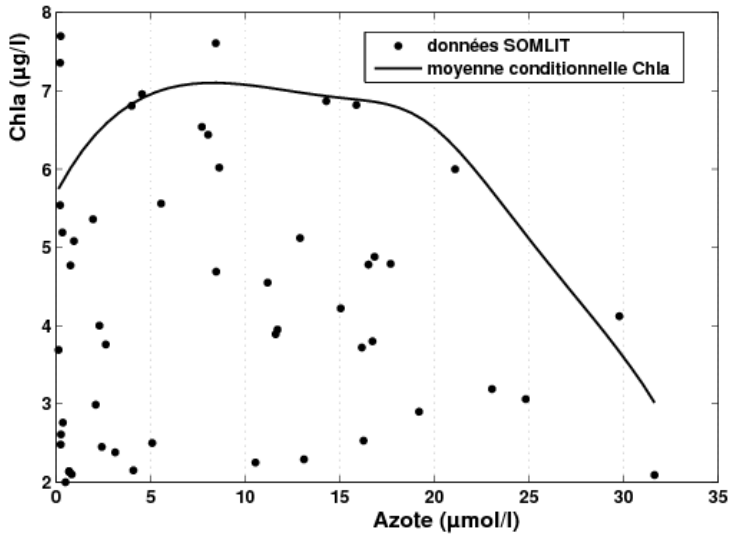

Figure 3-22 : Moyenne conditionnelle de la chlorophylle a sachant l'azote pour les données SOMLIT, pour un décalage de 3 mois dans les données de Chla.

La figure 3-23 représente la relation entre le pH et DO pour les deux systèmes de mesure. On note une tendance à l'augmentation de la moyenne conditionnelle, clairement visible dans les données SOMLIT. On note deux comportements dans les données MAREL Carnot avec un premier pic à 8,3 UpH et un second à 8,7 UpH qui est associé à 12 mg/L de DO (valeur supérieure à la moyenne annuelle de l'oxygène dissous : 6,57 mg/L). Au vu de ces résultats, on peut supposer qu'en l'absence d'activité photosynthétique, le système des carbonates régule la teneur en pH. Pendant l'activité photosynthétique, il y aurait augmentation du pH dans les eaux de surface. Plusieurs travaux ont montré la relation existante entre le pH et la DO. Les travaux d'Aminot et Kérouel (2004) au niveau de la rade de Brest ont montré une dépendance saisonnière entre pH et la DO, très visible au printemps. Pedersen et Hansen (2003) dans des cultures en laboratoire ont montré également que lors d'un bloom phytoplanctonique une augmentation du pH est observée. Dans les eaux côtières (zone semi-fermé) du Japon, Taguchi et Fujiwara (2009), ont montré une évolution saisonnière et interannuelle similaires de la série de pH et celle de la DO (dans une zone hypoxique). Nos résultats sont compatibles avec ces études réalisées dans des systèmes différents.

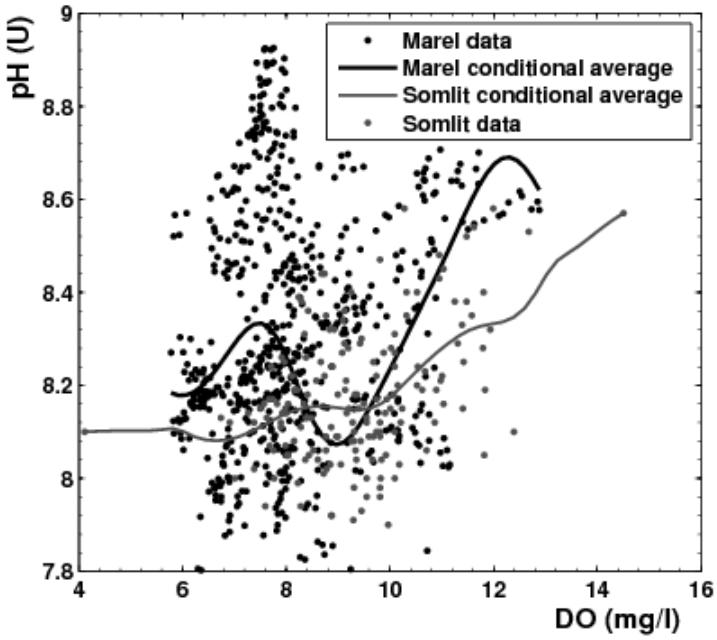

Figure 3-23 : Moyenne conditionnelle du pH sachant l'oxygène dissous pour les deux systèmes (SOMLIT et MAREL). On constate dans les deux cas une tendance générale à l'augmentation du pH pour une augmentation du DO.

3. Etude des ratios : N/P, Si/N, Si/P

3.1. Introduction

Ces dernières années, un dysfonctionnement écologique rencontré en Manche par des apparitions d'efflorescence massive algales a été détecté et interprété comme étant la conséquence de l'enrichissement en sels nutritifs anthropiques (Lefebvre, 2004b, 2008a,b ; Gentilhomme et Lizon, 1998 ; Huppert et al., 2002 ; Lefebvre et Caboche, 2008c). Dans ce contexte nous nous intéressons ici aux sels nutritifs en nous focalisant particulièrement sur la question de leur limitation.

Nous considérons ici la stoechiométrie de Redfield (Redfield, 1958, 1963) et considérons plus particulièrement la dynamique et la variabilité des ratios de paramètres chimiques provenant des séries MAREL et SOMLIT. Les ratios de Redfield sont des ratios

molaires C : N : P qui ont été estimés dans le phytoplancton et le zooplancton, en constatant une certaine stabilité, qui amène à postuler une universalité pour le vivant (producteurs primaires ou secondaires). A la suite de ceci, les ratios molaires dans l'eau de mer ont été considérés dans de nombreuses études : comme les éléments sont pris à partir de l'eau de mer au cours de la photosynthèse, la valeur du ratio dans le phytoplancton indique les besoins moyens pour la croissance algale. Ces ratios dans l'eau de mer n'ont pas été trouvés stables et universels comme dans le plancton (Downing, 1997), mais ils peuvent être comparées à leur valeur moyenne à l'équilibre au sein du phytoplancton : cela indique une limitation potentielle de la production primaire par certains éléments (Turner et al., 2003).

Nous considérons ici tout particulièrement les ratios stoechiométriques des nutriments N/P, Si/N et Si/P des eaux côtières. Ces ratios à "l'équilibre" (Si/N/P =16/16/1) sont généralement utilisés comme référence (Redfield, 1958 ; Brzezinski, 1985). L'information sur la silice (Si) peut être reliée à la dynamique des diatomées, lesquelles en ont besoin pour leur croissance, et l'optimum demandé correspond aux ratios Si/N =1 et Si/P =16. Lorsque les ratios estimés sont en dessous de ces ratios optimaux, cela correspond à une limitation en Si, et donc un désavantage pour les diatomées au profit d'autres espèces. Pour la croissance du phytoplancton, le ratio moyen N/P vaut 16 ; un ratio N/P <16 indique une limitation par l'azote et une abondance en phosphore alors qu'une limitation par le phosphore survient lorsque le rapport N/P est supérieur à 16.

Dans la littérature, les ratios N/P ou Si/P sont généralement estimés et étudiés en tenant compte de leur variabilité spatiale (Wang et al., 2003 ; Kucuksezgin et al., 2005) et également en considérant la variabilité saisonnière (Jordan et Joint, 1998 ; Kress et Herut, 2001 ; Kucuksezgin et al., 2005). Ces études indiquent qu'il y a une limitation en N dans la plupart des zones marines (Wang et al., 2003), tandis que dans les estuaire ou en Méditerranée, une limitation en P est souvent rencontrée (Krom et al., 1991 ; Wang et al., 2003 ; Kucuksezgin et al., 2005).

Dans notre approche ici, nous ne considérons pas la variabilité spatiale de ces ratios mais plutôt la dynamique des ratios en un point fixe. Nous considérons aussi la moyenne et les statistiques et pdf des ratios et non le ratio de la moyenne.

3.2. Evolution temporelle des ratios

La figure 3-24 indique l'évolution du rapport N/P au cours du temps. Les données utilisées proviennent des deux bases de données. Une forte variabilité apparaît dans les valeurs de ce rapport quelle que soit la méthode de mesure. Les plus grandes valeurs du rapport sont enregistrées par la station MAREL Carnot. Les données MAREL ne révèlent pas une évolution saisonnière à l'inverse de celles de SOMLIT. Les rapports N/P de SOMLIT et de MAREL varient entre 0,01 et 180 et entre 0,01 et 430 respectivement ce qui montre des variations sur 4 ordres de grandeur. Les moyennes du rapport N/P sont de l'ordre de 30,8 et de 26,1 pour MAREL et pour SOMLIT respectivement (Tableau 3-2). On trouve un rapport N/P moyen supérieure à 16, ce qui suppose que localement le phosphore est le facteur limitant pour le phytoplancton (au niveau des eaux de Boulogne-sur-mer en Manche orientale). Les mêmes résultats sont également trouvés en Méditerranée occidentale et orientale : des travaux ont montré une limitation en phosphore dans ces zones (Kress et Herut, 2001 ; Kress et al., 2005). Mais d'autres travaux ont montré que le phytoplancton pouvait être limité par les nutriments N ou P selon la saison (Jordan et Joint, 1998 ; Chikhaoui et al., 2008). En guise d'illustration, la figure 3-25 représente l'évolution saisonnière du rapport N/P, de la chlorophylle *a* et de la biomasse des dinoflagellés, mesurés par SOMLIT et par le SRN respectivement (de 2004 à 2006). On note un pic de N/P en mars suivi par un pic de Chla en avril et en mai, les forts pics de dinoflagellés apparaissent en juin et en août pour l'année 2004. On observe un N limitant surtout après la floraison printanière et un P limitant au début du printemps. Cela indique que localement l'évolution saisonnière de la Chla coïncide avec celle de l'azote.

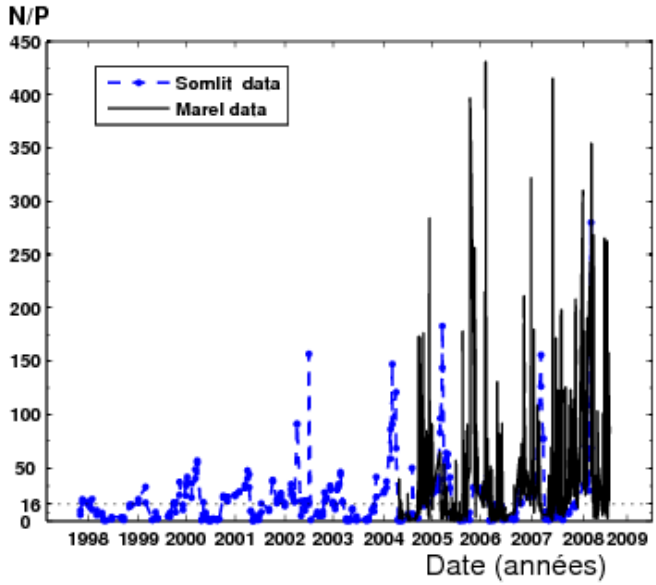

Figure 3-24 : Evolution du ratio N/P pour les données SOMLIT et MAREL de 1998 à 2008 et de 2004 à début 2009 respectivement.

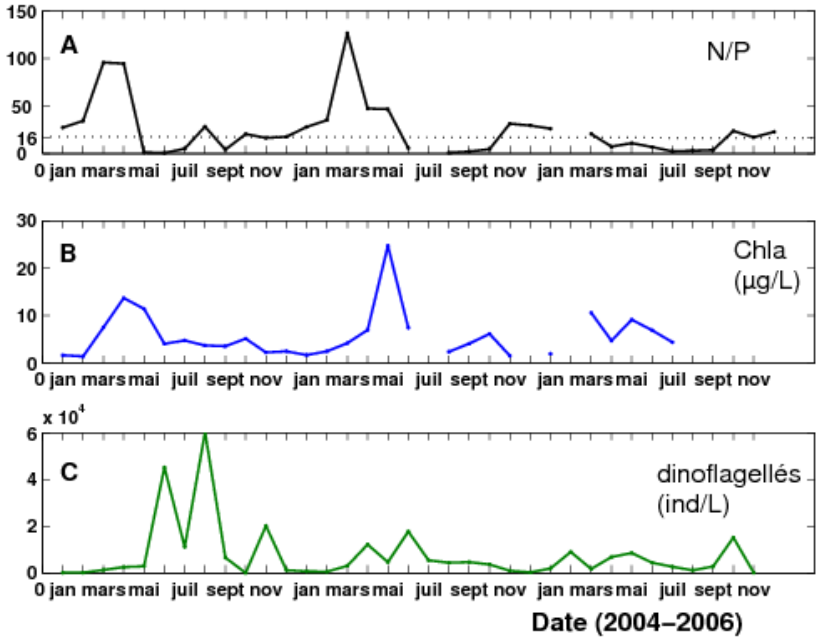

Figure 3-25 : Evolution saisonnière du ratio moyen N/P, de la Chla des données SOMLIT et de l'abondance de dinoflagellés (données du réseau SRN), sur la période 2004-2006.

La figure 3-26 représente le rapport Si/N pour les données SOMLIT et MAREL. On constate une forte intermittence dans les données MAREL Carnot comparées aux données SOMLIT. Les teneurs minimales et maximales en rapports sont de l'ordre de 0,01 et de 25,6 pour les données MAREL Carnot. Pour les données SOMLIT, les teneurs minimales et maximales du ratio sont de l'ordre de 0,015 et 15,8. La moyenne du rapport Si/N est de l'ordre de 0,55 pour MAREL Carnot et de l'ordre de 1,4 pour SOMLIT (Tableau 3-2).

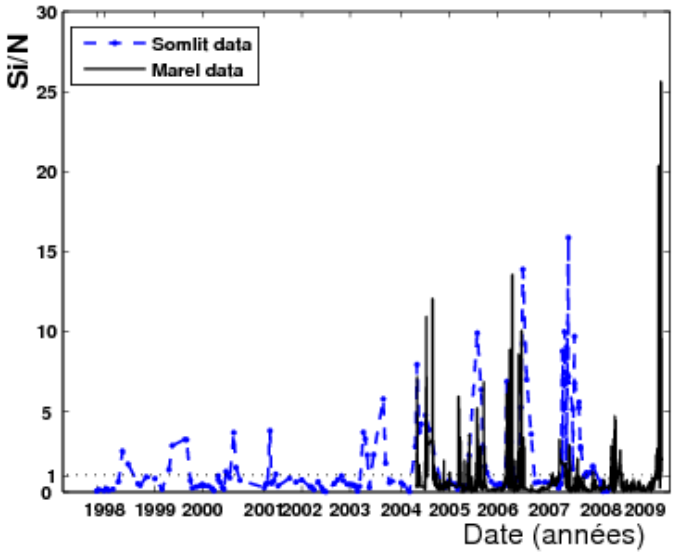

Figure 3-26 : Evolution du ratio Si/N pour les données SOMLIT et MAREL de 1998 à 2008 et de 2004 à début 2009 respectivement. On note une variabilité importante dans les teneurs en Si/N pour les deux types de mesure.

La figure 3-27 indique l'évolution des valeurs du rapport Si/P pour les données SOMLIT et MAREL Carnot. Cette figure met en évidence une variabilité interannuelle avec des valeurs du rapport qui peuvent être très importantes dans les données MAREL Carnot. Les teneurs minimales et maximales en rapport sont de 0,03 et 512 respectivement pour MAREL Carnot et de 0,44 et 108,02 pour SOMLIT. Les moyennes du rapport sont de l'ordre de 10,2 pour MAREL et de 17,4 pour SOMLIT.

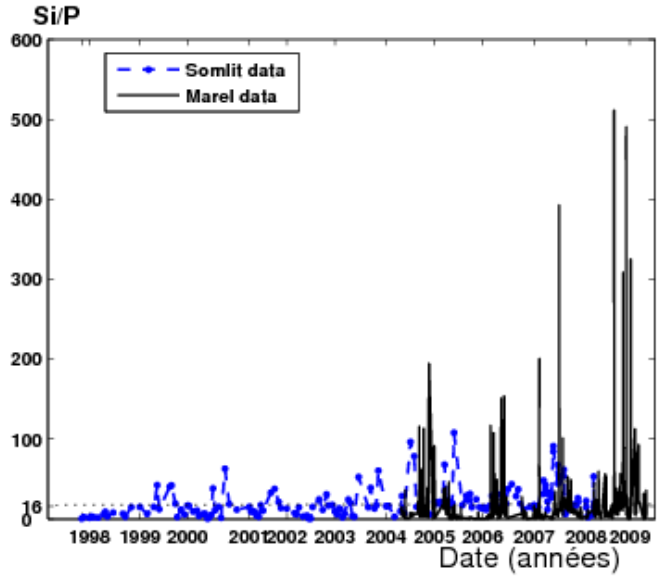

Figure 3-27 : Evolution du ratio Si/P pour les données SOMLIT et MAREL de 1998 à 2008 et de 2004 à début 2009 respectivement. Les données MAREL peuvent atteindre des fortes teneurs en Si/P.

Les données SOMLIT révèlent une moyenne des rapports Si/N et de S/P de 1,4 et de 17,4 respectivement. Ces valeurs en ratios sont assez proches de celles de l'équilibre de Redfield (1 et 16). On note que Si/N < 1 et Si/P < 16 dans les données MAREL, donc le Si semble plus limitant pour le phytoplancton que N ou P. Cela peut être dû à l'abondance de diatomées dans la communauté phytoplanctonique. Dans la zone, on note une moyenne de 315.037 ind/L de diatomées de 2004 à 2006, avec des abondances très élevées en hiver (avec une moyenne en hiver de l'ordre de 110.000 ind/L d'après les données du SRN). Un déficit en acide silicique pourrait être expliqué par la forte réponse des diatomées, sachant que la silice est indispensable à la structure et au métabolisme de ces dernières. De plus, de nombreux travaux ont montré que les groupes taxinomiques phytoplanctoniques répondent de façon diverses aux enrichissements nutritifs, aboutissant à des changements importants dans des communautés de micro-algues (Fouillaron et al., 2007 ; Chikhaoui et al., 2008). Cette variabilité importante dans les teneurs en rapport pourrait donc être due aux changements dans la composition phytoplanctonique (Riegman et al., 1992 ; Chikhaoui et al., 2008). En guise d'illustration la figure 3-28 représente l'évolution saisonnière de l'abondance des diatomées et du *Phaeocystis globosa* dans les eaux de Boulogne-sur-mer sur la période de 2004 à 2006 (données SRN). On observe une succession d'espèces avec

l'apparition des diatomées en mars suivi du *Phaeocystis* en avril (Lefebvre et Caboche, 2008c).

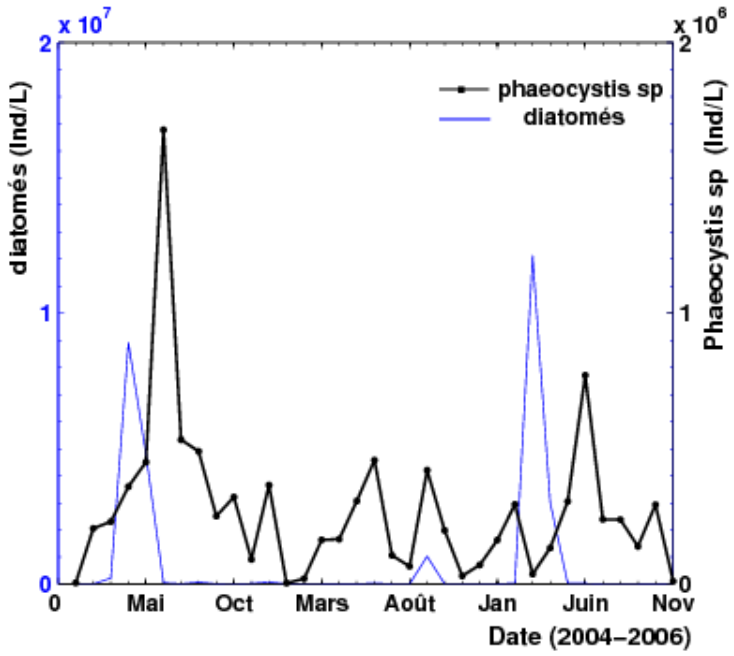

Figure 3-28 : Evolution saisonnière de l'abondance des diatomées et de Phaeocystis globosa de 2004 à 2006 (données SRN). Cette figure met en évidence une succession d'espèces : les diatomées apparaissent avant Phaeocystis globosa.

Tableau 3-2 : Les moyennes des rapports et les valeurs des pentes hyperbolique des pdfs pour chacun des ratios

	Stations	N/P	Si/N	Si/P
Moyenne du rapport	MAREL (Carnot)	30,8	0,55	10,2
	SOMLIT (point C)	26,1	1,4	17,4

3.3. Densité de probabilité des ratios stoechiométriques

La section précédente a mis en évidence la forte variabilité des ratios stoechiométriques, lorsque considérés comme des séries temporelles. Ceci suggère que cette forte variabilité est une propriété intrinsèque de ces ratios. Pour mettre en évidence cette variabilité et la caractériser, nous allons considérer ici les densités de probabilité de ces ratios.

La Figure 3-29 représente le ratio N/P pour les données MAREL et SOMLIT. Ce ratio montre une distribution asymétrique avec des plus fortes teneurs en ratio dans les données MAREL. On voit aussi que globalement les courbes ont la même allure, mais avec un décalage, qui est peut être l'effet de la résolution des mesures. Les grandes valeurs détectées à partir des séries temporelles nous amènent à considérer ces PDF en représentation log-log, de façon à mieux visualiser les extrêmes. La figure 3-30 représente la pdf (en log-log) des teneurs en rapport N/P des données SOMLIT et MAREL Carnot. Cette figure indique un comportement du type hyperbolique ou Pareto avec un exposant de l'ordre de 2 pour les deux types de mesure.

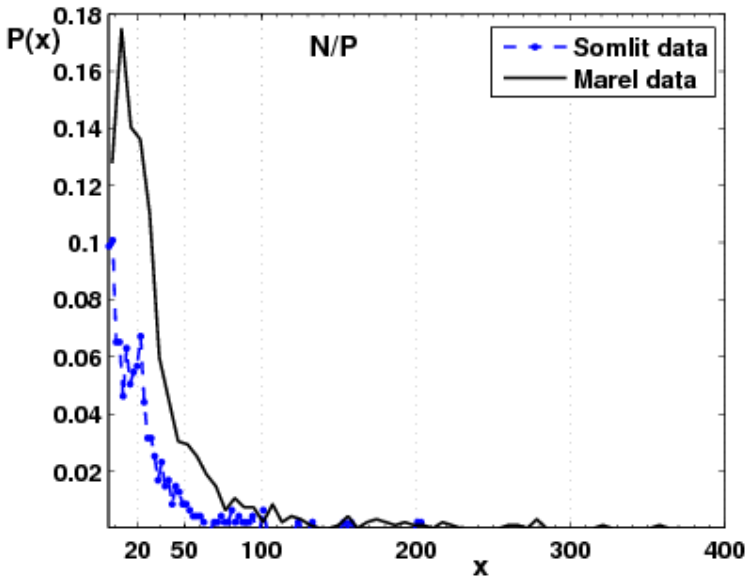

Figure 3-29: Densités de probabilités du ratio N/P des données MAREL et SOMLIT. On note une distribution asymétrique avec les fortes teneurs en rapport pour les données MAREL.

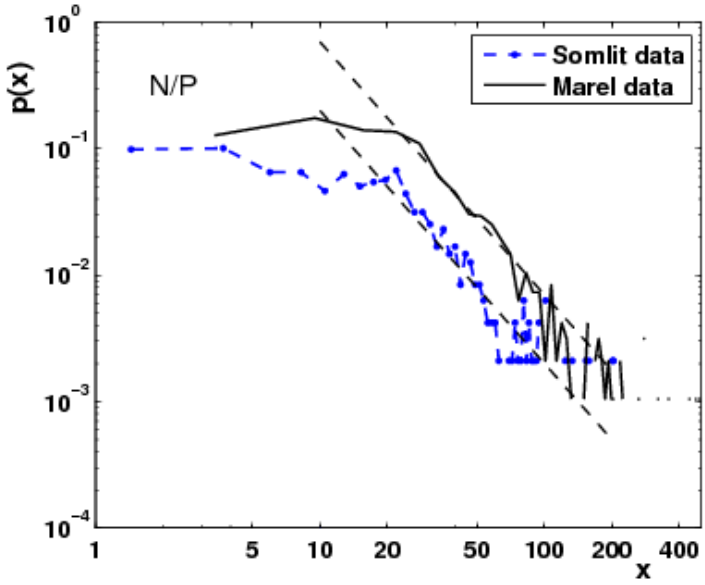

Figure 3-30 : Densités de probabilités du ratio N/P en log-log, mettant en évidence une queue de probabilité avec un exposant de l'ordre de 2,0 pour les deux types de mesure.

Un comportement hyperbolique est également mis en évidence dans le rapport Si/N (figure 3-31) avec un exposant de l'ordre de 3 pour les deux mesures (Tableau 3-3). Le rapport Si/P (figure 3-32) met en évidence aussi une intermittence hyperbolique avec un exposant de probabilité de l'ordre de 3 pour MAREL Carnot et SOMLIT (Tableau 3-3). Cela suppose que localement les teneurs en N/P comparées aux Si/N et Si/P sont plus intermittentes et que les extrêmes sont plus fréquemment rencontrés dans ce ratio. Les extrêmes mis en évidence dans ces ratios peuvent s'expliquer par l'apport important en sels nutritifs dans cette zone (plus particulièrement des nitrates). Des teneurs en nitrate très élevées sont très rapidement consommés et épuisés en stock par le phytoplancton, d'où l'apparition des valeurs extrêmes dans les teneurs en rapport N/P.

Il est assez remarquable ici de constater que les extrêmes de ces ratios suivent assez bien une loi hyperbolique. Nous avons constaté ceci pour tous les ratios considérés, laissant penser que ceci pourrait être une propriété universelle. De plus, pour les différentes bases de données concernant le même ratio (par exemple N/P), on constate la même pente.

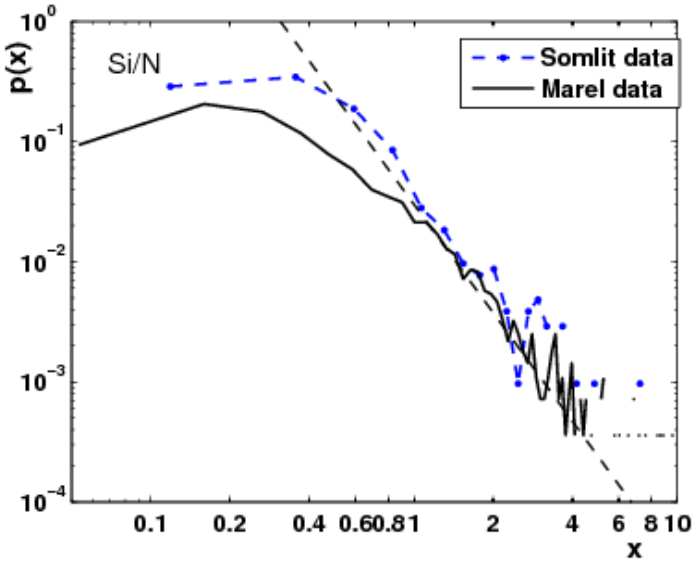

Figure 3-31 : Densités de probabilités du ratio Si/N en log-log, mettant en évidence une queue de probabilité hyperbolique avec un exposant de l'ordre de 3 pour les deux bases de données (SOMLIT et MAREL Carnot). On observe un décalage pour les faibles teneurs en Si/N et une superposition pour les fortes teneurs en Si/N.

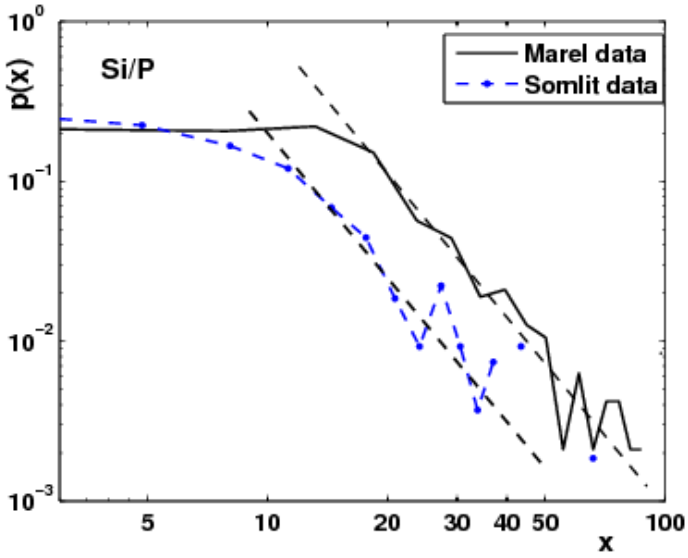

Figure 3-32 : Densités de probabilités du ratio Si/P en log-log, mettant en évidence une queue de probabilité hyperbolique avec un exposant de l'ordre de 3,0 pour les deux bases de données (SOMLIT et MAREL).

Tableau 3-3 : Les valeurs des pentes hyperbolique des pdfs pour chacun des ratios

	Stations	N/P	Si/N	Si/P
Valeur de la pente (pdf) **μ**	MAREL (Carnot)	2,0	3,0	3,0
	SOMLIT (Point C)	2,0	3,0	3,0

C. Les séries temporelles SOMLIT en Manche

Dans cette section, nous considérons les données SOMLIT issues de deux points côtiers : le point C en Manche orientale (la zone de Boulogne-sur-mer et Wimereux) et le point Estacade en Manche occidentale (la zone de Roscoff) (Figure 3-33). Seules les mesures faites en surface sont considérées dans cette étude.

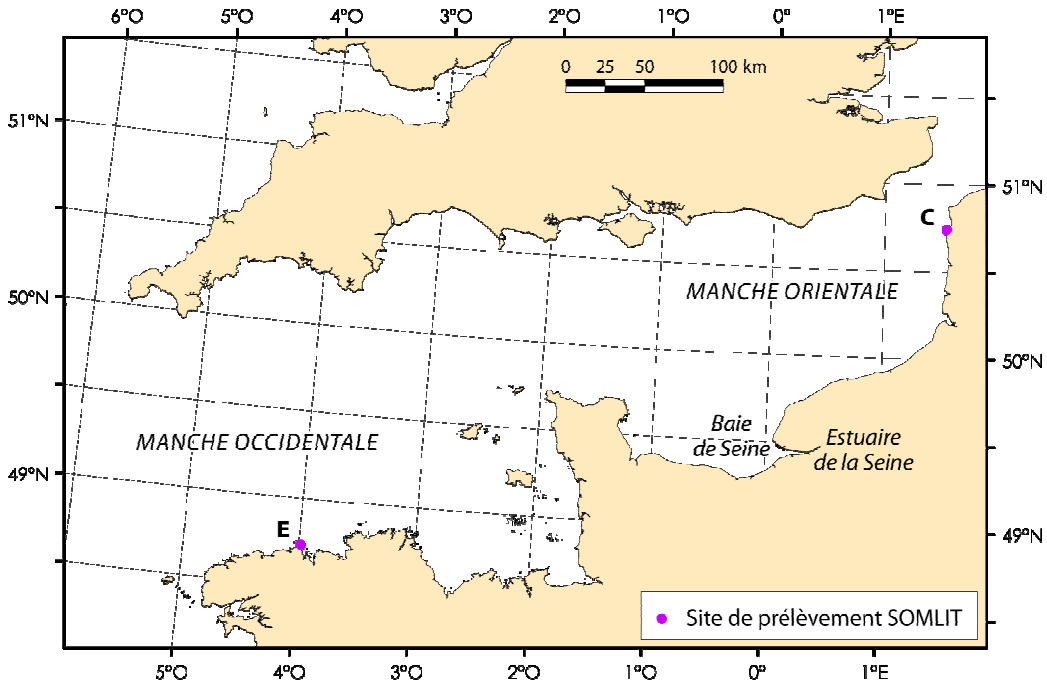

Figure 3-33 : Les bassins oriental et occidental en Manche : Wimereux pour les eaux côtières de Boulogne-sur-mer en Manche orientale (point C) et Roscoff pour les eaux côtières en Manche occidentale (Estacade). (Source : Denis Marin ; LOG).

1. Le point C et le point Estacade : deux points côtiers

Dans cette section, les séries de données SOMLIT provenant d'une part de la Manche orientale (point C) et d'autre part de la Manche occidentale (le point Estacade), ont été comparées entre elles. Ces deux points de prélèvement côtiers sont représentatifs de la Manche, et sont soumis à des influences continentales et anthropiques.

Les paramètres biogéochimiques du point C sont mesurés tous les 15 jours. La période d'étude s'étend de fin 1999 à début 2008. Les prélèvements d'échantillons d'eaux sont généralement réalisés à l'heure de la pleine mer dans les eaux de Boulogne-sur-mer (voir chapitre I). Les paramètres biogéochimiques au point Estacade sont également mesurés de manière bimensuelle. La période d'étude considérée s'étend de 1997 à fin 2008. Les prélèvements sont également effectués à marée haute de morte eau dans les eaux de Roscoff. Les méthodologies d'échantillonnage et d'analyse communes sont faites selon le protocole mise en place par SOMLIT (voir chapitre I).

Du fait du brassage intense et permanent par les courants de marée dans ces deux bassins de la Manche, la colonne d'eau reste généralement homogène en température et en salinité pendant l'ensemble de l'année (Dauvin et al., 1991). La comparaison des températures moyennes en surface des deux séries (Figure 3-34) indique que l'évolution saisonnière de la température Estacade (Roscoff) est plus atténuée que celle du point C (Wimereux). Les valeurs de température les plus élevées et les plus faibles sont retrouvées au point C. Le même constat a été fait dans les données de température recueillies à haute fréquence au point Estacade (Roscoff) et à MAREL Carnot (Boulogne-sur-mer) (voir chapitre II).

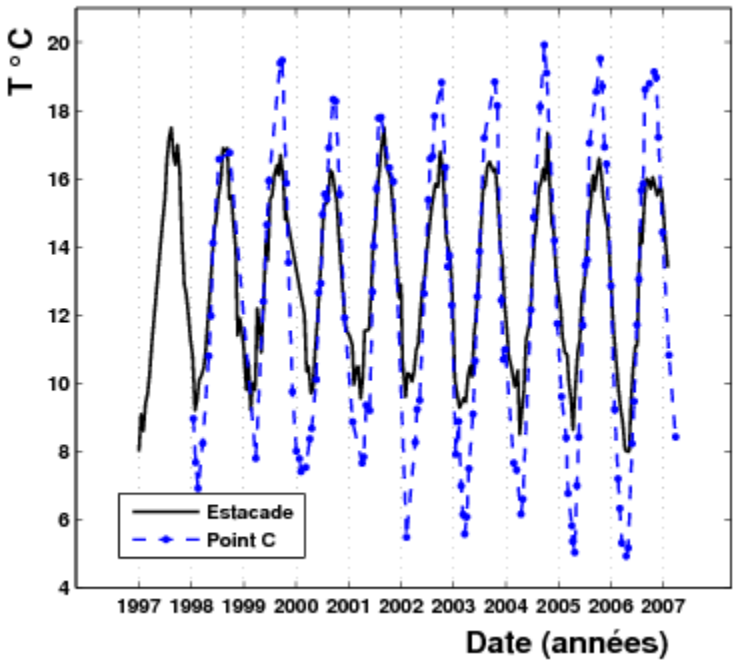

Figure 3-34 : Evolution de la température mesurée au point C (Wimereux) et au point Estacade (Roscoff) : on note une bonne superposition avec les températures.

La salinité de surface mesurée dans les deux bassins (Figure 3-35) révèle des teneurs en général plus élevées au point Estacade. On note une moyenne de 35,5 pour les eaux à Roscoff (Dauvin et al., 1991) et une moyenne de 34 pour les eaux de Boulogne-sur-mer. La figure 3-35B représente la différence de salinité moyenne de surface depuis 2002 pour les deux séries. Cette différence est de 1,2 ± 0,4 et varie de 0,36 à 2,47.

La figure 3-36 représente les données de Chla pour les deux zones. Les teneurs en Chla révèlent une forte variabilité interannuelle, avec des teneurs très élevées point C. On remarque des teneurs moyennes annuelles de l'ordre de 5,4 µg/L au point C et de 0,93 µg/L au point Estacade. Le rapport de Chla entre les deux zones ($Chla_W / Chla_R$) indique une certaine irrégularité (Figure 3-36B). Cette figure révèle une tendance à la baisse visible dans les pics et de forts pics sont rencontrés de 1998 à 2003. Ce rapport varie de 1,04 à 34,28 confirmant les teneurs très élevées au point C (Wimereux). La valeur du rapport est souvent entre 5 et 20.

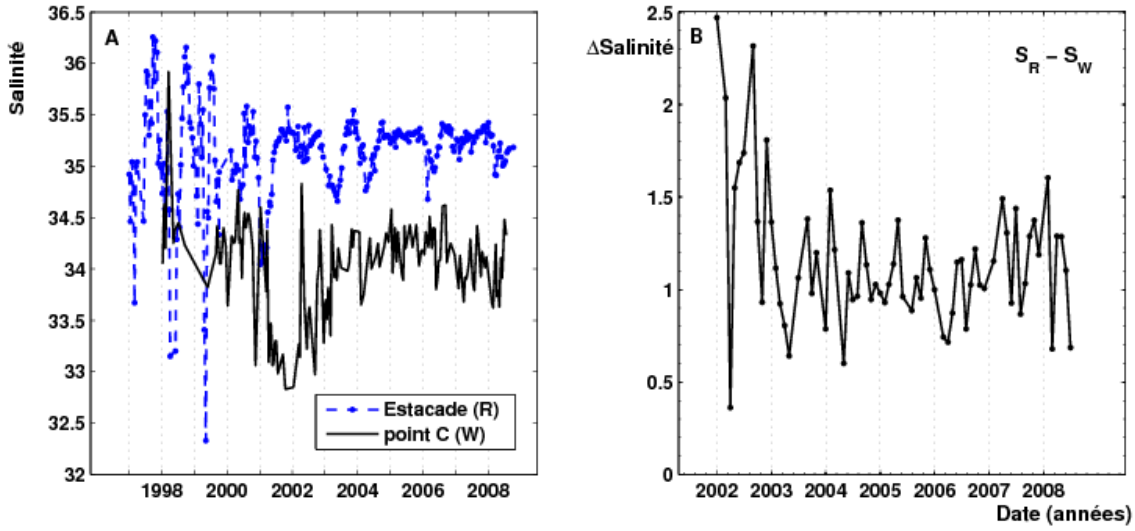

Figure 3-35 : Evolution des teneurs de salinité de surface mesurées au point C (Wimereux) et au point Estacade (Roscoff), on note des teneurs en salinité élevées pour le point Estacade (A). La différence de salinité est visible de 2002 à 2008 dans les deux zones, elle varie de 0,4 à 2,5 (B).

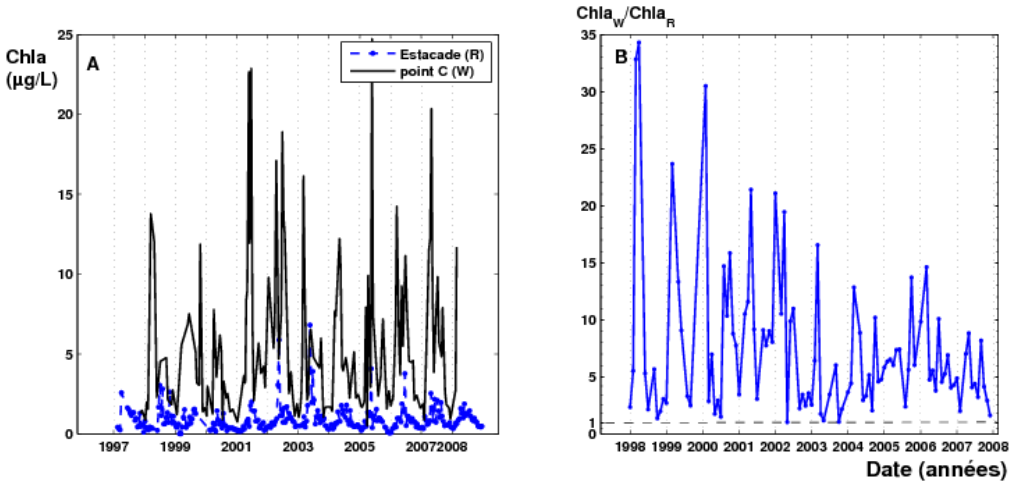

Figure 3-36 : Evolution des teneurs en Chla de surface mesurées au point C (Wimereux) et au point Estacade (Roscoff) : on note des teneurs très élevées au point C. Au point C (en Manche orientale), les teneurs en Chla sont très localement importantes (B). Le rapport de Chla entre les deux zones montre que les données à Wimereux sont toujours supérieures, le plus souvent le rapport va de 5 à 20.

Les teneurs en COP (Figure 3-37) et en NOP (Figure 3-38) sont aussi très différentes à Roscoff et à Wimereux : les COP et Les NOP mesurés au point C indiquent des teneurs relativement élevées comparées à celles mesurées au point Estacade. Pour les COP, on note une moyenne de 580 µg/L au point C contre 209 µg/L au point Estacade et pour les NOP on note 165 µg/L contre 32,5 µg/L respectivement. Le rapport moyen de COP entre les deux zones (COP_w / COP_R) depuis 2001 indique une certaine stabilité au cours du temps (Figure 3-37B) avec une valeur souvent entre 2 et 5. Quant au rapport NOP (NOP_w / NOP_R) des deux zones (Figure 3-38B), il indique une irrégularité mettant en évidence de forts pics concentrés entre 2003 et 2005.

La relation linéaire entre NOP et COP pour chacune des zones est représentée en log-log en figure 3-39. Au point Estacade (Roscoff), une relation linéaire est décrite par la fonction exponentielle comparée au point C (Wimereux) où la majorité des points se retrouvent au dessus de cette fonction.

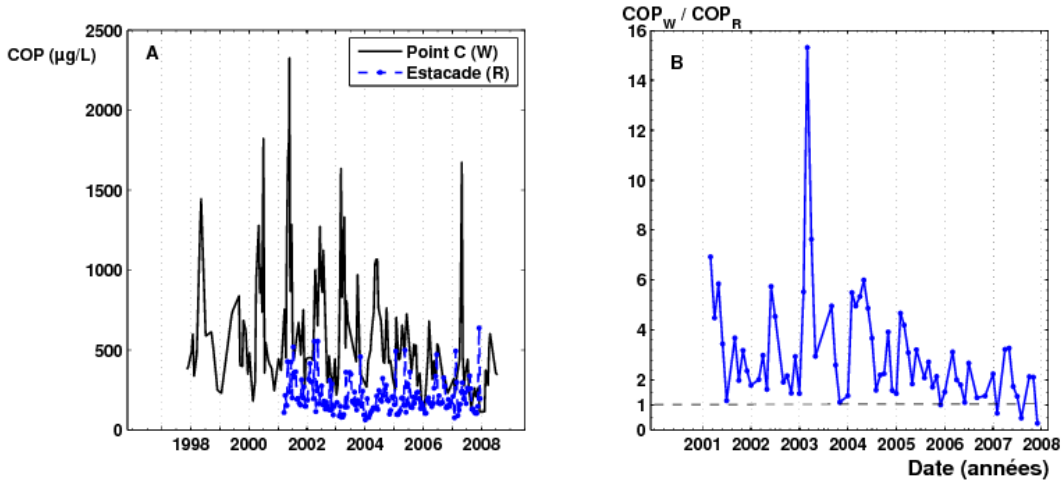

Figure 3-37 : Evolution des teneurs en COP mesurées au point C (Wimereux) et au point Estacade (Roscoff) : (A) on note des teneurs très variables dans les deux zone mais très élevées au point C ; Le rapport de COP entre les deux zones indique une certaine stabilité au cours du temps (B), avec une valeur souvent entre 2 et 5.

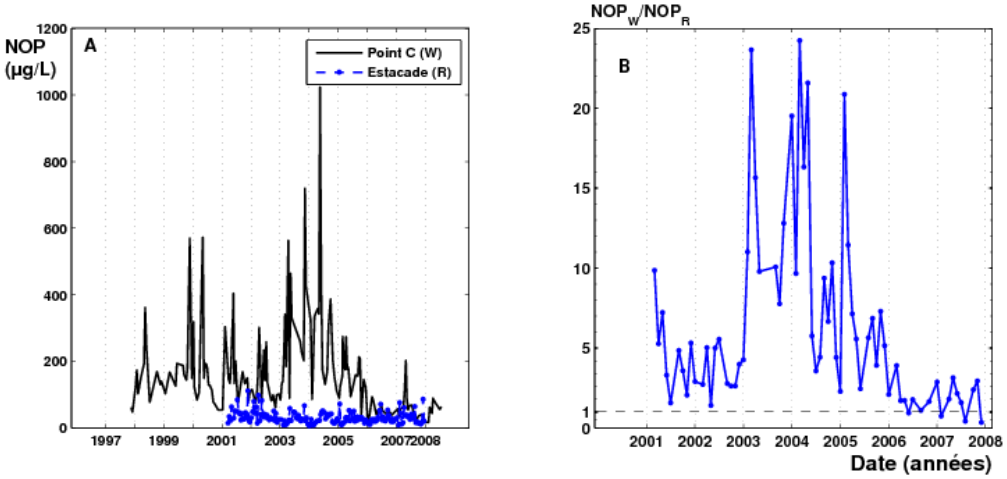

Figure 3-38 : Evolution des teneurs en NOP mesurées au point C (Wimereux) et au point Estacade (Roscoff) : on note des teneurs très élevées au point C (A) ; le rapport de NOP entre les deux zones indique une évolution irrégulière au cours du temps. Les plus forts pics sont rencontrés de 2003 à 2005.

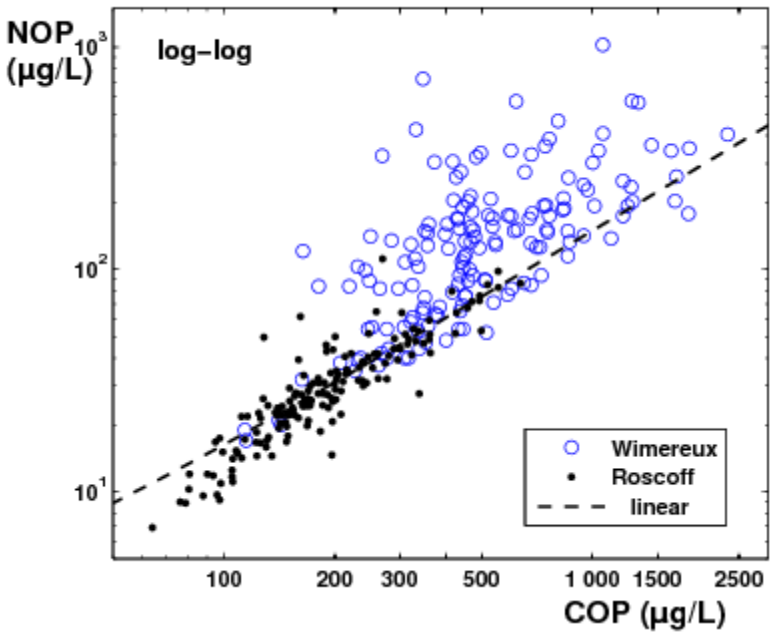

Figure 3-39 : La relation entre les COP et NOP de chaque zone en log-log. Une relation décrite par une fonction puissance semble plus nette à Roscoff qu'a Wimereux ou le nuage de point s'éloigne de cette dernière.

2. Comparaison des densités de probabilité des ratios: N/P, Si/N, Si/P, COP/NOP et COP/Chla

Des travaux antérieurs ont montré que de façon générale les eaux proches de Boulogne-sur-mer, en Manche orientale sont plus riches en nitrate et en biomasse algale comparées aux eaux proches de Roscoff (en Manche occidentale) (Maguer et al., 1998). Dans notre étude, on constate également que les teneurs moyennes en azote, en phosphate et en acide silicique dans les eaux de surface diffèrent entre le point C et le point Estacade (Figure 3-40). Cette tendance à l'enrichissement en sels nutritifs au point C est bien nette comparée au point Estacade (voir le Tableau 3-4).

