

Utilisation de données hautes fréquences pour l'étude des statistiques et de la dynamique de la fluorescence dans la Manche

Jonathan Derot, François G. Schmitt

Résumé

Le phytoplancton joue un rôle important dans les écosystèmes marins, et influence le cycle du carbone. Les séries temporelles issues de systèmes automatisés hautes fréquences montrent des dynamiques non-linéaires et multi-échelles. Nous analysons ici les données de fluorescence provenant de trois systèmes automatisés en point fixe, tous localisés dans la Manche (MAREL Carnot à Boulogne, MAREL Iroise près de Brest, et bouée L4 au large de Plymouth) et enregistrant des informations avec des périodicités inférieures à l'heure. Nous considérons d'un côté les statistiques, en estimant les densités de probabilité (PDF) réalisée sur l'ensemble des données ; nous nous focalisons sur deux modèles, le modèle lognormal et le modèle en loi de puissance. Nous trouvons que pour deux séries, le modèle en loi de puissance est plus proche des données et que le modèle lognormal ne s'applique pas, tandis que pour la troisième série (Iroise), les données sont lognormales. On considère ensuite la dynamique, en comparant, pour chaque site, les spectres d'énergie de la fluorescence et ceux de la température, permettant de mettre en évidence une influence de la biologie sur la dynamique, et une possible universalité des lois d'échelle ainsi estimées.

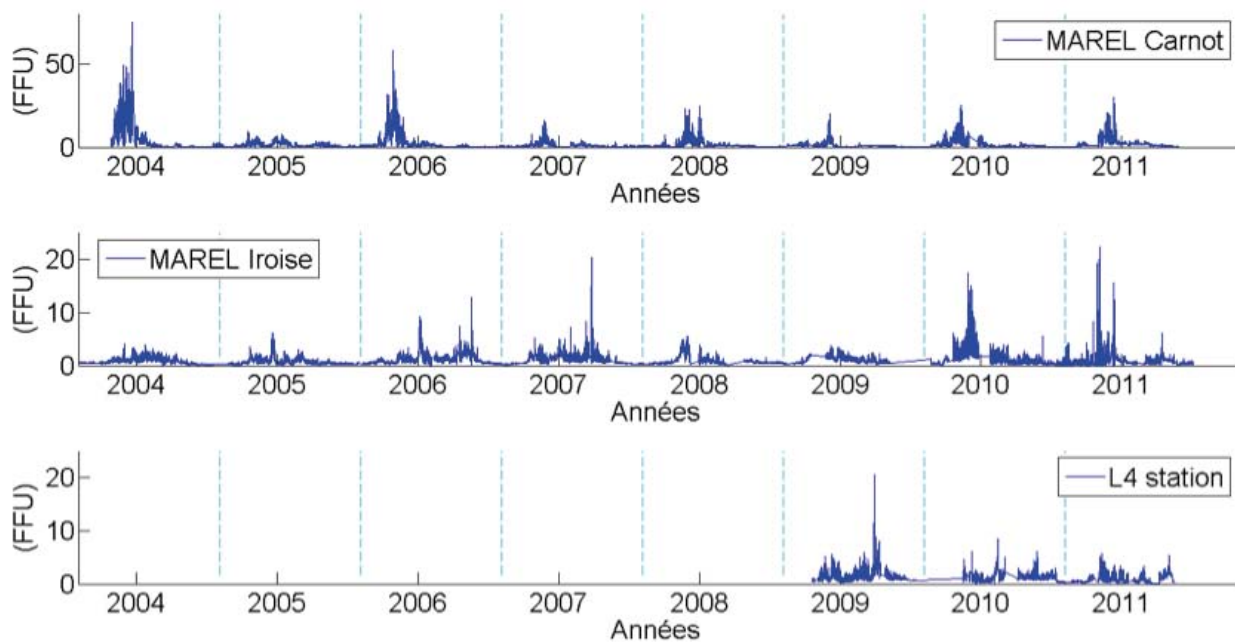
Introduction

En océanographie côtière tout comme dans les géosciences en général, les différents champs considérés possèdent de très fortes variations à toutes les échelles, aussi bien spatiales que temporelles. Ces fluctuations sont généralement la résultante de la superposition de variations déterministes associées à différents forçages astronomiques comme les cycles annuels, saisonniers, journaliers, ou liés à la marée, et de fluctuations stochastiques liées à la turbulence, aux réactions chimiques, et interactions biologiques et à d'autres facteurs. Nous nous concentrons ici sur l'étude de la dynamique du phytoplancton, et plus précisément sur l'étude de la fluorescence en tant que proxy de la biomasse phytoplanctonique. Ce paramètre biogéochimique joue un rôle clé dans l'étude des écosystèmes marins, mais sa dynamique est relativement complexe : d'un côté il est soumis à des variations stochastiques importantes en relation avec la turbulence, la dynamique des populations, la lumière, les sels nutritifs, le broutage par le zooplancton ; et de l'autre, il est lié à des variations saisonnières déterministe sous la forme de forçages. En effet, la croissance du phytoplancton est influencée par la disponibilité en sels nutritifs dans le milieu, la température, et la lumière reçue, processus ayant une composante saisonnière marquée.

En Manche, et surtout en Manche orientale, *Phaeocystis* est la principale espèce phytoplanctonique responsable des blooms¹⁸. Son impact possible sur les écosystèmes côtiers a été étudié dans plusieurs études récentes¹⁹. Plusieurs méthodes ont été utilisées

18. SCHAPIRA M., VINCENT D., GENTILHOMME V., SEURONT L., « Temporal patterns of phytoplankton assemblages, size spectra and diversity during the wane of a *Phaeocystis globosa* spring bloom in hydrologically contrasted coastal waters », *Journal of the Marine Biological Association of the UK*, 88, 2008, p. 649-662 ; MONCHY S., GRATTEPANCHE J.-D., BRETON E., MELONI D., SANCIU G., CHABÉ M., DELHAES L., VISCOGLIOSI E., SIME-NGANDO T., CHRISTAKI U., « Microplanktonic community structure in a coastal system relative to a *Phaeocystis* bloom inferred from morphological and tag pyrosequencing methods », *PloS ONE*, 7, 2012, e39924.

19. DAUVIN J.-C., « The main characteristics, problems, and prospects for Western European coastal seas », *Marine Pollution Bulletin*, 57, 2008, p. 22-40 ; SEURONT L., VINCENT D., « Increased seawater viscosity, *Phaeocystis globosa* spring bloom and Temora longicornis feeding and swimming behaviours », *Marine Ecology Progress Series*, 363, 2008, p. 131-145 ; SPILMONT N., DENIS L., ARTIGAS L. F., CALOIN F., COURCOT L., CREACH A., DESROY N., GEVAERT F., HACQUEBART P., HUBAS C., JANQUIN M.-A., LEMOINE Y., LUCZAK C., MIGNE A., RAUCH M., DAVOULT D., « Impact of the *Phaeocystis globosa* spring bloom on the intertidal benthic compartment in the eastern English Channel: a synthesis », *Marine Pollution Bulletin*, 58(1), 2009, p. 55-



pour surveiller l'abondance de *Phaeocystis* dans cette région, y compris les échantillonnages *in situ*²⁰, les relevés satellites couleurs de l'océan²¹, et les systèmes automatisés à hautes fréquences²².

Ici nous nous plaçons dans cette dernière catégorie. L'objectif principal de notre étude est d'avoir

63; GRATTEPANCHE J.-D., BRETON E., BRYLINKY J.- M., LECUYER E., CHRISTAKI U., « Succession of primary producers and micrograzers in a coastal ecosystem dominated by *Phaeocystis globosa* blooms », *Journal of Plankton Research*, 33, 2010, p. 37-50.

20. GRATTEPANCHE *et al.*, 2010, *op. cit.* ; LEFEBVRE A., GUISELIN N., BARBET F., ARTIGAS F. L., « Long-term hydrological and phytoplankton monitoring (1992-2007) of three potentially eutrophic systems in the eastern English Channel and the Southern Bight of the North Sea », *ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil*, 68, 2011, p. 2029-2043 ; HOULIEZ E., LIZON F., ARTIGAS L. F., LEFEBVRE S., SCHMITT F. G., « Spatio-temporal variability of phytoplankton photosynthetic activity in a macrotidal ecosystem (the Strait of Dover, eastern English Channel) », *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 129, 2013, p. 37-48.

21. LUBAC B., LOISEL H., GUISELIN N., ASTORECA R., ARTIGAS L.F., MÉRIAUX X., « Hyperspectral and multispectral ocean color inversions to detect *Phaeocystis globosa* blooms in coastal waters », *Journal of Geophysical Research*, 113, 2008, C06026.

22. ZONGO S., SCHMITT F. G., « Scaling properties of pH fluctuations in coastal waters of the English Channel: pH as a turbulent active scalar », *Nonlinear Processes in Geophysics*, 18, 2011, p. 829-839 ; DEROT J., SCHMITT F. G., GENTILHOMME V., ZONGO S.B., « Long-term high frequency phytoplankton dynamics, recorded from a coastal water autonomous measurements system in the eastern English Channel », *Continental Shelf Research*, 109, 2015, p. 210-221.

Figure II.6.1. Données brutes de la fluorescence (FFU) : en haut MAREL Carnot ; au milieu MAREL Iroise ; en bas Bouée L4.

une meilleure compréhension de la dynamique de la fluorescence en comparant les propriétés statistiques et dynamiques de trois séries temporelles. Nous utilisons les données provenant du système MAREL Carnot à Boulogne-sur-mer, du système MAREL Iroise près de Brest, et de la bouée L4 au large de Plymouth. Nous présentons ci-dessous les bases de données utilisées. Les sections suivantes présentent les analyses statistiques puis dynamiques et les comparaisons pour les trois sites.

Présentation des données

MAREL Carnot et MAREL Iroise

Les dispositifs MAREL (Mesures Automatisées en Réseau pour l'Environnement Littoral) peuvent exister sous plusieurs formes telles que des bouées, des pylônes ou des pontons flottants. La pluralité dans les formes de ces dispositifs a pour but de s'adapter aux milieux dans lesquels elles sont implantées. Nous utilisons ici les données provenant de MAREL Carnot, présentées dans le premier article de cet ouvrage²³,

23. LEFEBVRE A., POISSON-CAILLAUD E., ROUSSEUW K., HAMAD D., SOUDANT D., SOUDANT A., GOHIN F., RÉPÉCAUD M., « La station instrumentée MAREL Carnot : Retours d'expériences de 10 ans d'observation à haute fréquence d'une zone côtière sous influence anthropique », ce volume (II).

et les données de MAREL Iroise²⁴, présentées dans le second article de cet ouvrage²⁵. Nous considérons les données de fluorescence pour l'analyse des lois de probabilité, et les données de fluorescence et de température pour l'analyse des dynamiques.

Bouée L4

La station marine de Plymouth a fait installer en 1999, dans le cadre du programme NERC (Natural Environment Research Council) Oceans 2025, une bouée autonome en point fixe en Manche orientale (50°15.0'N ; 4°13.0'W). Ce dispositif a été nommé bouée L4²⁶ : il enregistre 10 paramètres physico-chimiques avec une périodicité d'une heure. Les paramètres pris en compte par cette bouée sont les suivants : la direction et la force des vents ; la pression atmosphérique ; le P.A.R ; la température de la mer et de l'air ; la salinité ; l'oxygène ; la fluorescence et la turbidité. Dans cette étude, nous utilisons les données brutes de ce paramètre sur une période comprise entre 2009 et 2011. Les différentes séries temporelles de fluorescence sont présentées en figure II.6.1.