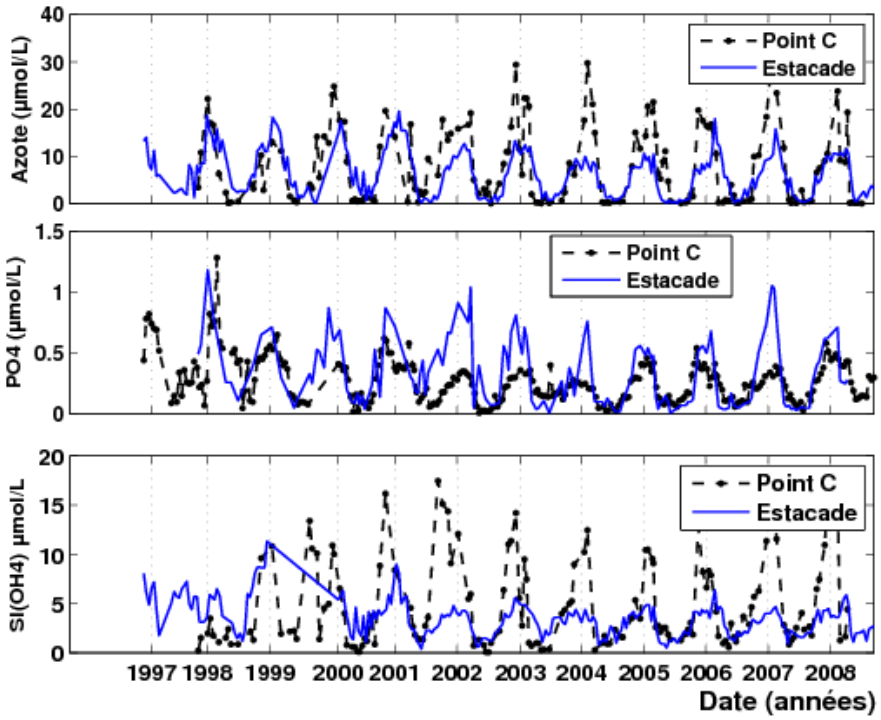

Figure 3-40 : Evolution des sels nutritifs au point C (Wimereux) et au point Estacade (Roscoff) : l'azote, le phosphate (PO4) et l'acide silicique (Si(OH)4). Les teneurs les plus élevées sont mesurées au point C (Wimereux) en Manche orientale). Le Phosphate indique des teneurs plus importantes à Roscoff au cours du temps.

Tableau 3-4 : Les moyennes annuelles des sels nutritifs mesurés au point C et au point Estacade

Moyenne annuelle	Azote (µmol/L)		Phosphates (µmol/L)		Acide silicique (µmol/L)	
	Point C	Estacade	Point C	Estacade	Point C	Estacade
1997	7,16	6,33	0,53	0,38	0,87	5,36
1998	7,18	8,84	0,53	0,47	2,47	5,50
1999	7,39	6,75	0,38	0,3	5,79	
2000	8,20	8,20	0,31	0,28	4,17	3,79
2001	7,80	7,36	0,40	0,25	6,47	3,67
2002	9,94	5,69	0,44	0,18	5,20	2,78
2003	7,04	5,64	0,28	0,23	3,60	3,41
2004	8,63	4,86	0,27	0,16	3,51	2,85
2005	9,44	4,03	0,23	0,25	4,84	2,63
2006	6,07	5,95	0,24	0,21	4,10	3,1
2007	8,12	5,79	0,33	0,25	6,34	3,00
2008	6,89	6,44	0,38	0,34	5,86	3,11

Selon les séries temporelles considérées, les concentrations en N/P, Si/N et Si/P des eaux de surface des deux zones fluctuent fortement. Le rapport N/P en Manche orientale (Wimereux) demeure nettement plus élevé qu'en Manche occidentale (Roscoff) : on note des teneurs maximales et minimales de 0,25 et 280 pour le point C et de 0,1 et 166 pour Estacade. Une variabilité interannuelle du rapport N/P (Tableau 3-4) est montrée par les deux zones. Cette variabilité a été également mise en évidence en rade de Brest par Sournia et Birrien (1995).

La valeur moyenne du rapport N/P est de l'ordre de 22,9 pour Estacade (Roscoff) et de l'ordre de 23,6 (Wimereux) pour le point C sur la même période d'étude. La figure 3-41 représente la superposition des teneurs en rapport N/P des deux zones. Elle indique une variabilité importante de 1997 à 2008 avec de fortes teneurs en N/P mesurées au point C en 2004, 2005, 2007 et 2008 (Figure 3-41B). L'évolution de ce rapport de 2006 à 2008 indique qu'en 2006 ce rapport était plus important au point Estacade (Roscoff) contrairement aux années 2007 et 2008 qui mettent en évidence de forts pics au point C (Wimereux). Ces valeurs en rapport moyens N/P sont assez proches des valeurs trouvées au niveau des eaux

profonde en Méditerranée (N/P ≈ 28 :1) (Krom et al., 2004). Béthoux et al. (2002) estiment un rapport de 22 dans le bassin ouest de la Méditerranée. Le ratio N/P en rade de Brest fluctue aussi fortement et indique un rapport moyen de 30 en début de bloom (Delmas et al., 1983). Dans Krom et al. (2004), on retrouve également une valeur de N/P proche de 25, estimée par Karafistan et al. (2002) dans les eaux profondes du détroit de la Sicile en Méditerranée.

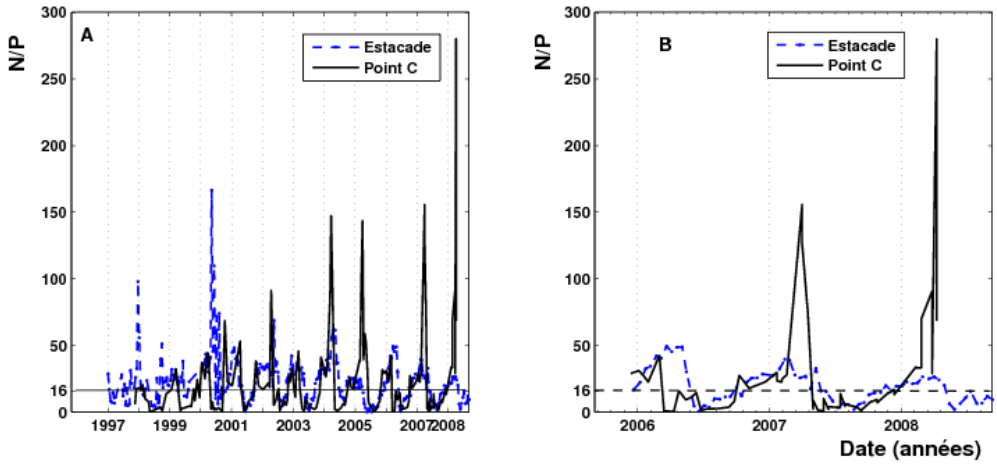

Figure 3-41 : Evolution du ratio N/P au point C (Wimereux) et au point Estacade (Roscoff) : (A) on note de forte fluctuations, une variabilité interannuelle et des valeurs du rapport étant généralement supérieures au rapport de Redfield (N/P=16) ; (B) sur une échelle de 3 ans, les teneurs au point C se démarquent de celles mesurées au point Estacade.

De grandes fluctuations du ratio Si/P sont observées pour les eaux de surface dans les deux régions de la Manche considérées ici (Figure 3-42A). Sur une échelle de 3 ans (de 2006 à 2008), on remarque des teneurs en Si/P très importantes au point C (Wimereux) (Figure 3-42B). Les rapports moyens Si/P possèdent une variabilité interannuelle (Tableau 3-4). Les rapports moyens en Si/P sur l'ensemble des séries sont de 17,8 pour Estacade et de 17,5 pour le point C. Ces rapports sont assez proches de ceux trouvés en rade de Brest en février 1982 (Si/P ≈ 18,7 ; 17,5) par Hafsaoui et al. (1985). On remarque que de 2003 à 2008 (Figure 3-42), le point C révèle de très fortes fluctuations avec un maximum de 108 contre 80 pour Estacade. On note pour les deux zones des pics fortement

supérieurs au rapport de Redfield (Si/P > 16) (Figure 3-42), et on constate que les valeurs moyennes en rapports dans les eaux de surface ne diffèrent pas entre la Manche orientale et la Manche occidentale, quoique les valeurs en Manche orientale soient en général légèrement plus élevées (visible dans les données disponibles).

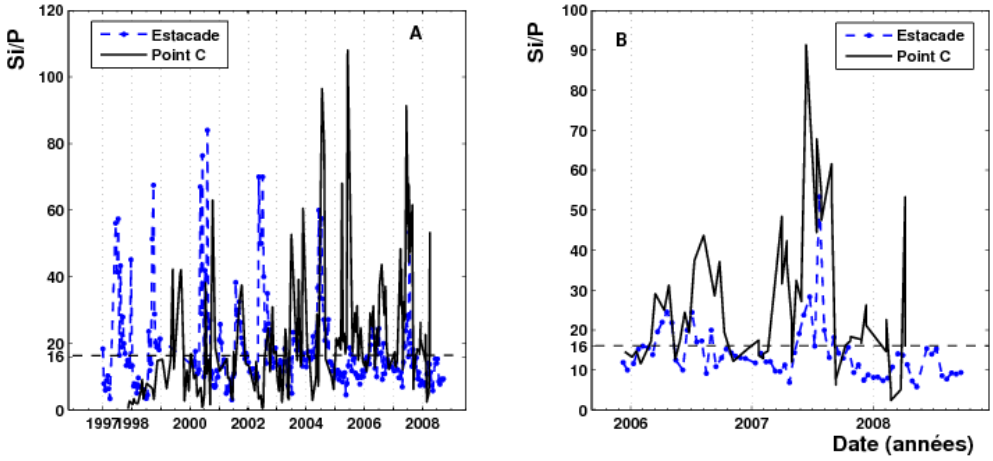

Figure 3-42 : Evolution du ratio Si/P au point C (Wimereux) et au point Estacade (Roscoff): (A) 0n note de fortes fluctuations, une variabilité interannuelle avec des teneurs élevées au point C de 2004 à 2008. Des valeurs généralement supérieures au rapport de Redfield (Si/P=16) ; (B) cette figure indique une forte variabilité intra et inter sites.

Quant au rapport Si/N, il indique également de fortes fluctuations pour les eaux de surface des deux zones (Figure 3-43). La figure 3-43B représente l'évolution de rapport sur une échelle de 3 ans (de 2006 à 2008), on remarque la différence au niveau des teneurs de ce rapport dans les deux zones. Les rapports moyens en Si/N sont de l'ordre de 1,1 pour Estacade (Roscoff) et de l'ordre de 1,4 pour le point C (Wimereux) avec d'importantes fluctuations. Les deux zones indiquent un rapport assez proche de celui de Redfield (Si/N=1).

De façon générale, les différences spatiales ne sont pas manifestes dans les rapports moyens mais on remarque en Manche orientale des pics plus marqués.

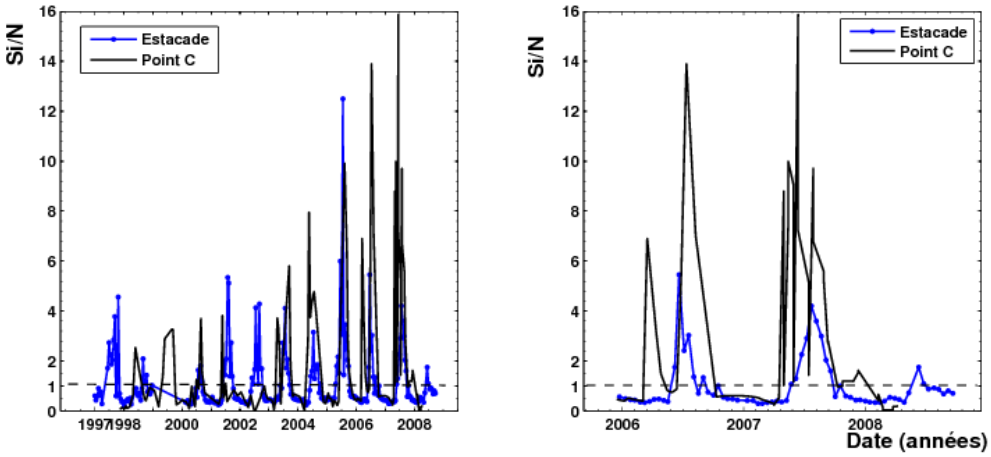

Figure 3-43 : Evolution du ratio Si/N au point C (Wimereux) et au point Estacade (Roscoff) : (A) on remarque de fortes fluctuations, une variabilité interannuelle avec des teneurs élevées au point C de 2004 à 2008, avec des valeurs du rapport qui sont souvent supérieures au rapport de Redfield (Si/N=1) ; (B) sur une échelle de 3 ans (de 2006 à 2008) ces teneurs en rapport Si/N au point C sont largement au dessus de celles trouvées au point Estacade.

Les teneurs en carbone organique particulaire (COP) sont importantes comparées aux teneurs en azote organique particulaire (NOP) au point C (Figure 3-44) et aux teneurs enregistrées au point Estacade (Figure 3-45). La distribution des valeurs du rapport COP/NOP indiquent des fluctuations importantes (Figure 3-46). On assiste à une baisse des valeurs vers la Manche orientale (point C) en rapport (Tableau 3-5) avec la plus grande abondance de la matière organique particulaire dans les masses d'eaux. La moyenne du rapport COP/NOP est de $6,8 \pm 1,5$ pour Estacade et de $4,5 \pm 2,1$ pour le point C. Il est remarquable de constater une certaine stabilité de ce rapport au cours du temps, montrant dans les 2 sites des fluctuations autour de valeurs différentes.

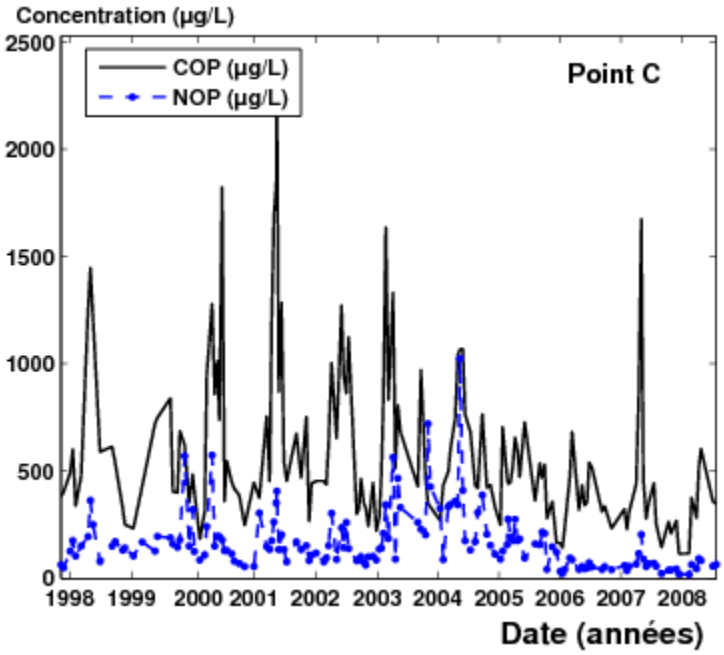

Figure 3-44 : Evolution des teneurs en COP et en NOP mesurées au point C (Wimereux) : on note des teneurs très élevées en COP comparées aux NOP.

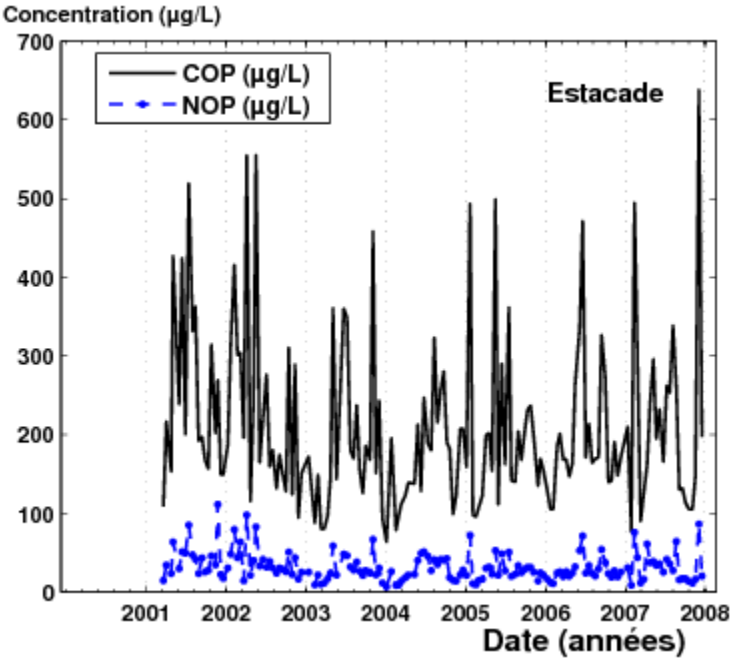

Figure 3-45 : Evolution des teneurs en COP et en NOP mesurées au point Estacade (Roscoff) : on note des teneurs très élevées en COP comparées aux NOP.

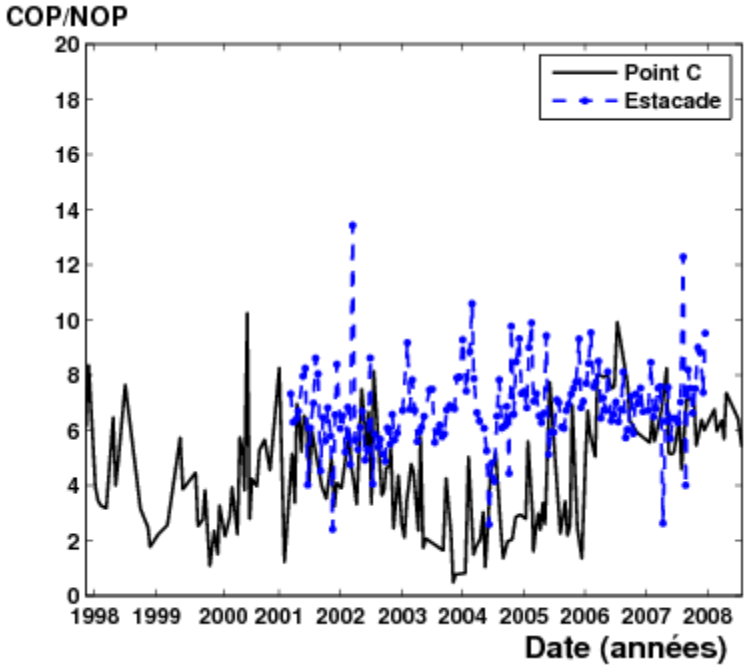

Figure 3-46 : Evolution des valeurs du rapport COP/NOP au point C (Wimereux) et au point Estacade (Roscoff): on note des valeurs du rapport élevées au point Estacade mais avec une certaine stabilité, surtout pour le point Estacade.

Le rapport COP/Chla est présenté en figure 3-47. Il indique de fortes fluctuations avec des teneurs localement très importantes au point Estacade. Le rapport moyen COP/Chla au point C et au point Estacade varie de 69 à 282 et de 201 à 498 respectivement selon les années. Sur l'ensemble de la période d'étude, le rapport moyen COP/Chla est significativement plus élevé en Manche occidentale (317 au point Estacade) qu'en Manche orientale (136 au point C).

Selon certains chercheurs (Cifuentes et al., 1988 ; Thompson et al., 1992) ces valeurs peuvent être interprétées dans les estuaires de deux façons : un rapport $COP/Chla > 200$ caractérise une faible part du phytoplancton dans la matière organique particulaire (MOP), donc une prédominance du matériel détritique (Bentaled et al., 1998) ; et un rapport $COP/Chla < 200$ caractérise une MOP riche en phytoplancton frais. Cifuentes et al. (1988) ont confirmé cette valeur de 200 en utilisant des isotopes stables ($\delta^{15}N$ et $\delta^{13}C$) pour identifier les sources de MOP dans l'estuaire de Delaware. Dans le Nord-est de la

Méditerranée durant le maximum de chlorophylle *a* en juillet 1993 et en mars 1994, le rapport COP/Chla était estimé à 64 et à 129 respectivement (Ediger et al., 2005). En supposant que ces seuils sont valides dans notre cas, cela suggère que le ratio COP/Chla en Manche occidentale indique la présence de matière organique particulaire à prédominance plutôt terrigène, et que « la part du phytoplancton dans la matière organique particulaire est donc plus importante seulement au niveau du maximum de Chla » (Herbland et Le Bouteiller, 1983). Le tableau 3-5 indique les différentes concentrations moyennes de Chla au point C et au point Estacade.

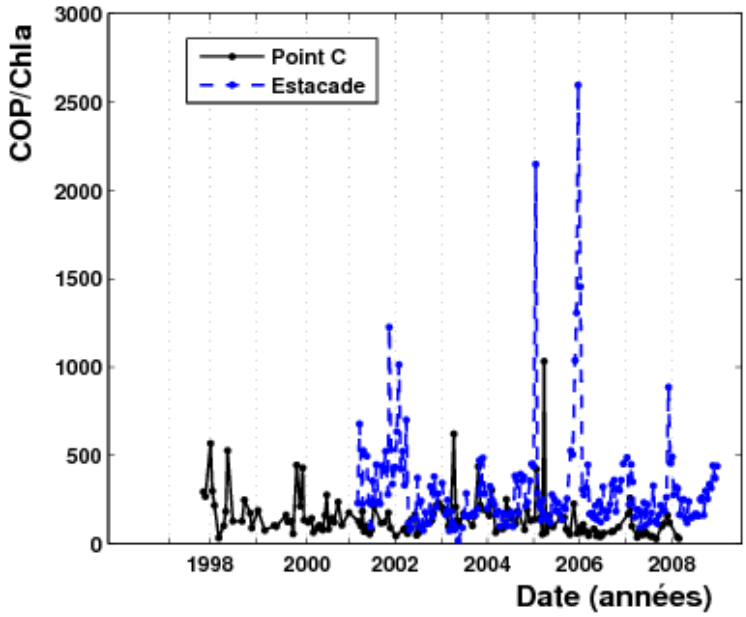

Figure 3-47 : Evolution des valeurs du rapport COP/Chla au point C (Wimereux) et au point Estacade (Roscoff) : on note des teneurs localement très élevées du rapport au point Estacade.

La densité de probabilité du rapport COP/Chla est représentée en figure 3-48. On note un décalage entre les deux pdfs avec un mode de l'ordre de 100 pour le point C et de l'ordre de 200 pour le point Estacade. On observe une faible probabilité d'apparition des valeurs en rapport COP/Chla supérieures à 100 pour le point C.

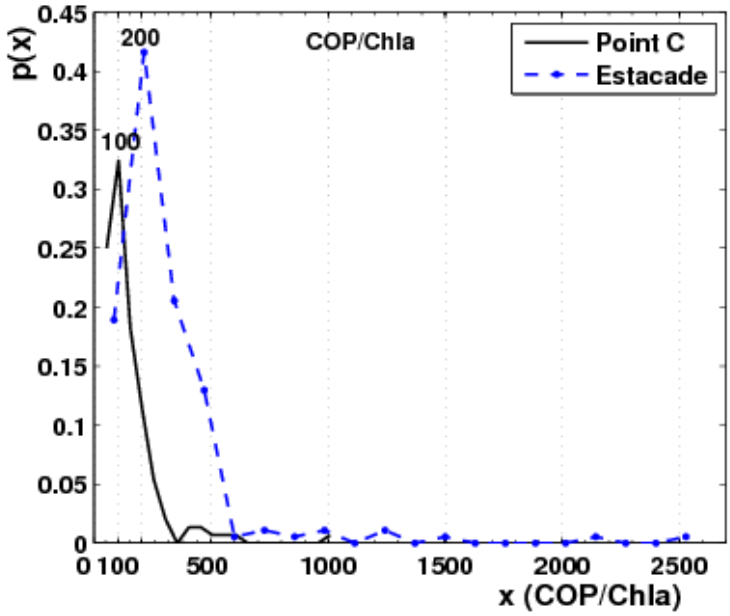

Figure 3-48 : Densités de probabilité du rapport COP/Chla au point C (Wimereux) et au point Estacade (Roscoff). On note un décalage entre les deux distributions avec un mode autour de 100 au point C et un mode autour de 200 au point Estacade.

Les densités de probabilités du rapport N/P au point C et au point Estacade sont représentées en figure 3-49. Cette figure révèle une distribution asymétrique du rapport N/P, et on remarque un mode autour de 25 dans les données Estacade (Figure 3-49A). Ceci suggère que la moyenne ce rapport N/P sur l'ensemble des années fluctue fortement autour de 25. La représentation en log-log montre une allure assez proche de l'hyperbolique mettant en évidence un comportement intermittent. On observe une pente de l'ordre de 2 pour les eaux de surface en Manche orientale et occidentale (Tableau 3-7).

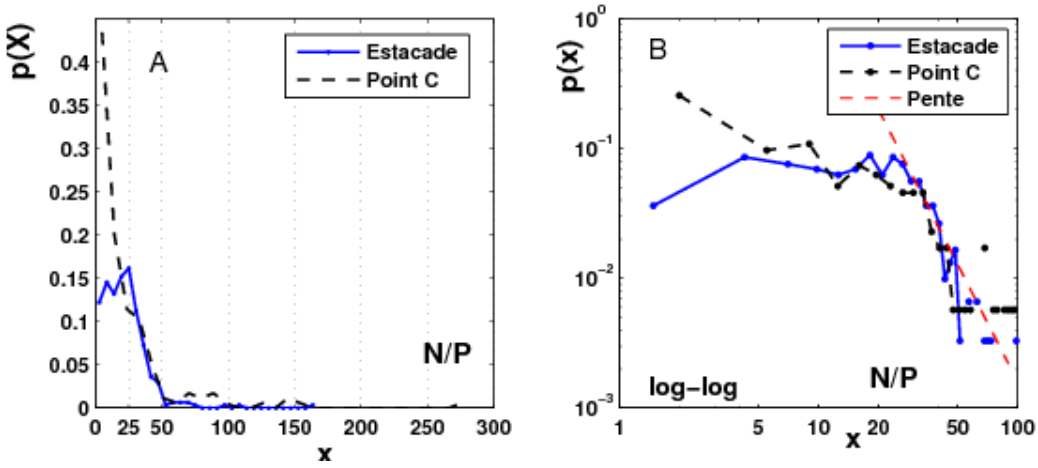

Figure 3-49 : Densités de probabilité du rapport N/P point C (Wimereux) et au point Estacade (Roscoff) : (A) la représentation en lin-lin indique une distribution asymétrique avec une bonne superposition pour les grandes valeurs, Des petites valeurs N/P ont une forte probabilité d'apparition au point C ; (B) la représentation en log-log indique un comportement proche de l'hyperbolique avec pour pentes 2.

La densité de probabilité des valeurs du rapport Si/P est représentée en figure 3-50. La représentation en linéaire indique une très bonne superposition avec un mode commun à 13 (Figure 3-50A). La faible probabilité d'apparition des rapports supérieurs à 20 est observée dans cette figure. Cette pdf représentée (Figure 3-50B) en log-log indique un comportement hyperbolique, donc des extrêmes très fréquents, avec des pentes de l'ordre de 3 pour le point C et de l'ordre de 4 pour le point Estacade. Ceci signifie que les valeurs du rapport Si/P au point C mettent en évidence des extrêmes plus fréquents que les valeurs du rapport Si/P au point Estacade (Tableau 3-7).

Quant au rapport Si/N, sa pdf représentée en lin-lin (linéaire) en figure 3-51 indique une distribution asymétrique. Un mode de 0,5 est montré dans les données du point Estacade et on remarque une faible probabilité d'apparition des teneurs en rapport supérieures à 2. Un ajustement en loi de puissance en figure 3-52, indique des pentes du rapport Si/N de l'ordre de 3 en Manche orientale (point C) et de 1,7 en Manche occidentale (Tableau 3-7).

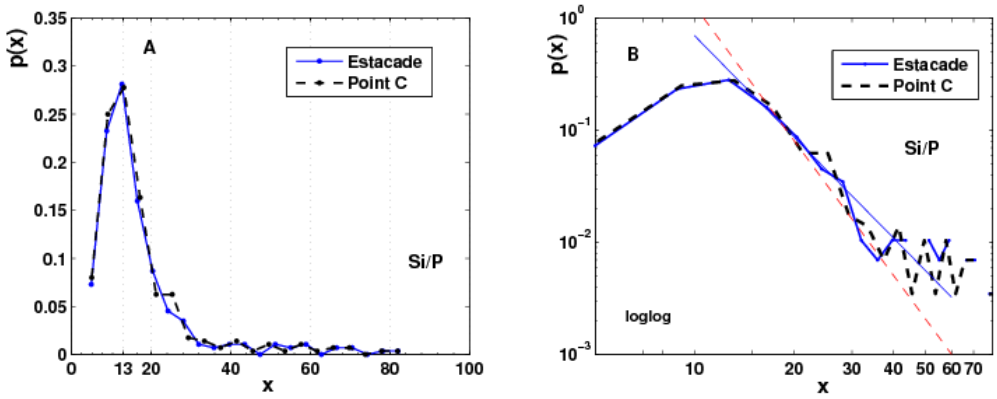

Figure 3-50 : Densités de probabilité du rapport Si/P au point C (Wimereux) et au point Estacade (Roscoff): (A) la représentation en lin-lin indique une bonne superposition des deux pdfs avec un mode autour de 13 µmol/l, on note une faible probabilité d'apparition des fortes valeurs Si/P ; (B) la représentation en log-log révèle un comportement hyperbolique avec des pentes entre 3 et 4 (l'éparpillement apparent empêche d'être plus précis).

Tableau 3-5 : Les moyennes annuelles des ratios mesurés au point C et au point Estacade

Moyenne annuelle	N/P		Si/P		Si/N	
	Point C	Estacade	Point C	Estacade	Point C	Estacade
1997	11,64	20,79	1,57	21,94	0,101	1,39
1998	8,50	19,68	5,47	16,82	0,74	0,76
1999	11,43	22,87	19,43		1,35	0,65
2000	18,71	39,96	14,10	23,50	0,85	
2001	16,28	23,53	15,10	17,08	0,93	1,19
2002	20,13	27,26	11,93	24	0,46	1,05
2003	15,63	21,67	18,68	15,77	1,53	1,06
2004	29,11	29,99	24,96	23,65	2,64	0,92
2005	35,87	10,95	28,41	11,19	1,63	1,88
2006	14,50	24,29	22,76	15,98	2,78	1,03
2007	22,21	18,15	31,57	15,57	3,37	1,21
2008	79,73	16,24	15,66	10,19	0,24	0,67

Tableau 3-6 : Les moyennes annuelles des ratios mesurés au point C et au point Estacade

Moyenne annuelle	COP/Chla		COP/NOP		Chla (µg/L)	
	Point C	Estacade	Point C	Estacade	Point C	Estacade
1997	282,5		7,24		1,39	0,96
1998	226		4,02		4,71	1,03
1999	161,13		3,14		4,74	0,78
2000	150,4		4,22		3,26	0,50
2001	121,7	408,26	5,00	6,48	7,71	0,68
2002	118,6	300,72	4,82	6,09	7,36	1,18
2003	207,8	201,23	2,85	6,76	4,46	1,46
2004	149,6	243,73	2,57	6,92	4,99	0,84
2005	191,5	497,54	3,26	7,16	5,34	0,84
2006	69,42	309,14	7,10	7,18	5,48	0,89
2007	95,07	255,64	6,16	7,20	6,12	1,03
2008		261,28				0,91

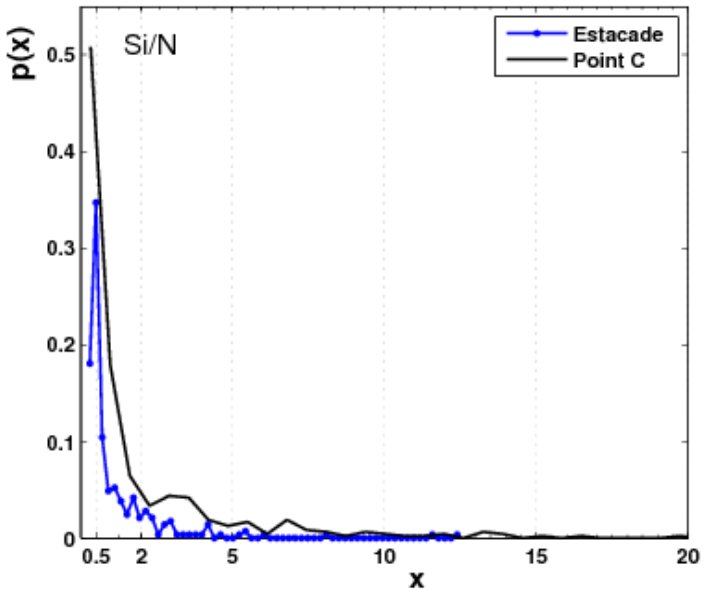

Figure 3-51 : Densités de probabilité du rapport Si/N en lin-lin au point C (Wimereux) et au point Estacade (Roscoff). On remarque une distribution asymétrique et le rapport au point Estacade indique un mode à 0,5 µmol/L.

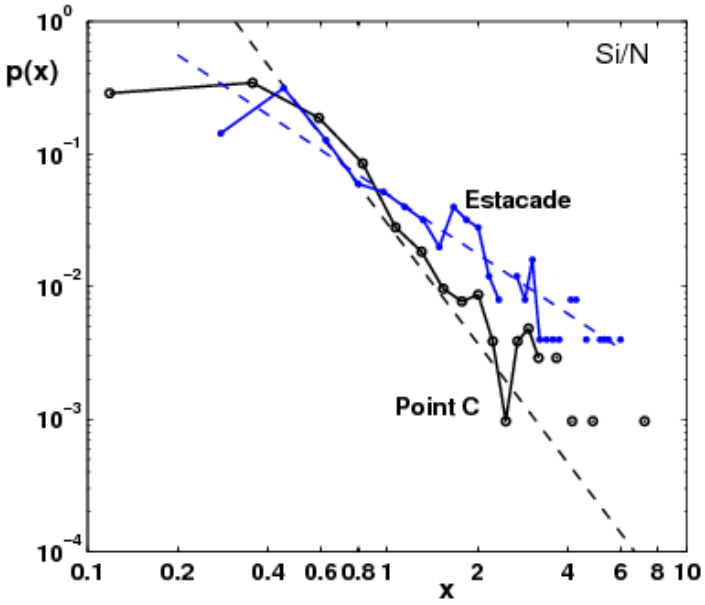

Figure 3-52 : Densités de probabilité du rapport Si/N en log-log au point C (Wimereux) et au point Estacade (Roscoff). On note un comportement hyperbolique avec pour pentes 3 au point C et 1,7 au point Estacade.

Tableau 3-7 : Les valeurs moyennes des rapports et valeurs des pentes de chaque pdf

	Stations	N/P	Si/P	Si/N
Moyenne du rapport	Point C	23,6	17,5	1,4
	Estacade	22,9	17,8	1,1
Valeur de la pente μ	Point C	2,0	3,0	3,0
	Estacade	2,0	4,0	1,7

D. Discussion

Dans ce chapitre, dans un premier temps, nous montrons quelques exemples de variabilités temporelles avec les données MAREL Carnot comparées aux données SOMILT.

La base de données SOMLIT longue de 10 ans est issue d'un échantillonnage manuel tous les 15 jours et à haute mer, tandis que celle de MAREL Carnot provient des mesures automatiques et à haute fréquence (tous les 20 minutes). Les deux séries de données (de surface) sont issues d'un échantillonnage eulérien, en un point fixe (dans les eaux côtières de Boulogne-sur-mer). Le site de prélèvement SOMLIT est situé à 6 milles marin sud de la station MAREL Carnot et fourni les mêmes paramètres biogéochimiques clés. Les données SOMLIT mettent en évidence une évolution saisonnière, tandis que les données MAREL Carnot, par leur haute fréquence d'échantillonnage donnent accès à une grande gamme d'échelle de variation. La comparaison entre les deux types de mesures a permis de quantifier des complémentarités, sachant que les données MAREL fournissent un plus grand nombre de données et que les mesures SOMLIT procurent des estimations directes de plus nombreux paramètres. Les fortes teneurs rencontrées dans les différents paramètres biogéochimiques sont mesurées par MAREL Carnot. Ces teneurs élevées peuvent être reliées aux apports fluviaux (Marel Carnot soumis à l'influence directe de la Liane).

Nous avons considéré dans cette première étude, la covariation entre paramètres en utilisant une méthode de régression linéaire faisant appel à un noyau local gaussien (Wand et Jones, 1995). Cette approche est bien connue dans le domaine de l'analyse numérique, particulièrement en mathématique (Collomb et Härdle, 1986 ; Wand et Jones, 1995 ; Azzedine et al., 2008), mais cette méthode a été assez peu utilisée dans le domaine des sciences de la mer (Durrieu et al., 2009). Dans le domaine de l'écologie marine, on se contente le plus souvent d'une régression linéaire et d'un coefficient. Nous avons donc appliqué cette méthode à différents couples de paramètres. Cet estimateur a permis d'obtenir une courbe lisse représentant la dépendance entre paramètres pour chaque type de mesures.

Nous avons considéré le couple pH-DO, plus précisément la covariation entre le paramètre pH et le paramètre DO. Cette covariation révèle une relation non-linéaire précise

pour les deux bases de données (MAREL et SOMLIT). Une relation fonctionnelle entre le pH et DO a été mise en évidence dans les données MAREL et SOMLIT qui s'écrit :

$$pH = \begin{cases} 8.1\ ; & DO < 10\text{mg/L} \\ 8.1 + (DO - 10)b\ ; & DO > 10\text{mg/L} \end{cases} \quad (29)$$

Avec b=0,12 pour les données SOMLIT and 0,2 les données MAREL et pour l'ensemble de données SOMLIT et MAREL $b = 0{,}16 \pm 0{,}04$. La courbe de moyenne conditionnelle du pH des données MAREL indique une tendance légère à l'augmentation, suivie d'une baisse pour des DO compris entre 6 et 9 mg/L. Contrairement aux données MAREL, cette baisse du pH n'est pas visible dans les données SOMLIT. Les données SOMLIT révèlent une tendance assez lente de la moyenne conditionnelle du pH sachant la DO sur l'ensemble des données de DO. L'observation des courbes de moyennes conditionnelles révèle donc que l'échantillonnage à haute fréquence indique à la fois l'influence conjuguée des processus biologiques (avec la photosynthèse, du système des carbonates) et des processus physiques (les échanges avec l'atmosphère, les advections) dans la variabilité du pH. Ces processus agissent de manière simultanée, mais ayant chacun son échelle d'implication. Les données SOMLIT indiquent une covariabilité mettant plus en évidence les processus biologiques. Ceci s'explique par le fait que la DO et le pH sont liés à la photosynthèse estivale algale en Manche orientale (Frankignoulle et al., 1996). Le cycle saisonnier du pH peut être attribué à la production biologique, qui augmente le pH de l'eau de mer de surface, résultat du déplacement de l'équilibre des carbonates lié à la consommation de CO_2 (Frankignoulle, 1994 ; Bensoussan et al., 2004). La covariation entre le pH et les COP (carbone organique particulaire) révèle une tendance à l'augmentation de la moyenne conditionnelle du pH en fonction des apports en COP. La relation saisonnière entre ces deux paramètres est bien visible dans les données SOMLIT.

Le couple DO-Chla décrit également un comportement non-linéaire. Une tendance à l'augmentation du DO en fonction des concentrations en Chla est visible, mais jusqu'à un certain seuil (autour de 11 mg/L de DO). Une relation fonctionnelle a été également mise en évidence dans le couple DO-log (F=fluorescence). Cette relation peut s'écrire sous la forme :

$$DO = 0{,}55 * \log(F) + 8{,}56 \quad (30)$$

Ces deux paramètres montrent une relation quantitative associée à la photosynthèse.

La covariation entre l'azote et la Chla pour les données SOMLIT et la fluorescence pour les données MAREL Carnot, révèle un comportement décrit par une courbe de dépendance. La relation N-Chla a été mise en évidence dans différents écosystèmes aquatiques et à plusieurs échelles (William et al., 2010). Dans notre étude, la courbe de moyenne conditionnelle de Chla nous permet une description quantitative de la relation N-Chla. Les apports en azote (nitrate) induisent une réponse biologique avec des pics importants caractérisant l'abondance et la succession des différentes espèces phytoplanctoniques. On note des concentrations en azote associées à chaque pic correspondant à chaque type d'espèces. Les sels nutritifs dans cette zone affectent de différentes manières la dynamique du phytoplancton en induisant des remaniements dans la composition des microalgues pendant différentes périodes de l'année (Lefebvre et Caboche, 2008c). De nombreux travaux ont également montré qu'en Manche orientale l'azote est régénéré rapidement dans la colonne d'eau (Gentilhomme et Lizon, 1998 ; Maguer et al., 1998) d'où le stock important en hiver.

Concernant les rapports stoechiométriques des sels nutritifs provenant de SOMLIT et de MAREL, nous avons pu montrer la grande variabilité de ces rapports, lorsqu'estimés à haute fréquence. Nous avons considéré leur pdf, en nous focalisons en particulier sur les extrêmes : la queue de distribution de probabilité des ratios N/P, Si/N et Si/P suit une loi de puissance avec un paramètre μ qui caractérise les évènements extrêmes :

$$p(x) = Cx^{-\mu} \quad ; \text{x>>1} \tag{31}$$

La probabilité des valeurs extrêmes correspond ici à une loi du type Fréchet (Fréchet, 1927) ou hyperbolique, ou Pareto (Pareto, 1897). On constate que les deux bases de données (SOMLIT et MAREL) mettent en évidence une valeur μ identique. La faible valeur de la pente indique l'existence de valeurs extrêmes plus fréquentes dans les teneurs en rapports N/P, Si/N et Si/P en Manche orientale.

Les résultats du suivi SOMLIT en Manche orientale (Wimereux) et en Manche occidentale (Roscoff) montrent une différence assez importante dans les séries temporelles entre ces deux bassins de la Manche (Maguer et al., 1998). Nos résultats sont en accord avec ceux des travaux précédents qui indiquent que les eaux de surface des deux zones sont

thermiquement homogènes toute l'année (Sournia et Birrien, 1995 ; Maguer et al., 1998). Les teneurs en salinité sont élevées à Roscoff comparées à celles estimées à Wimereux. Cette différence importante est également estimée dans les séries temporelles de Chla : on remarque qu'à Wimereux la Chla pourrait être estimée en moyenne à 7 fois plus abondante qu'à Roscoff. Le carbone et l'azote particulaire également indiquent des concentrations très élevées dans les eaux de surface à Wimereux comparées aux eaux de surface à Roscoff. Les teneurs moyennes en sels nutritifs provenant des deux zones possèdent le même ordre de grandeur, même si les eaux de surface de Wimereux révèlent des pics locaux plus importants en nitrate et en acide silicique. Malgré ces teneurs moyennes non négligeables à Roscoff, la biomasse phytoplanctonique demeure faible (en moyenne la Chla est de 0,9 µg/L) comparée à celle rencontrée à Wimereux (en moyenne la Chla est de 5 µg/L). Ceci s'explique par le manque de lumière ne favorisant pas l'absorption des sels nutritifs par le phytoplancton dans cette zone de Roscoff (Maguer et al., 1998), comparée en Manche orientale où les conditions d'éclairement sont les meilleures au sein d'une partie de la colonne d'eau au printemps (Maguer et al., 1998).

Les valeurs moyennes en rapports N/P, Si/N et Si/P sont assez proches pour les deux bassins. Le rapport N/P varie au cours du temps, mais ce rapport tend à décroitre dans les eaux de surface côtière de Roscoff (Sournia et Birrien, 1995). On observe un rapport N/P supérieur à 16 donc une limitation en phosphates pour le phytoplancton dans ces zones.

La densité de probabilité du rapport N/P indique une distribution assez similaire pour les grandes teneurs. La pdf indique un rapport moyen de 25 rencontré dans les eaux de surface de Roscoff. Un ajustement en loi de puissance met en évidence une pente similaire de l'ordre de 2 ce qui suggère des valeurs extrêmes fréquentes dans les deux zones.

Quant au rapport Si/N, il varie considérablement dans les deux bassins avec une moyenne en rapport très proche de la valeur de Redfield. La pdf du rapport Si/N en log-log indique un comportement hyperbolique avec des pentes de l'ordre de 1,7 pour Estacade et de l'ordre de 3 pour le point C. Contrairement au rapport N/P, on remarque que le rapport Si/N estimé indique plus de valeurs extrêmes au point Estacade. Cette forte présence de valeurs extrêmes dans le rapport Si/N dans les eaux de surface de Roscoff pourrait s'expliquer par la forte production de diatomées dans la zone. D'après la littérature la

production par les diatomées représenterait l'essentiel de la production phytoplanctonique (Klein et Sournia, 1987 ; Hoch et Garreau, 1998 ; Gailhard et al., 2003). Ceci pourrait expliquer la prédominance des valeurs extrêmes dans les teneurs en Si/N en Manche occidentale (à Roscoff). La pdf à Roscoff indique également un mode à 0,5.

Concernant le rapport Si/P, sa pdf indique une distribution similaire dans les deux zones. La pdf de ce rapport révèle un comportement hyperbolique avec des pentes très proches.

Le rapport COP/Chla en Manche révèle également une variabilité au cours du temps, en indiquant l'origine de MOP dans les eaux de surface des deux zones. On note une matière organique particulaire composée d'une part en majeur partie du phytoplancton frais en Manche orientale et d'autre part en majeur partie par matériel terrigène en Manche occidentale. Cette différence peut être due à la faible production primaire rencontrée à Roscoff, ce qui suggère que le rapport COP/Chla varie en fonction de la production primaire. L'étude faite par Brunet et al. (1996) montre que les eaux côtières proches de Boulogne-sur-mer, indiquaient un rapport COP/Chla de l'ordre de 100 en mars et de l'ordre de 200 en mai.

Pour résumer la comparaison entre ces deux zones en Manche (Wimereux et Roscoff), on retiendra que malgré les différences en teneurs importantes en Chla, en sels nutritifs :

- Les valeurs des rapports N/P, Si/P et Si/N sont très proches ;
- Ces rapports suivent une même loi hyperbolique. La probabilité d'apparition des valeurs extrêmes sont du même ordre de grandeur ;
- Les valeurs du rapport COP/Chla et COP/NOP sont plus élevées dans les eaux de surface à Roscoff qu'au niveau de Wimereux. La part du phytoplancton dans la MOP serait donc plus importante au niveau du maximum de Chla ;
- La présence importante d'azote dans l'eau ne s'accompagne forcement pas d'une production primaire plus élevée ; cette production est fonction de la quantité de lumière pour autant qu'il y ait de l'azote.

-

Chapitre IV. Extrêmes & Dynamique

Chapitre IV. Extrêmes et Dynamique

A. Introduction

Dans ce chapitre, il s'agit de mettre en évidence la dynamique des événements rares ou extrêmes, car pour un grand nombre d'applications environnementales il est important de mettre en évidence ou de prévoir l'influence des événements extrêmes dans les écosystèmes aquatiques (Décamps, 2010). De façon générale, il faut noter que les catastrophes naturelles sont toujours associées à des extrêmes environnementaux. Ces événements occasionnels et exceptionnels peuvent se manifester par des inondations, des tempêtes, etc (Albeverio et al., 2006).

En écologie, la plupart des événements extrêmes sont associés aux proliférations, à l'eutrophisation, aux épidémies ou d'un autre côté, aux extinctions. L'eutrophisation a pour conséquence de déséquilibrer le fonctionnement normal de l'écosystème jusqu'à provoquer dans les cas extrêmes la mort de certaines composantes de l'écosystème par asphyxie. Des travaux récents ont également montré que la distribution et l'abondance de certaines espèces planctoniques pouvaient être influencées par des événements exceptionnels environnementaux (Cótrim Marques et al., 2007 ; Cardoso et al., 2008 ; Badjeck et al., 2010).