Analyse des données

Distributions de probabilité de la fluorescence

Nous considérons tout d'abord les trois séries de fluorescence. Nous prenons l'ensemble des données en compte : la série L4 contient près de 18 000 valeurs tandis que les séries MAREL dépassent les 100 000 points : plus de 170 000 pour MAREL Iroise et plus de 113 000 pour MAREL Carnot (tableau II.6.1). Ces chiffres permettent d'estimer des distributions et des densités de probabilité, et d'aller plus loin que de nombreuses études qui considèrent la normalité de séries en ne considérant que des tests statistiques.

La moyenne des données est de l'ordre de 1 FFU pour chaque série (tableau II.6.1). Les données représentées en figure II.6.1 montrent que des pics sont visibles avec des valeurs pouvant dépasser 10, 20 ou 40 FFU. Comme les valeurs mesurées sont nécessairement positives, ceci indique une distribution

dissymétrique, pour laquelle la densité de probabilité lognormale, d'équation :

$$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left(-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (1)$$

est un candidat possible. Rappelons ici que la loi lognormale est obtenue en prenant l'exponentielle d'une variable normale, ou en d'autres termes, le logarithme des données est supposé représenté par une loi normale. Dans l'équation (1) ci-dessus, μ est la moyenne et σ l'écart type de $\log(x)$. Les moyennes et écart-types du logarithme des données sont également listés dans le tableau II.6.1. En écologie marine, la loi log-normale est assez souvent utilisée implicitement pour approximer les données liées à l'abondance²⁷, qui comportent de fortes fluctuations, sans qu'il n'y ait vraiment de justification réelle et sans que cette loi soit explicitement mentionnée. En effet, des tests statistiques sont appliqués de manière classique sur $\log(A+1)$ où A est l'abondance²⁸. L'addition d'une unité est choisie pour éviter les problèmes liés au logarithme de la valeur nulle.

Une des méthodes les plus utilisées pour déterminer si des données suivent la loi lognormale est la méthode des quantiles : il s'agit de représenter les quantiles expérimentaux de $\log(x)$ en fonction des quantiles gaussiens. Ceci a été effectué, en réalisant en langage matlab des simulations de variables normales, en choisissant pour les simulations le même nombre de valeurs que les données expérimentales. Les données expérimentales ont été recentrées en prenant le logarithme, retranchant la moyenne et divisant par l'écart type, de façon à comparer à des variables normales centrées unitaires. Le résultat est représenté en figure II.6.2a. On constate qu'autour de la valeur moyenne (autour de 0) les données sont proches de la loi normale, mais les données MAREL Carnot et les données L4 s'en écartent pour les fortes et faibles valeurs. Comme les valeurs expérimentales ne suivent pas la bissectrice, on peut exclure le modèle lognormal

24. <http://www-ium.univ-brest.fr/observatoire/observation-cotiere/parametres-physico-chimiques/testpeg>.

25. RIMMELIN-MAURY P. *et al.*, « MAREL-Iroise/SOMLIT-Brest : un outil fonctions multiples, pour l'observation des eaux côtières », ce volume (12).

26. <http://www.westernchannelobservatory.org.uk>.

27. Ici nous considérons la fluorescence en tant que proxy de la biomasse phytoplanctonique, ce qui n'est pas une abondance (comptage), mais l'analogie est néanmoins possible.

28. WANG Z., QI Y., CHEN J., XU N., YANG Y., « Phytoplankton abundance, community structure and nutrients in cultural areas of Daya Bay, South China Sea », *Journal of Marine Systems*, 62, 2006, p. 85-94 ; WIDDICOMBE C., ELOIRE D., HARBOUR D., HARRIS R., SOMERFIELD P., « Long-term phytoplankton community dynamics in the Western English Channel », *Journal of Plankton Research*, 32(5), 2010, p. 643-655 ; FEUCHTMAYR H., THACKERAY S. J., JONES I. D., DE VILLE M., FLETCHER J., JAMES B., KELLY J., « Spring phytoplankton phenology— are patterns and drivers of change consistent among lakes in the same climatological region? », *Freshwater Biology*, 57, 2012, p. 331-344.

pour ces séries. Par contre, les données MAREL Iroise semblent très proches de cette bissectrice, sauf pour les valeurs les plus petites (inférieures à -3,5). La figure II.6.2b représente les mêmes courbes en soustrayant la bissectrice, de façon à mieux identifier les écarts à la lognormalité : en cas de modèle lognormal, les valeurs expérimentales doivent ici rester identiquement nulles (courbe horizontale). On constate encore que les données MAREL Carnot et L4 s'en éloignent nettement, mais les données de MAREL Iroise semblent proches de la valeur nulle.

Nous avons également considéré la distribution de probabilité ou fonction de survie $Pr(F > x)$ en fonction du seuil x , en figure II.6.2c, pour les deux séries s'approchant le plus du cadre lognormal (MAREL Iroise et station L4). Les courbes expérimentales sont superposées aux courbes obtenues à partir de simulations lognormales ayant le même nombre de points que les données expérimentales, et les valeurs de μ et σ données en tableau II.6.1. Ici également, la superposition est très bonne pour les données MAREL Iroise, et médiocre pour la station L4.

Enfin, nous avons considéré les densités de probabilité $p(x)$, que l'on peut voir comme des histogrammes normalisés par la taille des intervalles utilisés. Ici, en raison du grand nombre de données des séries analysées, ces intervalles peuvent être assez petits, permettant d'extraire une courbe continue pour les densités de probabilité. La distribution est bien sûr reliée à la densité par la relation $Pr(F > x) = \int_x^\infty p(u) du$. La figure II.6.2d montre le résultat, en représentation log-log. On constate que les données ont bien des queues de distribution « épaisses » (*heavy tails*), avec un ajustement en loi de puissance. Cet ajustement en loi de puissance correspond à une loi hyperbolique, quelquefois également appelée loi de Pareto ou de Fréchet :

$$p(x) = Cx^{-\alpha} \tag{2}$$

où C est une constante et $\alpha > 0$ un exposant de loi de puissance. Les lois de puissance sont assez répandues dans les sciences de la nature²⁹. Ce type de loi est classiquement utilisé dans de plusieurs domaines scientifiques, tels que les sciences économiques³⁰, les

séismes³¹, ou la physique statistique³². Ces lois sont également utilisées quelquefois en écologie³³. Ici l'ajustement réalisé permet d'estimer $\alpha=2,1$ pour MAREL Carnot, 3,75 pour la station L4 et 4,3 pour MAREL Iroise. Pour cette dernière série, on peut constater qu'un ajustement en loi de puissance est possible, mais nous avons vu que l'ajustement par le modèle lognormal est meilleur.

Nous concluons ce passage sur les lois de probabilité des séries temporelles considérées, en indiquant que les données MAREL Iroise de fluorescence sont bien ajustées par un modèle lognormal, tandis que pour les données MAREL Carnot et station L4, l'ajustement par une loi hyperbolique est meilleur, de paramètres respectivement $\alpha=2,1$ et 3,75.

	L4	MAREL Iroise	MAREL Carnot
Début série	2009	2004	2004
Fin série	2011	2011	2011
Pas de temps (minutes)	60	20	20
Nombre de valeurs	17994	173799	113115
Moyenne (FFU)	1,41	1,06	1,40
Maximum	20,48	22,44	45,99
Moyenne du log (μ)	0,029	-0,233	-0,398
Ecart-type du log (σ)	0,870	0,764	1,157

Tableau II.6.1. Caractéristiques des données brutes de la fluorescence (FFU) par les systèmes L4, MAREL Iroise et MAREL Carnot.

Etude de la dynamique : les spectres d'énergie

D'un autre côté, nous nous intéressons également à la dynamique, sous la forme des spectres d'énergie. Le spectre d'énergie correspond au module au carré de la

29. CLAUSET A., SHALIZI C. R., NEWMAN M. E., « Power-law distributions in empirical data », SIAM Review, 51, 2009, p. 661-703 ; ADLER R. J., FELDMAN R.E., TAQQU M.S. (dir.), A practical guide to heavy tails; statistical techniques and applications, Birkhauser, 1998.

30. GABAIX X., GOPIKRISHNAN P., PLEROU V., STANLEY H. E., « A theory of power-law distributions in financial market fluctuations », Nature, 423, 2003, p. 267-270.

31. GUTENBERG B., RICHTER C. F., « Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration (second paper) », Bulletin of the Seismological Society of America, 46, 1956, p. 105-145.

32. BAK P., Quand la nature s'organise, Flammarion, 1999.

33. SCHMITT F. G., MOLINERO J. C., ZONGO BRIZARD S., « Nonlinear dynamics and intermittency in a long term copepod time series », Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulations 13, 2008, p. 407-415 ; DEROT *et al.*, 2015, *op. cit.* ; FERRIERE R., CAZELLES B., « Universal power laws govern intermittent rarity in communities of interacting species », Ecology, 80, 1999, p. 1505-21.