Ce chapitre se scinde en deux parties. Il a pour objectif de :

- mettre en évidence l'influence des événements extrêmes du débit de la Seine sur la distribution des paramètres biogéochimiques mesurés à Honfleur et d'appréhender la répartition des paramètres biogéochimiques en épisodes exceptionnels de crues et d'étiages. Cette étude a été financée en 2009 dans le cadre du projet ZOOSEINE (Rôle du zooplancton dans le fonctionnement de l'écosystème estuarien dans la zone de gradient de salinité : sentinelle du bon état écologique et des changements climatiques), financé pour la période 2008-2010 par le programme Seine-Aval en collaboration avec le Pr Sami Souissi (LOG, coordinateur scientifique de ZOOSEINE).
- utiliser des données MAREL Carnot, plus précisément, les mesures de fluorescence et d'oxygène dissous pour estimer la qualité de la masse d'eau locale. En conformité

avec les critères utilisés dans le cadre de la DCE (Directive Cadre sur l'Eau), nous utilisons les percentiles 10 et 90 pour l'oxygène dissous et la chlorophylle *a* (fluorescence) respectivement, sur 6 ans de mesures. Ce projet a été financé par l'Agence de l'Eau Artois Picardie.

B. Relation avec le débit de la Seine

Notre analyse porte sur les données du débit de la Seine et les données provenant des mesures à haute fréquence de MAREL Honfleur (estuaire de la Seine) sur la période de 1997 à 2007. L'estuaire de la Seine, zone de contact entre l'eau de la Seine (douce) et l'eau salée de la Manche (marine), est caractérisé par un hydrodynamisme complexe qui conditionne la répartition des paramètres biogéochimiques et de ses peuplements (Devreker et al., 2004 ; Dur, 2004 ; Schmitt et al., 2008). Les paramètres biogéochimiques analysés à Honfleur sont la température, la salinité, l'oxygène dissous, le pourcentage de saturation en oxygène, la turbidité et le pH.

Cette étude s'inscrit dans le cadre du programme Seine-Aval, qui a été mis en place en 1995. Ce programme représente le volet scientifique du Groupement d'Intérêt Public (GIP) Seine-Aval crée en 2003 et composé par plusieurs membres est coordonné par la région Haute Normandie. On y retrouve plusieurs partenaires tels que l'Agence de l'Eau Seine Normandie. Notre travail s'intègre plus précisément dans l'un des projets multidisciplinaires du programme Seine-Aval IV « ZOOSEINE ».

Dans la zone de gradient de salinité, la diversité du compartiment mésozooplanctonique est faible. En effet, nous rencontrons essentiellement le copépode (petit crustacé planctonique) *Eurytemora affinis* présent toute l'année avec une abondance maximale en fin du printemps-début d'été. Pendant la saison chaude, les copépodes du genre *Acartia* (i.e, *Acartia tonsa*) peuvent dépasser en abondance la population d'*Eurytemora affinis* et ceci en fonction des conditions climatiques et hydrologiques (Kimmel et al., 2006 ; Soussi com. Pers). Ces deux copépodes sont particulièrement ciblés dans les différentes études expérimentales (laboratoire et *in situ*) et de modélisation (dynamique de population) dans le projet ZOOSEINE. Les densités importantes de cette

espèce sont rencontrées entre Honfleur et Tancarville (Mouny, 1998). Cette espèce est étudiée en tant qu'« indicateur écologique » (Devreker et al., 2004 ; Forget-Leray et al., 2009). Devreker et al. (2008) ont étudié en un point fixe la variation de la structure de la population d'*Eurytemora affinis* en fonction de la marée mais également de la profondeur. Ils ont proposé des habitats différents pour chaque groupe de stade de développement. Cet habitat apparent est déterminé par la salinité mais également l'hydrodynamisme. Kimmel et al. (2006) ont montré que la position des populations d'*Eurytemora* et d'*Acartia* dans la baie de Chesapeake est fortement liée aux conditions climatiques et surtout au débit. Par exemple, une année pluvieuse (i.e fort débit) serait favorable à *Eurytemora affinis* alors qu'une année sèche est plus avantageuse pour *Acartia tonsa*. Sachant que les optimums thermiques des deux espèces sont opposés, nous devons nous intéresser aux saisons hydrologiques correspondant aux crues et aux étiages. En absence de suivi régulier et à long terme du zooplancton dans l'estuaire de la Seine, nous avons voulu nous baser sur les enregistrements à haute fréquence de la bouée MAREL Honfleur pour réaliser une analyse statistique poussée des propriétés des habitats de ces deux espèces (écosystème pélagique en général) pendant les extrêmes hydrologiques.

L'estuaire de la Seine, confronté aux apports d'eaux douces amont, suscite ici l'intérêt d'études de l'influence des événements exceptionnels de crues ou d'étiages (les extrêmes dans le débit de la Seine) sur la distribution de certains paramètres biogéochimiques mesurés à Honfleur. Ci-dessous nous considérons d'abord les débits de la Seine et leurs percentiles, avant d'analyser comment les extrêmes de ces débits peuvent conditionner certains paramètres biogéochimiques.

1. Du barrage de Poses à Honfleur

L'estuaire de la Seine est un estuaire macrotidal qui s'étend du barrage de Poses (à pK202 en amont) jusqu'à la partie orientale de la baie (une distance d'environ 160 km en amont de l'estuaire). Les eaux douces dans l'estuaire proviennent en grande partie des apports en amont du fleuve du barrage de Poses (Figure 4-1). Des affluents (la Risle, le Commerce, la Sainte–Gertrude, le Rançon, l'Austreberthe, le Cailly, le Robec, l'Andella et

l'Eure, etc..) le long de l'estuaire et des eaux souterraines contribuent également aux apports d'eaux douces dans l'estuaire, mais restent minimes comparés aux apports en amont du fleuve. Des travaux commandés par la Direction Régionale de l'Environnement de Haute Normandie[20] (2004) ont montré qu'en période d'étiage, « les apports des affluent peuvent représenter plus de 30 % du débit du barrage de Poses » (GIP Seine-Aval, 2008b). Malgré cela, dans notre étude, seule l'influence des apports d'eaux au niveau du barrage de Poses est considérée.

Les données des débits de la Seine considérées ici proviennent du Service de Navigation de la Seine (le SNS ; les données sont disponibles sur le site web du GIP Seine Aval). Les premières mesures du débit au barrage de Poses ont été faite en 1941. En moyenne, le débit de la Seine est de l'ordre de 500 m^3/s. En étiage, le débit est de l'ordre de 40 m^3/s et lors des crues exceptionnelles, le débit peut atteindre 2.300 m^3/s. Les débits maximaux sont mesurés en hiver et au printemps lors de la saison humide. La saison humide est dominée par des pluies, qui peuvent être successives et entrainer des crues. 3 épisodes de crues successives (1400 m^3/s) ont été recensés en hiver 1997-1998 d'une durée de 95 jours entrainant d'importantes tonnes de matériels particulaires en suspension dans l'estuaire du barrage de Poses (Guézennec, 1999). Ces importants apports en matières en suspensions par des eaux douces forment au niveau de l'embouchure un « bouchon vaseux ». Ce « bouchon vaseux » varie en fonction des périodes de crues et d'étiage (Avoine et Crevel, 1985b).

La distance séparant le barrage de Poses (pK202) à la station MAREL Honfleur (pK355) est de l'ordre de 153 km. D'après la courbe de tarage donnée dans la thèse de Guézennec (1999) (source SNS voir la Figure 4-3 qui indique le nombre de jour moyen du transit fluvial en fonction de la distance au barrage de Poses, pour différents débits), on a pu estimer la durée d'écoulement moyen de la Seine (en nombre de jours) du barrage de Poses à la station MAREL Honfleur (ceci ne tient pas compte des effets de la marée). Cette figure se lit de la façon suivante : pour les débits supérieurs à 1000 m^3/s, la durée d'écoulement de Poses à Tancarville est estimée à 4 jours et pour les débits de 250 m^3/s, la durée est estimée à 14 jours. D'après Le Hir et Silva-Jacinto (2001), l'âge moyen des eaux douces à

[20] http://www.haute-normandie-developpement-durable.gouv.fr.

Honfleur en étiage serait de l'ordre de 17 à 18 jours, tandis qu'en période de crues, elle passerait à 4,5-7 jours. On retrouve également dans Le Hir et Silva-Jacinto (2001) que Salomon (1976) avait estimé le temps de transit des particules de Poses à Honfleur à 6 jours pour un débit de la Seine de 675 m^3/s. Dans la suite du document nous utilisons ces valeurs pour relier les séries temporelles de débit enregistrées à Poses, aux données biogéochimiques enregistrées à Honfleur.



Figure 4-1 : Le barrage de Poses en amont de l'estuaire de la Seine. (Source http//www.seine-aval.crihan.fr : C. Fisson).

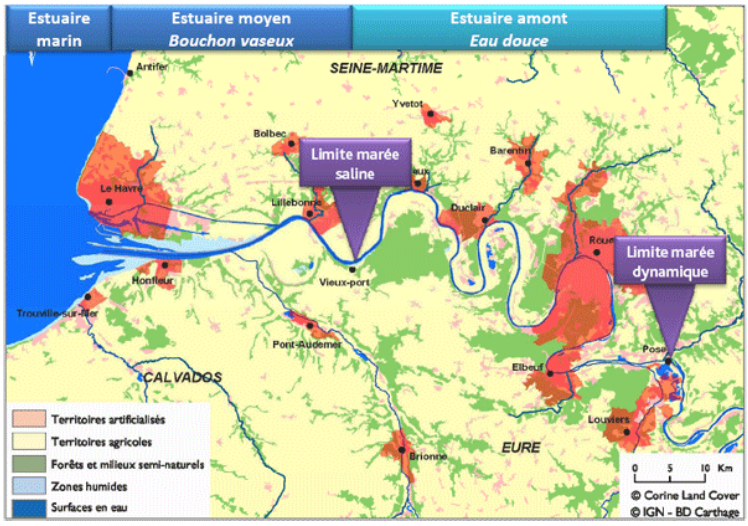

Figure 4-2 : L'estuaire de la Seine du barrage de Poses à Honfleur : au Vieux-port : limite marée saline ; à Poses : limite marée dynamique (http//www. seine-aval.crihan.fr).

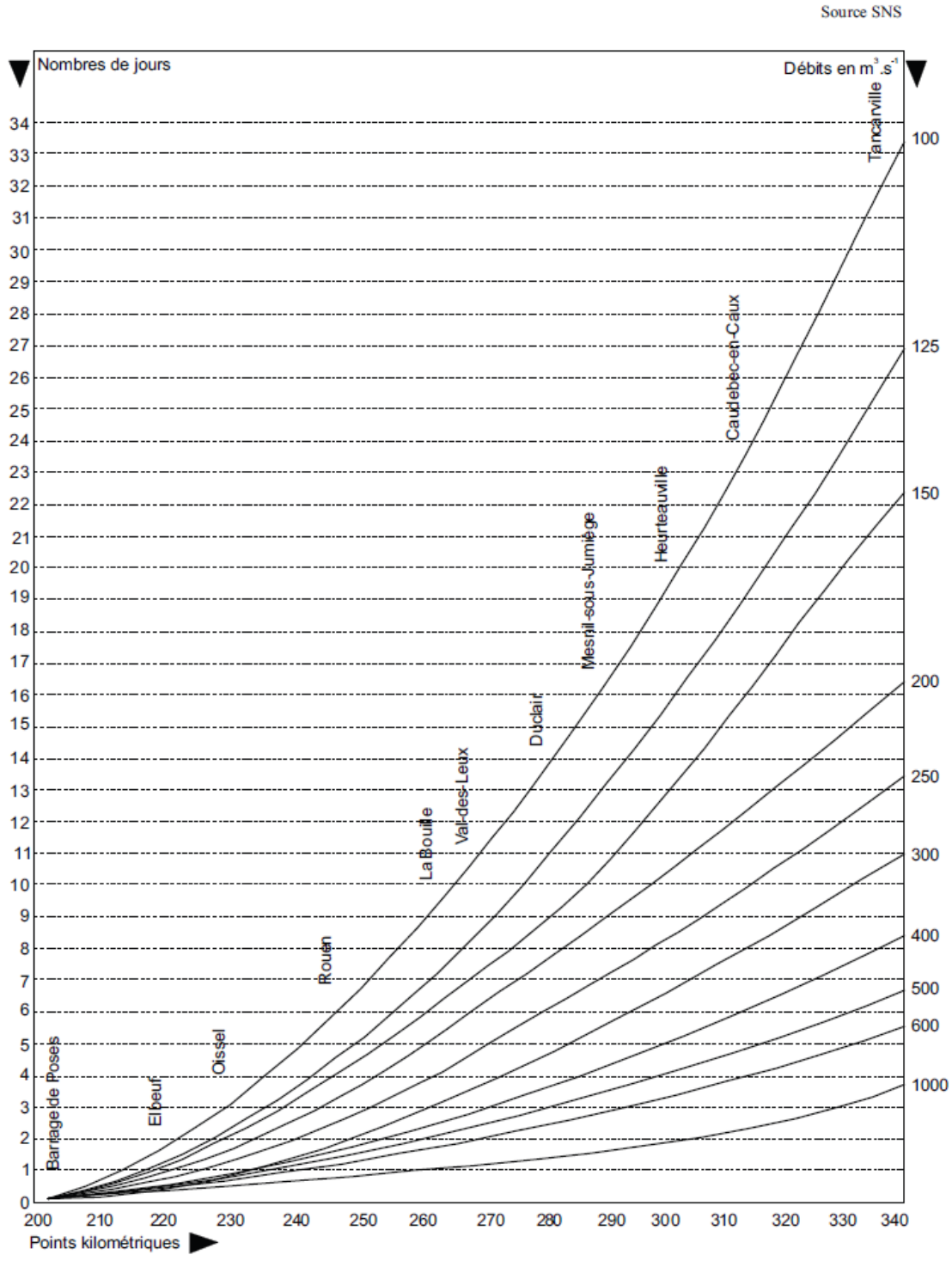

Figure 4-3 : Le nombre de jour moyen du transit fluvial en fonction de la distance au barrage de Poses, pour différents débits (de pK202 à pK340) (Thèse Guézennec, 1999, source SNS : http//www. seine-aval.crihan.fr).

2. La série temporelle du débit de la Seine

Dans cette section, nous décrivons succinctement les données de débit de la Seine recueillies à Poses. Ces données ont été analysées récemment par Huang et al. (2009).

Les données du débit journalier de la Seine de 1941 à 2007 sont représentées en figure 4-4. Cette figure montre l'évolution du débit au cours du temps et met en évidence de fortes fluctuations. Les débits moyens annuels de la Seine de 1941 à 2007 varient de 200 à 900 m^3s^{-1} (Figure 4-5). La figure 4-5A représente les débits moyens annuels. On note une variabilité interannuelle : l'année 2001 correspond au plus fort débit moyen. La figure 4-5B indique l'évolution des valeurs minimales mesurées pour chaque année : l'année 1991 montre un débit minimal de 40 m^3/s, comparée à l'année 2001 où la valeur minimale est la plus importante (268 m^3/s). Les valeurs maximales du débit de la Seine mesurées sont représentées en figure 4-5C, et l'année 1962 met en évidence la valeur maximale de 116 m^3/s, comparée à l'année 2001 qui indique un débit maximal de l'ordre de 2280 m^3/s. Les moyennes mensuelles du débit de 1996 à 2007 sont représentées dans le tableau 4-1, et la figure 4-6 est obtenue à partir de ce tableau. On remarque dans cette figure que les mois de janvier à mars indiquent des débits supérieurs à 800 m^3/s comparés aux mois de juin à septembre où les débits ne dépassent pas les 300 m^3/s.

En se basant sur ces graphes (figure 4-5) on pourrait penser que le débit de la Seine montre une tendance à l'augmentation. Pour tester ceci, nous avons scindé la série de débit en plusieurs périodes : d'abord deux séries de 1941 à 1995 et de 1996 à 2007 (la même période que celle des données recueillies à Honfleur) ; ensuite nous avons considéré des sections de 10 ans et nous avons comparé les densités de probabilité pour chaque section.

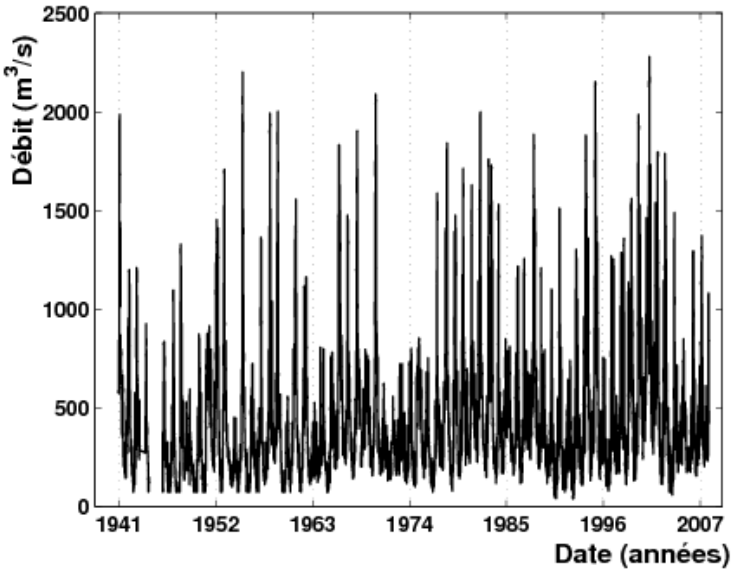

Figure 4-4 : Evolution journalière du débit de la seine de 1941 à 2007 au barrage de Poses. Cette figure montre de fortes fluctuations interannuelles.

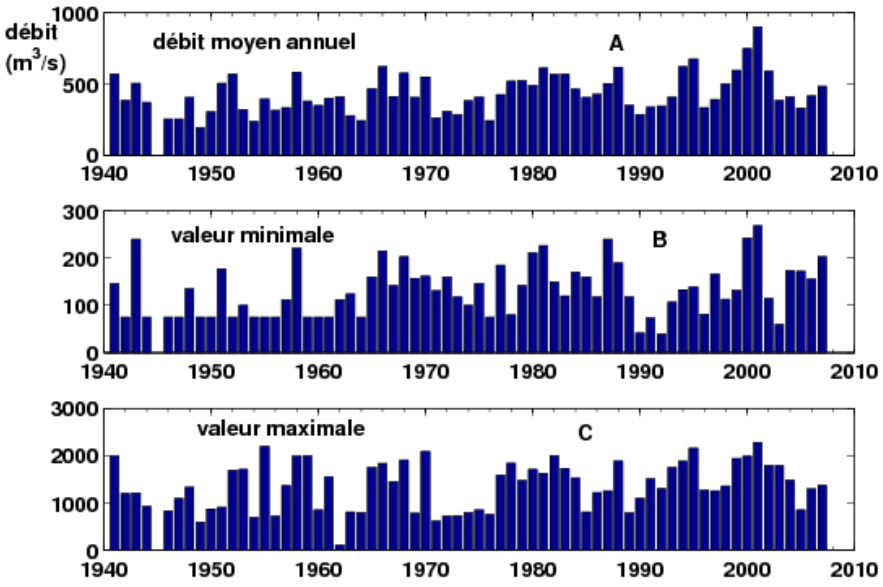

Figure 4-5 : Débit de la Seine à Poses de 1941 à 2007 : moyennes annuelles. Le débit moyen annuel en 2001 atteint les 900 m^3/s. Nous représentons également les débits maximaux et minimaux mesurés.

Tableau 4-1 : Moyenne mensuelle du débit de la Seine de 1996-2007

Mois	Moyenne mensuelle (m^3s^{-1})
Janvier	803,72
Février	805,31
Mars	818,87
Avril	618,03
Mai	476,70
Juin	283,57
Juillet	281,31
Août	269,78
Septembre	263,76
Octobre	337,76
Novembre	473,51
Décembre	665,74

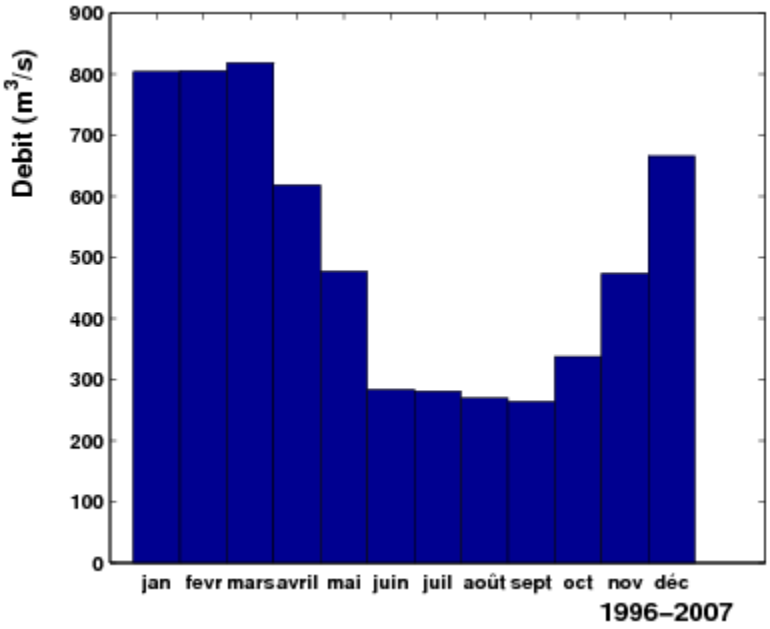

Figure 4-6 : Débit mensuel de 1996 à 2007 à Poses : les forts débits sont rencontrés de décembre à mars et les faibles débits de juin à octobre.

La figure 4-7 représente les pdfs du débit de 6 décennies successives. Les 3 premières décennies (de 1945-1955 ; de 1955-1965 ; de 1965-1975) montrent une bonne superposition pour les débits inférieures à 500 m^3/s. Pour les forts débits, les 6 périodes de 10 ans chacune indiquent une très bonne superposition. La figure 4-8 présente la densité de probabilité (pdf) du débit de la Seine sur deux périodes : de 1941 à 1995 et de 1996 à 2007. On observe une assez bonne superposition des deux pdfs. La représentation en log-log indique un léger décalage entre les pdfs au niveau des valeurs de débits les plus faibles. La superposition pour les plus grandes valeurs de débit est manifeste, indiquant que globalement, la série de débits est stationnaire. Il n'y a pas de tendance à la diminution.

La figure 4-9 représente la pdf du débit de 1996 à 2007 ; cette figure met en évidence une queue de probabilité ayant un comportement hyperbolique avec une pente de l'ordre de 2.

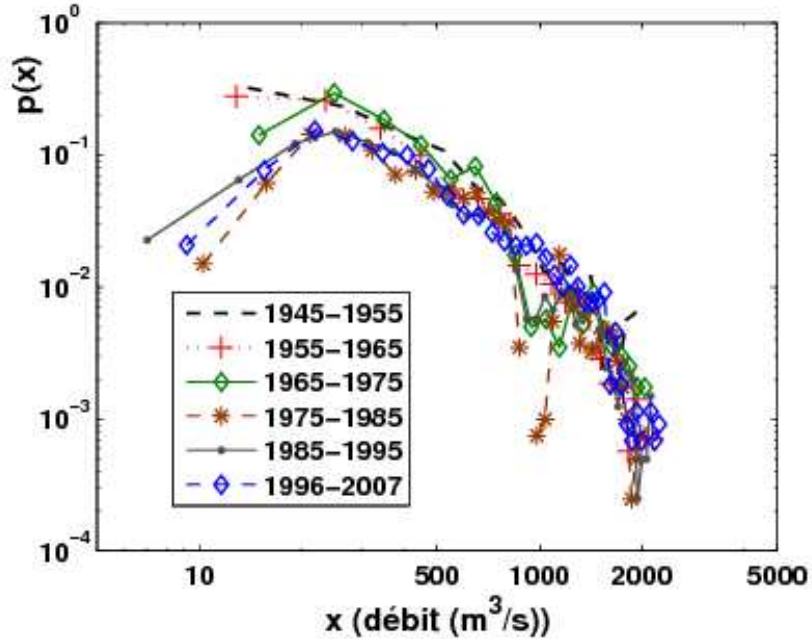

Figure 4-7 : Densité de probabilité en log-log du débit de la Seine tous les 10 ans de 1945 à 2007. L'allure des pdfs est analogue pour chaque section. On note que pour les faibles débits, les pdfs des périodes 1945-1955, 1955-1965 et 1965-1975 sont très proches. Pour les grandes valeurs, les 6 périodes de 10 ans chacun, les pdfs sont presque superposables.

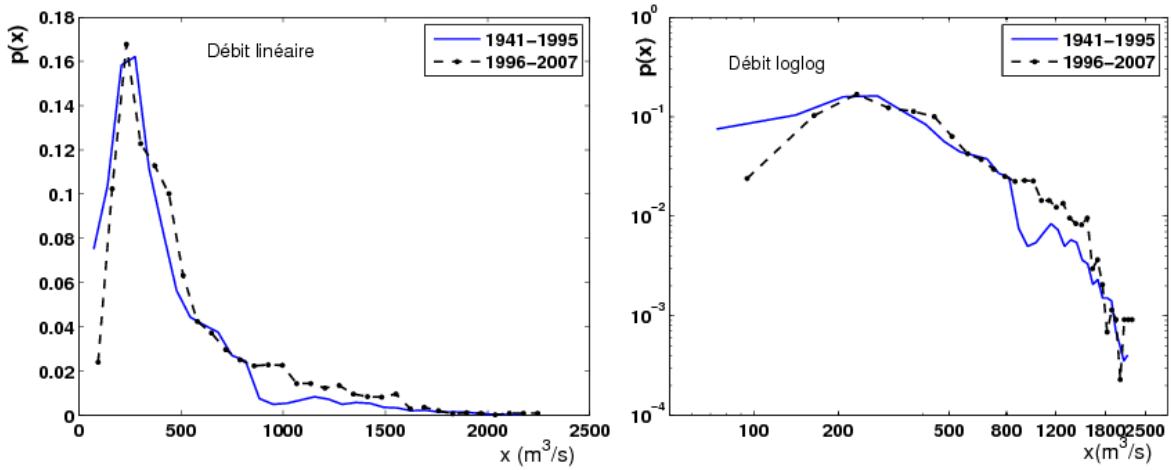

Figure 4-8 : Densités de probabilité du débit de la Seine de 1941 à 1995 et de 1996 à 2007 : débit linéaire, on note une superposition des deux pdfs. En log-log, on note un décalage pour les faibles débits, mais une bonne superposition pour les forts débits.

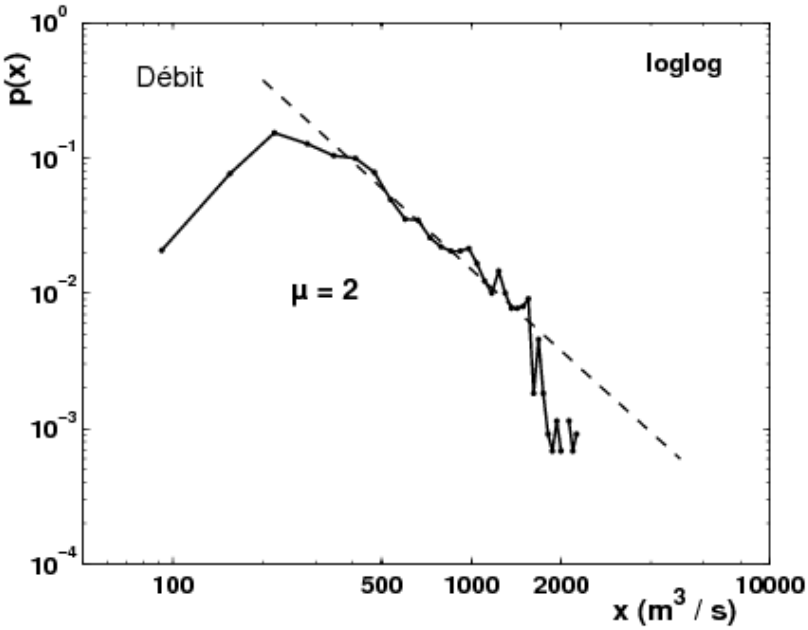

Figure 4-9: Densité de probabilité du débit de la Seine de 1996 à 2007 sur l'ensemble des données disponibles. Elle met en évidence une queue hyperbolique avec une pente de l'ordre de 2. Les valeurs les plus fortes ne suivent plus cette loi.

3. Les extrêmes : les percentiles 10 et 90

De façon à considérer un ensemble de fortes valeurs et un ensemble de faibles valeurs du débit, nous utilisons ici les percentiles 10 et 90 de la série de débits considérée sur l'ensemble des valeurs pendant la période de 1996 à 2007, correspondant aux mesures MAREL. Nous rappelons ici la méthode du percentile, à partir de la fonction de distribution On définit la fonction de distribution (Lumley, 2007) (voir chapitre I) $F(x)$:

$$F(x) = \Pr(X \leq x) = \int_{-\infty}^{x} p(t)dt \qquad (32)$$

où $p(x)$ est la densité de probabilité, X correspond aux données étudiées et x est un seuil. Cette approche permet d'estimer des seuils correspondants aux percentiles. Ainsi le percentile 10, noté x_{10} est tel que $F(x_{10}) = 0{,}1$ et x_{90} tel que $F(x_{90}) = 0{,}9$. Les percentiles 10 et 90 sont estimés à 208 m^3/s et à 1059 m^3/s (figure 4-10).

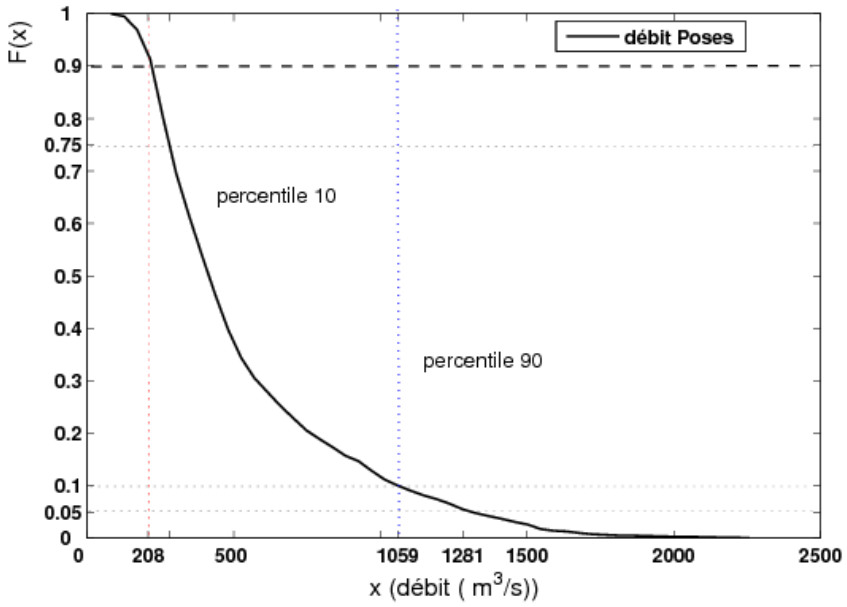

Figure 4-10 : Distribution de probabilité des valeurs du débit de la Seine de 1996 à 2007. Le percentile 90 correspond à 1059 m^3s^{-1} et le percentile 10 à 208 m^3s^{-1}.

Toutes les valeurs de débits inférieurs au percentile 10 (extrêmes faibles) et supérieurs au percentile 90 (extrêmes forts, crues) correspondent aux événements extrêmes. La figure 4-11 représente la durée cumulée de ces deux événements extrêmes sur tous les 10 ans de 1945 à 2007. Les extrêmes forts indiquent une tendance à l'augmentation avec une durée maximale de 430 jours de 1996 à 2007. Les extrêmes dans les faibles valeurs montrent également une tendance à l'augmentation et les deux dernières périodes de 10 ans révèlent des durées très proches (de 1985-1995 et de 1996 à 2007). Les deux premières périodes révèlent des durées d'extrêmes dans les faibles valeurs supérieurs à 3,5 ans.

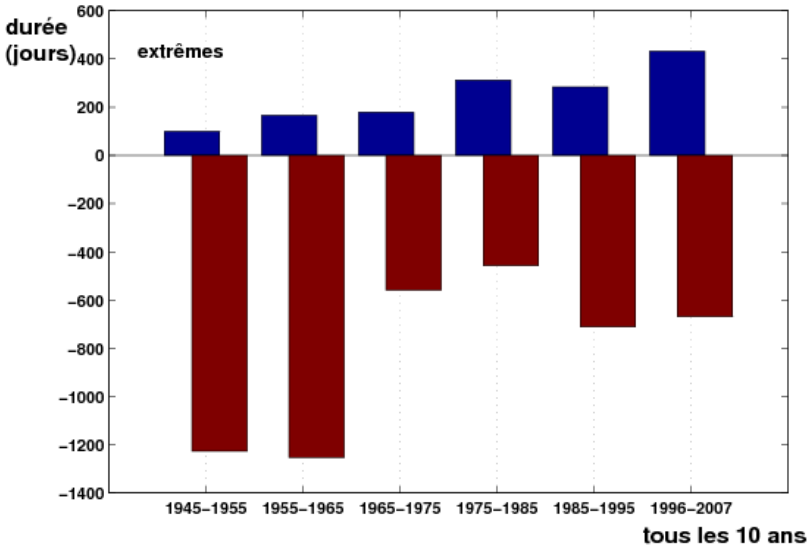

Figure 4-11 : Histogramme de la durée cumulée des événements extrêmes sur une période de tous les 10 ans de 1945 à 2007. On note une tendance (moins marquée) à l'augmentation des extrêmes forts et une tendance à l'augmentation des extrêmes dans les faibles valeurs du débit.

La figure 4-12 représente la durée de ces événements extrêmes (plus précisément, la durée du séjour dans les valeurs supérieures à x_{90} ou inférieures à x_{10}) pour chaque année (de 1996 à 2007). On estime pour chacune des années une succession d'événements extrêmes en période d'étiage ou en période de crue. Cette figure indique une forte variabilité dans la durée des extrêmes de 1996 à 2007. La durée de ces événements extrêmes varie de 1

à 110 jours (environ 4 mois). Pour les extrêmes faibles (les valeurs inférieures au percentile 10), la durée des extrêmes varie de 1 jour à 4 mois et les années 1996 et 2003 mettent en évidence des durées supérieures à 3 mois. Quant aux extrêmes forts (les valeurs supérieures percentile 90), l'année 2001 montre une durée de 2,5 mois. On note également une variabilité importante de la durée de ces extrêmes au cours du temps.

En ce référant à l'évolution (Figure 4-13) de la pluviométrie annuelle cumulée mesurée dans 3 stations sur le bassin de la Seine (GIP Seine-Aval : Klein et al., 2002), on constate que l'hydrologie de la seine (les événements extrêmes et leurs durées) suit celle des précipitations:

- l'année 1996 indique des durées successives des faibles débits (extrêmes dans les faibles valeurs) est une année caractérisée par une pluviométrie annuelle très faible. La durée maximale des débits faibles est de l'ordre de 90 jours en 1996.
- l'année 1997 est caractérisée par une pluviométrie annuelle moyenne (700 à 800 mm). On note également une succession de 8 événements extrêmes dont 7 pour les extrêmes dans les faibles valeurs du débit avec une durée maximale de 10 jours et pour les extrêmes forts d'une durée de 11 jours.
- l'année 1998 indique une pluviométrie annuelle moyenne (de 700 à 800 mm), et montre une succession de 10 événements extrêmes (5 événements pour les extrêmes dans les faibles valeurs du débit et les extrêmes forts). La durée maximale d'extrême dans les faibles valeurs du débit est de l'ordre de 29 jours et celle d'extrêmes forts de 10 jours.
- l'année 1999 indique une pluviométrie annuelle élevée (supérieure à 900 mm). On constate également que 13 événements extrêmes se succèdent avec 7 pour les extrêmes dans les faibles valeurs du débit avec une durée maximale de 15 jours et 6 événements pour les extrêmes forts avec une durée maximale de 38 jours.
- les années 2000 et 2001 révèlent une pluviométrie annuelle très élevée (supérieure à 900 mm), on note également dans ces années une succession d'événements extrêmes, 3 en 2000 et 5 en 2001) pour des valeurs supérieures au percentile 90. Les durées maximales de ces événements extrêmes varient de 33 à 77 jours à 2000 et à

2001 respectivement. Ces années sont marquées par l'absence des extrêmes dans les faibles valeurs de débit.

- l'année 2002 est caractérisée par une pluviométrie élevée (800 à 900 mm). On constate également que nous avions une succession d'événements extrêmes. On note une succession de 5 événements pour les extrêmes forts avec une durée maximale de 36 jours. On observe aussi 8 successions d'événements pour les extrêmes dans les faibles valeurs du débit avec une durée maximale de 11 jours.
- l'année 2003 indique une pluviométrie annuelle très faible (0 à 600 mm). On note 6 successions d'événements rares pour les extrêmes dans les faibles valeurs du débit avec une durée maximale de 112 jours. Pour les extrêmes forts on remarque une succession de 3 événements avec une durée maximale de 19 jours.

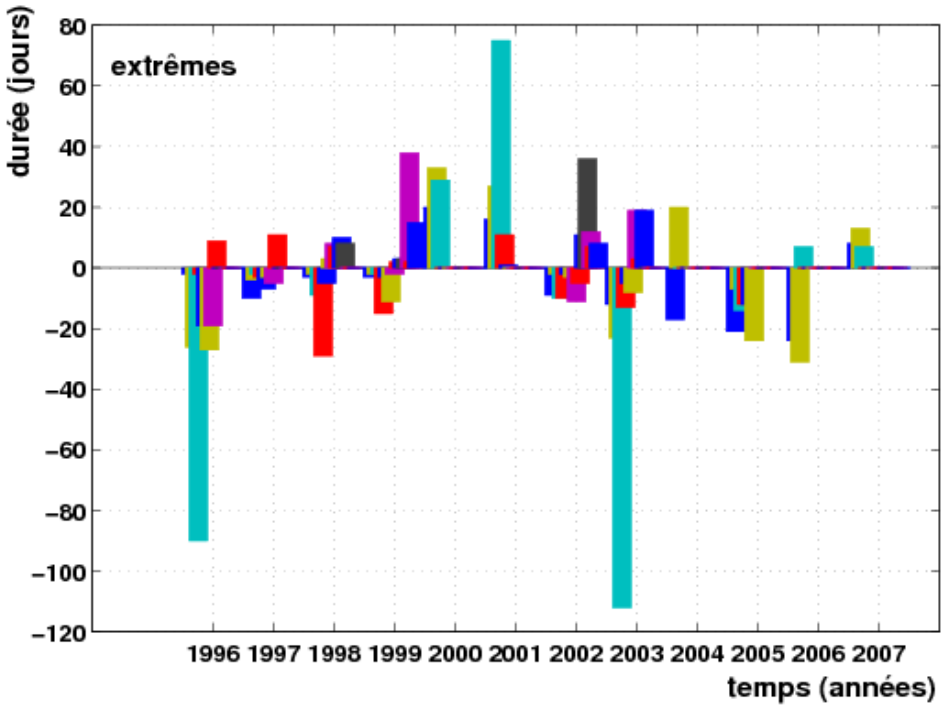

Figure 4-12 : Durée de chaque événements extrêmes intra et inter-annuel. On remarque une succession d'événements extrêmes de durée très variable. Les années 1996, et 2002 et 2003 indiquent des durées très importantes. Les extrêmes forts varient de 0 à 70 jours et les extrêmes dans les faibles valeurs du débit varient de 0 à 110 jours.

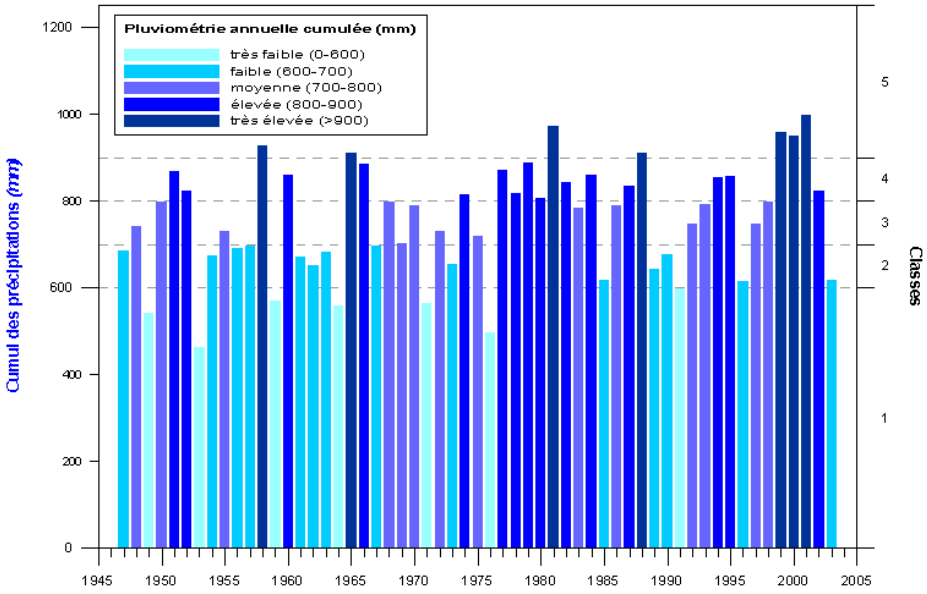

Figure 4-13 : L'évolution pluviométrique sur le bassin versant de la Seine de 1947 à 2003. Les classes correspondent aux seuils des percentiles 10, 25, 75, et 90. Pour les années 1999, 2000 et 2001, les valeurs de pluviométrie dépassent le seuil du percentile 90 (http//www. seine-aval.crihan.fr : Klein et al., 2002).

4. Dynamique des paramètres biogéochimiques à Honfleur en relation avec le débit de la Seine

Dans cette étude nous tenons compte d'une part des périodes humides et sèches (que nous considérons ici comme des conditions « normales ») et d'autre part des périodes d'événements extrêmes du débit. Le but est de comparer la dynamique des paramètres biogéochimiques mesurés à Honfleur pendant ces périodes. Il s'agit surtout d'analyser plus finement les différences qui peuvent être observées au niveau des distributions par le biais des densités de probabilité et des spectres d'énergie.

4.1. En période de saisons humide et sèche

Dans cette section nous considérons les densités de probabilité des paramètres biogéochimique sur les 10 ans de mesures à Honfleur (de 1996 à 2007) selon les deux saisons (période de pluie et période sèche) :

- ✓ période humide (forts débits) comprenant les mois de décembre, janvier, février, mars, avril, mai ;
- ✓ période sèche (faibles débits) comprenant les mois de juin, juillet, août, septembre, octobre, novembre.

La densité de probabilité (pdf)

La figure 4-14 représente la distribution de la température durant les deux périodes ci-dessus. En période humide, la distribution des valeurs de température révèle une distribution bimodale avec un premier mode à 6 °C et un second à 15 °C. Les valeurs minimales et maximales en période humide sont de l'ordre de 2,76 et de l'ordre de 19,5 °C respectivement. Concernant la température en période sèche, elle indique une distribution plurimodale avec un mode important autour de 20 °C. Les valeurs minimale et maximale enregistrées sont de l'ordre de 6,78 °C et de l'ordre de 24 °C respectivement, avec une moyenne autour de 15 °C. Les deux distributions montrent un décalage, et on constate qu'en période humide durant des apports importants en eau douce, la température de l'eau de surface indique une tendance à la baisse.

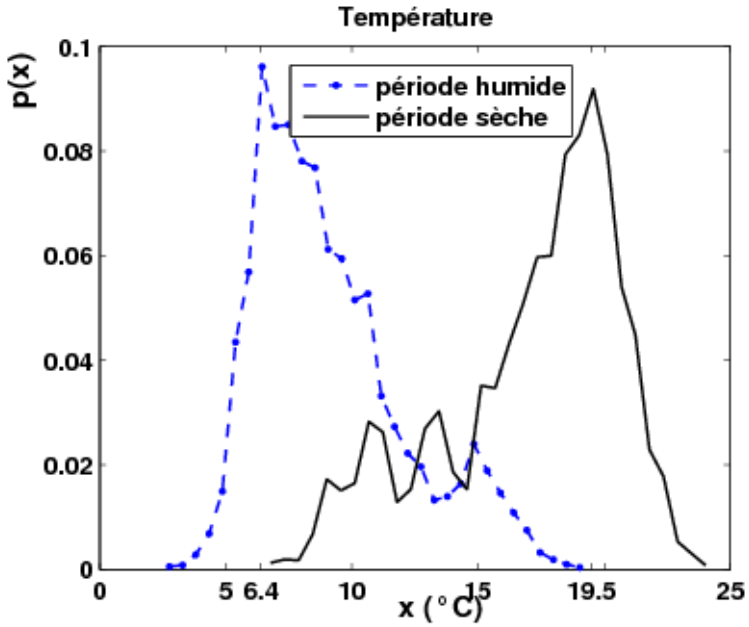

Figure 4-14 : Densité de probabilité de la température de l'eau mesurée à Honfleur en période humide (fort débit) et en période sèche (faible débit). On note un décalage très net entre les deux distributions.

La figure 4-15 met en évidence la distribution de la salinité durant les deux périodes. Les deux distributions se chevauchent. En période sèche, on note un minimum et un maximum de salinité de l'ordre de 1,26 et de 28 PSU respectivement avec un mode bien visible qui apparaît à 19,5 PSU. En période humide les valeurs minimales et maximales sont très proches de celles trouvées en période sèche, un mode moins bien visible apparaît à 6 PSU. Un décalage est bien visible au niveau des queues de probabilité des deux pdfs.

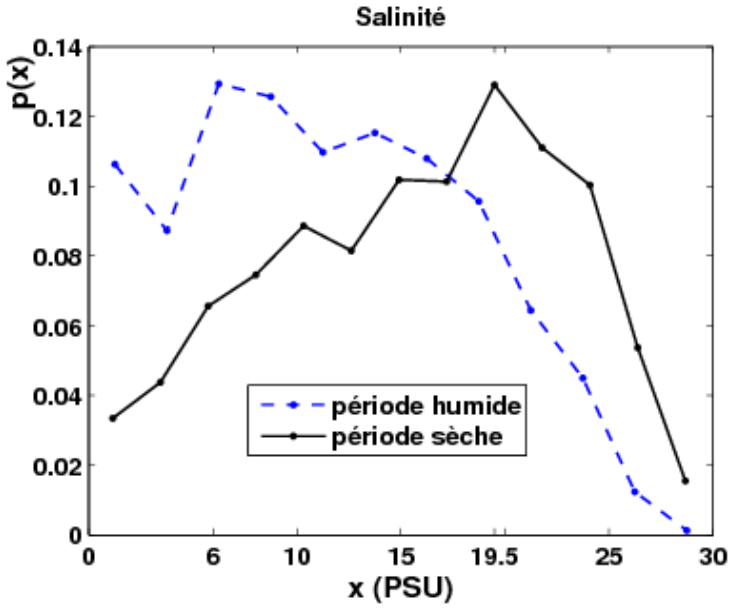

Figure 4-15 : Densité de probabilité de la salinité mesurée à Honfleur durant la période humide (fort débit) et durant la période sèche (faible débit). On note un décalage entre les deux distributions. Les deux pdfs se coupent à 18 °C.

La figure 4-16 présente la pdf de l'oxygène dissous mesuré à Honfleur durant les périodes humide et sèche. Un décalage est bien visible dans les deux distributions qui se coupent autour de 8 mg/L. La pdf en période sèche montre une plus faible oxygénation qu'en période humide. On note une allure unimodale avec un mode autour de 7 mg/L en période sèche et un mode de l'ordre de 8,6 mg/L en période humide.

En ce qui concerne le pourcentage de saturation en oxygène, les distributions sont quasi identiques (Figure 4-17). Les pdfs révèlent une distribution unimodale (autour de 80 % en saturation) avec une très bonne superposition pour les valeurs extrêmes. La présentation en log-linéaire montre un décalage pour les grandes valeurs (dans les deux distributions) (Figure 4-18).