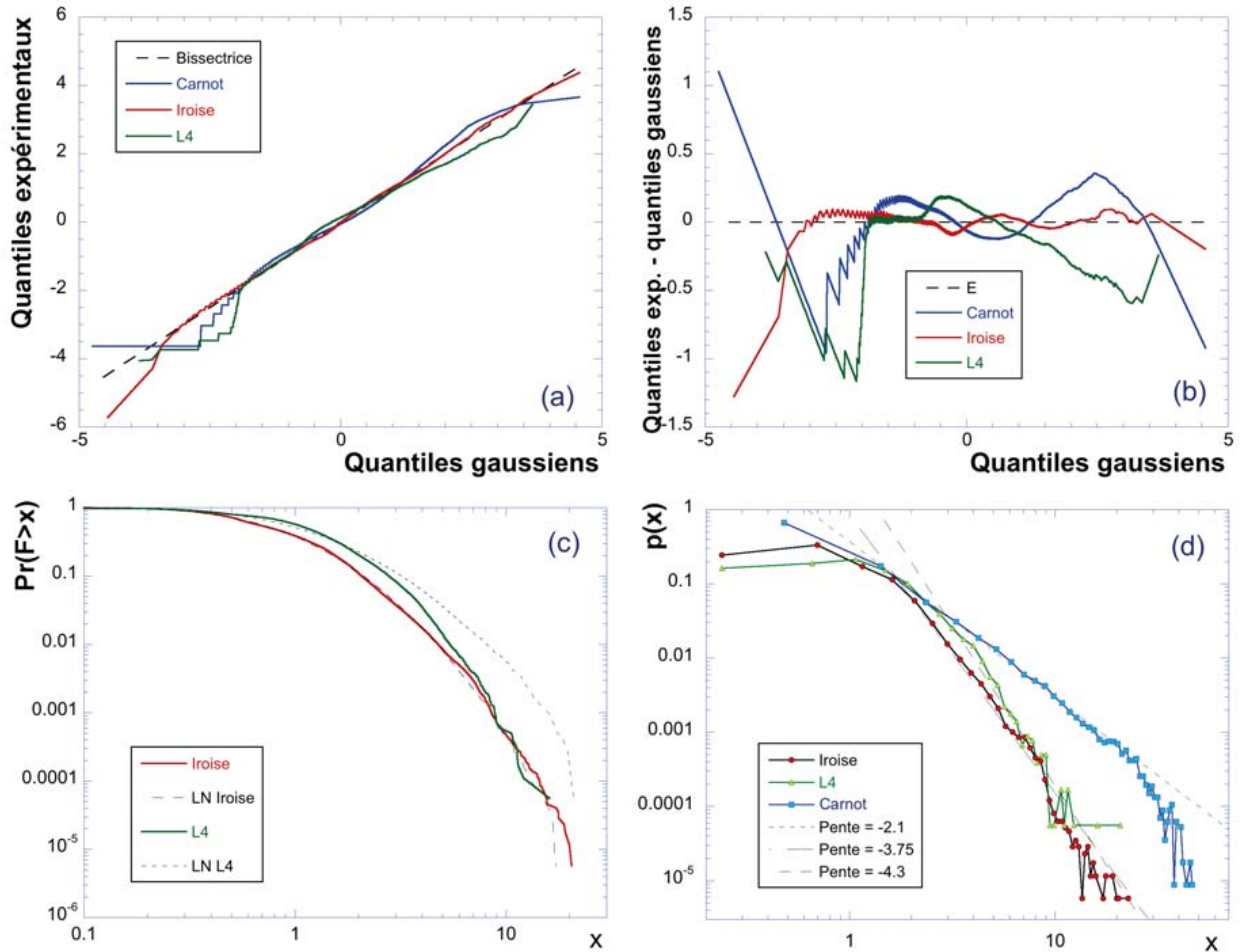


Figure II.6.2. Distributions de probabilité de la fluorescence, via différentes approches. (a) Représentation quantile-quantile du logarithme de la fluorescence, pour les 3 systèmes (Carnot, Iroise, L4). L'alignement selon la droite indique la lognormalité. (b) Même figure que la précédente, mais en soustrayant la première bissectrice : la lognormalité correspond ici à une droite horizontale identiquement nulle : ceci permet de mieux visualiser les zones où la lognormalité est vérifiée. (c) Distribution de probabilité (aussi appelée fonction de survie) $\Pr(F>x)$ en fonction du seuil x : la distribution lognormale (avec les paramètres correspondants à chaque base de données) est superposée aux données expérimentales. (d) Densité de probabilité de chaque base de données, en représentation log-log, permettant de mettre en évidence la validité d'une loi de puissance (ici une droite en log-log).

transformée de Fourier du signal ; il peut aussi s'écrire à partir de la fonction d'autocorrélation $R(\tau) = \langle X'(t) X'(t+\tau) \rangle$ où $X' = X - \langle X \rangle$ ($\langle \cdot \rangle$ est la moyenne) :

$$E(f) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} R(\tau) \cos(f\tau) d\tau \quad (3)$$

Ici, $E(f)$ est le spectre d'énergie, f est la fréquence, et la relation ci-dessus est appelée transformée de Fourier cosinus. L'analyse spectrale a déjà été utilisée en écologie marine³⁴, mais n'est pas encore généra-

lisée pour les analyses de séries temporelles à haute fréquence. Rappelons que cette analyse permet de mettre en évidence le bruit (spectre plat pour les fréquences correspondantes), la présence d'un forçage périodique (un pic très localisé en fréquence, ou alors une « bosse » plus diffuse), et aussi les régimes invariants d'échelle du type :

34. LEGENDRE P., LEGENDRE L., Numerical Ecology, Elsevier, Amsterdam, 1998, 870 p. ; PLATT T., DENMAN K. L., « Turbulence structure function in turbulent shear flows », Annual Review in Ecology and Systematics, 6, 1975, p. 189-210 ; SEURONT L., SCHMITT F. G., LAGADEUC Y., SCHERTZER D., LOVEJOY S., FRONTIER S., « Multifractal

analysis of phytoplankton biomass and temperature variability in the ocean », Geophysical Research Letters, 23, 1996a, p. 3591-3594 ; SEURONT L., SCHMITT F. G., SHERTZER D., LAGADEUC Y., LOVEJOY S., « Multifractal intermittency of eulerian and Lagrangian turbulence of ocean temperature and plankton fields », Nonlinear Processes in Geophysics, 3, 1996b, p. 236-246 ; SCHMITT F. G., DUR G., SOUSSI S., ZONGO S. B., « Statistical properties of turbidity, oxygen and pH fluctuations in the Seine river estuary (France) », Physica A, 387, 2008b, p. 6613-6623 ; ZONGO *et al.*, 2011, *op. cit.*

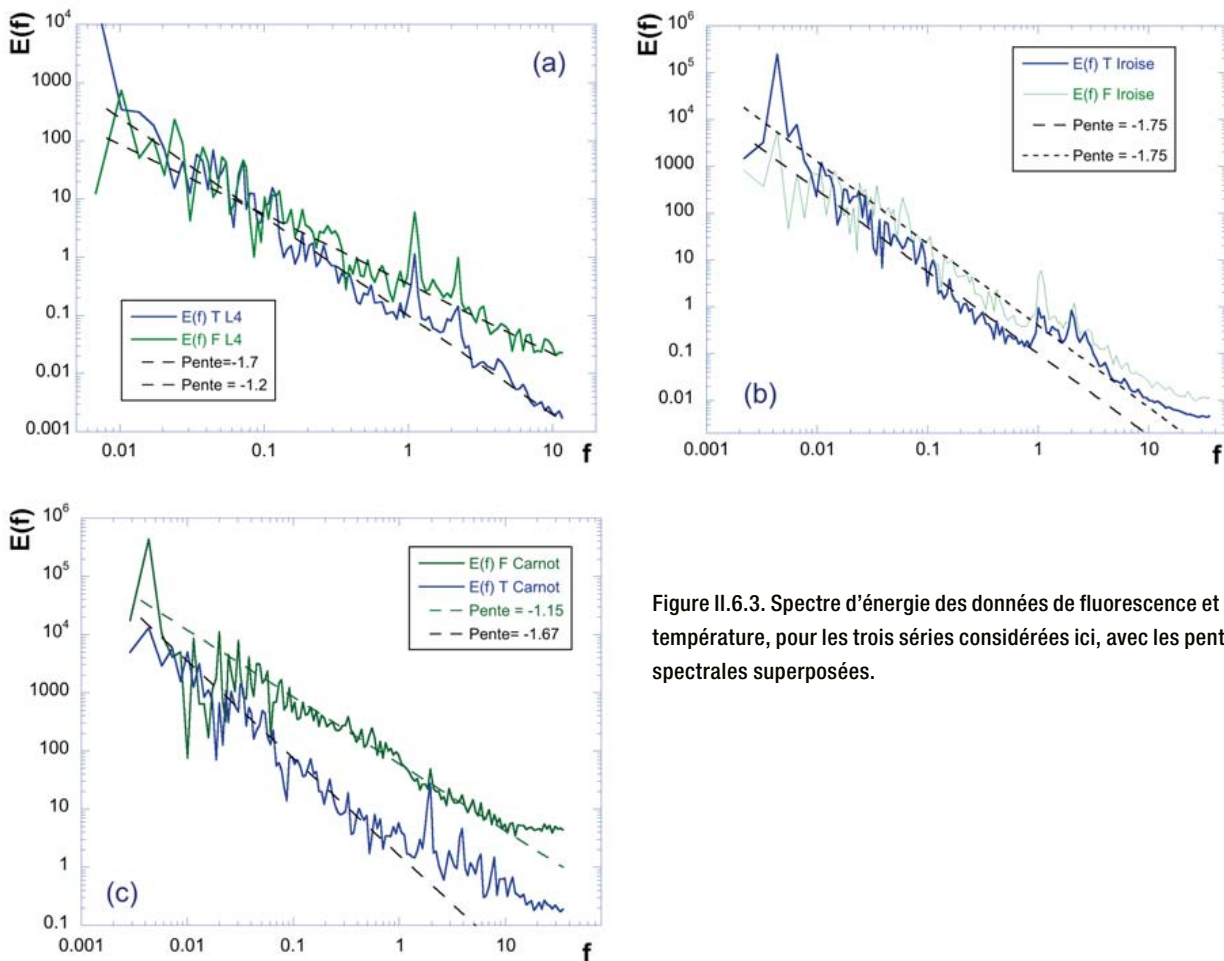


Figure II.6.3. Spectre d'énergie des données de fluorescence et de température, pour les trois séries considérées ici, avec les pentes spectrales superposées.

$$E(f) \approx f^\beta \tag{4}$$

où β est l'exposant spectral caractérisant le forçage. Pour un forçage turbulent, on obtient généralement une pente proche de $\beta=5/3$ comme prédit pour la turbulence homogène et localement isotrope en turbulence de vitesse³⁵ et de scalaire passivement advecté³⁶. Dans l'analyse spectrale, lorsqu'on obtient une loi d'échelle de type (4), l'exposant spectral renseigne ainsi sur le forçage : lorsque la pente est proche de 5/3, on peut raisonnablement penser à un forçage par la turbulence.

Différentes études publiées ces dernières années ont effectué des analyses spectrales sur des données

MAREL³⁷. Ici nous comparons les analyses spectrales pour les 3 systèmes considérés, en superposant les spectres de fluorescence aux spectres de température, pris comme référence passive : une différence dans les spectres de température et de fluorescence laisse indiquer une activité biologique³⁸. L'analyse spectrale est le plus souvent réalisée en utilisant l'algorithme *Fast Fourier transform* (FFT), qui demande un pas d'échantillonnage régulier. Les bases de données haute fréquence ont typiquement de nombreuses valeurs manquantes correspondant à des périodes d'entretien, de maintenance, de pannes... Nous avons donc choisi, à titre d'illustration de l'analyse spectrale, des périodes dans les bases de données, pour lesquelles il y a très peu

35. KOLMOGOROV A. N., « The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds number », *Doklady Akademia Nauk SSSR*, 30, 1941, p. 3-9 ; OBUKHOV A. M., « On the distribution of energy in the spectrum of a turbulent flow », *Doklady Akademia Nauk SSSR*, 32, 1941, p. 22-24.

36. OBUKHOV A. M., « The structure of the temperature field in a turbulent flow », *Izvezia Akademia Nauk. SSSR Geografic Geofiziks*, 13, 1949, p. 58-69 ; CORRISIN S., « On the spectrum of isotropic temperature in an isotropic turbulence », *Journal of Applied Physics*, 22, 1951, p. 469-473.

37. DUR G., SCHMITT F. G., SOUISSI S., « Analysis of high frequency temperature time series in the Seine estuary from the Marel autonomous monitoring buoy », *Hydrobiologia*, 588, 2007, p. 59-68 ; Schmitt *et al.*, 2008b, *op. cit.* ; ZONGO *et al.*, 2011, *op. cit.* ; HUANG Y., SCHMITT F. G., « Application of an empirical mode decomposition based time dependent intrinsic correlation to marine data », *Journal of Marine Systems*, 130, 2014, p. 90-100.

38. SEURONT *et al.*, 1996a,b, *op. cit.*

de valeurs manquantes. Les périodes en question sont indiquées dans le tableau II.6.2.