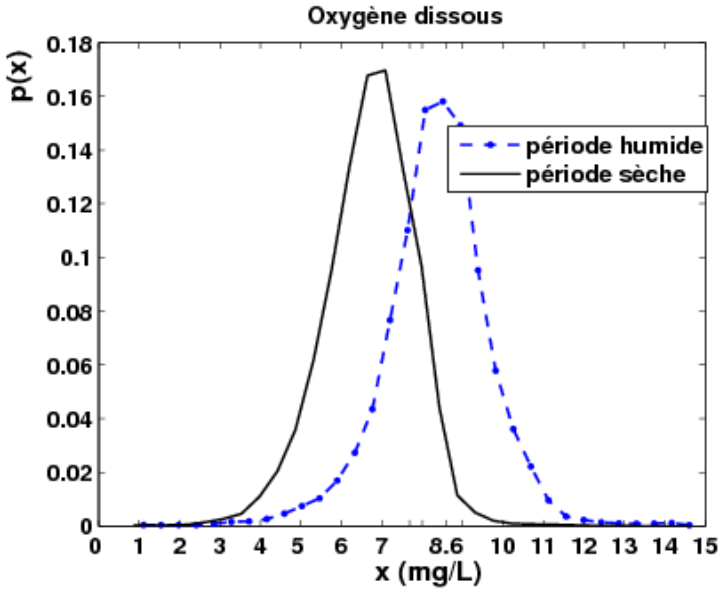

Figure 4-16 : Densité de probabilité de l'oxygène dissous mesuré à Honfleur durant la période humide (fort débit) et durant la période sèche (faible débit). On note un décalage entre les deux distributions. Les deux pdfs se coupent à 7,8 mg/L. Lors des forts débits, les valeurs de OD sont plus élevées comparées aux valeurs en période de faibles débits.

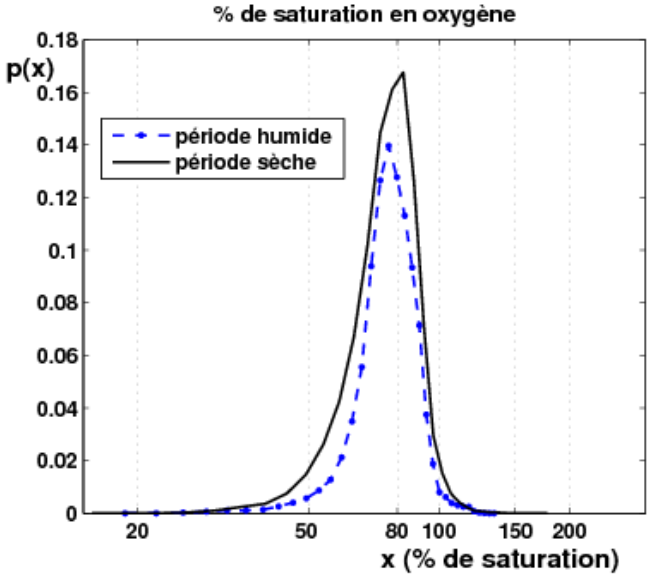

Figure 4-17 : Densité de probabilité du pourcentage de saturation en oxygène mesuré à Honfleur en période humide (fort débit) et en période sèche (faible débit). Les deux pdfs sont superposables, cela est bien visible au niveau des extrêmes.

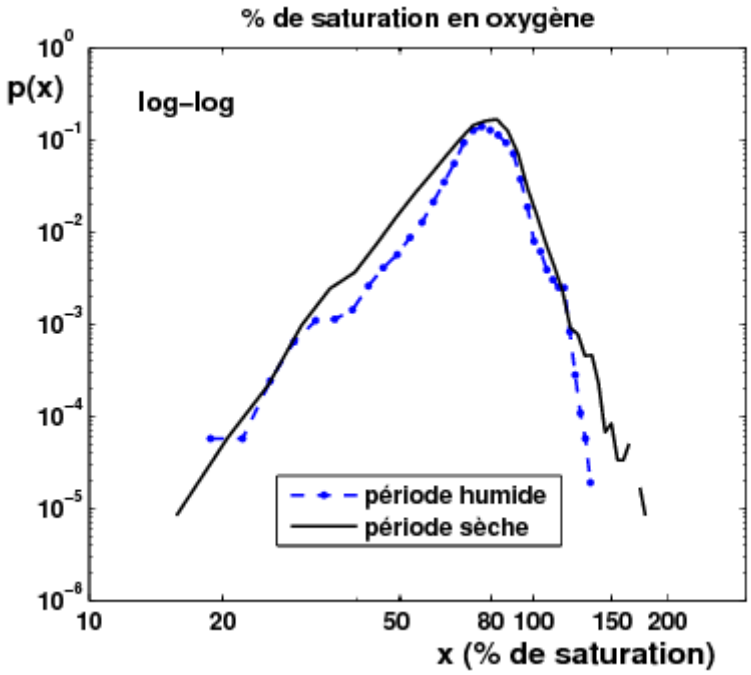

Figure 4-18 : Densité de probabilité en log-log du pourcentage en saturation mesuré à Honfleur en période humide (fort débit) et en période sèche (faible débit). On constate que pour les fortes teneurs en oxygène saturé, les deux pdfs montrent un décalage et qu'en période sèche (faibles débits), l'oxygène saturé indique des teneurs un peu plus importantes.

La figure 4-19 représente les pdfs du pH durant les deux périodes. Les pdfs montrent une distribution unimodale et un mode commun est estimé à 7,88 UpH. La figure 4-20 met en évidence des pdfs représentées en log-linéaire. On constate que ces pdfs sont proches d'une distribution gaussienne.

La figure 4-21 représente la pdf de la turbidité représentée en linéaire et en log-linéaire durant les deux périodes. Cette figure met en évidence deux distributions de forme similaire mais un décalage est bien visible entre elles. La distribution en période humide est au-dessus de celle en période sèche. Ceci confirme le lien existant entre le débit et le flux de matière particulaire arrivant dans l'estuaire. La représentation en log-linéaire permet de comparer les queues de probabilité : ceci indique que les maximums sont atteints en période humide.

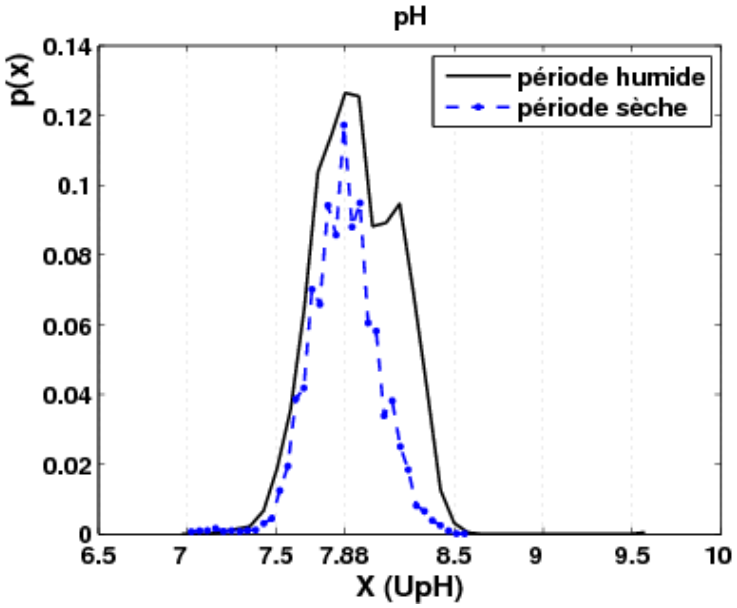

Figure 4-19 : Densité de probabilité du pH mesuré à Honfleur durant la période humide (fort débit) et durant la période sèche (faible débit). La pdf en période sèche (faible débit) est à l'intérieure de celle en période humide (fort débit).

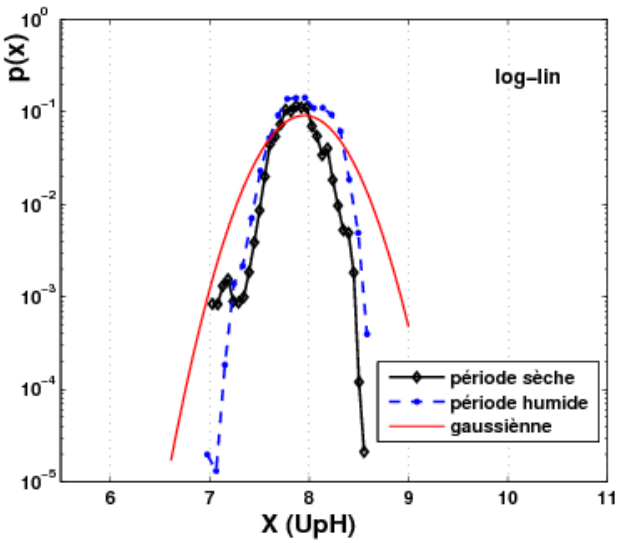

Figure 4-20 : Densité de probabilité en log-lin du pH mesuré durant la période humide (fort débit) et durant la période sèche (faible débit). On note que lors de la période humide (fort débit) on a une faible probabilité d'apparition des teneurs les plus faibles et en période sèche (faible débit), on note une faible probabilité d'apparition des fortes teneurs de pH. Les deux pdfs superposées à la gaussienne indiquent une décroissance encore plus rapides des valeurs.

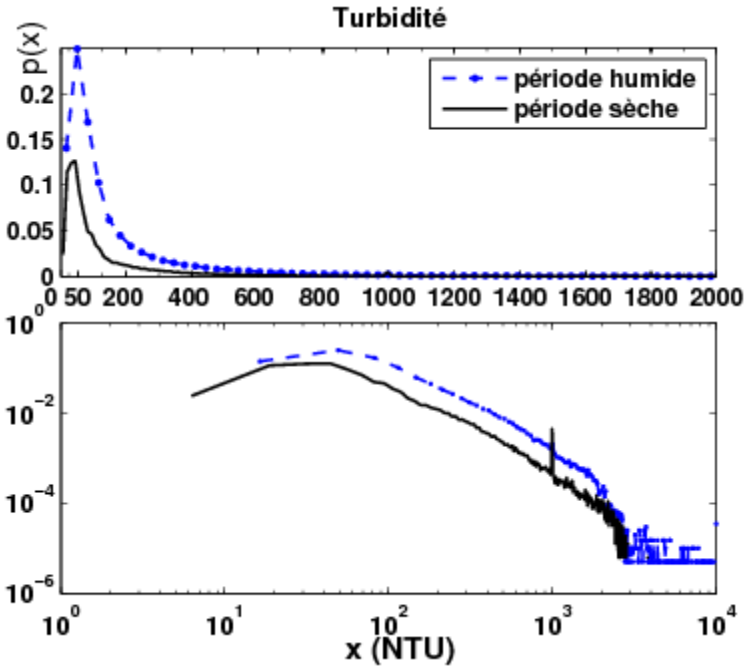

Figure 4-21 : Densité de probabilité en log-lin et en log-log de la turbidité mesurée à Honfleur en période humide (fort débit) et en période sèche (faible débit). On note une forte probabilité d'apparition des teneurs élevées de turbidité en période humide (fort débit).

4.2. En période d'événements extrêmes

Nous présentons ici les densités de probabilité et les spectres d'énergie de la température, de la salinité, de l'oxygène dissous (et saturé), du pH et de la turbidité sur les 10 ans de mesures à Honfleur (de 1996 à 2007) en séparant les périodes d'études en deux portions : les plus forts débits (supérieures au percentile 90) et les plus faibles (correspondant aux valeurs inférieures au percentile 10).

4.2.1. Les densités de probabilité

La figure 4-22 présente les densités de probabilité de la température de l'eau de surface mesurée à Honfleur pour les 2 domaines d'étude (crues et étiages). Cette figure montre deux pdfs décalées. On constate que le mode à 15° C visible en période humide est absent pendant la période d'événements extrêmes de crues (il est de l'ordre de 9,7 °C). En

période d'extrêmes de crues, la pdf de température possède deux modes à 6,7° C et à 9,7 °C et durant les événements extrêmes d'étiages, un fort mode à 20,3 °C apparaît (en période sèche le mode est de l'ordre de 19 °C). La température en période d'étiage est bien plus élevée, correspondant à la saison différente en laquelle les étiages sont obtenus en général.

La figure 4-23 représente la densité de probabilité de la salinité mesurée en période des crues et d'étiages de la Seine. Durant ces événements d'étiage, la distribution de la salinité est presque bimodale montrant des modes à 9,5 PSU et à 23,5 PSU. Pour les crues, la pdf indique une allure asymétrique et décroissante avec un mode à 3,2 PSU. La salinité est plus élevée pour les étiages, correspondant à l'influence plus importante des eaux marines dans le mélange.

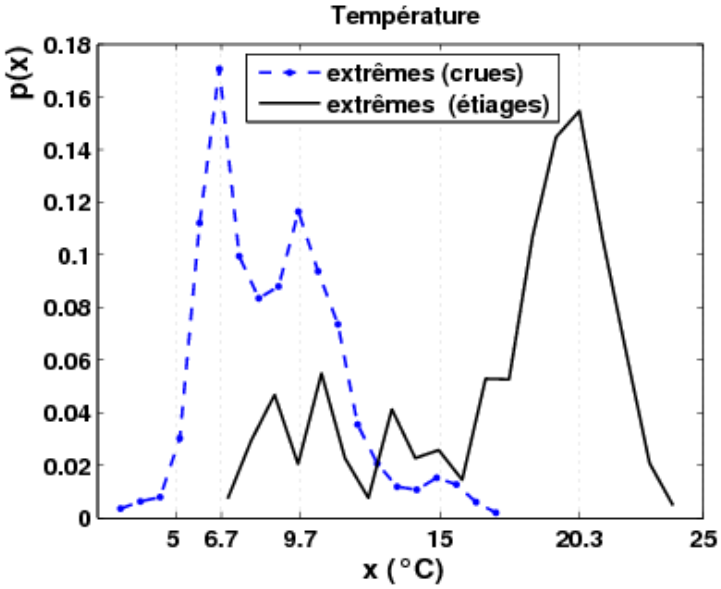

Figure 4-22 : Densités de probabilité de la température mesurée à Honfleur lors d'événements extrêmes (crues et étiages). Les deux pdfs montrent un décalage. Lors des crues, la température indique une distribution bimodale (des pics à 6,7°C et à 9.7°C). En période d'étiages, la température révèle une distribution unimodale avec un pic à 20,3°C.

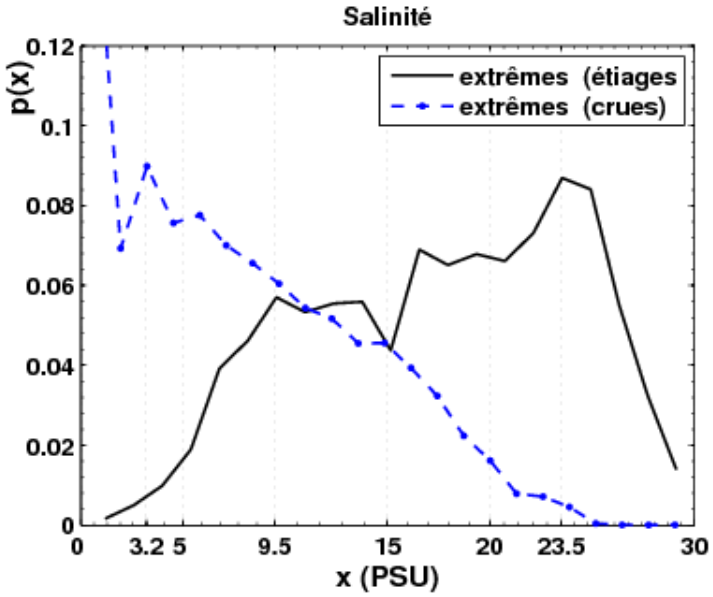

Figure 4-23 : Densités de probabilité de la salinité mesurée à Honfleur en période d'événements extrêmes (crues et étiages) du débit de la Seine. La pdf de la salinité lors d'extrêmes d'étiages montre une distribution bimodale comparée à la pdf en période d'extrêmes de crues qui indique une distribution asymétrique.

La figure 4-24 présente les pdfs de l'oxygène dissous mesuré à Honfleur durant les étiages et crues. La pdf de l'oxygène dissous en période de crues possède une distribution bimodale mettant en évidence un premier mode à 8,6 mg/L et un second mode à 10,6 mg/L. La valeur du premier mode est identique à celle trouvée en période normale humide (8,6 mg/L) et le second mode à 10,6 mg/L est absent durant la période normale humide. En période d'étiage, la pdf de l'oxygène dissous montre une allure unimodale avec un mode de l'ordre de 6,5 mg/L proche de celui trouvé en période normale sèche (6 mg/L). On constate que pour les crues les eaux sont plus oxygénées.

La figure 4-25 représente des pdfs du pourcentage en saturation mesuré. Un petit décalage est observé entre les deux pdfs. En période d'étiage, la pdf ce paramètre indique un mode autour de 82 % et durant les crues, la pdf met en évidence un mode de 74 %. Ici le pourcentage en saturation indique que les crues sont moins oxygénées. La différence pour l'oxygène dissous semblait principalement provenir de différences pour la température et la salinité. On constate également que les plus faibles teneurs en pourcentage en saturation n'apparaissent qu'en période d'étiage (on note des teneurs inférieures à 40 %). La

figure 4-26 représente les deux pdfs en log-linéaire : on note un fort décalage entre les deux pdfs pour les teneurs en dessous de 60 % du taux de saturation.

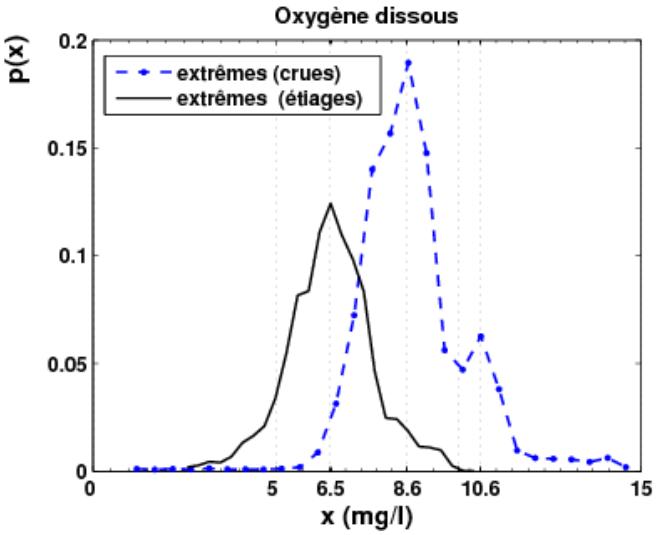

Figure 4-24 : Densités de probabilité de l'oxygène dissous mesuré à Honfleur en période d'événements extrêmes (crues et étiages) du débit de la Seine. On note un décalage entre les pdfs. Pour les crues les eaux sont plus oxygénées.

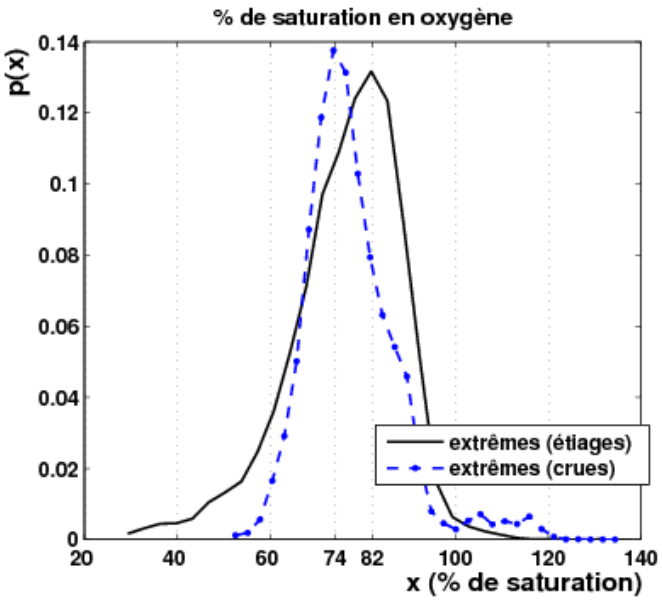

Figure 4-25 : Densités de probabilité du pourcentage en saturation mesuré à Honfleur en période d'événements extrêmes (crues et étiages) du débit de la Seine. La différence est moins marquée que pour l'oxygène dissous : ceci indique que la différence en figure 4-23 est principalement due aux différences de température et de salinité.

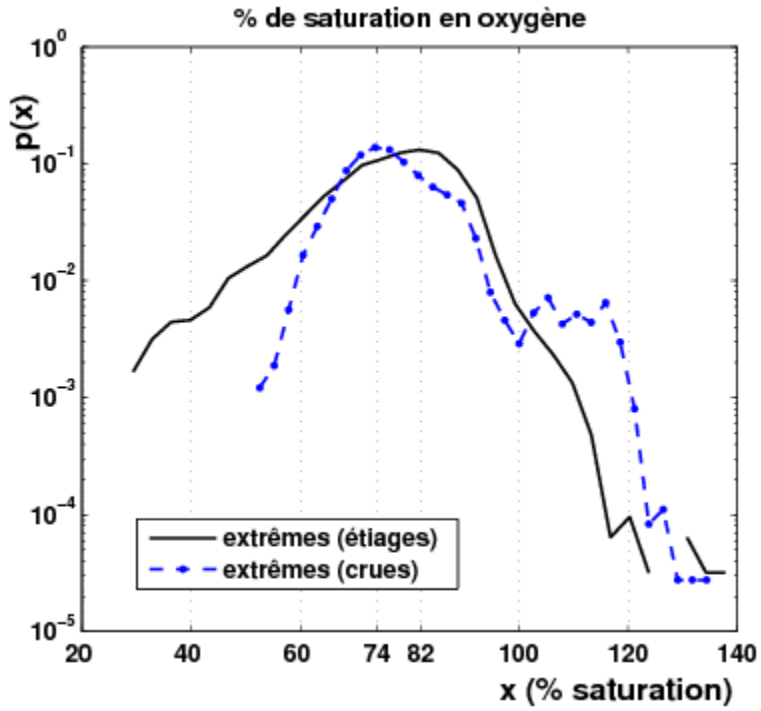

Figure 4-26 : Densités de probabilité du pourcentage de saturation en oxygène mesuré à Honfleur en période de crues et d'étiages. Les pdfs sont représentées en log-log. On note un décalage important entre les deux pdfs pour des teneurs en saturation inférieures à 60 %.

La figure 4-27 représente les pdfs du pH. Les deux pdfs révèlent un décalage pour les fortes teneurs en pH (Figure 4-26). La pdf du pH durant les crues indique une distribution bimodale. En période d'étiage, la pdf indique une allure unimodale, son mode est très proche du mode de la pdf en période de crues. Les pdfs du pH représentés en log-linéaire (Figure 4-28) mettent en évidence des distributions du type hyperbolique durant les crues et du type gaussien en période d'étiage (Figure 4-28).

La figure 4-29 représente les pdfs en log-log de la turbidité. Les pdfs indiquent une bonne superposition pour des teneurs en turbidité inférieures à 1000 NTU et au dessus de cette valeur, les pdfs révèlent un petit décalage. Ici on constate que pour des teneurs supérieures à 1000 NTU, la courbe en période de crues est en dessous de celle en période d'étiage. Ceci pourrait être expliqué par le rôle joué par le débit fluvial sur la position du « bouchon vaseux ». Car en période de crues, le « bouchon vaseux » est déplacé vers l'aval.

Avoine et al. (1985a) ont montré que lors des crues les matières en suspension (MES) étaient partiellement expulsées en mer avec un temps de résidence de quelques heures à quelques jours.

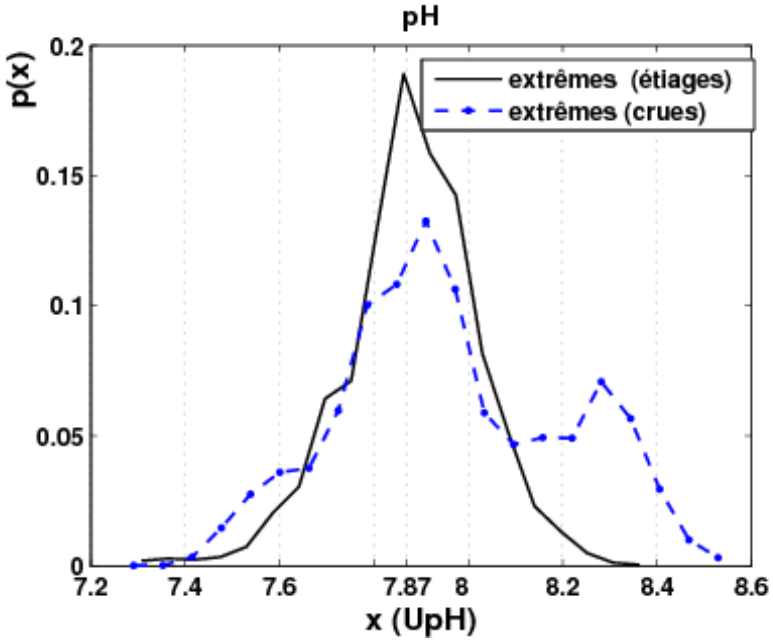

Figure 4-27 : Densités de probabilité du pH mesuré à Honfleur durant les crues et étiages. Un note un décalage entre les pdfs. La pdf en période d'extrêmes de crues indique une allure bimodale.

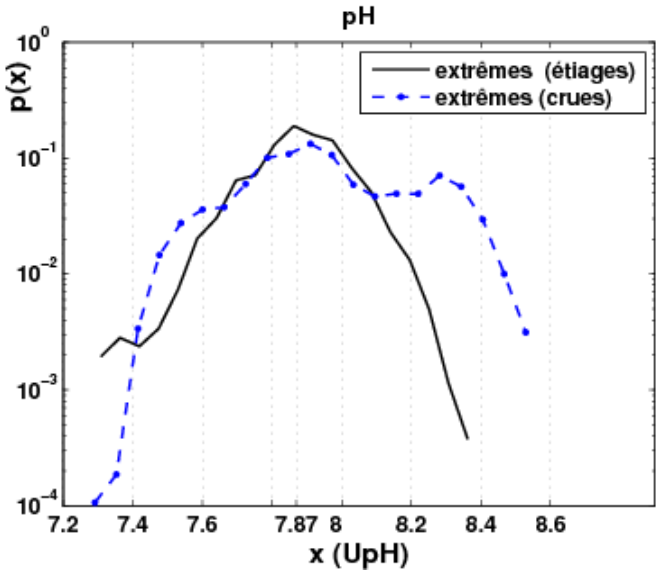

Figure 4-28 : Densités de probabilité du pH en log-linéaire (log-lin) mesuré à Honfleur pour les étiages et crues. En période de crues, la pdf du pH indique une distribution du type hyperbolique. Durant les étiages, le pdf du pH révèle une distribution proche d'une distribution gaussienne.

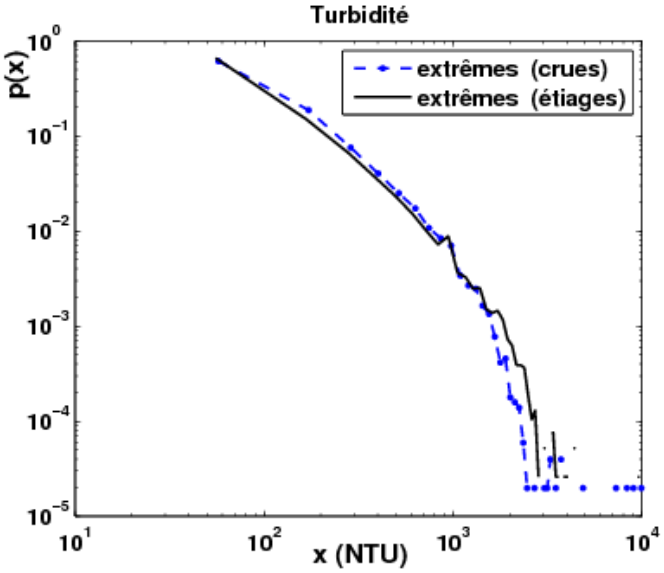

Figure 4-29 : Densités de probabilité de la turbidité mesurée à Honfleur durant les périodes de crues et d'étiages. Les pdfs sont représentées en log-log. On note une bonne superposition pour des teneurs en dessous de 1000 NTU et au dessus de cette valeur un léger décalage apparaît entre les deux pdfs.

4.2.2. Les spectres d'énergie

Ici nous considérons les spectres d'énergie, pour des périodes concernant les crues et étiages. Il y a pour l'analyse spectrale une contrainte supplémentaire : cette méthode demande de disposer de périodes consécutives suffisamment longues. Les années 2000, 2001 et 2003 sont des années qui montrent des périodes consécutives plus longues (voir figure 4-12). Ces années permettront d'avoir une série assez longue et moins de valeurs manquantes pour pouvoir effectuer l'analyse spectrale.

La figure 4-30 représente les spectres d'énergie de la température en période de crues (de l'année 2000) et d'étiage (de l'année 2003). Les deux spectres possèdent une bonne invariance d'échelle avec des pentes très proche de 5/3. On constate tout de même un décalage entre les deux spectres, ce qui suppose une distribution temporelle différente. Le spectre en période de crues révèle un pic important à 24 h comparé au spectre en période d'extrêmes d'étiage qui indique un pic important à 12 h. Ceci semble indiquer que la marée influence les faibles valeurs, tandis que le cycle jour/nuit a plus d'influence sur les grandes valeurs.

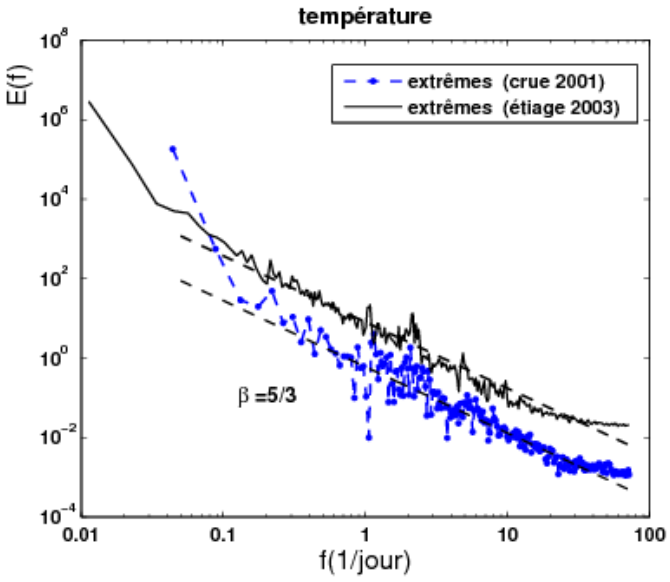

Figure 4-30 : Les spectres d'énergie de la température mesurée à Honfleur durant les événements extrêmes (étiage en 2003 et de crues en 2000) du débit de la Seine. Les spectres montrent une bonne invariance d'échelle avec des pentes proche de 5/3. On note un décalage entre les spectres sur toute l'échelle considérée. Le pic à 12 h est plus important lors des étiages.

La figure 4-31 met en évidence les spectres de salinité durant les deux événements extrêmes de l'année 2001 et l'année 2003. Les deux spectres possèdent des allures très proches. Les forts pics sont retrouvés dans le spectre de salinité en période d'étiage. La variabilité due au cycle de marée est plus importante pendant la période d'étiage (lors des faibles débits). Les spectres de salinité indiquent que le processus de dessalure dépendant du débit du fleuve est surtout influencé par l'amplitude de la marée.

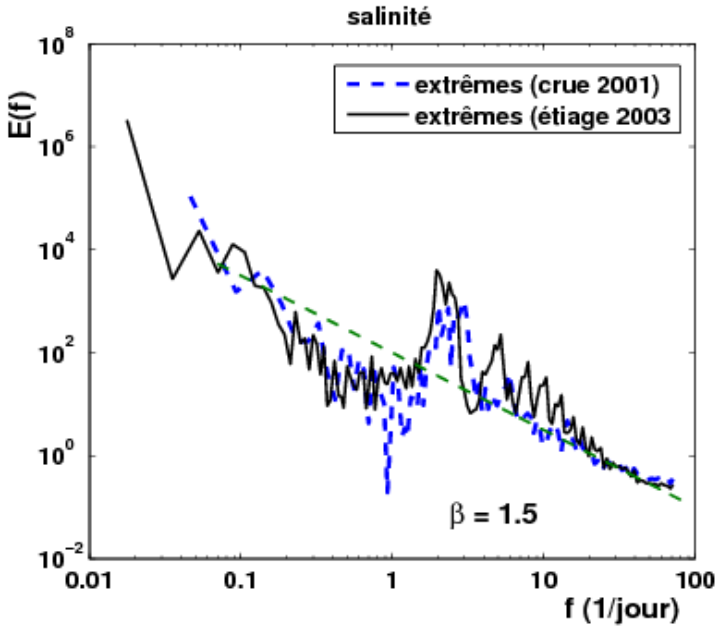

Figure 4-31 : Les spectres d'énergie de la salinité mesurée à Honfleur en période d'événements extrêmes (étiage en 2003 et crues en 2001) du débit de la Seine. Les deux spectres sont assez proches.

La figure 4-32 représente les spectres d'oxygène dissous mesuré à Honfleur en période de crues (2001) et étiages (2003) de la Seine. Les spectres montrent une dynamique différente. On note dans le spectre d'oxygène dissous en période de crues une bonne invariance d'échelle pour les échelles supérieures à 2 h avec une pente de 1,85. Le spectre d'oxygène dissous en période d'extrêmes d'étiage révèle une rupture de pente pour les échelles inférieure à 12 h : les données semblent bruitées montrant une totale déstructuration

vraisemblablement due à une absence de mélange turbulent. Une invariance d'échelle apparaît pour les échelles inférieures à 12 h, mettant en évidence une pente de l'ordre de 2.

Les spectres du pourcentage en saturation possèdent les mêmes allures que les spectres d'oxygène dissous en période d'événements extrêmes (Figure 4-33). Les spectres indiquent une pente de 1,5 en période de crues et une pende de l'ordre de 2 en période d'étiage. Une allure plate du spectre apparaît pour les échelles inférieures à 2 h durant la période de crues.

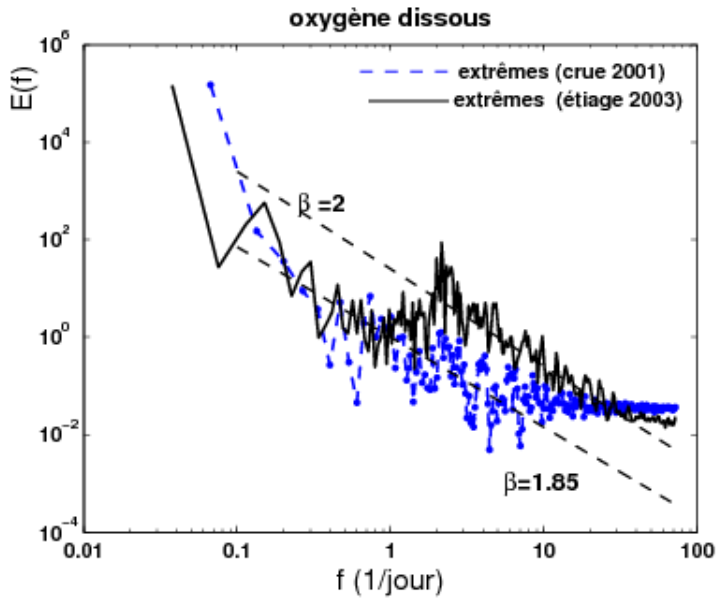

Figure 4-32 : Les spectres d'énergie de l'oxygène dissous mesuré à Honfleur durant les événements extrêmes (étiage en 2003 et crues en 2001) du débit de la Seine. Les deux spectres sont très différents. Les faibles valeurs montrent un bruit (spectre plat) pour les échelles supérieures à 2 h.

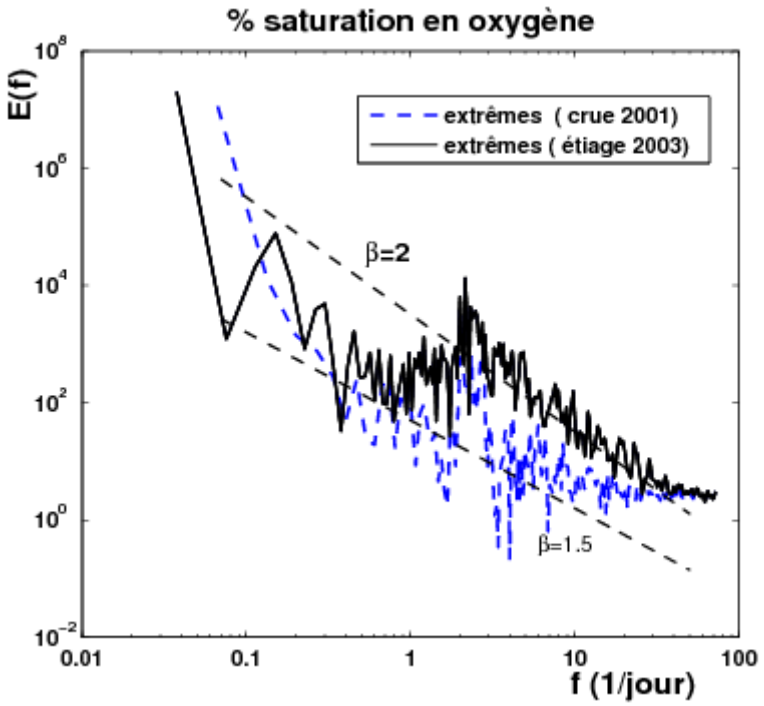

Figure 4-33 : Les spectres d'énergie du pourcentage de saturation en oxygène mesuré à Honfleur en période d'événements extrêmes (étiages en 2003 et crues en 2001) du débit de la Seine. L'allure des spectres est assez analogue à celle obtenue pour l'oxygène dissous.

La figure 4-34 met en évidence les spectres d'énergie du pH pour des données recueillies en périodes d'événements d'extrêmes du débit de la Seine. Les deux spectres indiquent une distribution temporelle différente. Le spectre en période de crues révèle une bonne invariance d'échelle avec une pente de l'ordre de 1,5. Le spectre en période d'extrêmes d'étiage possède également une invariance d'échelle avec une pente proche de 1,5 : ce spectre possède un pic important à 12 h.

La figure 4-35 représente les spectres d'énergie de turbidité mesurée à Honfleur pour des données recueillies en périodes événements extrêmes du débit de la Seine. Les deux spectres durant les événements extrêmes sont proches mais révèlent un léger décalage. Une bonne superposition est visible pour les échelles comprises entre 5 jours et 2 h. Pour les échelles inferieures à 1 jour, on remarque un décalage entre les spectres. Le spectre en période d'extrêmes d'étiage indique un pic plus important à 12 h.

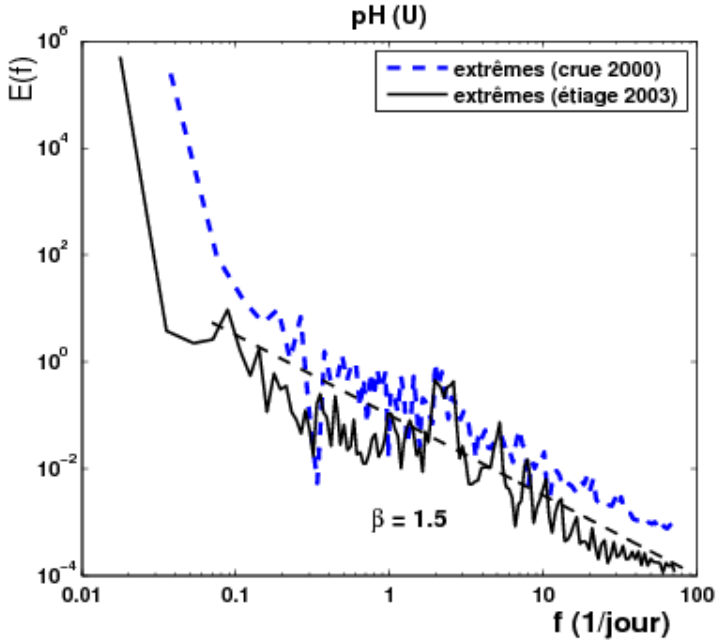

Figure 4-34 : Les spectres d'énergie du pH mesuré à Honfleur en période d'événements extrêmes (étiages en 2003 et crues en 2000) du débit de la Seine. Les deux spectres montrent un décalage. L'invariance d'échelle est moins bonne pour les données recueillies en période d'étiage.

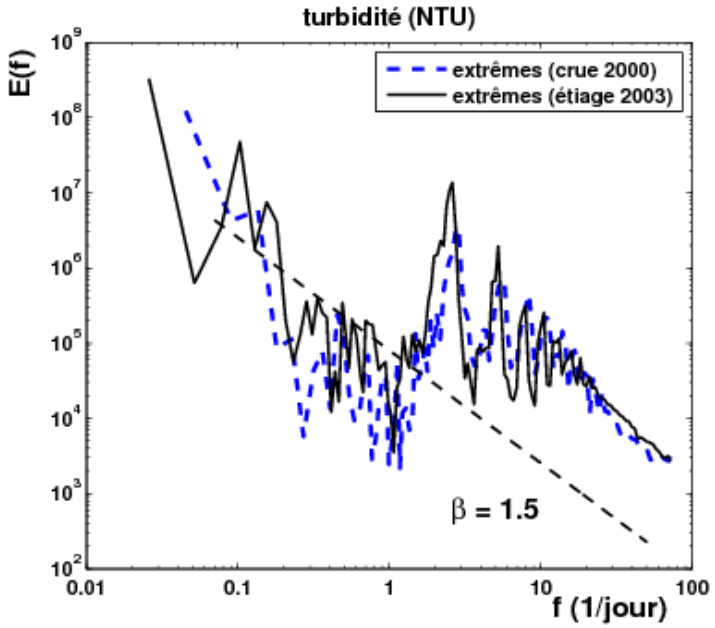

Figure 4-35 : Spectres d'énergie de la turbidité mesurés à Honfleur durant les événements extrêmes (étiages en 2003 et crues en 2001) du débit de la Sein

5. Discussion

L'analyse de données de température, de salinité, d'oxygène dissous ou saturé, de pH, de turbidité mesurées par MAREL Honfleur sur la période de 1996 à 2007 durant les deux événements extrêmes (de crues et d'étiages) du débit de la Seine, nous a permis d'apporter des informations concernant la distribution de ces paramètres.

Cette étude confirme les travaux antérieurs qui montrent que les débits de la Seine sont irréguliers et sont caractérisés par leur intermittence (Schmitt, 2006 ; Huang et al., 2009). Cette forte variabilité du débit est l'une cause de la forte variabilité rencontrée dans les paramètres biogéochimiques à Honfleur (Dur et al., 2007 ; Schmitt et al., 2008).

Le débit de la seine depuis 1941 montre des valeurs extrêmes de crues et d'étiages non négligeables, on remarque dans nos résultats que la pdf des valeurs du débit de 1996 à 2007 indique une forte probabilité d'apparition des valeurs extrêmes. Deux événements extrêmes sont détectés dans la série du débit : les événements extrêmes d'étiages et de crues. La série de 1996 à 2007 fait ressortir une succession d'événements extrêmes de durée très variable au cours du temps et quelle que soit l'année. Ces périodes de crues et d'étiages coïncident avec les périodes de précipitation et de sécheresse importantes sur le bassin versant de la seine. L'analyse des résultats montre l'influence de ces deux événements extrêmes du débit dans la distribution de ces paramètres environnementaux pour des mesures en un point fixe.

Les analyses faites en périodes « normales » et en périodes d'événement « extrêmes » à partir des séries temporelles enregistrées à Honfleur nous ont permis de déceler des différences au niveau de leur pdf. De plus, les pdfs des paramètres environnementaux durant ces événements extrêmes nous renseignent sur le mode de répartition de certaines espèces planctoniques (Vieira et al., 2003 ; Telesh et Khlebovich, 2010) telles que les copépodes et / ou le type de forçage qui peuvent rencontrer (ou subir) (Schmitt et al., 2008).

Les pdfs de la température durant les extrêmes d'étiages et de crues indiquent une augmentation et une baisse de la température de l'eau respectivement. Durant les extrêmes de crues, la pdf de la température révèle une forte probabilité d'apparition des modes autour de 6,7 et 9,5 °C. Il faut cependant remarquer qu'en période normale humide, la pdf indique

la même probabilité d'apparition d'un mode de l'ordre de 6,4°C. On constate également que durant la période d'extrêmes d'étiages la pdf de température indique une forte probabilité d'apparition d'un mode autour de 20 °C. En comparant les deux pdf en période normale sèche et en période d'étiages on note différence de mode de 1 °C.

La pdf de la salinité durant les événements extrêmes d'étiage indique une distribution presque bimodale ; cette allure pourrait être due au cycle de marée. La pdf indique une forte probabilité d'apparition des teneurs en salinité comprises en 16 et 25. Durant les événements extrêmes de crues la pdf indique une forte probabilité d'apparition de teneurs en salinité inferieures à 5. En outre, durant la période normale la pdf révèle une forte probabilité d'apparition des teneurs en salinité comprises en 6 et 19.

Concernant l'oxygène dissous, la pdf durant les événements extrêmes révèle un gradient d'oxygène croissant. En période d'extrêmes de crues, l'oxygène dissous présente des teneurs relativement élevées. La pdf montre une probabilité presque nulle d'apparition des teneurs en dessous de 5 mg/L comparée à la période normale ou des teneurs de 4 ou 5 mg/L apparaissent dans la pdf. La pdf possède un mode à 8,6 mg/L et 10,6 mg/L. L'oxygène dissous mesuré en surface montre une situation d'oxygénation des eaux lors des crues et une baisse d'oxygène dissous est observée lors des étiages. Contrairement à l'oxygène dissous, la pdf de l'oxygène saturé révèle durant la période d'étiage un pourcentage en saturation plus important. Durant la période d'événements extrêmes d'étiages, la distribution de l'oxygène dissous indique une allure unimodale avec un mode de 6,5 PSU. Comparée aux conditions normales ou la pdf indique un mode de 7 mg/L. Durant les deux événements extrêmes, la pdf du pourcentage en saturation indique une faible probabilité d'apparition des teneurs supérieures à 100 % en saturation. Ce constat est également fait lors des périodes dites normales humide et sèche.

La distribution bimodale est observée dans les données de pH en période d'événements extrêmes de crues. La pdf indique une augmentation de ce paramètre durant les crues, la valeur du mode augmente de 0,3 UpH comparée à la période normale humide. La queue de distribution met en évidence un comportement hyperbolique caractérisant l'intermittence dans les teneurs en pH durant les périodes de crues. Nous remarquons l'absence de comportement intermittent durant les périodes normales. Durant les extrêmes

d'étiage, l'allure de la pdf ne diffère pas de celle donnée en période normale sèche. En période d'étiage, les teneurs du pH enregistrées sont moins alcalines.

Quant à la turbidité, c'est un paramètre très important qui caractérise cet estuaire. L'évolution de la turbidité est associée au « bouchon vaseux ». Les deux pdfs (des deux événements extrêmes de débit) révèlent un décalage pour les grandes teneurs. On constate qu'en période d'événements extrêmes de crues, la distribution en log-linéaire indique une faible probabilité d'apparition des valeurs extrêmes de turbidité. Les valeurs extrêmes de turbidité sont plus fréquentes en période d'événements extrêmes d'étiage. Une turbidité élevée pourrait entrainer une limitation à la production primaire et donc induire le manque de nourriture pour le zooplancton.

Concernant l'analyse spectrale de ces paramètres durant les deux événements extrêmes, elle indique pour quelques paramètres une invariance d'échelle sur une certaines gamme d'échelle. Nous avions montré dans le chapitre II, que la variabilité temporelle des paramètres biogéochimique mesurés à Honfleur était due en grande partie à l'hydrodynamisme marin et à l'apport fluvial de la Seine (Schmitt et al., 2008). Durant les deux événements extrêmes, le spectre de Fourier révèle le caractère passif de la température, avec une pente proche de $\beta = 5/3$. La superposition des deux spectres (en périodes de crues et d'étiages), montre un décalage indiquant une distribution temporelle différente entre les deux spectres. Les spectres de salinité révèlent un léger décalage (spectres en périodes de crues et d'étiages). Le spectre de pH possède une assez bonne invariance d'échelles avec une pente de 1,5, une pente identique à celle obtenue en conditions normales (Schmitt et al., 2008). Le spectre de turbidité indique une pente proche de 1,5 qui met en évidence l'influence probable de la turbulence et du débit.

De plus on constate qu'en période de crues, l'énergie associée au pic de 12h (cycle de marée) est moins important qu'en période d'événements extrêmes d'étiage. Ceci s'explique par le fait que la vitesse de marnage est amortie dans l'ensemble de l'estuaire durant les périodes de crues (Le Hir et Silva-Jacinto, 2001).

En conclusion, nous remarquons que la distribution des paramètres biogéochimiques mesurés à Honfleur est conditionnée en grande partie par les eaux douces de la Seine mais

par la dynamique marégraphique (visible dans les spectres d'énergie). En raison de cette variabilité non négligeable entrainée par les événements extrêmes du débit, le fonctionnement des communautés zooplanctonique et phytoplanctonique pourrait être impacté par ces variabilités qui apparaissent à l'échelle de l'heure, sachant que les certaines communautés planctoniques de la Seine se repartissent selon leurs gammes de salinité et de température préférentielles (Mouny et al, 1998 ; Devreker et al., 2009 ; Dur et al., 2009).

C. Simulation bon état dans le cadre de la loi sur l'eau (DCE)

La directive Cadre sur l'Eau (DCE) a adoptée le 23 Octobre 2000 une politique européenne définissant un cadre pour la gestion et la protection des eaux (Directive 2000/06/EC). Cette politique de l'eau à pour objectif de fixer le « bon état » des eaux souterraines, superficielles et côtières en Europe en 2015. Des paramètres écologiques, biologiques et physico-chimiques sont choisis pour définir ce « bon état » (Borja, 2005).

En France, cette mission est assurée en collaboration par le Ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement Durable, les Agences de l'Eau et l'Ifremer.

La zone côtière en Manche orientale est l'un des sites couvert par l'Agence de l'Eau Artois Picardie, et qui représente notre site d'étude. Ce site reçoit des eaux douces par les rivières, les fleuves et ces apports en eaux douces chargées en sels nutritifs, qui modifient localement cet écosystème côtier. Des apparitions de prolifération algales sont rencontrées le plus souvent au printemps et pourraient être liées aux sels nutritifs déversés dans les eaux marines (Ménesguen, 2001 ; Sazhin et al., 2006 ; Lefebvre, 2008a,b). La décomposition des très fortes biomasses algales produites peut entrainer des phénomènes d'anoxie et donc avoir un impact majeur sur la croissance des espèces planctoniques (Marcus et Lutz, 1994 ; Stachowitsch, 1991).

L'objectif de cette étude est d'examiner comment on pourrait évaluer l'état des masses d'eau à partir de données à plus haute fréquence. Les mesures à haute fréquence de fluorescence et d'oxygène dissous sont fournies par la station MAREL Carnot.

1. Protocole établi par la DCE (Directive Cadre sur l'Eau)

En zone côtière (également pour les eaux de transition), les éléments de qualités pour évaluer l'état écologique sont (encadré 4-1) :

i. Les paramètres biologiques
ii. Les paramètres chimiques et physico-chimiques
iii. Les paramètres hydromorphologiques

Les paramètres biologiques retenus par la DCE sont le phytoplancton, les microalgues, la flore aquatique et la faune benthique invertébrée. Concernant les paramètres chimiques, la DCE recommande de doser 41 substances dans l'eau, et s'agissant des paramètres physico-chimiques, ils regroupent l'oxygène dissous, la turbidité, les nitrates, les nitrites, l'ammonium, l'orthosilicate et l'orthophosphate. Les polluants sont également retenus pour définir l'état chimique, ils sont groupés sous le nom de substances OSPAR, substances ''pertinentes'' et pesticides. Les paramètres hydromorphologiques intègrent les conditions morphologiques et le régime des marées.

Dans cette étude, uniquement un paramètre biologique et un paramètre physico-chimique ont été considérés. Le paramètre biologique considéré est le phytoplancton. Généralement les indicateurs pris en compte concernant le phytoplancton sont : la concentration en chlorophylle *a* (Chla) qui est l'indicateur de la biomasse du phytoplancton et le nombre de blooms (l'abondance et la composition taxonomique) (Revilla et al., 2009) .

La métrique retenue pour le paramètre biomasse est le percentile 90 des données de Chla. Le percentile 90 permet la prise en compte d'une grande majorité des données, y compris celles des pics de Chla à l'exception des données extrêmes de ces pics. L'échantillonnage doit être fait une fois par mois, de mars à octobre, sur six ans (Belin et Soudant, 2008).

La métrique retenue pour le paramètre abondance est le pourcentage d'échantillons pour lesquels un taxon dépasse la concentration-seuil fixée pour un bloom, rapporté au nombre total d'échantillons. L'échantillonnage doit être fait toute l'année, une fois par mois, sur six ans. Les concentrations seuils se distribuent dans les différents pays entre 100000 cellules par litre et 1 million de cellule par litre. Les seuils retenus pour les deux écotypes concernant la France sont de :

- 100 000 cellules par litre pour les grandes cellules,
- 250 000 cellules par litre pour les petites cellules.

Dans cette étude fondée sur la haute fréquence, nous n'avons pas accès à l'information concernant le nombre de blooms. Ce nombre de bloom est en fait une quantité qui dépend des efflorescences d'une part des espèces identifiées et d'autre part des espèces

nuisibles. L'idée d'utiliser simplement la Chla ne permet pas d'obtenir des informations précises concernant le nombre de bloom.

Au cours de cette étude, nous nous sommes intéressés au critère faisant appel au quantile de la Chla. Nous y avons ajouté un critère secondaire, qui fait également appel aux quantiles, utilisé à partir des données d'oxygène dissous (OD). L'OD est l'un des paramètres physico-chimique généralement utilisé dans le suivi de la qualité des eaux (l'indicateur également retenue par la DCE). Il est aussi préconisé pour diagnostiquer l'état d'eutrophisation des eaux côtières, en prenant en compte les concentrations en OD (Ménesguen, 2001 ; O'Boyle et al., 2009).

La métrique retenue pour l'OD est le percentile 10 des mesures de surface et au fond, une fois par mois, de juin à septembre, sur six ans.

L'évaluation faite dans le cadre de notre étude repose exclusivement sur la Chla (en tant que paramètre biologique) et l'OD. Une classification de l'état écologique par la DCE repose sur 5 classes d'état pour l'indicateur Chla et le paramètre DO : « Très bon (TB)», « Bon (B) », « Moyen (Mo) », « Médiocre (Me) » et « Mauvais (Ma) » selon le quantile (Tableau 4-2). Le paramètre le plus déclassant déterminera le « bon état » écologique général (Encadré 4-1).

Nous estimons donc les percentiles 10 et 90 pour les paramètres DO et Chla à partir de données haute fréquence. La valeur numérique de chaque percentile est transformée en indice de qualité (Tableau 4-2).

Selon le protocole retenu par la DCE, une estimation de la qualité des eaux n'est possible que sur une période de 6 ans, et l'estimation se fait à partir de 48 ou 98 valeurs obtenues tous les 15 jours.

Encadré 4-1 : La grille d'évaluation du « bon état général » des masses d'eaux (DCE) (http//www.ifremer.fr) ; l'état écologique définit par l'état biologique (phytoplancton, microalgues, la faune invertébrée benthique) et l'état chimique et physico-chimique (tels que les nutriments, l'oxygène dissous, la turbidité, et certains polluants)

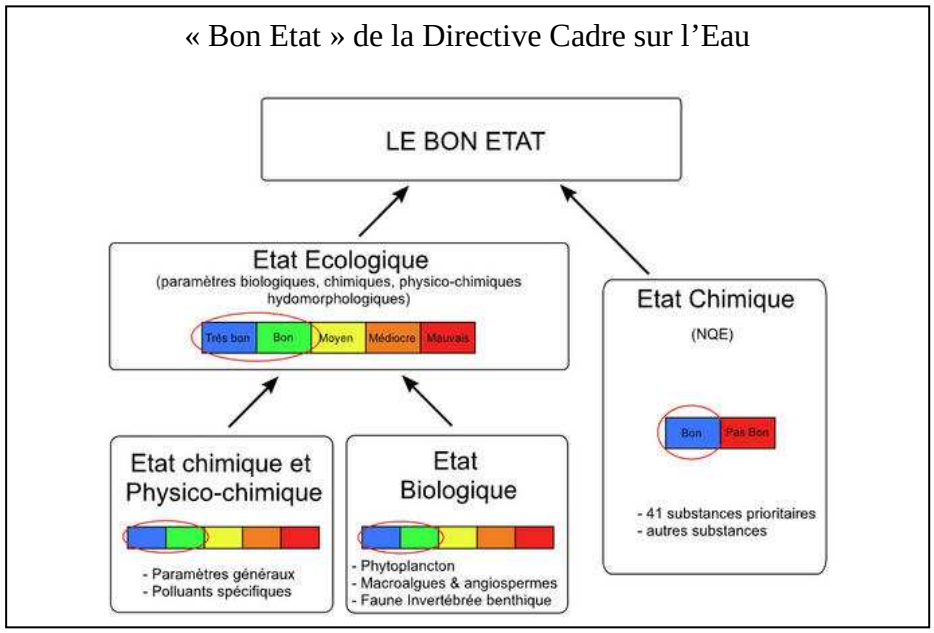

Tableau 4-2 : La grille d'évaluation (les eaux du littoral) : les critères (ou indices) de qualité utilisés pour quantifier les masses d'eau à partir des quantiles. Ces valeurs sont reprises de celles préconisées dans le cadre de la DCE

Quantité	**Valeur de P**	**Indice qualité retenu**
Chlorophylle a *P=percentile 90*	< 5 µg/l	Très bon (TB)
	5 à 10 µg/l	Bon (B)
	10 à 20 µg/l	Moyen (Mo)
	20 à 40 µg/l	Médiocre (Me)
	> 40 µg/l	Mauvaise (Ma)
Oxygène dissous *P=percentile 10*	> 5 mg/l	Très bon (TB)
	3 à 5 mg/l	Bon (B)
	2-3 mg/l	Moyen (Mo)
	1-2 mg/l	Médiocre (Me)
	< 1 mg/l	Mauvaise (Ma)

2. Méthodologie de l'étude

Rappelons que la Chla est l'un des indicateurs de qualité utilisée pour déterminer la qualité des masses d'eau dans le cadre de la DCE. Pour être en accord avec de la DCE, les données de fluorescence du programme MAREL sont transformées en Chla à l'aide d'une courbe de conversion (voir chapitre I : méthodes d'analyses).

Le but de cette étude est donc généralement d'estimer la qualité de la masse d'eau en Manche orientale (donc à partir des données haute fréquence sur 6 ans), avec un pas de temps variable. Il s'agit d'examiner l'influence de l'échelle ; ceci permettra de tester directement ce qu'il se passerait si on utilisait un temps plus court pour tester la qualité des eaux.

La méthodologie utilisée est de choisir le pas de temps, et sur ce pas de temps on estime les percentiles 10 et 90 des données d'OD en mg/L et de Chla en µg/L respectivement. Le nombre de données fournit par MAREL Carnot permet ainsi d'estimer les quantiles et de fournir un indice ou un critère de qualité des masses d'eau en Manche orientale basé sur ces deux paramètres. On estime également le pourcentage de chaque indice sur l'ensemble des données.

Dans cette étude on examine l'influence:

- de l'échelle (de la semaine à l'année) ;
- du changement de l'heure et du jour de prélèvement.

3. Les données haute fréquence MAREL Carnot

Rappelons que l'OD et la fluorescence (F) sont mesurés par la station MAREL Carnot installée dans les eaux côtières proches de Boulogne-sur-mer (voir chapitre I). Cette station effectue des mesures toutes les 20 minutes à 1,5 m sous la surface depuis mars 2004. La période d'étude considérée est de 2004 à 2009 (6 ans de mesure).

MAREL Carnot ne permet pas de doser la concentration en chlorophylle (Chla). Ce système permet de suivre l'évolution de la biomasse celle de la chlorophylle *a* via la fluorescence émise par la Chla présente dans le phytoplancton exprimée en FFU

(Fluoresceine Fluorescence Unit). Pour cela les données de fluorescence (F) sont tout d'abord transformées en Chla pour pouvoir appliquer les critères associées à la DCE.

Le facteur de conversion fluorescence-chlorophylle *a*

On s'intéresse ici à la relation entre « Chla » et « F » en considérant la covariation entre ces deux paramètres par la méthode de moyenne conditionnelle (méthodologie vue au chapitre I). Cette méthode nous permettra de mieux apprécier le comportement moyen au sein du nuage de points (Wand et Jones, 1995). Les données de Chla utilisées ici proviennent des mesures faite par Ifremer lors des essais de la station MAREL Carnot (de 2005 à 2006). La longueur de ces séries est de l'ordre de 38 valeurs.

La figure 4-36 présente un nuage de points $(F, Chla)$ des mesures effectués par Ifremer (point en blanc sur la figure) et par SOMLIT (points noirs sur la figure) et une courbe non linéaire d'ajustement $C(F)$ se dessine au sein du nuage de points. Cette courbe représente la moyenne conditionnelle de la Chla en fonction de la fluorescence. La relation obtenue n'est pas très éloignée d'un ajustement linéaire d'équation :

$$C(F) = Chla = 2.24F + 2.86 \qquad (33)$$

Par simplicité, dans la suite, nous transformons donc les données de fluorescence en concentration en chlorophylle à l'aide de cette transformation linéaire.

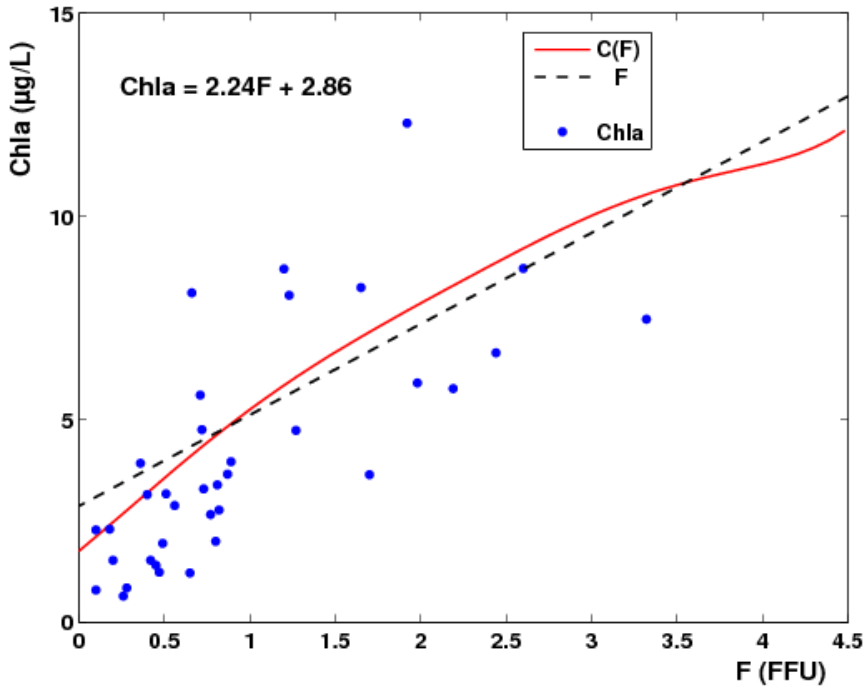

Figure 4-36 : La moyenne conditionnelle de la Chla en fonction de la fluorescence : C(F) correspond à la courbe d'ajustement et F l'ajustement de cette courbe (en « • » : données Ifremer).

4. L'état des masses d'eau à haute fréquence : MAREL Carnot

Nous considérons dans cette analyse l'influence de l'échelle sur l'indice de qualité des eaux. Nous considérons donc une période T pendant laquelle les percentiles sont estimés. Ceci permet une estimation de l'indice de qualité à partir des données DO et de Chla. De cette façon, on peut estimer un indice mis à jour pour chaque période T.

Nous examinons tout d'abord l'influence d'échelle sur 1 semaine, un mois et un an ensuite nous examinons l'influence du changement d'heure et du jour de prélèvement.

Rappelons que les périodes de l'année considérées par la DCE vont de juin à septembre pour la DO (le percentile 10) et de mars à octobre pour la Chla (le percentile 90).

4.1. L'influence de l'échelle : les percentiles 10 et 90

Nous considérons ici un estimateur de qualité des eaux estimé à différentes échelles temporelles : de 1 semaine, de 15 jours, de 1 mois, de 3 mois et de 1 an.

1. **T= 1 semaine**

Pour ce jeu de données on considère 4 semaines par mois et donc pour chaque semaine on calcule un percentile 90 et un percentile 10 :

- 1er semaine : 1 au 8 ;
- 2ème semaine : 9 au 15 ;
- 3ème semaine : du 16 au 23 ;
- 4ème semaine du 23 au 31.

2. **T= 15 jours**

Pour ce jeu de données on considère 2 semaines par mois et donc pour chaque 15 jours les percentiles 90 et 10 sont calculés :

- 1er 15 jours : du 1 au 15 ;
- 2ème 15 jours : du 15 au 31.

3. **T= 1 mois**

Pour cette échelle, on estime les percentiles 10 et 90 sur une durée mensuelle du 1 au 31 de chaque mois de janvier à décembre

4. **T= 3 mois**

On considère ici des périodes flottantes :

- Janvier – février – mars ;
- Février –mars- avril ;
- Mars –avril-mai ;
- Avril –mai- juin ;
- Mai –juin-juillet ;
- Juin –juillet-août ;

- Juillet-août-septembre ;
- Août-septembre-octobre ;
- Septembre-octobre-novembre ;
- Octobre-novembre-décembre.

5. T= 1 an

Les percentiles 10 et 90 sont estimés pour chacune année (de 2004 à 2009) et également de mars à octobre pour le percentile 90 et de juin à septembre pour le percentile 10.

4.1.1. L'échelle de 1 semaine

Les percentiles 10 (OD) et 90 (Chla) sont estimés sur une période T de 1 semaine de janvier à décembre de 2004 à 2009. La valeur de percentile estimée pour chaque semaine est transformée en indice ou critère de qualité à partir du tableau 4-2 (ci-dessus).

Le tableau 4-3 représente la classification des masses d'eau faite à partir de ce pas de temps pour les deux paramètres. Pour le percentile 10 (OD), on note deux critères de qualité visibles dans ce tableau : « TB » (Très bon) de janvier à décembre et « B » (Bon) de juin à septembre 2004. En estimant ces critères en pourcentage de juin à septembre de l'année 2004, on obtient un pourcentage de 50 % de « B » et de 50 % de « TB » en juin ; un pourcentage de 90 % de « B » et 10 % de « TB » en juillet ; d'août en septembre, on relève un pourcentage de 100 % de « B ».

La figure 4-37 montre l'évolution du percentile 10 de 2004 à 2009 pour un pas de temps de 1 semaine. Cette figure révèle une assez forte variabilité du percentile au cours du temps. L'indice reste toujours dans le « TB » de 2005 à 2009 et le critère « B » apparait en 2004. Les valeurs du percentile 10 pour ce pas de temps varient de 4,31 à 11,73 mg/L de OD et pour le critère « B » les valeurs varient de 4,31 à 4,99 mg/L de OD.

Quant à la Chla (le percentile 90), cinq critères apparaissent dans le tableau 4-3 : « TB », « B », « Mo », « Me » et « Ma » de janvier à décembre de 2004 à 2009. On constate que le critère « TB » apparaît le plus souvent en hiver, en automne et en été alors

que le « B » apparaît presque toute l'année et les « Mo », « Me » et « Ma » apparaissent au printemps. La figure 4-38 présente l'évolution de ces critères en pourcentage en fonction du mois de l'année. Cette figure révèle que la courbe « TB » possède une tendance à l'augmentation à partir du mois d'avril et que celle de « B » est plus variable et indique une tendance à la baisse à partir du mois de juillet (Figure 4-38). Les courbes « Mo », « Ma » sont retrouvées de février à juin et celle « Mo » révèle une tendance à l'augmentation de février à juin (Figure 4-38).

La visualisation graphique de l'évolution du percentile 90 de 2004 à 2009 pour un pas de temps de 1 semaine est représentée en figure 4-39. Cette figure révèle une variabilité du percentile 90 et les années 2004 et 2006 possèdent les plus forts pics qui apparaissent entre mars et mai (valeurs comprises entre 40 et 80 µg/L). Les 5 niveaux de qualité se dessinent dans cette figure. On constate que la plupart du temps on se retrouve dans les niveaux « TB » et « B » avec des pics de plus mauvais indice vers le milieu de l'année et selon l'année ces pics culminent dans la zone « Mo » ou dans la zone « Me ». De manière quantitative le percentile 90 varie de 2,88 à 80,47 µg/L de Chla (de 2004 à 2009).

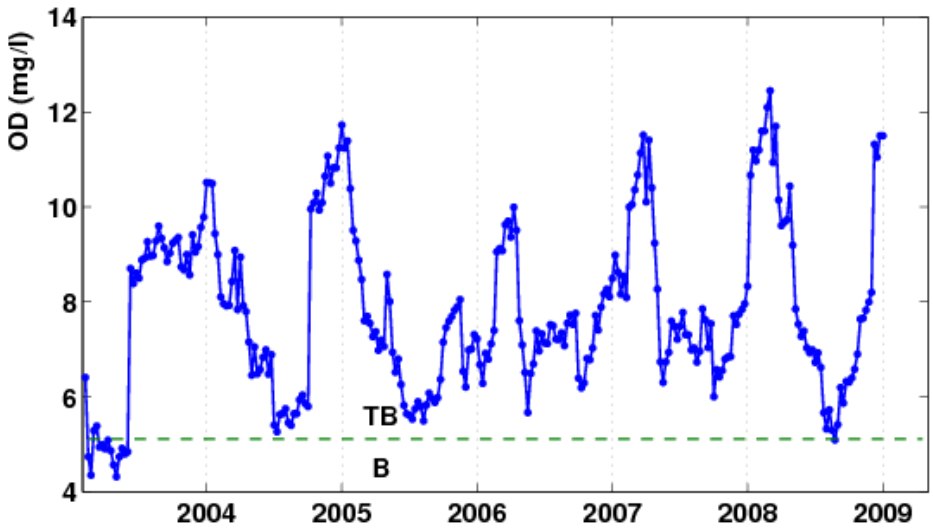

Figure 4-37 : Evolution du percentile 10 (OD) sur les 6 ans de mesure (2004-2009). Une forte variabilité est bien visible dans cette figure mettant en évidence 2 niveaux : « TB » et « B ». Le critère « TB » semble plus présent que le « B » pour ce pas de temps de 1 semaine.

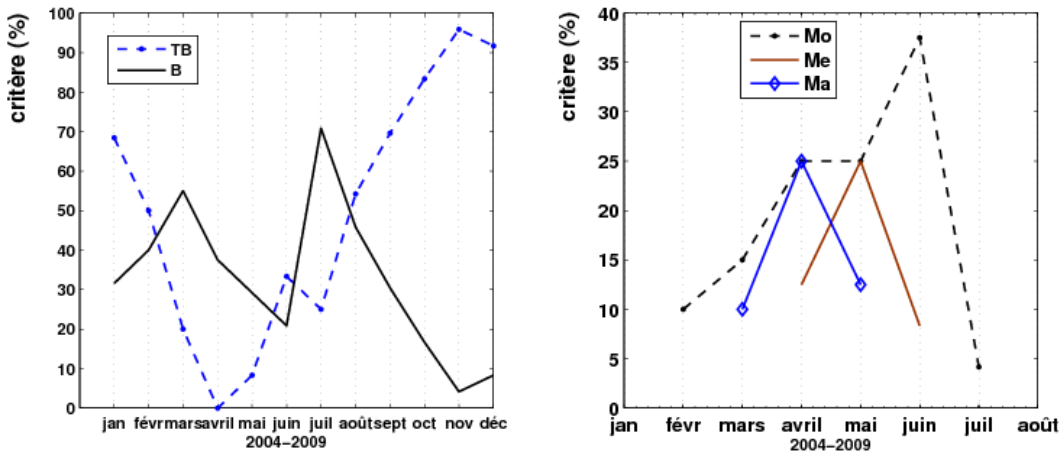

Figure 4-38 : Représentation du critère en pourcentage en fonction du mois (percentile 90), la qualité « TB » proche des 100% en automne et « B » en été (A) alors que les qualités « Mo » et « Me » et « Ma » (B) se retrouvent le plus souvent au printemps. Les critères « TB » et « B » apparaissent en premier en hiver suivis du critère « Mo ». Les critères les moins bon (« Me », « Ma ») apparaissent plus tard au printemps pour laisser place en début d'été aux critères « TB » et « B ».

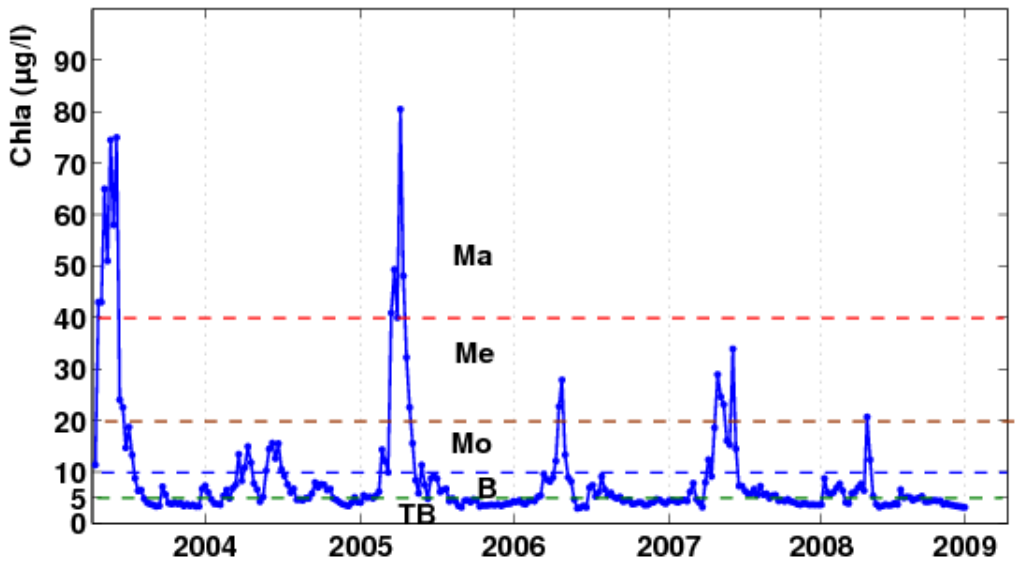

Figure 4-39 : L'évolution du percentile 90 (Chla) de 2004 à 2009 pour un pas de temps de 1 semaine. Une forte variabilité est bien visible dans cette figure mettant en évidence les cinq niveaux : « TB », « B », « Mo », « Me » et « Ma ».

Tableau 4-3 : Les indices de qualité pour les analyses faites sur une semaine

	2004		2005		2006		2007		2008		2009	
	OD	Chla	OD	Chla	OD	Chla	OD	Chla	OD	Chla	OD	Chla
Janvier			TB	B	TB	B	TB	TB	TB	TB	TB	B
			TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	B
			TB	TB	TB	B	TB	TB	TB	TB	TB	B
			TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	
Février			TB	TB	TB	B	TB	TB	TB	TB	TB	B
			TB	B	TB	B	TB	TB	TB	TB	TB	B
			TB	B	TB	Mo	TB	TB	TB	TB	TB	B
			TB	TB	TB	Mo	TB	TB	TB	TB	TB	B
Mars			TB	B	TB	B	TB	B	TB	B	TB	TB
			TB	B	TB	Mo	TB	B	TB	B	TB	TB
			TB	Mo	TB	Ma	TB	B	TB	TB	TB	B
		Mo	TB	B	TB	Ma	TB	B	TB	TB	TB	
Avril		Ma	TB	Mo	TB	Ma	TB	B	TB	B	TB	B
		Ma	TB	Mo	TB	Ma	TB	B	TB	Mo	TB	B
		Ma	TB	Mo	TB	Me	TB	Mo	TB	B	TB	B
		Ma	TB	B	TB	Me	TB	Me	TB	Mo	TB	B
Mai		Ma	TB	B	TB	Mo	TB	Me	TB	Me	TB	Me
		Ma	TB	TB	TB	B	TB	Mo	TB	Me	TB	Mo
		Ma	TB	B	TB	B	TB	B	TB	Me	TB	B
	TB	Me	TB	Mo	TB	Mo	TB	B	TB	Mo	TB	TB
Juin	B	Me	TB	Mo	TB	B	TB	TB	TB	Mo	TB	TB
	B	Mo	TB	Mo	TB	B	TB	TB	TB	Me	TB	TB
	TB	Mo	TB	Mo	TB	B	TB	TB	TB	Mo	TB	TB
	TB	Mo	TB	Mo	TB	B	TB	TB	TB	B	TB	TB
Juillet	B	B	TB	Mo	TB	B	TB	TB	TB	B	TB	TB
	B	B	TB	B	TB	B	TB	B	TB	B	TB	TB
	B	B	TB	B	TB	B	TB	B	TB	B	TB	TB
	TB	TB	TB	B	TB	TB	TB	B	TB	B	TB	B
Aout	B	TB	TB	B	TB	TB	TB	B	TB	B	TB	TB
	B	TB	TB	TB	TB	TB	TB	B	TB	B	TB	B
	B	TB	TB	TB	TB	TB	TB	B	TB	B	TB	B
	B	TB	TB	TB	TB	TB	TB	B	TB	B	TB	TB
Septembre	B	TB	TB	TB	TB	TB	TB	B	TB	TB	TB	TB
	B	B	TB	TB	TB		TB	B	TB	TB	TB	TB
	B	B	TB	B	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB
	B	TB	TB	B	TB	TB	TB	B	TB	TB	TB	TB
Octobre	TB	TB	TB	B	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB
	TB	TB	TB	B	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB
	TB	TB	TB	B	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB
	TB	TB	TB	B	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB
Novembre	TB	TB	TB	B	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB
	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB
	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB
	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB
Décembre	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB
	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB
	TB	B	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB
	TB	B	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB

4.1.2. L'échelle de 15 jours

Les percentiles 10 et 90 ont été également estimés à partir du période T de 15 jours de janvier à décembre de 2004 à 2009.

Le tableau 4-4 représente les critères de qualité pour les paramètres OD et Chla. Pour l'OD (le percentile 10) deux critères également apparaissent pour ce pas de temps : « TB » de janvier à décembre de 2005 à 2009 et « B » de juin à septembre 2004. La figure 4-40 indique l'évolution du percentile 10 pour un pas de 15 jours. L'indice reste toujours dans le « TB » de 2005 à 2009. Le critère « B » apparaît toujours en 2004 avec des valeurs comprises entre 4,5 et 4,9 mg/L de OD. On constate simplement que le passage de l'échelle de 1 semaine à 15 jours conduit à une augmentation de la valeur minimale du percentile 10.

Concernant le percentile 90 (Chla), ce tableau 4-4 révèle les 5 critères de qualité qui se repartissent de la manière suivante : le « TB » apparaît le plus souvent en août, en septembre, en octobre et en décembre ; le critère « B » apparait presque toute l'année et les critères « Mo », « Me » et « Ma » apparaissent plus de mars à mai. Ces critères sont alors ramenés en pourcentage en fonction du mois et on constate que les courbes « TB » et « B » s'approchent des 100% en automne et en été respectivement (Figure 4-41A), alors que celles de « Mo », « Me » et « Ma » se rapprochent des 50 % au printemps (Figure 4-41B).

L'évolution des valeurs du percentile 90 est représentée dans la figure 4-42. Les années 2004 et 2006 possèdent également les plus forts pics (de mars à mai) et ayant pour valeurs comprises entre 42 et 70 µg/L. En comparant ce pas de temps à celui d'une semaine, on constate que de manière quantitative, le percentile 90 tend à augmenter. La figure 4-42 révèle également une variabilité interannuelle tout en mettant en évidence les 5 niveaux de classification. Cette figure indique bien qu'on se trouve dans le niveau « TB » et « B » la plupart du temps malgré la présence des critères de qualité « Mo », « Me » et « Ma » en 2004 et en 2006.

Tableau 4-4 : Les indices de qualité pour les analyses faites tous les 15 jours

DATE	2004		2005		2006		2007		2008		2009	
	OD	Chla	OD	Chla	OD	Chla	OD	Chla	OD	Chla	OD	Chla
Janvier			TB	B	TB	B	TB	TB	TB	TB	TB	B
			TB	TB	TB	B	TB	TB	TB	TB	TB	B
Février			TB	B	TB	B	TB	TB	TB	TB	TB	B
			TB	B	TB	Mo	TB	TB	TB	B	TB	B
Mars			TB	B	TB	Ma	TB	B	TB	B	TB	B
		Mo	TB	Mo	TB	Ma	TB	B	TB	B	TB	B
Avril		Ma	TB	Mo	TB	Ma	TB	Mo	TB	Mo	TB	B
		Ma	TB	B	TB	Mo	TB	Me	TB	Me	TB	Me
Mai		Ma	TB	B	TB	B	TB	Mo	TB	Me	TB	Mo
	TB	Ma	TB	Mo	TB	B	TB	B	TB	Me	TB	TB
Juin	B	Mo	TB	Mo	TB	B	TB	TB	TB	Mo	TB	TB
	TB	Mo	TB	Mo	TB	B	TB	B	TB	B	TB	TB
Juillet	B	B	TB	B	TB	B	TB	B	TB	B	TB	TB
	B	B	TB	B	TB	TB	TB	B	TB	B	TB	B
Août	B	TB	TB	TB	TB	TB	TB	B	TB	B	TB	B
	B	TB	TB	B	TB	TB	TB	B	TB	TB	TB	TB
Septembre	B	TB	TB	B	TB	TB	TB	TB	TB	B	TB	TB
	TB	TB	TB	B	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB
Octobre	TB	TB	TB	B	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB
	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB
Novembre	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB
	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB
Décembre	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB
	TB	B	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB

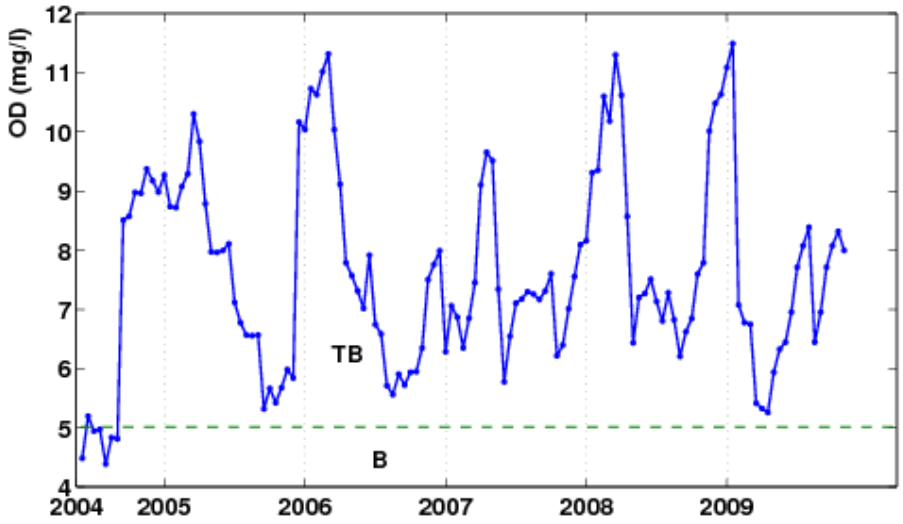

Figure 4-40 : Représentation des valeurs du percentile 10 de l'oxygène dissous sur une période de mesure de tous les 15 jours. « TB » : Très bon ; « B » : Bonne qualité.

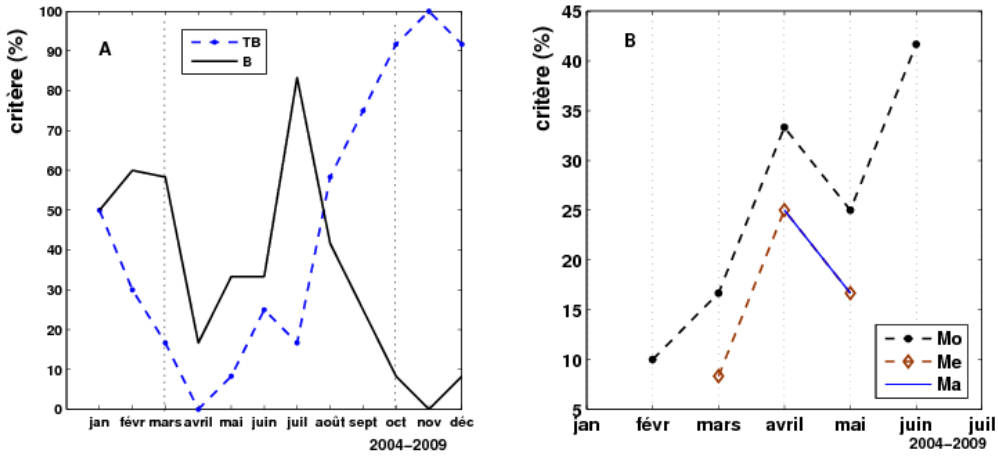

Figure 4-41 : Représentation du critère en pourcentage en fonction du mois (percentile 90), la qualité « TB » proche des 100% en automne et « B » en été alors que les qualités « Mo » et « Me » et « Ma » se retrouvent le plus souvent au printemps. Les critères « TB » et « B » apparaissent en premier en hiver suivis du critère « Mo ». Les critères les moins bons (« Me », « Ma ») apparaissent plus tard au printemps pour laisser place en début d'été aux critères « TB » et « B ».

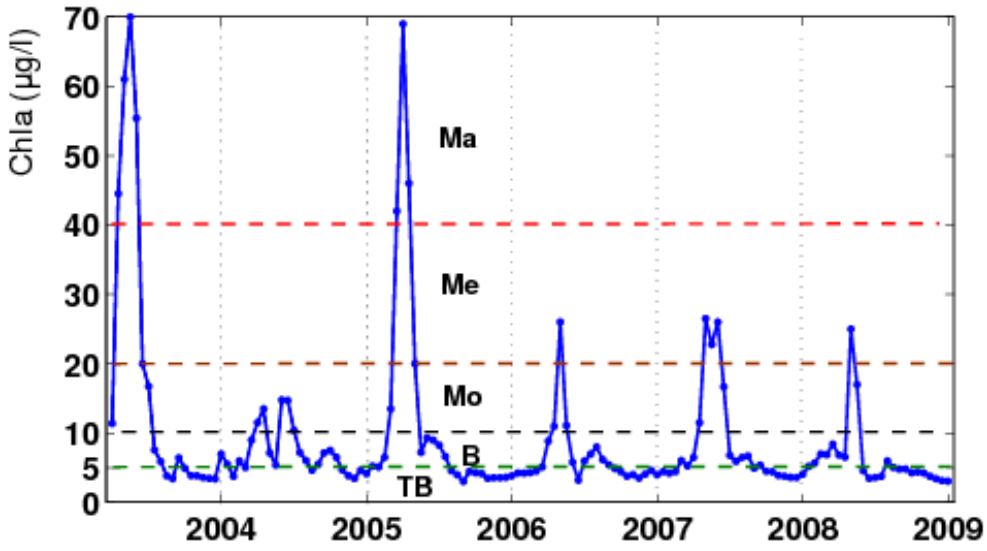

Figure 4-42 : Les valeurs du percentile 90 (chlorophylle). Une forte variabilité est bien visible dans cette figure mettant en évidence les cinq niveaux : « TB », « B », « Mo », « Me » et « Ma ».

4.1.3. L'échelle de 1 mois

Nous considérons ici une période de T de 1 mois de 2004 à 2009 et les percentiles 10 et 90 sont estimés sur ce pas de temps.

Le tableau 4-5 représente les différents critères de qualité pour l'OD et la Chla pour un pas de temps d'un mois. Pour l'OD, le critère « TB » apparaît de janvier à décembre de 2005 à 2009 et le « B » apparaît de juin à août 2004. On estime un pourcentage de 62,5 % de « TB » contre 37 % de « B » de mai à décembre 2004. De 2005 à 2009, on estime un pourcentage de 100 % de « TB » sur l'ensemble des 4 saisons. De manière quantitative la figure 4-43 indique l'évolution du percentile 10 de juin à septembre de 2004 à 2009. Le percentile 10 possède une variabilité au cours du temps : les valeurs de ce percentile pour un pas de temps de 1 mois augmentent de 4,5 à 11 mg/L.

Pour le percentile 90 (Chla), les 5 niveaux également apparaissent pour ce pas de temps (Tableau 4-5). Le critère « TB » apparaît majoritairement d'octobre à décembre et le « B » apparaît le plus en janvier, en février, en mars et en juillet. Quant aux critères « Mo » et « Me », ils sont plus rencontrés de mars à juin et le « Ma » en avril et en mai. La figure 4-44 met en évidence l'évolution de ces critères en pourcentage en fonction du mois, de 2004 à 2009. On constate que les courbes « TB » et « B » apparaissent en premier avec des pourcentages assez forts. La courbe de « TB » réapparait en août jusqu'en décembre avec des pourcentages allant de 50 à 100 % (Figure 4-44A). Les courbes « Mo », « Me » et « Ma » apparaissent de février à juin, ils sont absents de juillet à décembre (Figure 4-44B).

La figure 4-45 met en évidence l'évolution des valeurs du percentile 90 de 2004 à 2009 avec pas de temps de 1 mois. On note également une variabilité interannuelle dans les valeurs du percentile 90. Les valeurs du percentile 90 varient de 3,14 à 67µg/L de Chla. Cette figure met en évidence tous les niveaux de qualité. L'année 2006 révèle la présence de tous les critères comparée aux autres années. Le critère « TB » apparaît le plus en 2007 et en 2006. Le critère « B » apparaît le plus en 2005 et en 2008. Le « Mo » apparaît le plus en 2005 et le « Me » et « Ma » apparaissent majoritairement en 2006-2007 et en 2004 respectivement.

Tableau 4-5 : Les indices de qualité pour les analyses faites tous les mois

	2004		2005		2006		2007		2008		2009	
	OD	Chla	OD	Chla	OD	Chla	OD	Chla	OD	Chla	OD	Chla
Janvier			TB	B	TB	B	TB	TB	TB	TB	TB	B
Février			TB	B	TB	Mo	TB	TB	TB	B	TB	B
Mars		Mo	TB	Mo	TB	Ma	TB	B	TB	B	TB	B
Avril		Ma	TB	Mo	TB	Me	TB	Me	TB	Me	TB	Mo
Mai	TB	Ma	TB	Mo	TB	B	TB	B	TB	Me	TB	Mo
Juin	B	Mo	TB	Mo	TB	B	TB	TB	TB	Mo	TB	TB
Juillet	B	B	TB	B	TB	B	TB	B	TB	B	TB	B
Août	B	TB	TB	B	TB	TB	TB	B	TB	B	TB	TB
Septembre	TB	B	TB	B	TB	TB	TB	TB	TB	B	TB	TB
Octobre	TB	TB	TB	B	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB
Novembre	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB
Décembre	TB	B	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB

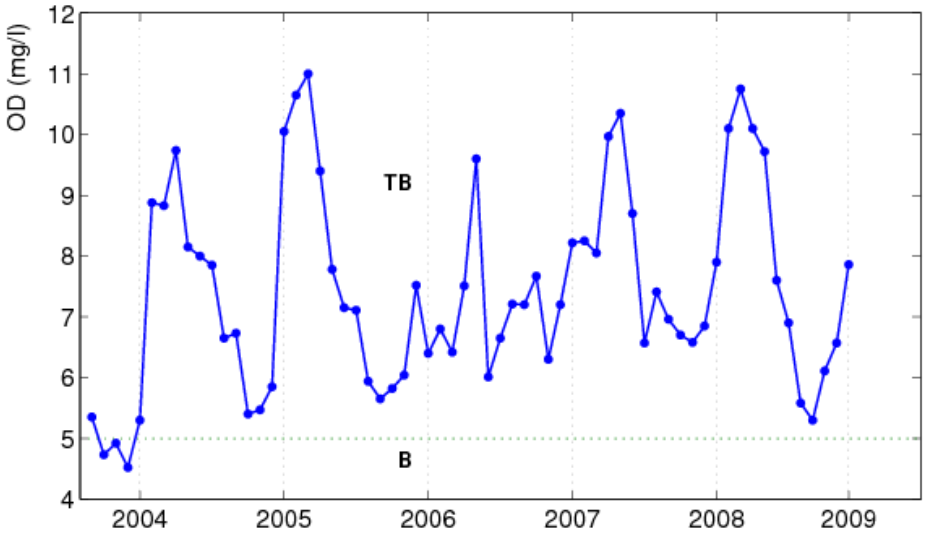

Figure 4-43 : Percentile 10 (oxygène dissous) sur un pas de temps de un mois (de 2004 à 2009). Cette figure montre une variabilité dans le percentile 10 d'un mois à l'autre. Le percentile varie de 5,4 à 12,5mg/L OD. Le critère retenu dans cette figure est : « TB ».

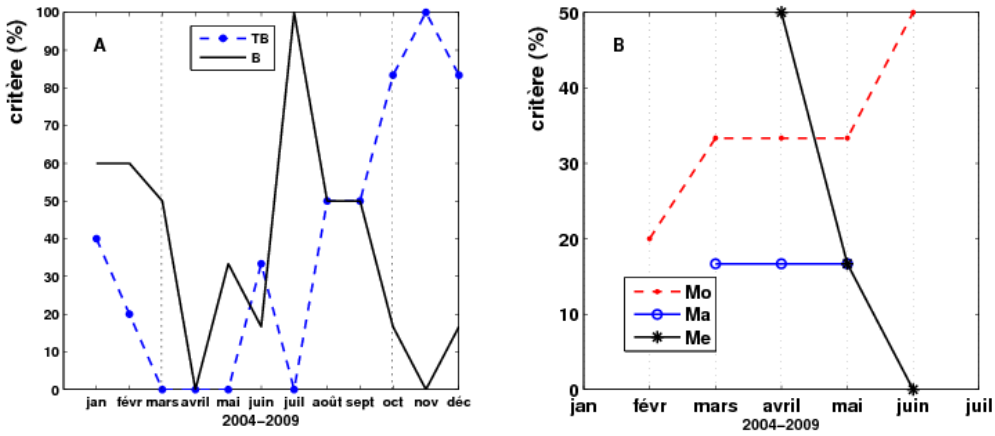

Figure 4-44 : Représentation du critère en pourcentage en fonction du mois (percentile 90), la qualité TB est très proche des 100 % en automne et en hiver alors que les qualités « B » et « Mo » se retrouvent le plus souvent au printemps.(A) : les états «B » et « TB » ; (B) les états « Mo », « Ma » et « Me ».

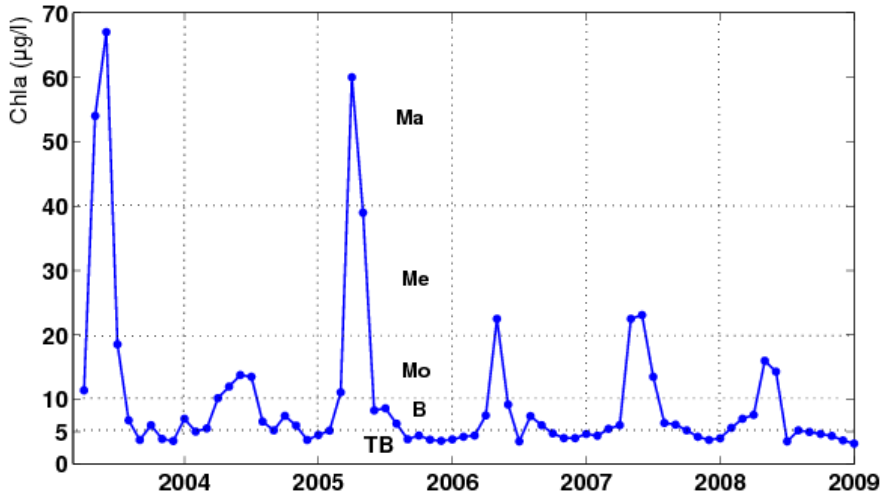

Figure 4-45 : Evolution du percentile 90 (chlorophylle) pour un pas de temps de 1 mois. On note une forte variabilité mettant en évidence de forts pics au printemps (en mars, en avril et en mai). Trois niveaux se dessinent dans cette figure : « TB », « B » et « Mo ».