Les résultats obtenus sont représentés en figure II.6.3, pour chaque base de données. Pour les données L4 et MAREL Carnot, la température présente des pics journaliers et liés à la marée, avec un spectre ayant une pente de 1,7, proche de 5/3, tandis que la fluorescence montre les mêmes pics avec une pente plus proche de 1,2, compatible avec les valeurs obtenues sur un autre site³⁹. Pour la série de MAREL Iroise, on constate aux échelles journalières et inférieures des influences de forçages, pour la température et la fluorescence, tandis que pour le reste des échelles des pentes spectrales proches de 1,75 sont obtenues pour les deux séries.

	L4	MAREL Iroise	MAREL Carnot
Pente spectrale T	1,7	1,75	1,67
Pente spectrale F	1,2	1,75	1,15

Tableau II.6.2. Pentés spectrales obtenues pour les données de température et de fluorescence, pour les trois séries considérées (figure II.6.3).

Discussions et conclusions

Les mesures hautes fréquences en point fixe sont indispensables pour la compréhension des mécanismes multi-échelles qui sont présents dans l'océan⁴⁰. Ces dernières années, les systèmes automatisés à point fixe ont commencé à se généraliser en milieu côtier, et sont installés dans de nombreux endroits à travers le monde, comme à Venise⁴¹, en Corée du sud⁴², ou en

39. SEURONT *et al.*, 1996a, *op. cit.*

40. DICKEY T.D., « The emergence of concurrent high-resolution physical and bio-optical measurements in the upper ocean and their applications », *Reviews of Geophysics*, 29, 1991, p. 383-413 ; CHANG G., DICKEY T., « Optical and physical variability on timescales from minutes to the seasonal cycle on the New England shelf: July 1996 to June 1997 », *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 106, 2001, p. 9435-9453 ; BENSOUSSAN N., ROMANO J.-C., EL-HAIKALI B., LAFONT M.-G., « Importance du choix des échelles de temps pertinentes pour l'étude du fonctionnement d'écosystèmes marins littoraux », *Comptes Rendus Geoscience*, 336, 2004, p. 909-918 ; DUR *et al.*, 2007, *op. cit.*

41. LOVATO T., CIAVATTA S., BRIGOLIN D., RUBINO A., PASTRES R., « Modelling dissolved oxygen and benthic algae dynamics in a coastal ecosystem by exploiting real-time monitoring data », *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 119, 2013, p. 17-30.

42. NAM S., KIM G., KIM K.-R., KIM K., CHENG L.O., KIM K.-W., OSSI H., KIM Y.-G., « Application of real-time monitoring buoy systems for physical and biogeochemical

Californie⁴³. Des discussions sont également en cours en France au niveau national, pour accompagner les services d'observation comme le SOMLIT du CNRS/INSU, le REPHY de l'Ifremer, et aussi le programme de surveillance de la Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM) par des systèmes hautes fréquences.

Le phytoplancton est un élément essentiel dans les écosystèmes marins et sa dynamique est soumise à de nombreux forçages à multi-échelles, incluant les forçages turbulents, qui apportent une grande hétérogénéité. Il est donc important d'utiliser des outils et un cadre théorique capables de s'adapter aux jeux de données hautes fréquences, et aux fortes fluctuations subies par ce type de système.

Les systèmes automatisés hautes fréquences engendrent des bases de données importantes (dans le cas de MAREL Carnot plusieurs dizaines de milliers de points), il est donc possible d'analyser les distributions de probabilité de façon précise. Dans une première partie, nous avons comparé les données produites dans les trois systèmes considérés, à des distributions lognormales et en loi de puissance. Il résulte des analyses que les données MAREL Iroise de fluorescence sont bien ajustées par un modèle lognormal, tandis que pour les données MAREL Carnot et station L4, l'ajustement par une loi hyperbolique est meilleur, de paramètres respectivement $\alpha=2,1$ et 3,75. Les raisons de tels ajustements demeurent l'objet de recherches et nous pouvons penser que les queues de distributions, importantes pour mieux comprendre les extrêmes liés à des efflorescences, seront l'objet de recherches ultérieures. En particulier, il demeure à déterminer le lien entre la dynamique locale et les queues de distribution de la fluorescence.

D'un autre côté, nous avons également considéré la dynamique via des études spectrales, effectuées sur des sous-ensembles des séries précédentes, choisis pour avoir des données consécutives avec peu de valeurs manquantes. Ces analyses comparatives ont montré que là aussi, la série Iroise se démarquait : pour les séries MAREL Carnot et L4, on constate une pente spectrale différente entre les données de fluorescence et de température, laissant penser à une dynamique du phytoplancton influencée par la biologie⁴⁴. Pour la série MAREL Iroise, les pentes spectrales de la tempé-

parameters in the coastal ocean around the Korean peninsula », *Marine Technology Society Journal*, 39, 2005, p. 70-80.

43. FRIEDER C., NAM S., MARTZ T., LEVIN L., « High temporal and spatial variability of dissolved oxygen and pH in a nearshore California kelp forest », *Biogeosciences* 9, 2012, p. 3917-3930.

44. SEURONT *et al.*, 1996a.

rature et du phytoplancton étaient similaires (proche de 5/3), laissant penser que le phytoplancton, pour les échelles considérées, se comportait plus comme un scalaire passif : les activités biologiques semblaient ici avoir moins d'influence. La relation possible entre les statistiques lognormales et l'absence apparente de dynamique biologique reste encore à étudier.

La dynamique des blooms phytoplanctoniques est complexe, liée à de nombreux paramètres et différents forçages, correspondant à des relations non-linéaires et stochastiques. L'utilisation des données hautes fréquences est nécessaire pour mieux comprendre ces relations complexes et mettre en évidence les régimes multi-échelles. Ici nous avons utilisé des jeux de données multiparamétriques hautes fréquences issus de systèmes automatisés, pour étudier la dynamique de la fluorescence et les blooms de phytoplancton dans le milieu côtier. Plusieurs lois ont été trouvées, pour les extrêmes et la dynamique ; néanmoins leur universalité reste à évaluer. L'utilité méthodologique des approches ici proposées est susceptible d'être généralisable à de nombreux systèmes.