4.1.4. L'échelle de 3 mois

Nous considérons ici une période de T de 3 mois de 2004 à 2009 et les percentiles 10 et 90 sont estimés sur ce pas de temps. Le tableau 4-6 indique le critère de qualité des eaux pour un pas de temps de trois mois. Pour le percentile 10 (l'oxygène dissous), on remarque

deux critères de qualité : « TB » et « B ». Le « TB » apparaît dans l'ensemble de l'année de 2005 à 2009 alors que le « B » apparait seulement dans les groupes de mai-juin-juillet ; juin-juillet-août ; juillet-août-septembre ; août-septembre-décembre de l'année 2004.

La figure 4-46 met en évidence l'évolution du percentile 10 pour tous les 3 mois. Cette figure décrit une évolution assez périodique du percentile. Le percentile 10 inférieur à 5mg/L d'oxygène apparaît dans les mois : mai-juin-juillet ; juin-juillet-août ; juillet-août-septembre ; août-septembre-octobre en 2004.

En ce qui concerne le percentile 90, on observe en 2004 et en 2006, les cinq niveaux de qualité (Tableau 4-6). Quatre niveaux apparaissent en 2008 : « TB », « B », « Mo » et « Me ». En 2005, en 2007 et en 2009, on remarque 3 niveaux : « TB », « B » et « Mo ». La figure 4-47 indique l'évolution des ces critère en pourcentage en fonction de chaque période de 3 mois considérés. La courbe du critère « B » tend à croitre d'avril à juillet alors que « TB » voit son pourcentage augmenter de juillet à décembre (Figure 4-47A). Le critère « Ma » atteint son pic en mars-avril-mai suivi du pic de « Me » qui lui apparaît en avril-mai-juin (Figure 4-47B).

La figure 4-48 représente l'évolution du percentile 90 (Chla) sur le pas de temps de 3 mois de 2004 à 2009. Cette figure montre des fortes valeurs du percentile en 2004 et en 2006 ; ensuite le percentile baisse pour atteindre des faibles valeurs jusqu'en 2009. Cette figure décrit les cinq niveaux de qualité. Les critères « TB » et « B » sont presque dominant par rapport aux autres de 2004 à 2009. Les critères « Mo », « Me » et « Ma » sont très minoritaires. Le « Mo » est retrouvé de 2004 à 2009 alors que « Me » et « Ma » sont présents en 2004 et en 2006.

Tableau : 4-6 : Les indices de qualité pour les analyses faites tous les 3 mois

Tous les 3 mois	2004		2005		2006		2007		2008		2009	
	OD	Chla	OD	Chla	OD	Chla	OD	Chla	OD	Chla	OD	Chla
janv,févr,mars			TB	B	TB	Ma	TB	B	TB	B	TB	B
févr,mars,avril			TB	Mo	TB	Ma	TB	Mo	TB	Mo	TB	B
mars,avril,mai		Ma	TB	Mo	TB	Ma	TB	Mo	TB	Me	TB	Mo
avril,mai,juin		Ma	TB	Mo	TB	Me	TB	Mo	TB	Me	TB	Mo
mai,juin,juil	B	Ma	TB	Mo	TB	B	TB	B	TB	Mo	TB	B
juin,juil,août	B	Mo	TB	Mo	TB	B	TB	B	TB	B	TB	TB
juil, août, sept	B	B	TB	B	TB	B	TB	B	TB	B	TB	TB
août,sept,oct	B	TB	TB	B	TB	TB	TB	B	TB	B	TB	TB
sept,oct,nov	TB	TB	TB	B	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB
oct,nov,déc	TB	TB	TB	B	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB

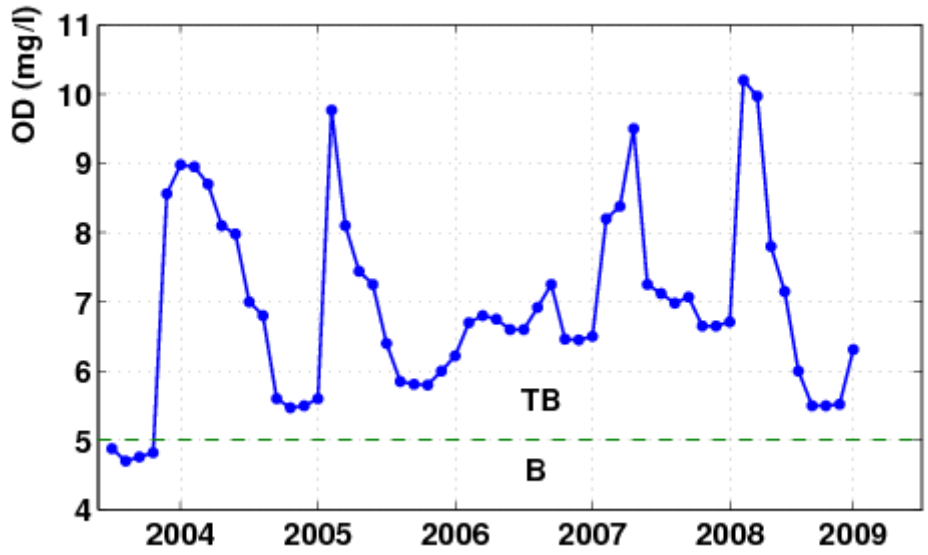

Figure 4-46 : Evolution du percentile 10 (oxygène dissous) tous les 3 mois mettant en évidence une forte variabilité au cours du temps. Le critère « TB » est le seul représenté par le percentile 10.

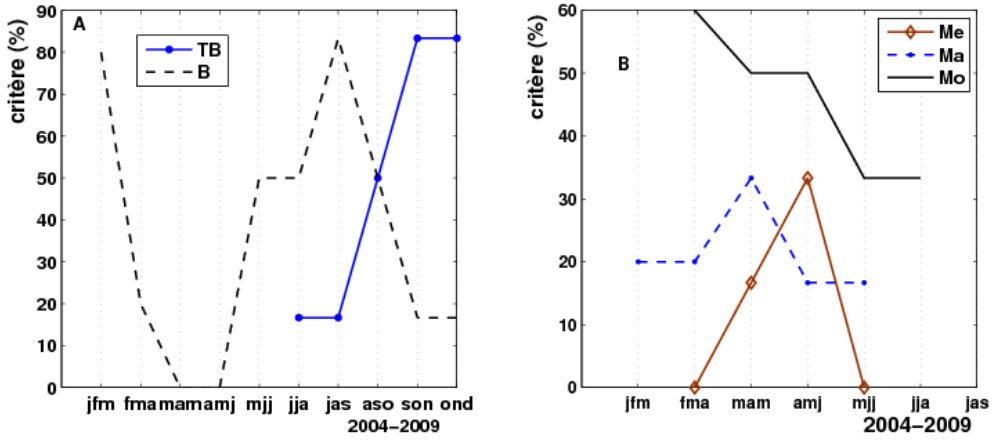

Figure 4-47 : Représentation du critère en pourcentage en fonction des 3 mois (percentile 90), la qualité « TB » est en nette croissance de fin printemps en hiver alors que les qualités « B » et « Mo » se retrouvent le plus souvent au printemps. (A) : les états « B » et « TB » ; (B) : les états « Me » ; « Ma » et « Mo ».

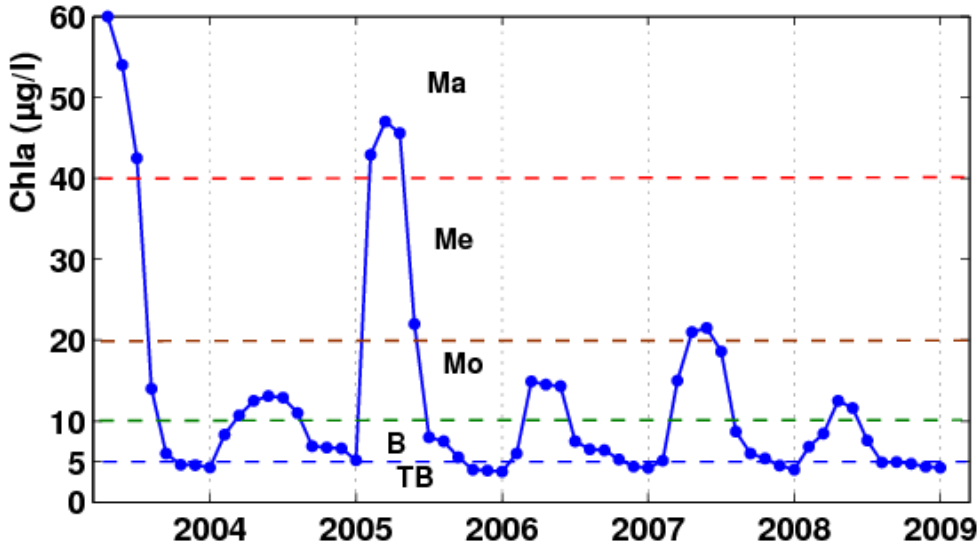

Figure 4-48 : Evolution du percentile 90 (Chla) tous les 3 mois.

4.1.5. L'échelle de 1 an

Le tableau 4-7 représente les critères de classification des masses d'eaux pour un pas de temps de 1 an. Nous considérons également ici les périodes de juin à septembre pour le percentile 10 (DO) et de mars à octobre pour le percentile 90 (Chla).

Pour la période de janvier à décembre, le percentile 10 indique un seul critère de qualité « TB » qui apparaît de 2004 à 2009. Le critère « B » apparaît en 2004 pour la période de juin à septembre. Pour le percentile 90, on note trois niveaux de classification « B », « Mo » et « Me » quelle que soit la période choisie (voir Tableau 4-7). Les figures 4-49 et 4-50 indiquent l'évolution des percentiles 10 et 90. Les valeurs du percentile 10 sur l'ensemble de l'année sont comprises entre 5,17 et 6,90 mg/L d'OD. Sur la période de juin à septembre le percentile 10 est compris entre 4,91 et 7,03 mg/L d'OD.

Quant au percentile 90, il varie de 6,20 à 33 µg/L de Chla sur l'année entière et sur la période de mars à octobre, il est compris entre 6,50 et 38 µg/L de Chla.

Le percentile 90 révèle une variabilité interannuelle, de mars à octobre et le critère de qualité « Me » apparaît en 2004 et en 2006 ; le « Mo » est présent en 2005 et en 2008 et « B » apparaît en 2007 et en 2009.

Tableau 4-7 : Les indices qualité pour les analyses faites tous les ans

	Sur l'année		De juin à septembre	De mars à octobre
	OD	**Chla**	**OD**	**Chla**
2004	**TB**	**Me**	**B**	**Me**
2005	**TB**	**B**	**TB**	**Mo**
2006	**TB**	**Mo**	**TB**	**Me**
2007	**TB**	**B**	**TB**	**B**
2008	**TB**	**Mo**	**TB**	**Mo**
2009	**TB**	**B**	**TB**	**B**

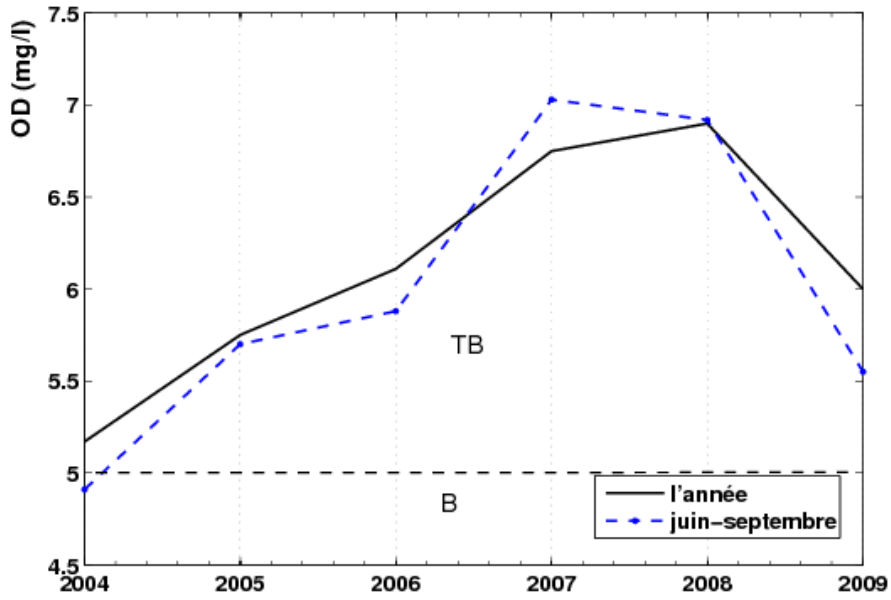

Figure 4-49 : Evolution du percentile 10 de chaque année et sur la période de juin à septembre de chaque année. On note une tendance à l'augmentation du percentile de 2004 à 2008 et baisse en 2009 pour atteindre des valeurs supérieures à 5 mg/L d'OD.

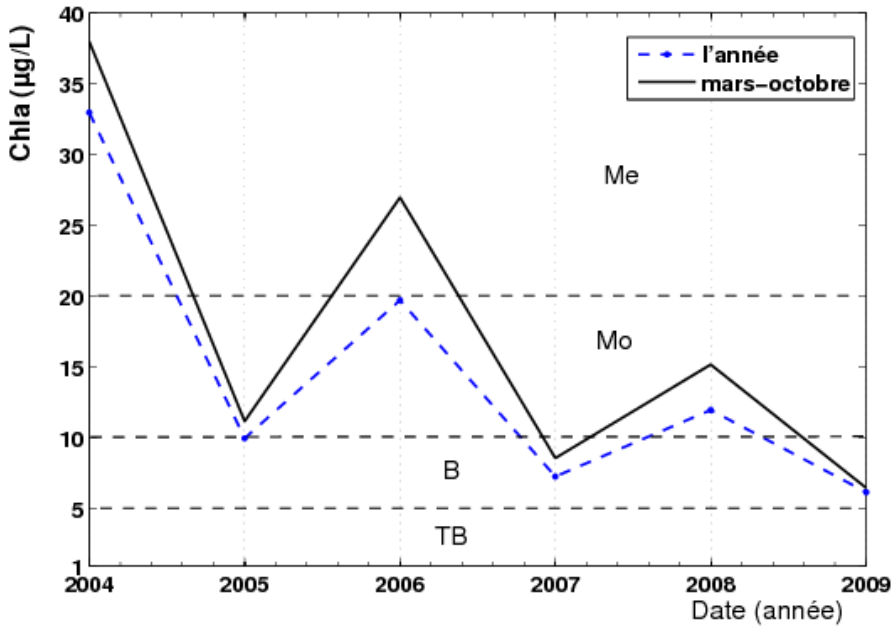

Figure 4-50 : Evolution du percentile 90 sur l'année et sur la période de mars à octobre de 2004 à 2009. On note une variabilité interannuelle. On note tout de même une tendance à la baisse de ce percentile au cours du temps en passant du niveau « Me » à « B ».

4.2. L'influence du changement d'heure et du jour de prélèvement

Dans cette section, nous utilisons les données MAREL et leur haute fréquence de mesure, pour tester l'influence de l'heure du prélèvement sur le résultat final et l'état qualitatif obtenu. Nous testons également l'influence du jour choisi sur le résultat final. Comme les mesures doivent être faites tous les 15 jours, nous testons le choix du premier jour, celui-ci pouvant aller du 1er au 15ème jour du mois. L'ensemble des valeurs possibles nous amène à considérer sur la période 2004-2009, 2 degrés de liberté (jour du 1er prélèvement et l'heure) ; nous avons donc comme résultat une matrice de valeurs.

Les simulations sont faites sur les données de 2004-2009 (sur 6 ans) de Chla et d'OD sur les périodes de mars à octobre et de juin à septembre respectivement.

Au cours de nos simulations, nous faisons varier l'heure tous les 15 jours sur 6 ans. Un exemple est donné dans le tableau 4-8. Les percentiles 90 sont alors estimés toutes les heures de 1h à 23h ou de 7h à 18h (GMT[21]/UTC[22]) tous les 15 jours sur 6 ans :

- ✓ Pour le percentile 90 de mars à octobre : nous avons 384 (cette valeur correspond à : [4 (nombre de valeur par heure)*2 (tous les 15 jours)*8 (nombre de mois)*6 (nombre d'années)]) valeurs de Chla pour chaque simulation.
- ✓ Pour le percentile 10 de juin à septembre : à chaque simulation le percentile est estimé sur 192 (cette valeur correspond à : [4 (nombre de valeur par heure)* 2 (tous les 15 jours)* 4 (nombre de mois)* 6 (nombre d'années)]) valeurs d'OD sur 6 ans de mesure.

Dans les résultats ci-dessous, la notation 1er jour sous entend le 1er et le 15ème jour, le 2ème jour sous entend le 2ème et le 16ème jour et ainsi de suite…

[21] Temps Moyen de Greenwich.
[22] Temps Universel Coordonné.

Tableau 4-8 : Un exemple de simulation faite pour l'heure égale à 7 h

heure	Tous les 15 jours (sur 6 ans)
7	1er et le 15ème jour
7	2ème et le 16ème jour
7	3ème et le 17ème jour
7	4ème et le 18ème jour
7	5ème et le 19ème jour
7	6ème et le 20ème jour
7	7ème et le 21ème jour
7	8ème et le 22ème jour
7	9ème et le 23ème jour
7	10ème et le 24ème jour
7	11ème et le 25ème jour
7	12ème et le 26ème jour
7	13ème et le 27ème jour
7	14ème et le 28ème jour
7	15ème et le 29ème jour

4.2.1. Le percentile 10 (OD)

La simulation permet d'estimer un état en fonction de l'heure et du jour de prélèvement. On constate qu'au sein de la masse d'eau de surface, le percentile 10 est toujours supérieures à 3 mg/L quelle que soit l'heure de la mesure de juin à septembre (de 2004 à 2009).

Le tableau 4-9 représente les critères de qualité utilisant OD. Le percentile 10 est estimé en fonction de l'heure et du jour. La plage horaire est fixée de 1 h (le matin) à 23 h tous les 15 jours (du 1er au 15ème jour de juin à septembre de 2004 à 2009). Ce tableau met en évidence 2 critères : « TB » (très bon) et « B » (Bon).

La figure 4-51 indique l'évolution des valeurs du percentile 10 obtenues pour cette plage d'horaire en fonction du jour de premier prélèvement. Les courbes révèlent une allure différente autour de la valeur seuil du percentile 10 estimé sur les 6 ans de mesure qui est de 5,33 mg/L (percentile 10 annuel de 2004-2009). Les courbes de 7 h à 18 h sont en dessous de cette valeur à partir du 1er au 10ème jour. Après le 10ème jour, ces courbes se retrouvent au dessus de cette valeur. Le critère « B » se retrouve exclusivement à partir du 3ème jour au

8ème jour. On constate que, quelle que soit l'heure de prélèvement, l'allure des courbes est similaire.

La figure 4-52 représente le pourcentage des deux critères en fonction de l'heure et en fonction du jour. En fonction de l'heure (Figure 4-52A), le pourcentage de chaque critère indique une évolution différente, le critère « TB » atteint les 100 % de 12 h à 13 h. En fonction du jour (Figure 4-52B), on constate que du 1er au 6ème jour le critère « B » est plus présent et après le 10ème jour, le critère « TB » devient dominant. Ceci montre que, sur cet exemple, il vaut mieux réaliser des mesures à la fin de la quinzaine et l'après midi, pour avoir le meilleur pourcentage de valeurs « TB ».

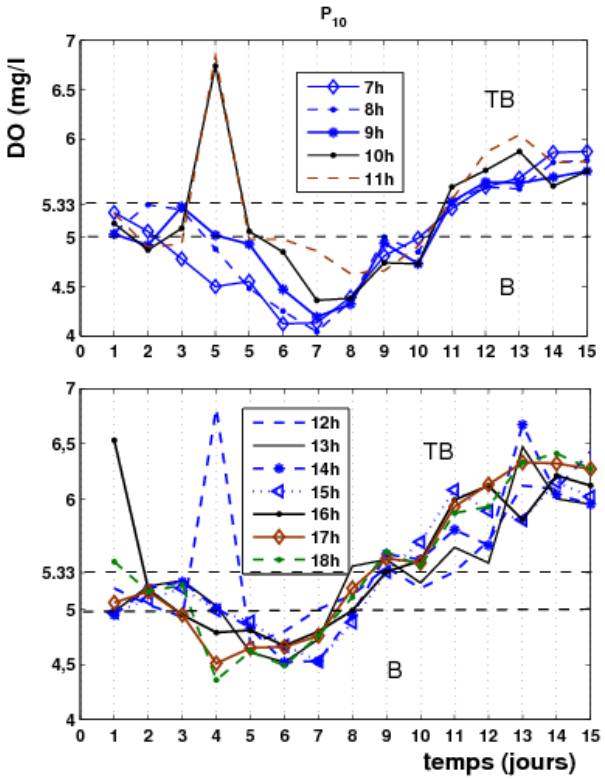

Figure 4-51 : L'évolution du percentile 10 (P_{10}) sur 6 ans de mesure (de 2004 à 2009) de juin à septembre de 7 h (matin) à 17h tous les 15 jours. Les courbes de 7 h à 9 h et de 13 h à 17 h sont en dessous de valeur seuil du percentile 10 (estimée sur les 6 ans : 5,33 mg/L) du 1er au 10ème jour. Après le 10ème jour ces courbes sont dessus de cette valeur (5,33 mg/L).

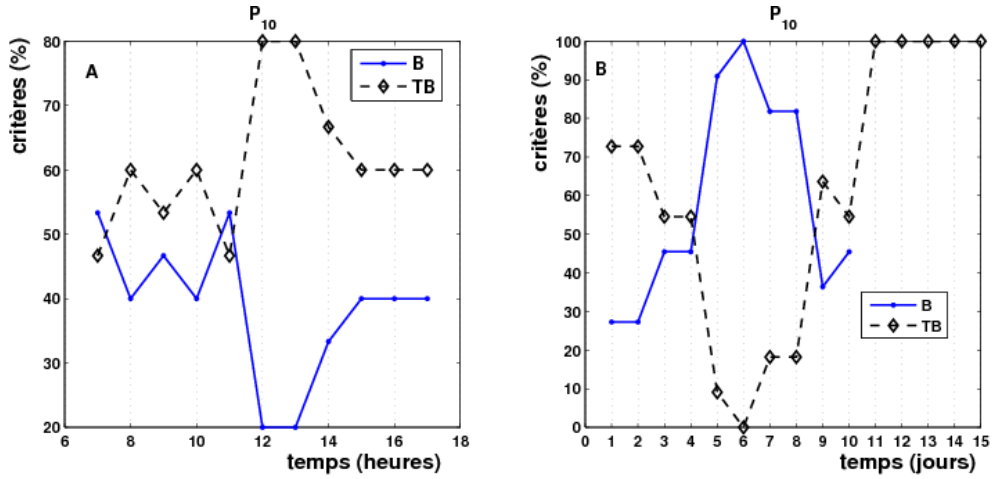

Figure 4-52 : L'évolution des deux critères estimés en pourcentage sur 6 ans (de 2004 à 2009) de juin à septembre de 7 h (matin) à 17 h tous les 15 jours. Le critère « TB » atteint un pic important à 13 h et le critère « B » de 11 h à 12 h. Les critères « TB » et « B » estimés en pourcentage en fonction du jour : du 1er au 6ème jour, le critère « B » est plus rencontré et à partir du 11ème jour le critère « TB » atteint les 100 %.

Tableau 4-9 : Percentile 10 ; critères en fonction du jour et de l'heure de juin à septembre de 2004-2009

Percentile 10															
heure\jour	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	TB	B	TB	B	B	B	B	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB
2	B	B	TB	B	B	B	B	TB	B	TB	TB	TB	TB	TB	TB
3	B	B	B	B	B	B	B	TB	B	TB	TB	TB	TB	TB	TB
4	B	B	B	B	B	B	B	TB	B	B	TB	TB	TB	TB	TB
5	TB	B	B	B	B	B	B	B	B	B	TB	TB	TB	TB	TB
6	TB	B	B	B	B	B	B	B	B	B	TB	TB	TB	TB	TB
7	TB	TB	B	B	B	B	B	B	B	B	TB	TB	TB	TB	TB
8	TB	TB	TB	B	B	B	B	B	TB	B	TB	TB	TB	TB	TB
9	TB	B	TB	TB	B	B	B	B	B	B	TB	TB	TB	TB	TB
10	TB	B	TB	TB	TB	B	B	B	B	B	TB	TB	TB	TB	TB
11	TB	B	B	TB	B	B	B	B	B	B	TB	TB	TB	TB	TB
12	TB	TB	B	TB	B	B	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB
13	B	TB	TB	TB	B	B	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB
14	B	TB	TB	TB	B	B	B	B	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB
15	B	TB	TB	B	B	B	B	B	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB
16	TB	TB	B	B	B	B	B	B	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB
17	TB	TB	B	B	B	B	B	B	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB
18	TB	TB	TB	B	B	B	B	B	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB
19	TB	TB	TB	B	B	B	B	B	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB
20	TB	TB	TB	B	B	B	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB
21	B	TB	TB	TB	B	B	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB
22	B	TB	TB	TB	B	B	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB
23	B	TB	B	TB	B	B	TB	TB	TB	B	TB	TB	TB	TB	TB

4.2.2. Le percentile 90 (Chla)

Le percentile 90 est également estimé en fonction de l'heure et du jour. Le tableau 4-10 représente les critères de qualité utilisant cet indicateur sur la période de mars à octobre (de 2004 à 2009). La plage horaire choisie est comprise entre 7 h (du matin) et 17 h tous les 15 jours (sur les 6 ans de mesure).

Trois critères de qualité apparaissent dans ce tableau : « B » (Bon), « Mo » (Moyen) et « Me » (Médiocre), avec une dominance du critère « Mo ». Les valeurs du percentile 90 sont comprises entre 8,79 et 22,33 µg/L. Le critère « B » apparait le 7ème jour de 7 h à 9 h et

le critère « Me » est rencontré le 5ème jour de 8 h à 12 h. La valeur seuil annuelle de 2004 à 2009 du percentile 90 est estimée à 11,66 µg/L.

La figure 4-53 représente l'évolution du percentile 90 selon le jour de prélèvement pour différentes heures. Ceci révèle un comportement autour de cette valeur du percentile (11,66 µg/L). Les courbes de 7 h, de 9 h et de 17 h sont en dessous de ce seuil du 6ème au 7ème jour. Les courbes de 12 h et 15 h sont quasiment au dessus de cette valeur seuil (11,66 µg/L). Ces courbes indiquent une évolution presque comprise entre 10 et 20 µg/L, ce qui correspond au critère ''Moyen'' (« Mo »). Ces résultats montrent que, sur cet exemple, si l'on veut le meilleur résultat il faut choisir certains couples bien spécifiques d'heures et jour de prélèvement : le matin (7-8 h) ou en fin d'après-midi (17 h) le 7ème jour, ou autour de midi le matin le 12ème jour.

Au vu de ces résultats, nous réalisons ci-dessous une simulation mensuelle de 2004 à 2009 afin de déterminer les mois potentiellement moins bons. Nous effectuons la même approche (varier l'heure et le jour), mais pour chaque mois (de mars à octobre) pris séparément.

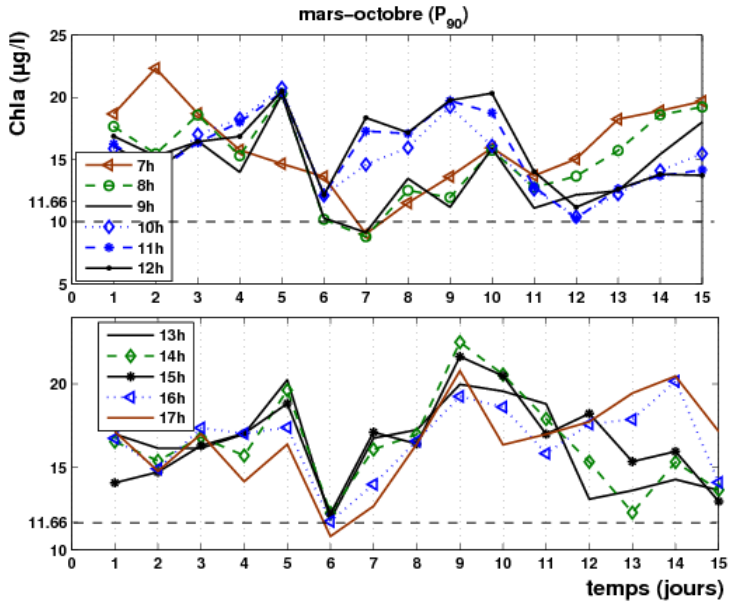

Figure 4-53 : L'évolution du percentile 90 de 7 h à 17 h tous les 15 jours au mois de mars à octobre sur 6 ans. On note trois niveaux de critère « B » et « Me » qui sont très faiblement représentés et le critère « Mo » qui est majoritairement présent.

Tableau 4-10 : Percentile 90 ; critères en fonction du jour et de l'heure de mars à octobre de 2004-2009

Percentile 90 mars-octobre											
jour\heure	**7 h**	**8 h**	**9 h**	**10 h**	**11 h**	**12 h**	**13 h**	**14 h**	**15 h**	**16 h**	**17 h**
1	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo
2	Me	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo
3	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo
4	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo
5	Mo	Me	Me	Me	Me	Me	Me	Mo	Mo	Mo	Mo
6	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo
7	B	B	B	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo
8	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo
9	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Me	Mo	Me
10	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Me	Mo	Mo	Me	Mo	Mo
11	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo
12	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo
13	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo
14	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Me	Me
15	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo

- **Les mois de mars**

Nous réalisons ici une simulation pour les mois de mars cumulés de 2004 à 2009. Le tableau 4-11 représente le percentile 90 estimé en fonction de l'heure et du jour. Une hétérogénéité apparait dans ce tableau avec 4 critères de qualité : « B » (Bon), « Mo » (Moyen), « Me » (Médiocre) et « Ma » (Mauvais). La figure 4-54 indique l'évolution des courbes de 7 h à 17 h tous les 15 jours. Cette figure met en évidence un comportement autour de la valeur seuil du percentile 90 (estimée sur les 6 ans de mesure à 11,66 µg/L). Du 1er au 6ème jour, les courbes de 7 h, de 9 h et de 17 h sont en dessous de cette valeur seuil du percentile et à partir du 7ème jour elles se retrouvent au dessus du seuil. La figure 4-55 représente l'évolution des 4 critères en pourcentage en fonction de l'heure et du jour. L'évolution en fonction de l'heure (4-55A) révèle une variabilité importante de chaque critère au cours du temps (de 7 à 17 h). L'évolution des critères en pourcentage en fonction du jour (Figure 4-55B) indique que : le critère « B » apparait majoritairement du 1er au 3ème jour du mois ; le critère « Mo » est dominant du 4ème au 7ème jour ; le critère « Me » apparait du 8ème au 11ème jour et le critère « B » atteint un fort pourcentage à la fin du mois.

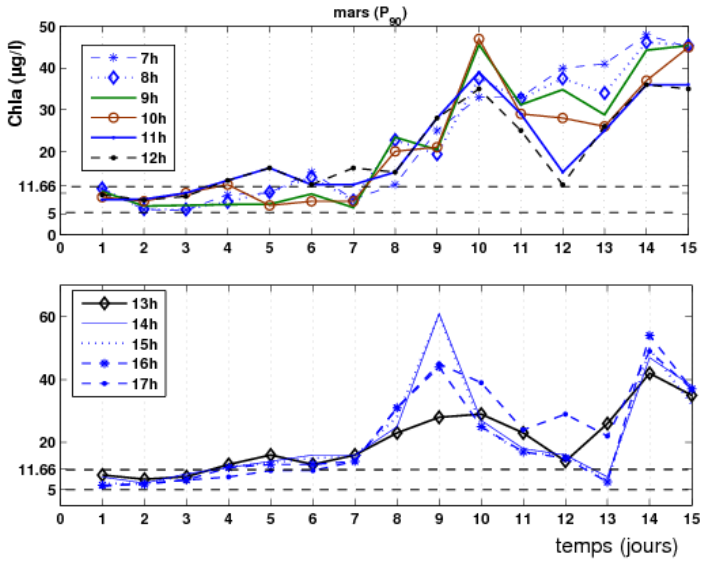

Figure 4-54 : L'évolution du percentile 90 (P_{90}) de 7 h à 17 h tous les 15 jours au mois de mars sur les 6 ans de mesure. Les quatre niveaux apparaissent : « B », « Mo », « Me » et « Ma ». On note que du 1er au 7ème jour du mois, les courbes de 7 h à 17 h fluctuent autour de la valeur seuil (11,66 µg/L).

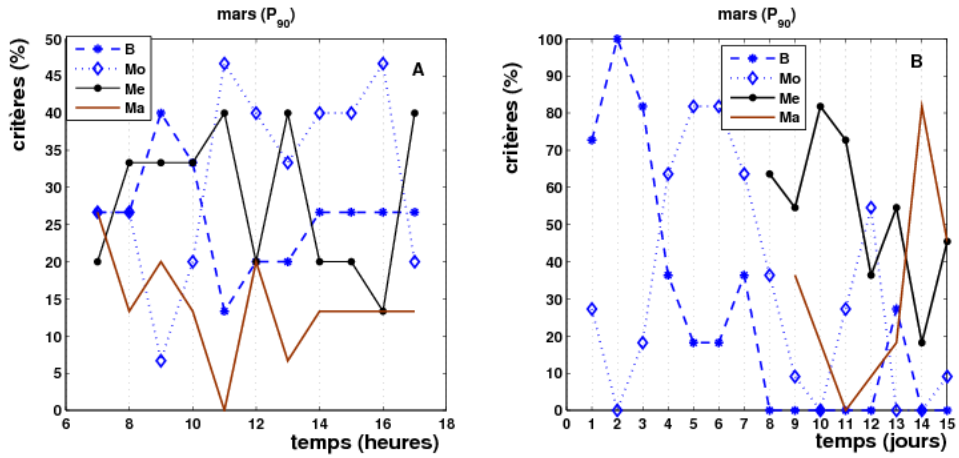

Figure 4-55 : L'évolution du pourcentage de chaque critère en fonction de l'heure (A) : on note ici une forte variabilité de chaque critère de 7 h à 17 h : le critère « Mo » est le plus rencontré à 11 h et à 16 h ; le critère «B » atteint son pic à 9 h ; le critère « Me » voit son pourcentage atteindre des pics à 11 h, à 13 h et à 17 h ; le critère « Ma » qui est très minoritaire en pourcentage possède un pic à 12 h. L'évolution des critères estimés en pourcentage en fonction du jour indique que (B) : le critère « B » est plus rencontré du 1er au 3ème jour, le critère « Mo » du 4ème au 7ème jour, le critère « Me » du 8ème au 11ème jour et le critère « Ma » est dominant partir du 14ème jour.

Tableau 4-11 : Percentile 90 : critères en fonction de l'heure et du jour au mois de mars (de 2004 à 2009)

Percentile 90- mars											
jour\heure	7 h	8 h	9 h	10 h	11 h	12 h	13 h	14 h	15 h	16 h	17 h
1	Mo	Mo	Mo	B	B	B	B	B	B	B	B
2	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
3	B	B	B	Mo	Mo	B	B	B	B	B	B
4	B	B	B	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	B
5	Mo	Mo	B	B	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo
6	Mo	Mo	B	B	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo
7	B	B	B	B	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo
8	Mo	Me	Me	Mo	Mo	Mo	Me	Me	Me	Me	Me
9	Me	Mo	Me	Me	Me	Me	Me	Ma	Ma	Ma	Ma
10	Me	Me	Ma	Ma	Me	Me	Me	Me	Me	Me	Me
11	Me	Me	Me	Me	Me	Me	Me	Mo	Mo	Mo	Me
12	Ma	Me	Me	Me	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Me
13	Ma	Me	Me	Me	Me	Ma	Me	B	B	B	Me
14	Ma	Ma	Ma	Me	Me	Ma	Ma	Ma	Ma	Ma	Ma
15	Ma	Ma	Ma	Ma	Me	Ma	Me	Me	Me	Mo	Me

- **Les mois d'avril**

Nous réalisons ici une simulation aux mois d'avril cumulés de 2004 à 2009. Le tableau 4-12 représente le percentile 90 estimé en fonction de l'heure tous les 15 jours. Dans ce tableau, 3 critères apparaissent « Me » (Médiocre), « Ma » (Mauvais) et « Mo » (Moyen) avec une dominance de « Me ». Les valeurs du percentile sont comprises entre 11,30 µg/l et 56,5 µg/L, la valeur minimale est très proche de la valeur seuil du percentile (estimé à 11,66 mg/L). Les valeurs du percentile 90 au mois d'avril sont majoritairement comprises entre 20 et 40 µg/L, ce qui correspond au critère « Me » (Médiocre).

La figure 4-56 met en évidence l'évolution du percentile 90 aux mois d'avril de 7 h à 17 h tous les 15 jours. Trois niveaux apparaissent dans cette figure « Ma », « Me » et « Mo ». Les courbes de 7 h, de 11 h, de 13 h, de 15 h et de 17 h sont au dessus de la valeur seuil du percentile 90 (11,66 µg/L). Seule la courbe de 9 h se rapproche de cette valeur le 4ème jour.

La figure 4-57 indique l'évolution des ces 3 critères en pourcentage en fonction de l'heure et du jour. Lorsqu'on regarde l'évolution de ces critères en pourcentage en fonction de l'heure (Figure 4-57A) on remarque que le critère « Me » est très dominant et est compris entre 50 et 80 % comparés au « Mo » et « Ma » qui eux sont compris entre 0 et 30 %. Aux mois d'avril, le critère « Me » est le plus dominant quelle que soit l'heure de la mesure. Le critère « Ma » est en nette augmentation de 9 h à 17 h et le critère « Mo » atteint ses pics à 9 h, à 11 h et à 14 h. Lorsqu'on regarde également cette évolution en fonction du jour (Figure 4-57B) on constate que du 1er et 3ème jour, le critère « Ma », est plus présent, et du 4ème au 15ème jour le critère « Me » est très dominant et à partir du 15ème jour et le critère « Mo » varie énormément et voit son pourcentage croitre et atteindre les 50 % le 15ème jour.

Tableau 4-12 : Percentile 90 : critères en fonction du jour et de l'heure au mois d'avril de 2004-2009

Percentile 90-avril											
jour\heure	**7 h**	**8 h**	**9 h**	**10 h**	**11 h**	**12 h**	**13 h**	**14 h**	**15 h**	**16 h**	**17 h**
1	Ma	Ma	Me	Me	Ma	Ma	Ma	Ma	Ma	Me	Me
2	Ma	Ma	Me	Me	Me	Ma	Ma	Ma	Ma	Ma	Ma
3	Ma	Ma	Me	Me	Me	Me	Ma	Ma	Ma	Ma	Me
4	Mo	Mo	Mo	Me	Me	Me	Me	Mo	Me	Me	Me
5	Me	Me	Me	Ma	Me	Me	Me	Me	Me	Me	Me
6	Me	Mo	Mo	Me	Me	Me	Me	Me	Me	Me	Me
7	Mo	Mo	Mo	Me	Me	Me	Me	Me	Me	Me	Me
8	Me	Me	Me	Me	Me	Me	Me	Me	Me	Me	Me
9	Me	Me	Mo	Mo	Me	Me	Me	Me	Me	Me	Me
10	Me	Me	Me	Me	Mo	Me	Me	Me	Me	Me	Me
11	Me	Mo	Mo	Me	Mo	Me	Me	Me	Me	Me	Me
12	Me	Me	Me	Mo	Mo	Mo	Me	Ma	Ma	Ma	Me
13	Ma	Me	Me	Me	Me	Me	Me	Me	Me	Ma	Ma
14	Me	Me	Me	Me	Me	Me	Me	Mo	Mo	Me	Ma
15	Me	Me	Me	Me	Me	Mo	Me	Mo	Mo	Mo	Mo

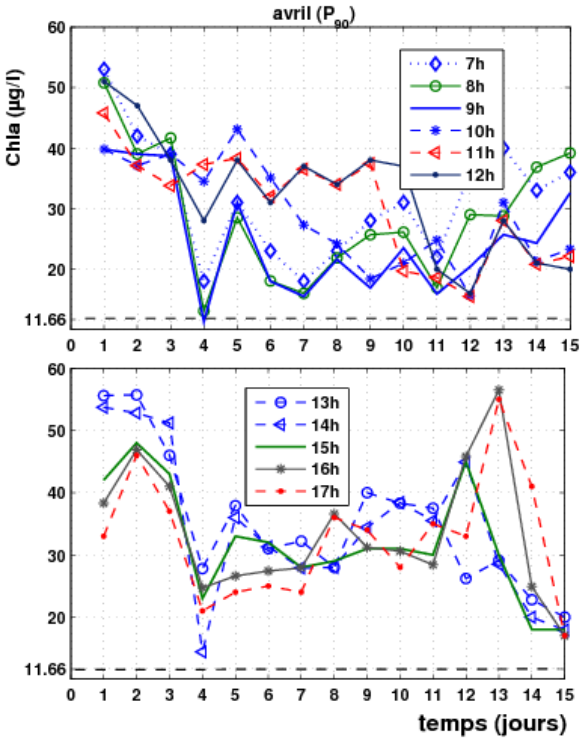

Figure 4-56 : Le percentile 90 estimé de 7 à 17 h tous les 15 jours au mois d'avril sur 6 ans. 3 niveaux apparaissent : « Mo », « Me » et « Ma ». Toutes les courbes sont au-dessus de la valeur seuil (11,66 µg/L).

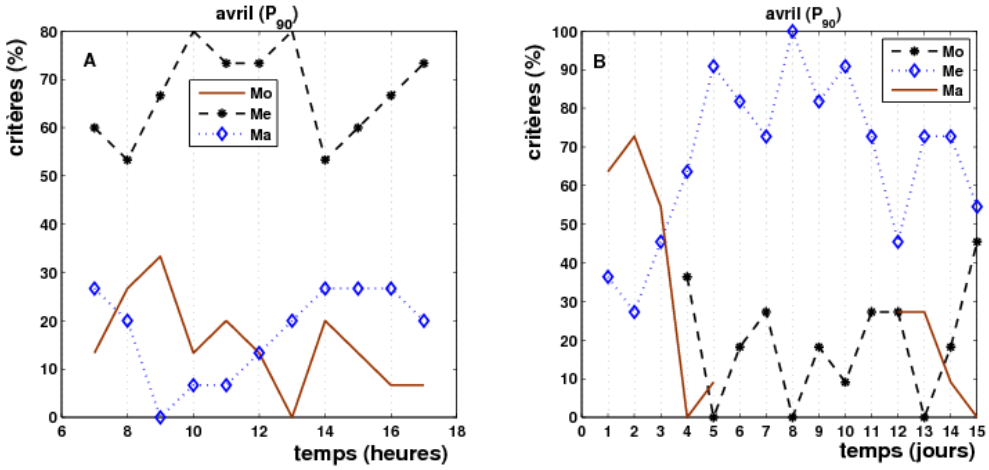

Figure 4-57 : L'évolution du percentile 90 en pourcentage en fonction de l'heure et du jour aux mois d'avril : (A) le critère « Me » apparait avec un pourcentage très important comparé aux « Mo » et au « Ma » ; (B) les critères en fonction du jour indique que le critère « Ma » apparaît du 1er au 3ème jour, le critère « Me » du 4ème au 15ème jour et le critère « Mo » après le 15ème jour.

- **Les mois de mai**

Le tableau 4-13 représente les critères en fonction de l'heure et du jour (percentile 90) aux mois de mai de 2004 à 2009. Quatre critères de qualité apparaissent dans ce tableau ; « Me », « Ma », « Mo » et « B ». Les valeurs du percentile 90 estimées aux mois de mai sont comprises entre 7,45 et 91 µg/L. On note toute de même un très faible nombre de valeurs du percentile 90 en dessous de la valeur seuil (fixée à 11,66 µg/L). Cela se confirme dans la figure 4-58.

La figure 4-58 met en évidence l'évolution des valeurs des percentiles 90 estimés en fonction de l'heure tous les 15 jours aux mois de mai. Les courbes de 7 h, de 10 h et de 12 h se rapprochent de la valeur seuil et on constate que du 11ème au 13ème jour ces trois courbes sont en dessous de cette valeur seuil.

La figure 4-59 met en évidence l'évolution des critères en pourcentage en fonction de l'heure et du jour. L'évolution des critères en fonction de l'heure (Figure 4-59A) indique que le critère « B » est présent de 7 h à 10 h (le matin), le critère « Me » est présent de 7 h à 17 h mais plus dominant de 7 h à 10 h. Quant au critère « Ma », il est en nette augmentation en fonction de l'heure et atteint son pic à 16 h. Le critère « Mo » quant à lui, indique une faible variabilité au cours du temps et montre une baisse à partir de 15 h. L'évolution des critères estimés en pourcentage en fonction du jour (Figure 5-59B) révèle une forte variabilité de chaque critère. On remarque tout de même que le critère « Ma » est en augmentation du 1er au 5ème jour et du 7ème au 10ème jour, sa baisse le 6ème jour est remplacé par le critère « Mo ». Le critère «Mo » est dominant du 1er au 2ème jour du mois.

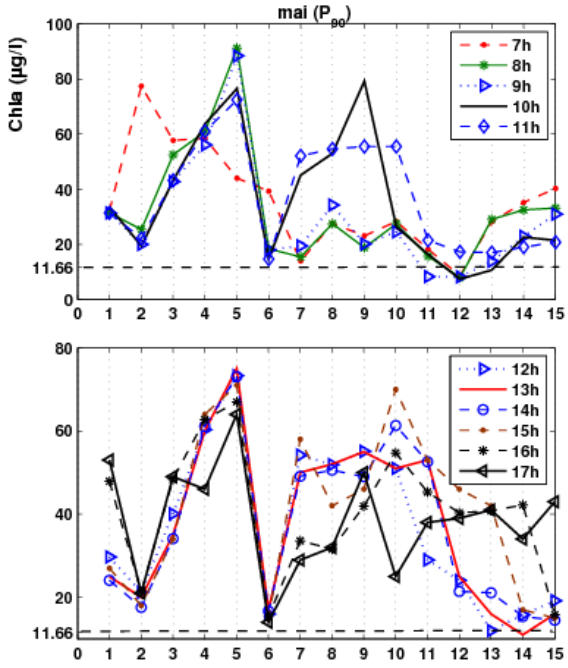

Figure 4-58 : L'évolution du percentile 90 (P_{90}) de 7 h à 17 h tous les 15 jours sur les 6 ans. Deux niveaux majoritairement apparaissent : « Me » et « Ma », le « B » apparait dans les courbes de 7 h et 10 h. Presque la totalité des courbes sont au dessus de la valeur seuil.

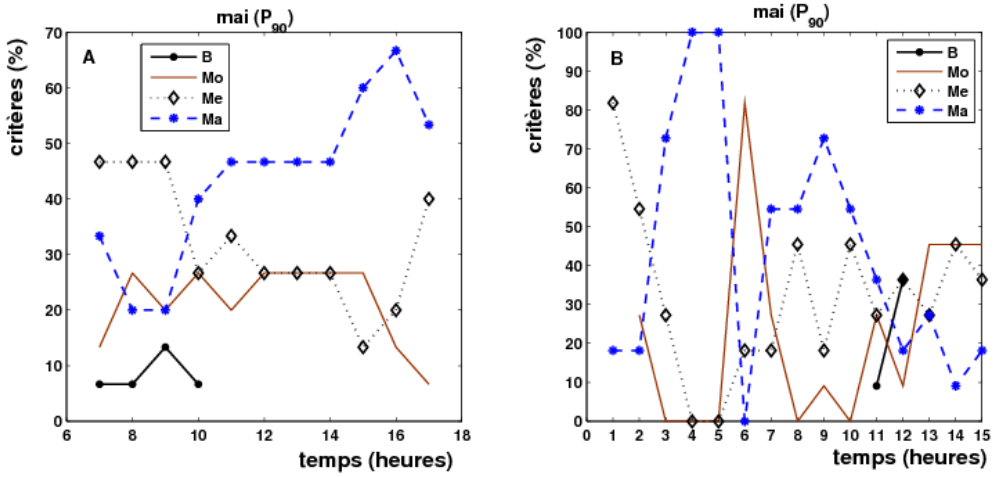

Figure 4-59 : Les critères estimés en pourcentage en fonction de l'heure et jour : (A) de 7 h à 10 h apparait les 4 critères et de 11 h à 17 h les 3 critères « Ma », « Mo » et « Me » ; (B) les critères en pourcentage en fonction du jour : du 1er au 2ème jour le critère « Me », du 3ème au 4ème jour et du 7ème au 11ème jour le critère « Ma », le critère « B » le 12ème jour. Le critère « Mo » à partir du 13ème jour.

Tableau 4-13 : Percentile 90 : critères en fonction du jour et de l'heure aux mois de mai de 2004-2009

Percentile 90- mai											
jour\heure	**7 h**	**8 h**	**9 h**	**10 h**	**11 h**	**12 h**	**13 h**	**14 h**	**15 h**	**16 h**	**17 h**
1	**Me**	**Me**	**Me**	**Me**	**Me**	**Me**	**Me**	**Me**	**Me**	**Ma**	**Ma**
2	**Ma**	**Me**	**Me**	**Mo**	**Me**	**Me**	**Me**	**Mo**	**Mo**	**Me**	**Ma**
3	**Ma**	**Ma**	**Ma**	**Ma**	**Ma**	**Ma**	**Me**	**Me**	**Me**	**Ma**	**Ma**
4	**Ma**	**Ma**	**Ma**	**Ma**	**Ma**	**Ma**	**Ma**	**Ma**	**Ma**	**Ma**	**Ma**
5	**Ma**	**Ma**	**Ma**	**Ma**	**Ma**	**Ma**	**Ma**	**Ma**	**Ma**	**Ma**	**Ma**
6	**Me**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Me**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**
7	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Ma**	**Ma**	**Ma**	**Ma**	**Ma**	**Ma**	**Me**	**Me**
8	**Me**	**Me**	**Me**	**Ma**	**Ma**	**Ma**	**Ma**	**Ma**	**Ma**	**Me**	**Me**
9	**Me**	**Mo**	**Me**	**Ma**	**Ma**	**Ma**	**Ma**	**Ma**	**Ma**	**Ma**	**Ma**
10	**Me**	**Me**	**Me**	**Me**	**Ma**	**Ma**	**Ma**	**Ma**	**Ma**	**Ma**	**Me**
11	**Mo**	**Mo**	**B**	**Mo**	**Me**	**Me**	**Ma**	**Ma**	**Ma**	**Ma**	**Me**
12	**B**	**B**	**B**	**B**	**Mo**	**Me**	**Me**	**Me**	**Ma**	**Ma**	**Me**
13	**Me**	**Me**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Me**	**Ma**	**Ma**	**Ma**
14	**Me**	**Me**	**Me**	**Me**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Ma**	**Me**
15	**Ma**	**Me**	**Me**	**Me**	**Me**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Ma**

- **Les mois de juin**

Nous réalisons ici une simulation aux mois juin de 2004 à 2009. Le tableau 4-14 représente les critères de qualité en fonction de l'heure et du jour. Les heures varient ici de 7 h à 17 h tous les 15 jours. Trois critères apparaissent dans ce tableau avec majoritairement le critère « Mo » qui tend vers les 100 % à partir de 11 h quel que soit le jour du prélèvement.

La figure 4-60 indique l'évolution des valeurs du percentile 90 de 7 h à 17 h tous les 15 jours. Elle révèle trois niveaux de classification : « B », « Mo » et « Me ». Les courbes de 7 h, de 10 h, de 12 h et de 16 h se rapprochent de la valeur seuil (11,66 µg/L). On constate, que la courbe de 10 h reste plus longtemps en dessous de cette valeur seuil (du 8ème au 14ème jour) et les courbes de 7 h à 12 h restent en dessous de ce seuil du 5ème au 9ème jour.

La figure 4-61 met en évidence l'évolution des critères en pourcentage en fonction de l'heure et du jour de prélèvement. La figure 4-61A indique cette évolution en fonction de

l'heure, on constate que le critère « Mo » est en nette augmentation au fur et à mesure que l'heure croit, pour atteindre les 100 % après 17 h. Le pourcentage de « Mo » est compris entre 60 et 100 %. Le pourcentage de « Me » et « B » sont très faibles comparés à celui de « Mo ». Les critères « B » et « Me » apparaissent de 7 h à 10 h. La figure 4-61B indique cette évolution en pourcentage en fonction du jour. Le critère « Ma » possède une forte variabilité en fonction du jour, il est compris entre 80 et 100 %. Le critère « M » est majoritairement présent le 1er jour. Le critère « B » révèle une forte variabilité, ce critère est présent du 6ème au 13ème jour.

Tableau 4-14 : Percentile 90 : critère en fonction du jour et de l'heure aux mois de juin de 2004-2009

Percentile 90-juin											
jour\heure	**7 h**	**8 h**	**9 h**	**10 h**	**11 h**	**12 h**	**13 h**	**14 h**	**15 h**	**16 h**	**17 h**
1	**Me**	**Me**	**Me**	**Mo**	**Mo**	**Me**	**Me**	**Me**	**Mo**	**Mo**	**Me**
2	**Me**	**Me**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**
3	**Me**	**Me**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**
4	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**
5	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**
6	**B**	**B**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**
7	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**
8	**B**	**B**	**B**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**
9	**Mo**	**B**	**B**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**
10	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**
11	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**B**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**
12	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**
13	**Mo**	**Mo**	**B**	**B**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Me**	**Mo**	**Mo**
14	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Me**	**Mo**	**Mo**
15	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**	**Mo**

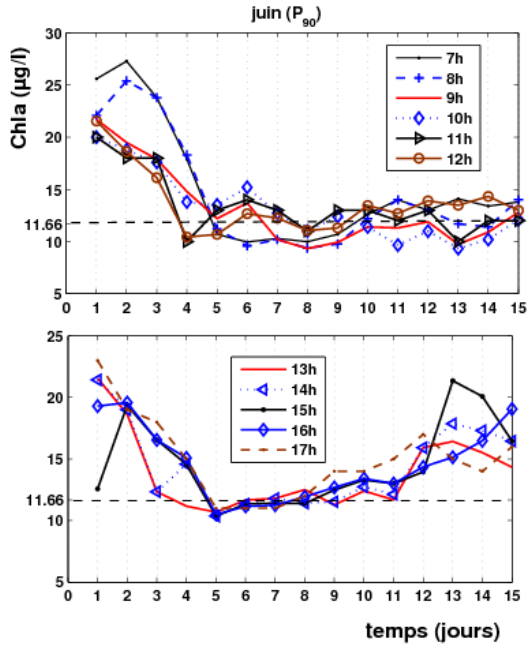

Figure 4-60 : Le percentile 90 (P_{90}) de 7 h à 17 h tous les 15 jours : 3 niveaux apparaissent « B », « Mo » et « Me » : le « Mo » apparait dans la courbe de 7 h 12 h et 16 h et « B » dans la courbe de 10 h. Du 5ème au 15ème jour les courbes de 7 h à 12 h fluctuent autour de la valeur seuil et du 5ème au 9ème jour les courbes de 13 h à 17 h sont très proches de la valeur seuil.

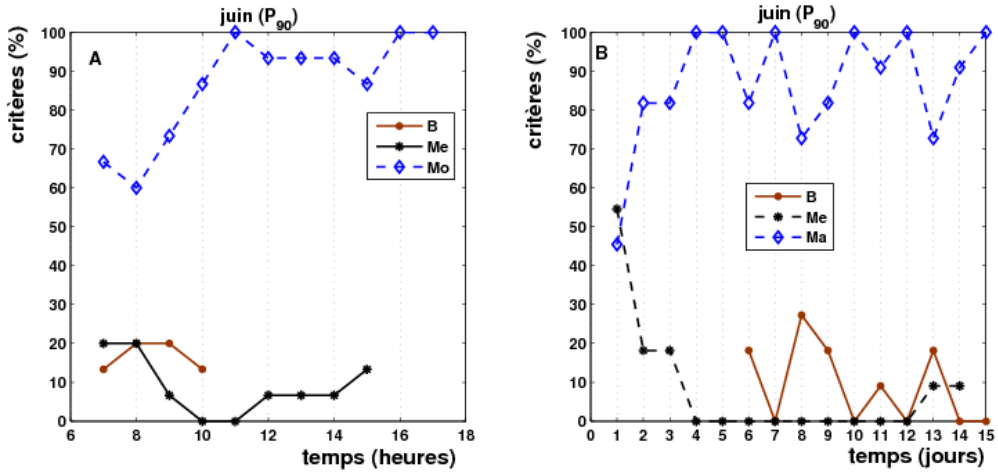

Figure 4-61 : L'évolution des critères estimés en pourcentage en fonction de l'heure et du jour de prélèvement : (A) le critère « Mo » indique une tendance à l'augmentation pour atteindre les 100 % à 16h, (B) le critère « Me » est majoritairement rencontré le 1er jour, le critère « Mo » présent majoritairement du 2ème au 15ème jour.

➢ **Les mois de juillet**

Le tableau 4-15 représente les critères de qualité en fonction de l'heure et du jour au mois de juillet (percentile 90). Deux critères apparaissent « Mo » et « B » avec une majorité de « B ». Le critère « Mo » est rencontré le 3ème jour de 14 h à 15 h.

La figure 4-62 met en évidence l'évolution des valeurs du percentile en fonction de l'heure tous les 15 jours. Toutes les courbes sont en dessous de valeur seuil de 11,66 µg/L. Les valeurs du percentile 90 varient entre 5 et 10,4 µg/L. Quels que soient l'heure et le jour de la mesure, le critère « B » est présent. On note un pourcentage de 98 % de « B» contre 1,2 % de « Mo ».

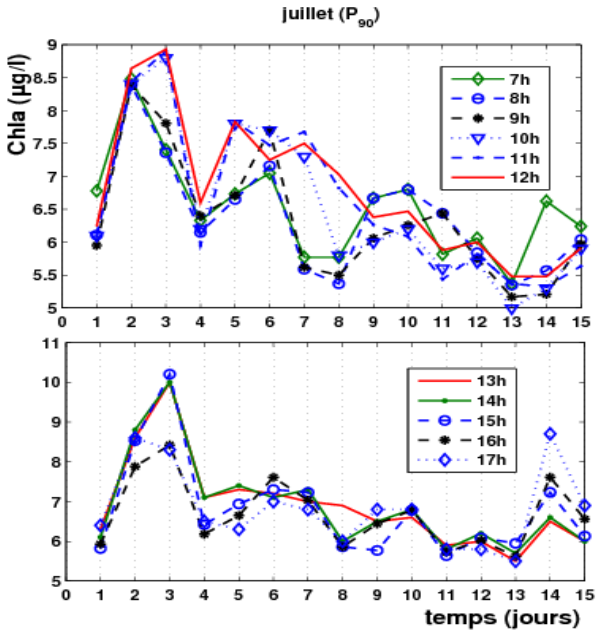

Figure 4-62 : Le percentile 90 (P_{90}) estimé aux mois de juillet de 7 h a 17 h tous les 15 jours : 2 niveaux apparaissent « B » et « Mo », la totalité des courbes sont au dessus de 5 µg/L.

Tableau 4-15 : Percentile 90 : critères en fonction du jour et de l'heure au mois de juillet de 2004-2009

Percentile 90-juillet											
jour\heure	7 h	8 h	9 h	10 h	11 h	12 h	13 h	14 h	15 h	16 h	17 h
1	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
2	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
3	B	B	B	B	B	B	B	Mo	Mo	B	B
4	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
5	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
6	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
7	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
8	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
9	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
10	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
11	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
12	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
13	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
14	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
15	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B

- **Les mois d'août, de septembre et d'octobre**

Le tableau 4-16 met en évidence deux critères aux mois d'août : « TB » et « B ». On note 84 % de « B » et de 16 % de « TB ». La figure 4-63 indique l'évolution des valeurs du percentile en fonction de l'heure. Les valeurs du percentile sont comprises entre 4,5 et 7,5 µg/L. Le critère « TB » est majoritairement rencontré entre le 6ème et le 10ème jour de 7 h à 17 h. La figure 4-64 révèle l'évolution des critères en pourcentage en fonction de l'heure et du jour de prélèvement aux mois d'août : en fonction de l'heure (Figure 4-64A), les critères indiquent une variabilité. Cette variabilité est également visible en fonction du jour de prélèvement (Figure 4-64B) : on remarque que le critère « TB » apparaît du 1er au 6ème jour et du 9ème jour au 13ème jour de 7 h à 17 h. Le critère « B » quant à lui est plus présent du 7ème au 8ème jour et le 14ème jour de 9 h a 17 h.

Le mois de septembre (tableau 4-17) met en évidence 86 % de « B » et 14 % de « TB ». La figure 4-65 indique l'évolution des valeurs du percentile en fonction de l'heure

et du jour. Les valeurs du percentile 90 sont en dessous du seuil de 11,66 µg/L. Cette figure montre une forte variabilité des ces courbes. Le critère « B » sera plus rencontré du 1er au 3ème et au 9ème au 15ème jour de 7 h à 17 h, quant au critère « TB », est rencontré du 4ème de 16h à 17h, le 5ème jour de 7h à 8h, du 8ème jour de 8 h à 14 h.

Les mois d'octobre indiquent 59 % de « TB » et 41 % de « B » (tableau 4-18). La figure 4-66 montre l'évolution des valeurs du percentile en fonction de l'heure et du jour. Les courbes en heure sont en dessous de la valeur seuil de 11,66 µg/l. Les valeurs du percentile 90 au mois d'octobre sont comprises entre 4,3 et 7,2 µg/L. Le critère « TB » est rencontré de 7 h à 9 h et de 15 h à 17 h, le 3ème et le 4ème jour et après le 14ème jour du mois d'octobre. Le critère « B » est plus rencontré de 10 h à 11 h du 1er au 2ème jour et du 8ème au 11ème jour au mois d'octobre.

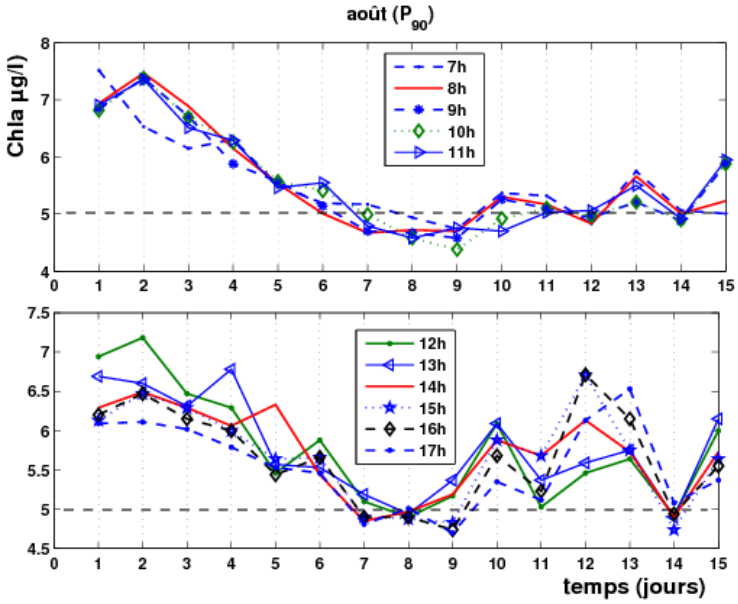

Figure 4-63 : Le percentile 90 estimé au mois d'août de 7 h à 17 h tous les 15 jours : 2 niveaux apparaissent « B » et « TB ». Les courbes de 7 h à 11 h montrent une faible variabilité comparées aux courbes de 12 h à 17 h.

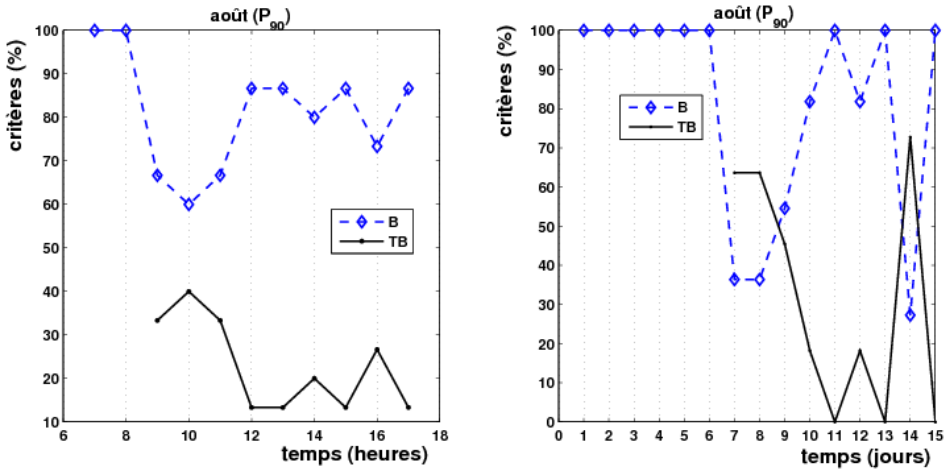

Figure 4-64 : Les critères « B » et « TB » estimés en pourcentage en fonction de l'heure et du jour de la mesure : (A) en fonction de l'heure, on remarque que le critère « B » atteint les 100 % de 7 h à 8 h, et le critère « TB » montre une variabilité avec des pourcentages très faible ; (B) en fonction du jour, le critère « B » est rencontré majoritairement du 1er au 6ème jour et le critère « B » du 7ème au 8ème jour.

Tableau 4-16 : Percentile 90 : critère en fonction du jour et de l'heure au mois d'août de 2004-2009

Percentile 90-août											
jour\heure	**7 h**	**8 h**	**9 h**	**10 h**	**11 h**	**12 h**	**13 h**	**14 h**	**15 h**	**16 h**	**17 h**
1	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
2	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
3	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
4	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
5	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
6	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
7	B	B	TB	TB	TB	B	B	TB	TB	TB	TB
8	B	B	TB	TB	TB	TB	TB	TB	B	TB	B
9	B	B	TB	TB	TB	B	B	B	B	TB	TB
10	B	B	B	TB	TB	B	B	B	B	B	B
11	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
12	B	B	TB	TB	B	B	B	B	B	B	B
13	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
14	B	B	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	B
15	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B

Tableau 4-17 : Percentile 90 : critères en fonction du jour et de l'heure au mois de septembre de 2004-2009

Percentile 90- septembre										
jour\heure	**7 h**	**8 h**	**9 h**	**10 h**	**12 h**	**13 h**	**14 h**	**15 h**	**16 h**	**17 h**
1	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**
2	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**
3	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**
4	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**TB**	**TB**
5	**TB**	**TB**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**TB**
6	**B**	**TB**	**TB**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**
7	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**
8	**TB**	**TB**	**TB**	**TB**	**B**	**TB**	**TB**	**B**	**B**	**TB**
9	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**
10	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**
11	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**
12	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**
13	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**
14	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**
15	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**

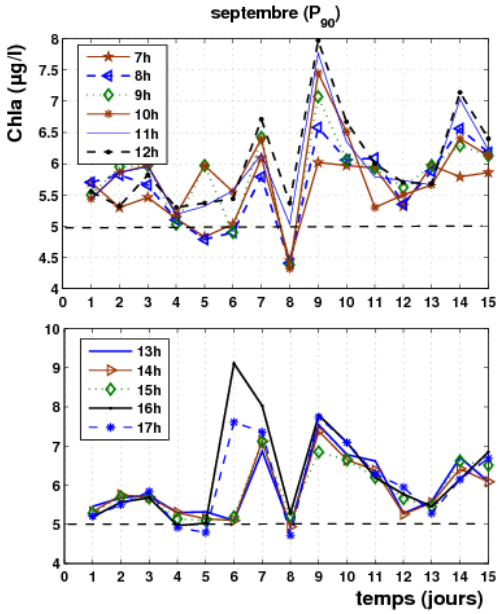

Figure 4-65 : Le percentile 90 estimé au mois de septembre de 7 h à 17 h tous les 15 jours : 2 niveaux apparaissent « B » et « TB ». Les courbes de 7 h à 11 h montrent une faible variabilité comparées aux courbes de 12 h à 17 h.

Tableau 4-18: Percentile 90 : critères en fonction du jour et de l'heure au mois d'octobre de 2004-2009

Percentile 90 octobre											
jour\heure	**7 h**	**8 h**	**9 h**	**10 h**	**11 h**	**12 h**	**13 h**	**14 h**	**15 h**	**16 h**	**17 h**
1	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**TB**	**TB**
2	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**TB**	**B**	**B**	**TB**	**TB**	**TB**
3	**TB**	**TB**	**TB**	**TB**	**TB**	**TB**	**TB**	**TB**	**TB**	**TB**	**TB**
4	**TB**	**TB**	**B**	**B**	**TB**	**TB**	**TB**	**TB**	**TB**	**TB**	**TB**
5	**TB**	**TB**	**TB**	**B**	**B**	**TB**	**B**	**B**	**B**	**TB**	**TB**
6	**TB**	**TB**	**B**	**B**	**B**	**B**	**TB**	**B**	**B**	**TB**	**TB**
7	**TB**	**TB**	**TB**	**B**	**B**	**B**	**TB**	**TB**	**TB**	**TB**	**TB**
8	**TB**	**TB**	**TB**	**B**	**B**	**B**	**B**	**TB**	**TB**	**B**	**TB**
9	**TB**	**TB**	**TB**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**TB**	**B**	**B**
10	**TB**	**TB**	**TB**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**
11	**B**	**B**	**TB**	**TB**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**
12	**B**	**B**	**B**	**TB**	**TB**	**TB**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**
13	**B**	**B**	**B**	**TB**	**TB**	**TB**	**TB**	**TB**	**TB**	**B**	**B**
14	**TB**	**TB**	**TB**	**B**	**B**	**TB**	**TB**	**TB**	**TB**	**TB**	**TB**
15	**B**	**TB**	**TB**	**TB**	**TB**	**TB**	**TB**	**TB**	**TB**	**TB**	**TB**

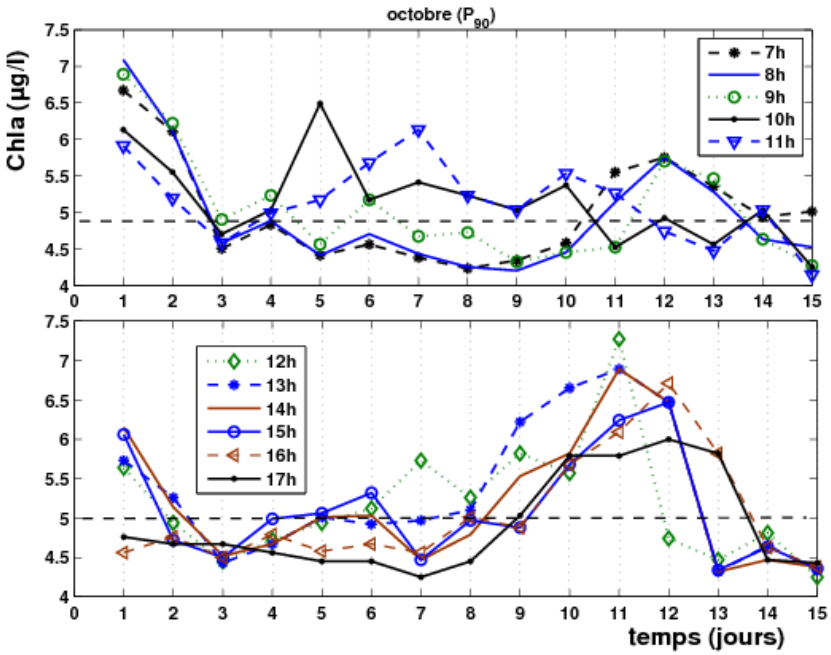

Figure 4-66 : Le percentile 90 estimé au mois d'octobre de 7 h à 17 h tous les 15 jours : 2 niveaux apparaissent « B » et « TB ».

5. Discussion et conclusion

Généralement l'estimation de la qualité dans le cadre de la DCE est faite sur des mesures à basse fréquence et sur très peu de données. L'originalité de notre étude est l'utilisation du paramètre fluorescence transformé en chlorophylle *a* par le biais d'un facteur de conversion en utilisant les données MAREL à haute fréquence. Notre étude s'est focalisée sur les paramètres définissant un état écologique, notamment des paramètres biologique et physico-chimique : la Chla et l'OD respectivement sur une période de 6 ans.

Nous avons estimé la qualité de la masse d'eau avec un pas de temps allant de la **semaine à l'année**. Ceci nous a permis de tester directement ce qui se passerait si on utilisait un pas de temps plus court pour estimer la qualité des eaux. La lecture des grilles d'évaluation a permis de donner une conclusion provisoire de l'état écologique des masses d'eau via ces deux paramètres.

Une évaluation de la qualité des masses d'eau littorales en Côte d'Opale a été récemment effectuée par l'Ifremer à partir de données disponibles dans la base Quadrige (Soudant et Belin, 2009). Sur la période de 2002-2007, la description de la masse du Slack-La Warenne a révélé un état « moyen » pour le phytoplancton. Cette évaluation a été considérée également sur plusieurs périodes glissantes d'une durée totale de 6 années, et a étudié 2 scénarios : mesures toute l'année, et mesures les mois de mars à octobre. En ce qui concerne le percentile 90 de la Chla, la valeur obtenue est variable, mais correspond toujours à l'indice qualité « Bon » (voir la Tableau 4-19).

Grâce aux données à haute fréquence, nous avons pu également estimer l'influence de l'heure et du jour de prélèvement sur la classification des masses d'eau côtière. Une simulation sur des données de fluorescence de 2005, 2006 et 2007 avait été faite également par l'Ifremer dans le but également d'étudier « l'influence de la période et de la fréquence d'échantillonnage sur le percentile 90 de la fluorescence » (Soudant et al., 2008). Dans leur étude, ils ont considérés des données diurnes de fluorescence sur la plage d'horaire de 7 h a 19 h sur 6 ans (en doublant les années 2005, 2006 et 2007). Ils obtiennent une valeur du percentile 90 de l'ordre de 3,28 FFU ce qui correspond après conversion à 10,21 de Chla donc au critère « M » (moyen) (Soudant et al., 2008). Ils ont également considéré les jours opérationnels (de lundi à vendredi) et la période de mars à octobre. Leur conclusion s'est limitée au niveau quantitatif et non qualitatif. Notre étude apporte plus de précisions sur l'influence de l'heure et du jour de prélèvement sur la classification, en transformant la valeur du percentile estimée en indice de qualité.

Tableau 4-19 : Le percentile 90, µg/L, eaux côtière : la Slack-Warenne (provenant de Soudant et Belin, 2009)

Période	Années	Nombre de données	Valeur du percentile 90	Indice
Toute l'année	2000-2005	110	13,8	Bon
Mars-octobre	2000-2005	86	14,6	Bon
Toute l'année	2001-2006	121	11,8	Bon
Mars-octobre	2001-2006	95	13	Bon
Toute l'année	2002-2007	130	10,9	Bon
Mars-octobre	2002-2007	104	11,7	Bon

Dans nos résultats, concernant **l'influence de l'échelle** nous constatons que les épisodes qui pourraient donner lieu à des mauvais indices de qualité sont très localisés dans le temps. Comme ces événements sont localisés, si l'on considère seulement une seule période T, certains critères deviennent indétectables. Par contre, ce n'est que par des études fines qu'on peut détecter leur présence.

Les résultats de l'évaluation pour le DO (percentile 10) de 2004 à 2009 indiquent que la masse d'eau côtière est en qualité « TB » ou « B » quelle que soit l'échelle choisie. Le DO analysée provient des mesures en surface (1,5 m en dessous de la surface), ce qui pourrait donner lieu à une sous-estimation de la qualité des masses d'eau via ce paramètre. La DCE recommande des mesures d'oxygène en surface et au fond.

L'indicateur Chla estimé à partir de la fluorescence montre une variabilité du percentile 90. L'estimation annuelle (de mars à octobre) de ce percentile montre une différence interannuelle, seules les années 2007 et 2009 montres un indice de qualité « B » (bon). Les années 2004 et 2006 indiquent un indice de qualité « Me » (médiocre) et les années 2005 et 2008 révèlent un indice « Mo » (moyen). La figure 4-67 montre l'évolution de chaque critère en pourcentage en fonction du nombre de jours choisi pour l'échelle. Sur une période de 2004 à 2009 (tous les mois), le critère « TB » est rencontré jusqu'au 90ème jour (3 mois). Les pourcentages « B », « Mo » et « Me » ont une tendance à l'augmentation avec des pourcentages très faibles pour une fréquence de 3 mois, et avec le critère « B » ayant le plus fort pourcentage, alors que **« Ma » baisse lorsque le pas de temps augmente**. Le pourcentage de qualité « Ma » disparaît à partir de l'échelle de 3 mois. Sur la période de

mars à octobre (Figure 4-68), le pourcentage de tous les critères de qualité est inférieur à 50 %. Lorsque le pas de temps croît et que le critère qualité « TB » décroit (il passe de 36 à 0 %). Le « B » varie très peu malgré l'augmentation du pas de temps. Les pourcentages de « Mo » et de « Me » montrent une légère augmentation. A l'échelle de 1 an les critères « Mo », « B » et « Me » ont la même probabilité d'apparition. Le critère « Ma » voit son pourcentage augmenter jusqu'au pas de temps de 3 mois ensuite atteint 0 % pour le pas de temps de 1 an. **En conclusion, quelle que soit la période considérée les critères « TB » et « Ma » apparaissent seulement jusqu'au pas de temps de 3 mois.** L'utilisation de la haute fréquence sur un pas de temps variable nous a permis de voir que le percentile 90 de la Chla peut atteindre localement de forts pics. On voit que cet indicateur, sur une échelle de 1 semaine montre un ''bon état'' assez souvent, mais avec de fortes valeurs allant jusqu'à l'état « mauvais ». Le changement de résolution nous montre que l'augmentation de l'échelle fait baisser progressivement le maximum du percentile 90, mais on voit qu'à l'échelle de 3 mois ou même un an, les blooms amènent un mauvais classement. Il semble clair que moyenner sur de plus longues périodes est un moyen de masquer ce mauvais état. Malgré cela pendant certains blooms ce mauvais état est manifeste et il semble normal que l'indicateur utilisé s'en ressente.

La simulation faite sur les données d'OD de juin à septembre met en évidence également une variabilité du percentile 10. Le percentile 10 varie en fonction de l'heure et du jour de prélèvement. Les résultats indiquent que le critère « B » sera rencontré en début du mois et le critère « TB » vers la fin du mois. Concernant la simulation faite sur les données de Chla de mars à octobre (sur 6 ans), le critère « Mo » apparait presque quotidiennement de 7 h à 17 h.

Une simulation faite mensuellement indique une variabilité quantitative et qualitative importante du percentile 90 en fonction du jour et l'heure du prélèvement. Les mois de mars de 2004-2009 indiquent une très forte variabilité du critère de qualité. Les premiers jours du mois tous les 15 jours sont dominées par le critère « B » suivi par le critère « Mo » et les critères « Mo » et « Ma » apparaissent à la fin du mois. Au niveau des horaires, la variabilité est très importante pour détecter la plage horaire fixe pour chaque paramètre. La simulation

faite aux mois d'avril (2004-2009), révèle également une moins forte variabilité du percentile 90 de la Chla. Les critères « B » et « TB » présents en mars sont absents au mois d'avril. Le critère « Ma » apparait au début du mois suivi par « Me » et « Mo » voit son pourcentage croître en fin du mois. La simulation faite aux mois de mai (2004-2009) indique une variabilité plus importante qu'au mois d'avril du percentile 90. Le critère « B » réapparait, il est retrouvé en début du mois suivi par « Ma » ensuite par « Mo », et au niveau horaire, le critère « Ma » croit de 10 h à 16 h, sur la plage horaire de 7 h à 9 h, le critère « Me » est le plus rencontré. Le mois de juin met en évidence une très faible hétérogénéité dans la classification des masses d'eau. Le critère « Mo » apparaît dans l'ensemble du mois quelle que soit l'heure de la mesure. La simulation faite aux mois de juillet, d'aout, septembre et octobre sur 6 ans indiquent un critère « B » ou « TB ».

En conclusion la simulation de 6 années de mesure de mars à octobre indique une forte variabilité du percentile 90. Les mois de mars à juin mettent en évidence une classification de « bon » à « mauvais » en fonction de l'heure et du jour de la mesure. Les mois de juillet à octobre sont des mois qui indiquent à plus fine échelle, un critère « B ». Si on se réfère à la définition du « bon état » par la DCE : « l'état global se fixe sur le paramètre le plus déclassant car un seul paramètre ne respectant pas le bon état entraîne le déclassement de la masse d'eau », on suppose que dans notre étude la Chla est le paramètre déclassant. Il peut être considéré comme non déclassant si on considère les mois de juillet, août, septembre et octobre.

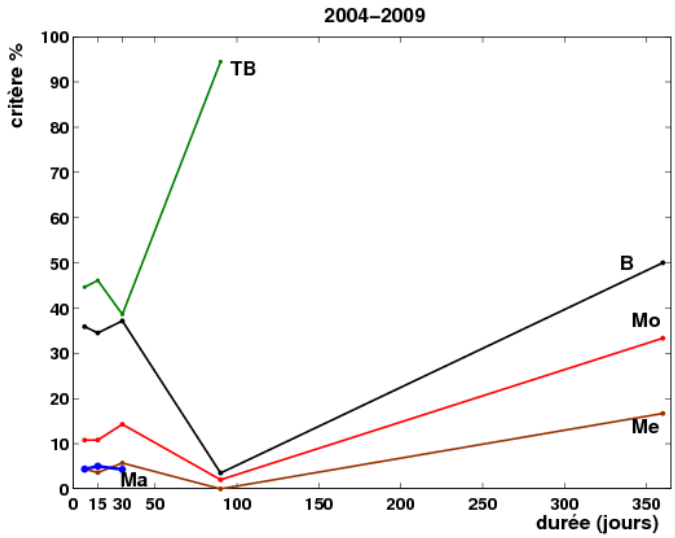

Figure 4-67 : Evolution de chaque critère en pourcentage en fonction du nombre de jours. Le critère « Ma » apparaît jusqu'à 1 mois. Jusqu'à 3 mois le critère « TB » est dominant. Les autres critères se maintiennent jusqu'à 1 an.

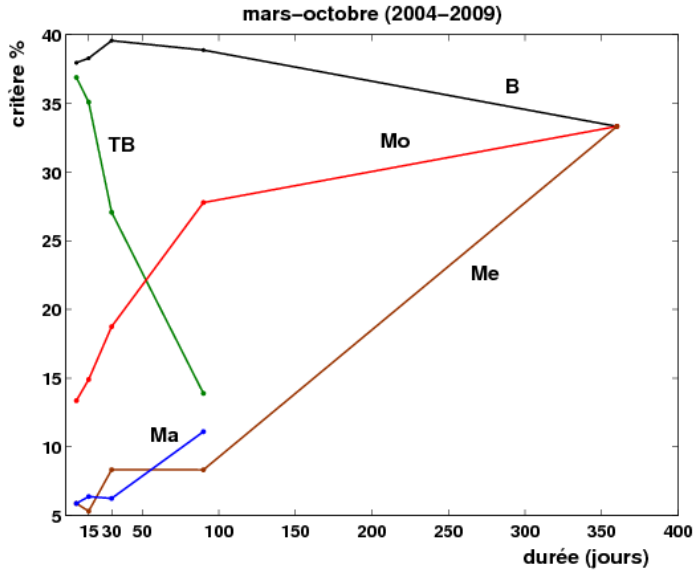

Figure 4-68 : Evolution de chaque critère en pourcentage en fonction du nombre de jours de mars à octobre. Le critère « Ma » apparaît jusqu'à 1 mois. Jusqu'à 3 mois le critère « TB » est dominant. Les autres critères se maintiennent jusqu'à 1 an.

Conclusion Générale & Perspectives

Conclusion Générale et Perspectives

L'objectif principal de cette recherche a été d'analyser des séries biogéochimiques à moyen et long terme dans l'environnement côtier. Nous avons considéré des séries de température, salinité, pH, oxygène dissous (DO), oxygène saturé, chlorophylle *a* (Chla), fluorescence, turbidité, carbone organique particulaire (COP), azote organique particulaire (NOP) et sels nutritifs (azote $(NO_2^- + NO_3^-)$, l'acide silicique $(Si(OH)_4)$), phosphate (PO_4). L'analyse s'est focalisée sur les variations de ces paramètres biogéochimiques en utilisant des méthodes à la fois classiques et novatrices telles que l'analyse spectrale de Fourier, les densités de probabilité, les covariations en utilisant un estimateur. Ces méthodes d'analyse nous ont permis de caractériser la dynamique non-linéaire en nous focalisant sur l'étude des fluctuations, et d'expliquer les changements qui peuvent survenir à différentes échelles de temps de l'heure à la décennie. On s'est intéressé également aux extrêmes de ces fluctuations qui peuvent être associés aux pollutions chimiques liées aux apports importants en sels nutritifs de l'environnement littoral côtier ; aux concentrations de certains paramètres clés qui atteignent des seuils critiques pour l'écosystème local ; aux extrêmes du débit fluvial.

L'étude des paramètres biogéochimiques a été la base du travail effectué dans cette thèse et la zone côtière Manche a été notre site d'étude. Ces paramètres sont considérés comme étant des indicateurs de l'état de santé du milieu aquatique. La Manche est une zone sensible à différentes perturbations d'origine anthropique avec des apparitions brusques et explosives de certaines espèces. C'est un écosystème qui est particulièrement complexe avec un fort hydrodynamisme marin, un marnage important et qui reçoit quotidiennement des apports en eaux douces par les fleuves. Notre but était également de déceler le rôle de ces forçages environnementaux dans la variabilité de ces paramètres biogéochimiques. Dans ce contexte, nous nous somme intéressé à la zone côtière Manche et aux zones de transitions (l'estuaire de la Seine et la rivière Wimereux). Ces zones de transition sont caractérisées par le couplage conjugué du régime des marées (l'alternance du flot et du jusant de la Manche) et du régime fluvial.

Cette thèse est constituée de trois grands chapitres :

- **chapitre II**. Analyse spectrales des séries biogéochimiques à haute fréquence ;
- **chapitre III**. Les données SOMLIT en Manche : comparaison avec les données MAREL, covariation et rapports stoechiométriques ;
- **chapitre IV**. Extrêmes et Dynamique.

Les premiers résultats de cette étude sont issus de l'analyse spectrale effectuée à partir de séries biogéochimiques à haute fréquence. Dans cette partie, les séries analysées proviennent en grande partie du programme MAREL opéré par l'Ifremer. Une particularité de ces séries est la présence d'un grand nombre de valeurs manquantes : les analyses spectrales ont pris en compte cet aspect, de façon à mettre en évidence les régimes invariants d'échelle et les forçages. Les spectres d'énergie de la plupart des paramètres montrent une bonne invariance d'échelle. Par les spectres d'énergie des différents paramètres environnementaux nous avons pu déterminer également la spécificité de chaque site étudié. Les forçages de nature période et leur échelle ont été mis en évidence. Ceci a permis de montrer que la variabilité observée pour certains paramètres biogéochimiques (pH, fluorescence, DO, salinité) était fortement influencée par les forçages turbulents. Certains résultats assez stables ont été obtenus, comme la pente spectrale $\beta = 1{,}2$ pour la fluorescence dans le domaine côtier, laissant entendre que ce comportement pouvait être assez universel. Les comparaisons effectuées entre des mesures en estuaire et des mesures en domaine côtier mettent également en évidence des différences entre les 2 systèmes pour certains paramètres : par exemple $\beta = 1{,}5$ pour le pH en domaine côtier et $\beta = 1{,}2$ dans la zone estuarienne.

Le chapitre suivant a été consacré d'une part à la comparaison entre les mesures manuelles à basse fréquence et les mesures automatiques à haute fréquence par le biais des covariations entre paramètres et les pdfs. D'autre part, on s'est intéressé également aux éventuelles caractéristiques communes de différentes zones de la Manche. Ceci a permis de voir comment les propriétés temporelles peuvent dépendre de la zone de mesure

(information spatiale). Les premiers résultats dans cette section concernent la comparaison des données issues des programmes MAREL et SOMLIT. L'analyse des covariations en utilisant un algorithme adapté a mis en évidence la complémentarité entre les deux types de mesures et une relation non-linéaire entre paramètres. Nous avons interprété statistiquement ces relations entre paramètres. Les pdfs des rapports stoechiométriques issues des deux bases de données on permis de mettre en évidence de fortes probabilités d'apparition des valeurs extrêmes (N :P ; Si :N ; Si :P). De façon générale, ces pdfs suivent une loi hyperbolique. Cette partie a montré que les relations fonctionnelles entre paramètres pourraient être vues et analysées de façon non-linéaire. Elle a aussi montrée que les ratios stoechiométriques, utilisés pour déterminer le sel nutritif limitant sont d'une très grande variabilité. Cette variabilité est telle que ces ratios sont sans doute mal définis : le ratio de la moyenne n'est pas la moyenne des ratios. Ceci montre que la notion d'échelle de mesure est déterminante pour le calcul de ces ratios. La question des échelles et leur importance pour les paramètres hautement variables est une question qui nous a servi de fil conducteur tout au long de cette étude.

Le dernier chapitre concerne deux études spécifiques. Dans la section consacrée à la relation avec le débit de la Seine, nos résultats ont montré l'influence importante des événements extrêmes de crues et d'étiages du débit de la seine dans la distribution des différents paramètres mesurés à Honfleur. Le manque de données marégraphiques ne nous a pas permis de mieux apprécier l'influence de ces événements extrêmes. L'analyse des résultats concernant l'estimation de l'état des masses d'eau à haute fréquence révèle une variabilité importante de certaines métriques (les percentiles 90 et 10) utilisées pour déterminer l'état des masses d'eau.

En conclusion, les travaux menés dans le cadre de cette étude ont permis de mieux comprendre le lien entre les phénomènes physiques (plus précisément de la turbulence) et biogéochimiques qui se déroulent au sein de cet écosystème à fort hydrodynamisme (Schmitt et al., 2008). En effet la dynamique de ces paramètres résulte d'interactions complexe à plusieurs échelles (Bensoussan et al., 2004) et le fonctionnement de

l'écosystème marin est généralement étudié à partir de modèles biogéochimiques (Grégoire et Soetaert, 2010 ; Faure et al., 2010). Des modèles du couplage des processus physiques et biologiques sont largement appliqués en biogéochimie, permettant ainsi de les relier (Tusseau et al., 1997 ; Franke et al., 1999).

De nombreux travaux ont montré que les interactions entre les systèmes biogéochimiques et l'environnement physique ont lieu aux échelles allant de la seconde à l'année (Bensoussan et al., 2004 ; Schmitt et al., 2008). Le choix des échelles pour l'étude de ces couplages sont assez pertinents comme l'indique Bensoussan et al. (2004), elle dépendra des objectifs fixés.

L'oxygène est un paramètre qui varie en fonction des processus biologiques, chimiques et physiques. Nous avons détecté l'échelle d'implication de l'un des processus physiques notamment la turbulence sur la variabilité de ce paramètre pour les grandes échelles. On suppose également que les échanges de l'OD entre l'atmosphère et les océans ont lieu à ces échelles. En effet, l'océan assure également la régulation de ce paramètre par couplage avec l'atmosphère. Aux petites échelles comme à l'échelle de la journée la variabilité de ce paramètre reste dominée par l'influence des processus biologiques tels que la photosynthèse et la respiration (Bensoussan et al., 2004).

La variabilité temporelle du pH est régulée en partie par le système des carbonates, donc également indirectement par les échanges du CO_2 entre l'océan et l'atmosphère et par la photosynthèse (Copin-Montegut, 1996). La consommation du CO_2 engendre un déplacement de l'équilibre des carbonates (Copin-Montégut, 1996). L'étude de ce paramètre a pris aujourd'hui une place cruciale en biogéochimie et notamment dans le phénomène d'acidification des océans. De nombreux travaux prédisent une baisse du pH des eaux de mer qui résulterait d'une augmentation du dioxyde de carbone anthropogénique (Zeebe et Wolf-Gladrow, 2001 ; Blackford, 2010). Les résultats obtenus ici montrent l'évidence de la relation entre le pH et l'OD associée en grande partie à l'influence des processus biologiques. Bensoussan et al. (2004) montrent qu'à l'échelle de la journée, le fort couplage entre le pH et l'OD résulte des processus biologique même si leurs relations avec l'activité biologique ne sont pas identiques de même que les échanges avec l'atmosphère.

On notera que l'énergie turbulente générée en surface des eaux due à l'activité météorologique cause ainsi un mélange dans la colonne d'eau. Et engendre une distribution structurée de ces paramètres biogéochimique.

Les perspectives de nos travaux sont multiples. De façon générale, les écosystèmes côtiers sont des prototypes de systèmes complexes, c'est-à-dire un système comportant de multiples constituants qui interagissent entre eux de façon non-linéaire. Dans les écosystèmes côtiers, les forçages sont multiples : turbulence, marnages, autres forçages…. ; les constituants sont très nombreux (forte productivité biologique, rôle de nourriceries….) ; les apports continentaux sont fortement présents. Entre ces multiples constituants, il existe une multitude de réactions chimiques, biologiques, physiques. Les échelles de variation sont également multiples, allant de la seconde aux décennies (et même plus, mais la décennie est l'échelle maximale de nos bases de données ici).

Cette grande complexité, cette non-linéarité intrinsèque, demandent des méthodologies adaptées pour leur étude. Nous avons ici utilisé de telles méthodologies, avec pour objectif d'extraire des résultats suffisamment généraux pour qu'ils puissent être proposés comme ‘‘lois’’, peut être universels. Les résultats que nous avons obtenus à partir de différentes bases de données, appartiennent à ce paradigme : ils visent à chercher des régularités statistiques des lois expliquant une structuration au sein des échanges complexes.

Plusieurs résultats obtenus vont dans ce sens :

- l'analyse spectrale a mis en évidence des lois d'échelles pour certains paramètres avec des pentes ‘‘universelles’’. Une perspective ici est de comparer avec d'autres zones côtières de façon à étendre la potentielle universalité de ces exposants.
- les approches de covariations correspondent en fait à des diagrammes d'état marquant l'évolution de paramètres. En thermodynamique, on a des relations statistiques entre pression, volume et température. Dans l'écosystème côtier, il est possible également de chercher à avoir de telles relations entre pH,

oxygène, COP, etc.. certains des relations que nous avons obtenues vont dans ce sens. Ceci demande à l'avenir à être étendu à d'autres systèmes.

- les rapports stoechiométriques sont souvent utilisés dans les études biogéochimiques pour évaluer les sels nutritifs qui sont limitants. Notre étude de la dynamique de ces ratios à haute fréquence montre que, de façon très générale, les ratios prennent des valeurs très fluctuantes avec des pdfs universelles possédant des extrêmes hyperboliques. Cette forte variabilité laisse penser que les rapports de la moyenne de 2 quantités (par exemple N et P) ne sont pas égaux à la moyenne des rapports. Le rapport N :P serait alors une quantité mal définie, qui doit en fait être estimée à une échelle bien fixée. Ce problème méthodologique est une conséquence de nos résultats, que nous n'avons pas explorés ici ; il s'agit d'une piste de perspective très intéressante et potentiellement importante par ses conséquences.
- notre étude de la dépendance spectrale de paramètres estuariens, en relation avec la force du débit du fleuve, permet de rechercher l'influence des forçages physiques sur la dynamique de certains paramètres. Les différences rencontrées montrent à quel point ce forçage est déterminant. Ceci va dans le sens d'une universalité, prenant une forme ou une autre selon la force des forçages turbulents. Nous explorerons ceci dans le futur.
- finalement notre analyse de l'état des masses d'eau selon les critères de la DCE, et de l'influence de la fréquence d'échantillonnage sur cet état, amène certains renseignements. D'un côté on peut considérer que le fait de choisir un indicateur basé sur un quantile (10 ou 90) est un bon choix, puisque ceci est, en théorie, indépendant de la fréquence d'échantillonnage. Mais en effectuant ceci à haute fréquence (toutes les semaines) on voit que les mauvais états représentent des ‘‘pics’’ localisés. Ces pics prennent de fortes valeurs et conservent une influence même en considérant de plus grandes échelles. Ce sont ces pics qui sont responsables de la mauvaise qualité potentielle des masses d'eau. Dans ce contexte on peut en déduire :
    - un indicateur de la qualité des eaux est dynamique ;

- cette dynamique dépend de l'échelle ;
- il indiquera forcément des mauvaises qualités, même de façon très localisée.

Ceci montre en particulier qu'il n'est sans doute pas possible d'espérer pouvoir choisir une échelle d'évaluation de l'indicateur (par ex. 6 ans) permettant d'effacer les fortes fluctuations et de donner un ''bon état''. En effet les fortes fluctuations existent à toutes les échelles et les valeurs supérieures au percentile 90 peuvent être très élevées.

Cette étude appartient à l'ensemble des analyses multi-échelles des écosystèmes côtiers. Elle montre que nous avons encore beaucoup de chemin à faire pour bien comprendre ces systèmes complexes. Elle montre aussi qu'une meilleure compréhension est possible.

Cette étude donne aussi des exemples d'analyses quantitatives de séries temporelles à haute fréquence et à long terme. Nous espérons que l'usage de ces méthodes pourra se développer, étant donné les nombreux systèmes d'observations mis en places dans différents sites de par le monde. Des méthodes d'analyse pour toutes ces bases de données sont tout-à-fait nécessaires.

Références Bibliographiques

Références bibliographiques

Albeverio, S., Jentsch, V., Kantz, H., (Eds.) 2006. *Extreme events in nature and society*. Springer, New-York, 351pp.

Aminot, A., Chaussepied, M., 1983. *Manuel des analyses chimiques en milieu marin*. Centre National pour l'Exploitation des Océans, Brest, 395pp.

Aminot, A., Guillaud, J. F., Andrieux-Loyer, F., Kérouel, R., Cann, P., 1998. Apports de nutriments et développement phytoplanctonique en baie de Seine. *Oceanologica Acta* 21, 923-935.

Aminot, A., Kérouel, R., 2004. *Hydrologie des écosystèmes marins*. *Paramètres* et *analyses*. Ifremer, France, 336pp.

Avoine, J., Dubrulle, L., Larsonneur, C., 1985a. La dynamique sédimentaire dans les estuaires de la baie de Seine-conséquences sur l'environnement. *Actes de Colloques IFREMER 4*, 183-192.

Avoine. J., Crevel, L., 1985b. Influence des apports fluviatiles en Baie de Seine. *Actes de Colloques IFREMER 4*, 125-134.

Azzedine, N., Laksaci, A., Ould-Saïd, E., 2008. On robust nonparametric regression estimation for a functional regressor. *Statistics and Probability Letters* 78, 3216-3221.

Badjeck, M. C., Allison, E. H., Halls, A. S., Dulvy, N. K., 2010. Impacts of climate variability and change on fishery-based livelihoods. *Marine Policy* 34, 375-383.

Bakunin, O. G., 2008. *Turbulence and Diffusion*. Springer, Berlin.

Beirlant, J., Vynckier, P., Teugels, J. L., 1996. Tail index estimation, Pareto quantile plots, and regression diagnostics. *Journal of the American Statistical Association* 91, 1659-1667.

Belin, C., 2001. *Cahier des procédures REPHY. Document de prescription*. Rapport Interne, Ifremer/DEL, 47pp.

Belin, C., Soudant, D., 2008. *DCE : évaluation provisoire de la qualité des masses d'eaux côtières et de transition pour l'élément phytoplancton. Etat des lieux complet du littoral français basé sur les données chlorophylle et phytoplancton disponibles dans Quadrige*. Document Ifremer / SE3L / DYNECO / VIGIES / EMP, novembre 2008.

Bendat, J. S., Piersol, A. G., 2000. *Random data: Analysis and Measurement Procedures*. John Wiley and Sons, 3rd ed, Canada.

Bendschneider, K., Robinson, R. J., 1952. A new spectrophotometric method for the determination of nitrite in sea water. *Journal Marine Research 45*, 136-140.

Benson, B. B., Krause, J. R., 1984. The concentration and isotopic fractionation of oxygen dissolved in freshwater and seawater in equilibrium with atmosphere. *Limnology and Oceanography* 29, 620-632.

Bensoussan, N., Romano, J. C., El-Haikali, B., Lafont, M. G., 2004. Importance du choix des échelles de temps pertinentes pour l'étude du fonctionnement d'écosystème marins littoraux. *Compte Rendus Geoscience* 336, 909-918.

Bentaleb, I., Fontugne, M., Descolas-Gros, C., Girardin, C., Mariotti, A., Pierre, C., Brunet, **C., Poisson, A., 1998**. Carbon isotopic fractionation by plankton in the Southern Indian Ocean: relation between $\delta^{13}C$ of particulate organic carbone and dissolved carbon dioxide. *Journal of Marine Systems 17*, 39-58.

Berthome, J. P., 1994. Marel: un réseau automatisé de veille pour l'environnement littoral. *Equinoxe* 47-48, 34-35.

Best, A. A., Wither, A. W., Coates, S., 2007. Dissolved oxygen as a physico-chemical supporting element in the weter framework directive. *Marine Pollution Bulletin* 55, 53-64.

Béthoux, J. P., Morin, P., Ruiz-Pino, D. P., 2002. Temporal trends in nutrient ratios: chemical evidence of Mediterranean ecosystem changes driven by human activity. *Deep-Sea Research II* 49, 2007-2016.

Billen G., Garnier, J., 1999. Nitrogen transfer through the Seine drainage network: A budget based on the application of the RIVERSTRAHLER Model. *Hydrobiologia* 410, 139-150.

Billen, G., Garnier, J., 2007. River basin nutrient delivery to the coastal sea: Assessing its potential to sustain new production of non-siliceous algae. *Marine Chemistry* 106, 148-160.

Blackford, J. C., Gilbert, F. J., 2007. pH variability and CO_2 induced acidification in the north sea. *Journal of Marine Systems* 64, 229-241.

Blackford, J. C., 2010. Prediction the impacts of ocean acidification: challenges from an ecosystem perspective. *Journal of Marine Systems* 81, 12-18.

Blain, S., Guillou, J., Tréguet, P., Woerther, P., Delauney, L., Follenfant, E., Gontier, O., Hamon, M., Leildé, B., Masson, A., Tartu, C., Vuillemin, R., 2004. High frequency monitoring of the coastal environment using the Marel buoy. *Journal of Environment Monitoring* 6, 569-575.

Bodineau, L., Thoumelin, G., Wartel, M., 1999. Fluxes and seasonal changes in composition of organic matter in the English Channel. *Continental Shelf Research* 19, 2101-2119.

Boncœur, J., Noël, J. F., Sabourin, A., Tsang King Sang, J., 2007. La gouvernance des aires marines protégées: le projet de parc marin en Iroise, un exemple de processus participatif ? *Monde en développement* 2, 138, 77-92.

Borja, A., 2005. The European water framework directive: A challenge for nearshore, coastal and continental shelf research. *Continental Shelf Research* 25, 1768-1783.

Boudouresque, C. F., Verlaque, M., 2002. Biological pollution in the Mediterranean sea: Invasive versus introduced macrophytes. *Marine Pollution Bulletin* 44, 32-38.

Breton, E., Sautour, B., Brylinsky, J. M., 1999. No feeding on *Phaeocystis sp*. as solitary cells (post-bloom period) by the copepod *Temora longicornis* in the coastal waters of the English Channel. *Hydrobiologia* 414, 13-23.

Brunet, C., Brylinski, J. M., Bodineau, L., Thoumelin, G., Bentley, D., Hilde, D., 1996. Phytoplankton Dynamics during the spring bloom in the South-eastern English Channel. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 43, 469-483.

Brylinski, J. M., Bentley, D., Quisthoudt, C., 1988. Discontinuité écologique et zooplancton (Copépodes) en Manche orientale. *Journal of Plankton Research* 10, 503-513.

Brylinski, J. M., Lagadeuc, Y., 1990. L'interface eaux côtières/ eaux du large dans le Pas de Calais (côte française): une zone frontale. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 311 (2), 535-540.

Brylinski, J. M., Lagadeuc, Y., Gentilhomme, V., Dupont, J. P., Lafite, R., Dupeuble, P. A., Huault, M. F., Auger, Y., Puskaric, E., Wartel, M., Cabioch, L., 1991. Le fleuve côtier, un phénomène hydrologique important en Manche orientale. Exemple du Pas de Calais. *Oceanologica Acta 11*, 197-203.

Brylinski, J. M., Brunet, C., Bentley, D., Thoumelin, G., Hilde, D., 1996. Hydrography and phytoplankton biomasse in the Eastern English Channel in spring 1992. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 43, 507-519.

Brzezinski, M. A., 1985. The Si:C:N ratio of marine diatoms, interspecific variability and the effect of some environmental variables. *Journal of Phycology* 21, 347-357.

Cachot, J., Dégremont, C., 2009. *Quel est le risque génotoxique en estuaire de la Seine* ? Fascicule Seine-Aval, 2.2, 70.

Caldeira, K., Wickett, M. E., 2005. Ocean model predictions of chemistry changes from carbon dioxide emission to the atmosphere and ocean. *J. Geophys. Res.* 110, C09S04.

Cardoso, P. G., Raffaelli, D., Lillebo, A. I., Verdlhos, T., Pardal, M. A., 2008. The impact of extreme flooding events and anthropogenic stressors on the macrobenthic communities' dynamics. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 76, 553-565.

Cariou, T., Macé, E., Morin, P., 2002. *La série océanographique littorale Estacade de l'Observation Océanologique de Roscoff: Résultats des observations 1985-2002.* Rapport, Observatoire océanologique de Roscoff, France, published.

Carritt, D. E., Carpentier, J. H., 1966. Comparison and evaluation of currently employed modification of the Winkler method for determining dissolved oxygen in sea water. *Journal Marine Research* 24, 286-318.

CETMEF, 2005. *Suivi scientifique de Port 2000, utilisation du réseau MAREL baie de Seine: état de référence (1998-2001), suivi des travaux (2002-2004), compléments d'analyse*. Rapport Cetmef, novembre 2005.

Chatelain, M., Guizien, K., 2010. Modelling coupled turbulence-dissolved oxygen dynamics near the sediment-water interface under wind waves and sea swell. *Water Research* 44, 1361-1372.

Chikhaoui, M. A., Hlaili, A. S., Mabrouk, H. H., 2008. Réponses saisonnières du phytoplancton aux apports d'enrichissement N :N :P dans la lagune de Bizerte (Sud-Ouest de la Méditerranée). *Comptes Rendus Biologie* 331, 389-408.

Cifuentes, L. A., Sharp, J. H., Fogel, M. L., 1988. Stable carbon and nitrogen isotope biogeochemistry in the Delaware estuary. *Limnology and Oceanography* 35, 1102-1115.

Cloern, J. E., Jassby, A. D., 2010. Patterns and scales of phytoplankton variability in estuarine-coastal ecosystems. *Estuarines and Coasts* 33, 230-241.

Collomb, G., Härdle,W., 1986. Strong uniform convergence rates in robust nonparametric time series analysis and prediction: Kernel regression estimation from dependent observations. *Stochastic Process and Application* 23, 77-89.

Copin-Montégut, G., 1996. *Chimie de l'eau de mer*. Institut océanographique, Paris.

Corrsin, S., 1951. On the spectrum of isotropic temperature fluctuations in an isotropic turbulence. *Journal of Applie Physics* 22, 469pp.

Cotonnec, G., Brunet, C., Sautour, B., Thoumelin, G., 2001. Nutritive value and selection of food particles by copepods during a spring bloom of *Phaeocystis sp*. in the English Channel, as Determined by pigment and Fatty Acid Analyses. *Journal of Plankton Research* 23, 693-703.

Cótrim Marques, S., Azeiteiro, U. M., Martinho, F., Pardal, M. A., 2007. Climate variability and planktonic communities: The effect of an extreme event (severe

drought) in a southern European estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 73, 725-734.

Dauvin, J. C., Joncourt, M., Latrouite, D., Raguénès, G., 1989. Température et salinité de l'eau de mer au large de Roscoff de 1983 à 1987. *Cahier de Biologie Marine* 30, 5-10.

Dauvin, J. C., Joncourt, M., Birrien, J. L., 1991. Température et salinité de l'eau de mer au large de Roscoff de 1988 à 1990. *Cahier de Biologie Marine* 32, 545-550.

Dauvin, J., C., 1997. Les biocénoses marines et littorales françaises des côtes Atlantiques, Manche et mer du Nord synthèse, menaces et perspectives. *Patrimoines Naturels* 28, 1-359.

Dauvin, J. C., Dewarumez, J. M ; Gentil, F., 2003. Liste actualisée des espèces d'Annélides Polychètes présentes en Manche. *Cahier de Biologie Marine* 44, 67-95.

Dauvin, J. C., Thiébaut, E., Gomez Gesteira, J. L., Ghertsos, K., Gentil, F., Ropert, M., Sylvand, B., 2004. Spatial structure of a subtidal macrobenthic community in the Bay of Veys (Western bay of Seine, English Channel). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 307, 217-235.

Dauvin, J. C., 2006. Mer côtière à forte pression anthropique propice au développement d'une gestion intégrée: Exemple du basin oriental de la Manche (Atlantique Nord Est). *Revue des Sciences de l'Environnement* 7, 14pp.

Dauvin, J. C., 2008. The main characteristics, problems and prospects for Western European Coastal seas. *Marine Pollution Bulletin* 57, 22-40.

Décamps, H., 2010. Ecosystems and extreme climatic events Ecosystèmes. *Compte Rendus Geoscience* (in press).

Delmas, R., Hafsaoui, M., Le Jehan, S., Quéguiner, B., Tréguer, P., 1983. Impact de fertilisations à forte variabilité saisonnière et annuelle sur le phytoplancton d'un ecosystème eutrophe. *Oceanologica Acta*, 81-85.

Deloffre, J., Lafite, R., Lesueur, P., Verney, R., Lesourd, S., Cuvilliez, A., Taylor, J., 2006. Controlling factors of rhythmic sedimentation processes on an intertidal estuarine mudflat-Role of the turbidity maximum in the macrotidal Seine estuary, France. *Marine Geology* 235, 151-164.

Devreker, D., Souissi, S., Seuront, L., 2004. Development and mortality of the first naupliar stages of *Eurytemora affinis* (Copepoda, Calanoide) under different conditions of salinity and temperature. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 303. 31-46.

Devreker, D., Souissi, S., Molinero, J. C., Nkubito, F., 2008. Trade-offs of the copepod *Eurytemora affinis* in mega-tidal estuaries: insights from high frequency sampling in the Seine estuary. *Journal of Plankton Research* 30, 1329-1342.

Devreker, D., Souissi, S., Winkler, G., Forget-Leray, J., Leboulenger, F., 2009. Effects of salinity, temperature and individual variability on the reproduction of Eurytemora Affinis (Copepoda; Calanoide) from the Seine estuary: A laboratory study. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 368, 113-123.

Diaz, R. J., Rosenberg, R., Ansell, A. D., Gibson, R. N., Barnes, M., 1995. Marine benthic hypoxia: a review of its ecological effects and behavioural responses of benthic macrofauna. *Oceanography and Marine Biology Annual Review* 33, 245-303.

Direction Régionale de l'Environnement Haute–Normandie, 2004. Caractéristiques hydrologiques des principaux bassins versants régionaux (http ://www.haute-normandie-developpement-durable.gouv.fr).

Directive 2000/60/CE du 23 octobre 2000 du Parlement européen et du Conseil établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau. *Official Journal of the European Communities* 22.12.2000, pp. L327/1-327/21.

Downing, J. A., 1997. Marine nitrogen: Phosphorus stoichiometry and the global N:P cycle. *Biogeochemistry* 37, 237-252.

Dur, G., 2004. *Modelling of the physical and biological process at different spatio-temporal scales in the case of Eurytemora Affinis from the Seine estuary: data analysis and individual-based modelling*. Liège University, Master Thesis, 107pp.

Dur, G., Schmitt, F.G., Souissi, S., 2007. Analysis of high frequency temperature time series in the Seine estuary from the Marel autonomous monitoring buoy. *Hydrobiologia* 588, 59-68.

Dur, G., Souissi, S., Devreker, D., Ginot, V., Schmitt, G. F., Hwang, J. S., 2009. An individual-based model to study the reproduction of egg bearing copepods : Application to *Eurytemora Affinis* (Copepoda Calanoida) from the Seine estuary, France. *Ecological Modelling* 220, 1073-1089.

Durrieu, G., Nguyen, T. M. N., Sow, M., 2009. Comparaison d'estimateurs de regression non paramètrique : application en valvométrie. *Actes des 41 ième Journée de Statistique.*

Ediger, D., Tuğrul, S., Yilmaz, A., 2005. Vertical profiles of particulate organic matter and its relationship with chlorophyll-*a* in the layer of the NE Mediterranean Sea. *Journal of Marine Systems* 55, 311-326.

Embrechts, P., Klüppelberg, C., Mikosch, T., 1997. *Modelling extremal events for insurance and finance*. Springer, New York.

Fairbridge, R. W., 1980. The estuary: its definition and geodynamic cycle. In: E. Olausson and I. Cato (Eds.), *Chemistry and Biogeochemistry of estuaries*. Wiley, New-York, pp. 1-35.

Faure, V., Pinazo, C., Torréton, J. P., Jacquet, S., 2010. Modelling the spatial and temporal variability of the SW lagoon of New Caledonia I: A new biogeochemical model based on microbial loop recycling. *Marine Pollution Bulletin* 61, 465-479.

Forget-Leray, J., Souissi, S., Devreker, D., Cailleaud, K., Budzinski, H., 2009. Ecological status and health of the plankton copepod *Eurytemora affinis* in the Seine Estuary. In: C. Amiard-Triquet and P. S. Rainbow (Eds.), *Environmental Assessment of Estuarine Ecosystems*, CRC Press, New-York, pp. 199-225.

Fouillaron, P., Claquin, P., L'Helguen, S., Huonnic, P., Martin-Jézéquel, V., Masson, A., Longphuirt, S. N., Pondaven, P., Thouzeau, G., Leynaert, A., 2007. Response of a phytoplancton community in increased nutrient inputs : A mesocosm experiment in the Bay of Brest (France). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 351, 188-198.

Franke, U., Hutter, K., Jöhnk, K., 1999. A Physical-biological coupled model for algal dynamics in Lakes. *Bulletin of Mathematical Biology* 61, 239-272.

Frankignoulle, M., 1994. A complete set of butter factors for acid/base CO_2 system in seawater. *Journal Marine System* 5, 111-118.

Frankignoulle, M., Gattuso, J. P., Biondo, R., Bourge, I., Copin-Montégut, G., Pichon, M., 1996. Carbon fluxes in coral reefs. 2. Eulerian study of inorganic carbon dynamics and measurement of air-sea CO_2 exchanges. *Marine Ecology Progress Series* 145, 123-132.

Franks, P. J. S., 2005. Plankton patchiness, turbulent transport and spatial spectra. *Marine Ecology Progress Series* 294, 295-309.

Fréchet, M., 1927. Sur la loi de probabilité de l'écart maximum. *Ann. Soc. Math. Polon*. 6, 93-116.

Frisch, U., 1995. *Turbulence: the legacy of AN Kolmogorov*. Cambridge University Press.

Frontier, S., Pichod-Viale, D., Leprêtre, A., Davoult, D., Luczak, C., 2008. *Ecosystèmes: Structure, Fonctionnement, Evolution*. 4ème édition. Dunod, Paris.

Gailhard, I., Durbec, J. P., Beliaeff, B., Sabatier, R., 2003. Ecologie du phytoplankton sur les côtes françaises : comparaison inter-sites. *Compte rendus Biologie* 326, 853-863.

Gentilhomme, V., Lizon, F., 1998. Seasonal cycle of nitrogen and phytoplankton biomass in a well mixed coastal system (Eastern English Channel). *Hydrobiologia* 361. 191-199.

Gilpin, L. C., Davidson, K., Roberts, E., 2004. The influence of changes in nitrogen: silicon ratios on diatom growth dynamics. *Journal of Sea Research* 51, 21-35.

GIP Seine-Aval, 2008a. *Compilation des profiles bathymétriques de la Seine, de 1824 à 2005*. Atlas et représentation graphique de donnée (http// Seine-aval.crihan.fr).

GIP Seine-Aval, 2008b. *Contextes climatique, morphologiques et hydro-sédimentaire : Apports en eau douce à l'estuaire de la Seine*. Fiche thématique Seine-Aval (http// Seine-aval.crihan.fr).

Gómez, F., Souissi, S., 2008. The impact of the 2003 summer heat wave and the 2005 late cold wave on the phytoplankton in the north-eastern English Channel. *Comptes Rendus Biologie* 331, 678-685.

Grégoire, M., Soetaert, K., 2010. Carbone, nitrogen, oxygen and sulfide budjets in the Black Sea: A biogeochemical model of the whole water column coupling the oxic and anoxic parts. *Ecological modeling* 221, 2287-2301.

Guézennec, L., 1999. *Hydrodynamique et transport en suspension du matériel particulaire fin dans la zone fluviale d'un estuaire macrotidal : l'exemple de l'estuaire de la Seine* (*France).* Thèse de doctorat, Université de Rouen, France.

Guillaud, J. F., 1993. *Les apports en sels nutritifs dans l'estuaire de la Seine.* Ifremer. Rapport Interne DEL/93.04. Brest, 32pp. Unpublished.

Guillaud, J. F., Souchu, P., 2001. *Les indicateurs de l'eutrophisation, leurs valeurs-seuils éventuelles.* In : L'eutrophisation des eaux marines et saumâtres en Europe, en particulier en France. Ménesguen (coord.). Rapport Interne. Ifremer, Del/Ec/01.01 pour la Commission Européenne DG. ENV. B1, 32-35.

Guilyardi, E., 2001. Quand le sel de l'océan pimente le climat. *La Météorologie* 33, 34-44.

Gumbel, E. J., 1958. *Statistics of extremes*. Columbia University Press.

Gypens, N., Lacroix, G., Lancelot, C., 2007. Causes of variability in diatom and *Phaeocystis* blooms in Belgian coastal waters between 1989 and 2003: A model study. *Journal of Sea Research* 57, 19-35.

Hafsaoui, M., Quéguiner, B., Tréguer, P., 1985. Production primaire et facteur limitant la croissance du phytoplancton en rade de Brest (1981-1983). *Océanis* 11, 181-195.

Hallegraeff, G. M., Bolch, C. J., 1991. Transport of diatom dinoflagellate cysts via ship's ballasts water. *Marine Pollution Bulletin* 22, 27-30.

Hansen, P. J., 2002. Effect of high pH on the growth and survival of marine phytoplankton: implications for species succession. *Aquatic Microbial Ecology* 28, 279-288.

Harley, C. D. G., Randall Hughes, A., Hultgren, K. M., Miner, B. G., Sorte, C. J. B., Thornber, C. S., Rodriguez, L. F., Tomanek, L., Williams, S. L., 2006. The impacts of climate change in coastal marine systems. *Ecology Letters* 9, 228-241.

Heisler, J., Glibert, P. M., Burkholder, J. M., Anderson, D. M., Cochlan, W., Dennison, W. C., Dortch, Q., Gobler, C. J., Heil, C. A., Humphries, E., Lewitus, A., Magnien, R., Marshall, H. G., Sellner, K., Stockwell, D. A., Stoecker, D, K., Suddleson, M., 2008. Eutrophication and Harmful algal blooms: a scientific consensus. *Harmful Algae* 8, 3-13.

Herbland, A., Le Bouteiller, A., 1983. Dynamique du phytoplancton et matière organique particulaire dans la zone euphotique de l'Atlantique Equatorial. *Marine Biology* 72, 265-278.

Herut, B., Almogi-Labin, A., Jannink, N., Gertman, I., 2000. The seasonal dynamics of nutrient and chlorophyll *a* concentrations on the SE Mediterranean shelf-slope. *Oceanologica Acta* 23, 771-782.

Hill, B. M., 1975. A simple general approach to inference about the tail of distribution. *Annals of Statistics* 3. 1163-1174.

Hinga, K. R., 2002. Effects of pH on coastal marine phytoplankton. *Marine Ecology Progress Series* 300, 238-281.

Hoch, T., Garreau, P., 1998. Phytoplankton dynamics in the English Channel a simplified three-dimensional approach. *Journal of Marine Systems* 16, 133-150.

Huang, Y., Schmitt, F. G., Lu, Z., Liu, Y., 2009. Analysis of daily river flow fluctuations using Empirical Mode Decomposition and arbitrary order Hilbert spectral analysis. *Journal of Hydrology* 373, 103-111.

Huppert, A., Blasius, B., Stone, L., 2002. A model of phytoplankton blooms. *The American Naturalist* 159, 156-171.

Iglesias-Rodriguez, M. D., Halloran, P. R., Rickaby, R. E. M., Hall, I. R., Colmenero-Hidalgo, E. Gittins, J. R., Green, D. R. H., Tyrrell, T., Gibbs, S. J., Dassow, P. V., Rehm, E., Armbrust, E. V., Boessenkool, K. P., 2008. Phytoplankton Calcification in a High-CO_2 World. *Science* 320, 336-340.

In-Situ Inc., 2006. *Multi-parameter TROLL 9500, WQP-100. Operator's Manuel*. Water Quality Troll, USA, 158pp.

Jeng, Y. N., Huang, P. G., 2004. *Computational Mechanics*. Tsinghua University Press and Springer, Verlag.

John, H. R., Dunstan, W. M., 1971. Nitrogen, Phosphorus and Eutrophication in the Coastal Marine Environment. *Science* 171, 1008-1013.

Jordan, M. B., Joint, I., 1998. Seasonal Variation in Nitrate:Phosphate ratios in the English Channel 1923-1987. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 46, 157-1674.

Karafistan, A., Martin, J. M., Rixen, M., Beckers, J. M., 2002. Space and time distributions of phosphate in the Mediterranean Sea. *Deep Sea Research* I 49, 67-82.

Karl, D., Lukas, R., 1996. The Hawaii Ocean Time-Series (HOT) Program: Background, rationale and field implementation. *Deep-Sea Research II* 43, 129-156.

Kimmel, D. G., David Miller, W., Roman, M. R., 2006. Regional scale climate forcing of mesozooplankton dynamics in Chesapeake Bay. *Estuaries and Coasts* 29, 375-387.

Klein, B., Sournia, A., 1987. A daily study of the diatom spring bloom at Roscoff (France) in 1985: II. Phytoplankton pigment composition studied by HPLC analysis. *Marine Ecology Progress Series* 37, 265-275.

Klein Tank, A. M. G. et al., 2002. Daily dataset of 20th-century surface air temperature and precipitation series for the European climate Assessment. *International Journal of Climatology 22, 1441-1453.*

Kolmogorov, A. N., 1941. The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds number. *Compte rendus de l'Academie Science de l'URSS* 30, 299pp.

Kolmogorov, A. N., 1962. A refinement of previous hypotheses concerning the local structure of turbulence in a viscous incompressible fluid at high Reynolds number. *Journal of Fluid Mechanics* 13, 82-85.

Koroleff, F., 1969. Direct determination of a ammonia in natural waters as indophenol blue. ICES/CM/1969/C:21. *Hydrography Committee, Ref: L (Plankton C.),* 4pp.

Kress, N., Herut, B., 2001. Spatial and seasonal evolution of dissolved oxygen and nutrients in the Southern Levantine Basin (Eastern Mediterranean Sea): Chemical characterization of the water masses and inferences on the N: P ratios. *Deep Sea Research I* 48, 2347-2372.

Kress, N., Thingstad, T. F., Herut, B., Zohary, T., Pitta, P., Psarra, S., Polychronaki, T., Spyres, G., Mantoura, F., Tanaka, T., Rassoulzadegan, F., Groom, S., Krom, M., 2005. Effect of P and N addition to oligotrophic Eastern Mediterranean waters influenced by nearshore waters: A microcosm experiment. *Deep Sea Research II 52*, 3054-3073.

Krom, M. D., Brenner, S., Kress, N., Gordon, L. I., 1991. Phosphorus limitation of primary productivity in the E. Mediterranean Sea. *Limnology and Oceanography* 36, 424-432.

Krom, M. D., Herut, B., Mantoura, R. F. C., 2004. Nutrient budget for the Eastern Mediterranean: Implications for phosphorus limitation. *Limnology and Oceanography* 49, 1582-1592.

Kucuksezgin F., Kontas, A., Altay O., Uluturhan E., 2005. Elemental composition of particulate matter and nutrient dynamics in the Izmir Bay (Eastern Aegean). *Journal of Marine Systems* 56, 67-84.

Lagadeuc, Y., Brylinsky, J. M., Aelbrecht, D., 1997. Temporal variability of the vertical stratification of a front in a tidal Region of Freshwater Influence (ROFI) system. *Journal of Marine Systems* 12, 147-155.

Lancelot, C., Mathot, S., 1987. Dynamics of a phaeocystis dominated spring bloom in Belgian coastal waters. I. Phytoplanktonic activities and related parameters. *Marine Ecology Progress Series* 37, 239-248.

Lee, J. H. W., Wu, R. S. S., Cheung, J. K., Wong, P. P. S., 1991. Dissolved oxygen variations in Marine Fish culture zone. *Journal of Environmental Engeneering* 117, 799-815.

Lee, Y. J., Lwiza, K., 2005. Interannual variability of temperature and salinity in shallow water: Long Island Sound, NewsYork. *Journal Geosphysics Research* 110. C09022, doi10.1029/2004JC002507.

Lefebvre, A., Delpech, J. P., 2004a. *Le bloom de phaeocystis en Manche orientale : nuisances socio-économiques et /ou écologiques*. Rapport. Ifremer/R.INT.DEL/BL/RST/04/01, 36pp.

Lefebvre, A., 2004b. Seasonal trends of the phaeocystis sp and nutrients dynamics in the eastern English Channel. *Journal of Research Oceanography* 28, 57-61.

Lefebvre, A., 2008a. *Modélisation intégrée des transferts de nutriments depuis les bassins versants de la Seine, la Somme et l'Escaut jusqu'en Manche Mer du Nord*. Rapport Final projet Liteau II. 04/121510/MF, 110 pp.

Lefebvre, A., 2008b. *MAREL Carnot: Valorisation des données d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer).* Rapport 3, bilan de l'année 2006. Ifremer/RST.LER.BL/08.04, 23 pp.

Lefebvre, A., Caboche, J., 2008c. *Suivi régional des nutriments sur le littoral Nord-Pas de Calais/Picardie*. Bilan de l'année 2007. Ifremer/RST.LER.BL/08.03, 187pp.

Legendre, P., Legendre, L., 1998. *Numerical Ecology*. Elsevier, Amsterdam.

Le Hir, P., Silva-Jacinto, R., 2001. *Courants, Vagues et Marées : les mouvements de l'eau*. Programme Scientifique Seine Aval, Ifremer, Plouzané, 31pp.

Lejeune, P., Schmitt, F. G., Zongo, S. B., 2009. *Etude des couplages existant à haute fréquence entre la concentration en oxygène dissous, la température et la lumière*. Rapport de stage, Avril-Mai 2009. Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences. Wimereux, France.

Lomas, M., Bates, N., Knap, D., Lukas, R., Landry, M., Bidigare, R., Steinberg, D., Carlson, C., 2002. Refining our understanding of ocean biogeochemistry and ecosystem functioning. *EOS* 83, 559-561.

Lorenzen, C. C., 1967. A method for the continuous measurements of in vivo chlorophyll concentration. *Deep Sea Research* 13, 223-227.

Lovejoy, S., Currie, W. J. S., Tessier, Y., Claereboudt, M. R., Bourget, E., Roff, J. C., Schertzer, D., 2001. Universal multifractales and ocean patchiness: phytoplankton, physical fields and coastal heterogeneity. *Journal of Plankton Research* 23, 117-141.

Lumley, J., 2007. *Stochastics Tools in Turbulence*. Dover Publications, INC, New-York.

Maguer, J. F., L'Helguen, S., Madec, C., LE Corre, P., 1998. Absorption et Régénération de l'azote dans le système brassé de la Manche: production nouvelle et régénérée. *Oceanologica Acta* 21, 861-870.

Marcus N. H., Lutz, R. V., 1994. Effects of anoxia on the viability of subitaneous eggs of planktonic copepods. *Marine Biology* 123, 83-87.

Martin-Jézéquel, V., Hildebrand, M., Brzezinski, M. A., 2000. Silicon metabolism in diatoms: implication for growth. *Journal of Phycology* 36, 821-840.

Marty, J. C., Chiavérini, J., Pizay, M. D., Avril, B., 2002. Seasonal and interannual dynamics of nutrients and phytoplankton pigments in the western Mediterranean Sea at the DYFAMED time-series station (1991-1999). *Deep-Sea Research II* 49, 1965-1985.

Marty, J. C., Chiavérini, J., 2010. Hydrological changes in the Ligurian Sea (NW Mediterranean, DYMAFED site) during 1995-2007 and biogeochemical consequences. *Biogeosciences* 7, 2117-2128.

Mazumder, A., Taylor, W. D., McQueen, D. J., Lean, D. R. S., 2006. Effects of fish and plankton on lake temperature and mixing depth. *Science, New Series* 247, 312-315.

Ménesguen, A., Salomon, J. C., 1988. Eutrophication modelling as a tool for fighting against ulva coastal mass blooms. In: B. A. Shrefler and O. C. Zienkiewiez (Eds.) *Computer modelling in ocean engineering.* Balkema.

Ménesguen, A., 2001. *L'eutrophisation des eaux marines et saumâtre en Europe, en particulier en France*. Rapport d'étude. Ifremer DEL/EC/01.02, 60 pp.

Ménesguen, A., 2003. *''Les marées vertes'' en Bretagne, la responsabilité du nitrate*. Rapport/ ouvrage. http://www. Ifremer.fr/docelec/doc/2000/rapport-143.pdf.

Minier, C., Amara, R., 2009. From pollution to altered physiological performance: The case of flatfish in the Seine Estuary. In: C. Amiard-Triquet, and P. S. Rainbow (Eds.), *Environmental Assessment of Estuarine Ecosystems*, CRC Press, New-York, pp. 199-225.

Monin, A. S., Yaglom, A. M., 2007. *Statistical fluid mechanics vd II.* Dover Publications, INC.

Mouny, P., 1998. *Stucture spatio-temporelle du zooplankton et du suprabenthos de l'estuaire de la Seine. Dynamique et rôle des principales espèces dans la chaîne trophique*. Thèse de doctorat, Museum National d'Histoire Naturelle, Paris.

Mullin, J. B., Riley, J. P., 1955. The spectrophotometric determination of silicate-silicon in natural waters with special reference to sea water. *Analytica Chimica Acta* 12, 162-170.

Murphy, J., Riley, J. P., 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta* 27, 31-36.

Neal, C., Hilton, J., Wade, A. J., Neal, M., Wickham, H., 2006. Chlorophyll-a in the rivers of eastern England. *Science of the Total Environment* 365, 84-104.

Newton, A., Mudge, S. M., 2003. Température and Salinity regimes in a shallow, mesotidal lagoon, the Ria Formosa, Portugal. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 57, 73-85.

O'Boyle, S., McDermott, G., Wilkes, R., 2009. Dissolved oxygen levels in estuarine and coastal waters around Ireland. *Marine Pollution Bulletin* 58, 1657-1663.

Obukhov, A. M., 1941. Spectre energy distribution in a turbulent flow. *Dokl. Akad. Nauk SSSR* 32 (1), 22-24.

Obukhov, A. M., 1949. Structure of the temperature field flows. *Izv. Akad. Nauk SSSR Ser. Geog. Geofiz*, 13, 58-69.

Paerl, H. W., 2006. Assessing and managing nutrient-enhanced eutrophication in estuarine and coastal waters: Interactive effects of human and climatic perturbations. *Ecological Engineering* 26, 40-54.

Pannard, A., Claquin, P., Klein, C., Le Roy, B., Véron, B., 2008. Short-term variability of the phytoplankton community in coastal ecosystem in response to physical and chemical conditions changes. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 80, 212-224.

Pareto, V., 1897. *Cours d'Economie Politique.* Lausane.

Pedersen, M. F., Hansen, P. J., 2003. Effects of high pH on a natural marine planktonic community. *Marine Ecology Progress Series* 260, 19-31.

Peperzak, L., 2003. Climate change and harmful algal blooms in the North Sea. *Acta Oecologica* 24, S139-S144.

Plat, T., Denman, K. L., 1975. Turbulence structure function in turbulent shear flows. *Annu. Rev. Ecol. Syst.,* 6, 189-210.

Piriou, J. Y., 1986. *Les marées vertes sur le littoral Breton. Bilan 1985*. Rapport Ifremer/Dero-86.29-EL.

Pope, S. B., 2000. *Turbulence flows*. Cambridge University Press.

Preumont, A., 1990. *Vibrations aléatoires et analyse spectrale*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.

Redfield, A. C., 1958. The biological control of chemical factors in the environment. *American Scientist* 46, 205-221.

Redfield A.C., Ketchum B.H., Richards, F. A., 1963. The influence of organisms on the composition of sea-water. In: M. N. Hill and others (Eds.), *The Sea v 2*, New-York, pp. 26-77.

Revilla, M., Franco, J., Bald, J., Borja, A., Laza, A., Sergio, S., Valencia, V., 2009. Assessment of the phytoplankton ecological status in the Basque coast (northern Spain) according to the European Water Framework Directive. *Journal of Sea Research* 61, 60-67.

Richardson, L. F., 1922. *Weather Prediction by Numerical Process*. Cambridge University Press.

Richlen, M. L., Morton, S. L., Jamali, E. A., Rajan, A., Anderson, D. M., 2010. The catastrophic 2008-2009 red tide in the Arabian gulf región, with observations on the identification and phylogeny of the fish-killing dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides. Harmful Algae* 9, 163-172.

Riebesell, U., Zondervan I., Rost, B., Tortell, P. D., Zeebe, R. E., Morel, F. M. M., 2000. Reduced calcification of marine plankton in response to increased atmospheric CO2. *Nature* 407, 364-367.

Riegman, R., Noordeloos, A. A. M., Cadée, G. C., 1992. *Phaeocystis* blooms and eutrophication of the continental coastal zones of the North Sea. *Marine Biology* 112, 479-484.

Rodier, J., 1996. *L'analyse de l'eau.* 8 ème édition. DUNOD, Paris, 1383pp.

Salomon, J. C., 1976. *Modèle mathématique de la propagation de la marée en estuaire et des transports sableux associés; application aux estuaires de la Loire et de la Seine*. Thèse de l'Université de Bretagne occidentale.

Sazhin, A. F., Artigas, L. F., Nejstgaard, J. C., Frischer, M. E., 2006. The colonization of two Phaeocystis species (Prymnesiophyceae) by pennate diatoms and other protists: a significant contribution to colony biomasse. *Biogeochemistry* 83, 137-145.

Schertzer, D., Lovejoy, S., Schmitt, F. G., Chigirinskaya, Y., Marsan, D., 1997. Multifractal cascade dynamics and turbulent intermittency. *Fractals* 5, 427-471.

Schmitt, F. G., Schertzer, D., Lovejoy, S., Brunet, Y., 1994. Empirical study of multifractal phase transitions in atmospheric turbulence. *Nonlinear Processes in Geophysics* 1, 95-104.

Schmitt, F. G., 2005. Relating lagrangian passive scalar scaling exponents to eulerien scaling exponents in turbulence. *European Physical Journal B* 48, 129-137.

Schmitt, F. G., 2006. *Outils Multi-échelles pour l'estimation des flux particulaire et dissous ; acquisition et analyse de données et validation de l'outil*. Rapport Seine-Aval 3, 29pp.

Schmitt, F. G., Dur, G., Souissi, S., Zongo, S. B., 2008. Statistical properties of turbidity oxygen and pH fluctuations in the Seine river estuary (France). *Physica A* 387, 6613-6623.

Seuront, L., Schmitt, F. G., Shertzer, D., Lagadeuc, Y., Lovejoy, S., 1996a. Multifractal intermittency of eulerian and Lagrangian turbulence of ocean temperature and plankton fields. *Nonlinear Processes in Geophysics* 3, 236-246.

Seuront, L., Schmitt, F. G., Lagadeuc, Y., Shertzer, D., Lovejoy, S., Frontier, S., 1996b. Multifractal analysis of phytoplankton biomass and temperature in the ocean. *Geophysical Research Letters* 23, 3591-3594.

Seuront, L., 1997. Distribution inhomogène multi-échelle de la biomasse phytoplanctonique en milieu turbulent. *Journal de Recherche Océanograhique* 22, 9-16.

Seuront, L., Gentilhomme, V., Lagadeuc, Y., 2002. Small-scale nutrient patches in tidally mixed coastal waters. *Marine Ecology Progress Series* 232, 29-44.

Seuront, L., Schmitt, F. G., 2004. Eulerian and Lagrangian properties of biophysical intermittency in the ocean. *Geophysical Research Letters* 31, 1-4.

Smith, V. H., Tilman, G. D., Nekola, J. C., 1999. Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. *Environmental Pollution* 100, 179-196.

Sornette, D., 2000. *Critical Phenomena in Natural Sciences*. Springer, New-york.

Soudant, A., Soudant, D., Lefebvre, A., 2008. *Influence de la période et de la fréquence d'échantillonnage sur le percentile 90 et de la fluorescence*. Rapport Ifremer/R.INT.DOP/DYNECO/VIGIER, décembre 2008-17, 36 pp.

Soudant, D., Belin, C., 2009. *Evaluation DCE décembre 2008. Eléments d'expertise. Elément de qualité : phytoplancton*. Rapport DIR/DYNECO/VIGIES/09-04/DS, janvier 2009.

Sournia, A., Birrien, J. L., 1995. La série océanographique côtière de Roscoff (Manche occidentale) de 1985 à 1992. *Cahiers de Biologie Marine* 36, 1-8.

Spilmont, N., Denis, L., Artigas, L. F., Caloin, F., Courcot, L., Créach, A, Desroy, N., Gevaert, F., Hacquebart, P., Hubas, C., Janquin, M. A., Lemoine, Y., Luczak, C., Migné, A., Rauch, M., Davoult, D., 2009. Impact of the *phaeocystis* globosa spring bloom on the intertidal benthic compartment in the eastern English Channel: A synthesis. *Marine Pollution Bulletin* 58, 55-63.

Stachowitsch, M., 1991. Anoxia in the northern Adriatic Sea: Rapid dealth, slow recovery. In : R. V. Tyson and T. H Pearson (Eds.), *Modern and Ancient Continental Shelf Anoxia,* Geological Society Special Publication 58, pp 119-129.

Steinberg, D. K., Carlson, C. A., Bates, N. R., Johnson, R. J., Michaels, A. F., Anthony, H. K., 2001. Overview of the US JGOFS Bermuda Atlantic Time-series Study (BATS): a decade-scale look at ocean biology and biogeochemistry. *Deep-Sea Research* II 48, 1405-1447.

Strickland, J. D. H., Parsons, T. R., 1972. A practical handbook of seawater analysis. *Fisheries Research Board of Canada*, Ottawa, Canada.

Taguchi, F., Fujiwara, T., 2009. Carbon dioxide stored and acidified low oxygen bottom waters in coastal seas, Japan. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1-5 (in press).

Telesh, I. V., Khlebovich, V. V., 2010. Principal processes within the estuarine salinity gradient: A review. *Marine Pollution Bulletin 61*, 149-155.

Tennekes, H., Lumley, J. L., 1972. *A first course in turbulence*. The MIT Press.

Tessier, Y., Lovejoy, S., Hubert, P., Schertzer, D., Pecknold, S., 1996. Multifractal analysis and modelling of rainfall and river flows and scaling, causal transfer function. *Journal Geophysics Research D* 21, 26,427-426,440.

Thingstadt, T. F., Skjordal, E. F., Bohne, R. A., 1993. Phosphorus cycling and algal bacterial competition in sandsfjord, Western Norway. *Marine Ecology Progress Series* 99, 239-259.

Thompson, P. A., Guo, M. X., Harrison, P. J., 1992. Effects of variation in temperature, 1. On the biochemical composition of eight species of marine phytoplankton. *Journal of Phycology* 28, 481-488.

Thorpe, S. A., 2007. *An Introduction to Ocean Turbulence*. Cambridge University Press.

Turner, R. E., Rabalais, N. N., Justic, D., Dortch, Q., 2003. Futur aquatic nutrient limitations. *Marine Pollution Bulletin* 46, 1032-1034.

Tusseau, M. H., Lancelot, C., Martin, J. M., Tassin, B., 1997. 1-D coupled physical-biological model of the northwestern Mediterranean Sea. *Deep-Sea Research* II 44, 851-880.

Tzella, A., Haynes, P. H., 2007. Small-scale spatial structure in plankton distributions. *Biogeosciences* 4, 173-179.

Unesco, 1986. Progress on oceanographic tables and standards 1983-1986: work and recommendations of the Unesco/Scor/ICES/IAPSO Joint Panel. Unesco Technique. Pap. *Marine Sciences* 50, 59pp.

Vangriesheim, A., Khripounoff, A., Crassous, P., 2009. Turbidity events observed in situ along the Congo submarine channel. *Deep Sea Research II* 56, 2208-2222.

Vieira, L., Azeiteiro, U., Ré, P., Pastorinho, R., Marques, J. C., Morgado, F., 2003. Zooplankton distribution in a temperate estuary (Mondego estuary southern arm: Western Portugal). *Acta Oecological* 24, S163-S173.

Wand, M. P., Jones, M. C., 1995. *Kernel Smooting*. Chapman and Hall/ CRC, New-York.

Wang B., Wang, X., Zhan R., 2003. Nutrient conditions in the Yellow Sea and the East China Sea, Estuarine. *Coastal and Shelf Science* 58, 127-136.

Weiss, R, F., 1970. The solubility of nitrogen, oxygen and argon in water and seawater. *Deep Sea Research* 17, 721-735.

William, K. W. Li., Lewis, M. R., Harrison, W. G., 2010. Multiscalarity of the nutrient-Chlorophyll Relationship in Coastal Phytoplankton. *Estuaries and Coasts* 33, 440-447.

WOCE, 1994. *WOCE Experiment Manual, WHP office Report 90-1*, WOCE Report No.67/91, Rev.2, Woods Hole, Mass, USA.

Woerther, P., 1998. Marel, Mesures Automatisées en Réseau pour l'Environnement Littoral. *L'Eau, l'industrie, les nuisances* 217, 67-72.

Wood, E. D., Armstrong, F. A. J., Richards, F. A., 1967. Determination of nitrite in sea water by cadmium copper reduction to nitrite. *Journal of the Marine Biology Association of UK* 74, 23-31.

Wootton, J. T., Pfister, C. A., Forester, J. D., 2008. Dynamic patterns and ecological impacts of declining ocean pH in a high-resolution multi-year dataset. *PNAS*, 105, 18848-18853.

Yentsch, C. S., Menzel, D. W., 1963. A method for determination of chlorophyll and phaeophytin by fluorescence. *Deep Sea Research* 10, 221-231.

Zeebe, R. E., Wolf-Gladrow, D. A., 2001. CO_2 *in Seawater: Equilibrium Kinetics, Isotopes*. Elsevier Oceanographic Series 65. Elsevier, Amsterdam.

Zhao, Y., Schichun, S., 2006. Effects of salinity, temperature and pH on the survival of the nemertean Procephalothrix simulus Iwata, 1952. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 328, 168-176.