Remerciements

La thèse de Jonathan Derot (2011-2014) a été financée par l'Agence de l'Eau Artois Picardie et la Région Nord-Pas-de-Calais. Nous remercions également le département REM et l'unité de recherche et développement technologique d'Ifremer qui assurent le contrôle opérationnel, l'entretien du système MAREL Carnot. Les données de la station L4 sont produites dans le cadre du « UK NERC National Capability » financé par le Western Channel Observatory. Nous remercions spécialement James Fishwick pour son travail sur les bases de données. Les données MAREL/Iroise sont recueillies et diffusées dans le cadre de l'accord signé entre Ifremer, le CNRS (INSU) et l'Université de Bretagne Occidentale (au nom de l'IUEM) n° 11/2-210922.

Références bibliographiques

- ADLER R. J., FELDMAN R.E., TAQQU M.S. (dir.), A practical guide to heavy tails; statistical techniques and applications, Birkhauser, 1998.
- ARINO A., PIMM S. L., « On the nature of population extremes », *Ecology and Evolution*, 9, 1995, p. 429-43.
- BAK P., *Quand la nature s'organise*, Flammarion, 1999.
- BENSOUSSAN N., ROMANO J.-C., EL-HAIKALI B., LAFONT M.-G., « Importance du choix des échelles de temps pertinentes pour l'étude du fonctionnement d'écosystèmes marins littoraux », *Comptes Rendus Geoscience*, 336, 2004, p. 909-918.
- CHANG G., DICKEY T., « Optical and physical variability on timescales from minutes to the seasonal cycle on the New England shelf: July 1996 to June 1997 », *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 106, 2001, p. 9435-9453.
- CLAUSET A., SHALIZI C. R., NEWMAN M. E., « Power-law distributions in empirical data », *SIAM Review*, 51, 2009, p. 661-703.
- CORRSIN S., « On the spectrum of isotropic turbulence in an isotropic turbulence », *Journal of Applied Physics*, 22, 1951, p. 469-473.
- DAUVIN J.-C., « The main characteristics, problems, and prospects for Western European coastal seas », *Marine Pollution Bulletin*, 57, 2008, p. 22-40.
- DEROT J., SCHMITT F. G., GENTILHOMME V., ZONGO S.B., « Long-term high frequency phytoplankton dynamics, recorded from a coastal water autonomous measurements system in the eastern English Channel », *Continental Shelf Research*, 109, 2015, p. 210-221.
- DICKEY T.D., « The emergence of concurrent high-resolution physical and bio-optical measurements in the upper ocean and their applications », *Reviews of Geophysics*, 29, 1991, p. 383-413.
- DUR G., SCHMITT F.G., SOUISSI S., « Analysis of high frequency temperature time series in the Seine estuary from the Marel autonomous monitoring buoy », *Hydrobiologia*, 588, 2007, p. 59-68.
- FERRIERE R., CAZELLES B., « Universal power laws govern intermittent rarity in communities of interacting species », *Ecology*, 80, 1999, p. 1505-21.
- FEUCHTMAYR H., THACKERAY S. J., JONES I. D., DE VILLE M., FLETCHER J., JAMES B., KELLY J., « Spring phytoplankton phenology—are patterns and drivers of change consistent among lakes in the same climatological region? », *Freshwater Biology*, 57, 2012, p. 331-344.
- FRIEDER C., NAM S., MARTZ T., LEVIN L., « High temporal and spatial variability of dissolved oxygen and pH in a nearshore California kelp forest », *Biogeosciences* 9, 2012, p. 3917-3930.
- GABAIX X., GOPIKRISHNAN P., PLEROU V., STANLEY H. E., « A theory of power-law distributions in financial market fluctuations », *Nature*, 423, 2003, p. 267-270.
- GRATTEPANCHE J.-D., BRETON E., BRYLINKY J.-M., LECUYER E., CHRISTAKI U., « Succession of primary producers and micrograzers in a coastal ecosystem dominated by *Phaeocystis globosa* blooms », *Journal of Plankton Research*, 33, 2010, p. 37-50.

- GUTENBERG B., RICHTER C. F., « Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration (second paper) », Bulletin of the Seismological Society of America, 46, 1956, p. 105-145.
- HOULIEZ E., LIZON F., ARTIGAS L. F., LEFEBVRE S., SCHMITT F. G., « Spatio-temporal variability of phytoplankton photosynthetic activity in a macrotidal ecosystem (the Strait of Dover, eastern English Channel) », Estuarine, Coastal and Shelf Science, 129, 2013, p. 37-48.
- HUANG Y., SCHMITT F. G., « Application of an empirical mode decomposition based time dependent intrinsic correlation to marine data », Journal of Marine Systems, 130, 2014, p. 90-100.
- KOLMOGOROV A. N., « The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds number », Doklady Akademia Nauk SSSR, 30, 1941, p. 3-9.
- LEFEBVRE A., GUISELIN N., BARBET F., ARTIGAS F. L., « Long-term hydrological and phytoplankton monitoring (1992-2007) of three potentially eutrophic systems in the eastern English Channel and the Southern Bight of the North Sea », ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil, 68, 2011, p. 2029-2043.
- LEFEBVRE A., POISSON-CAILLAULT E., ROUSSEUW K., HAMAD D., SOUDANT D., SOUDANT A., GOHIN F., RÉPÉCAUD M., « La station instrumentée MAREL Carnot : Retours d'expériences de 10 ans d'observation à haute fréquence d'une zone côtière sous influence anthropique », ce volume (I1).
- LEGENDRE P., LEGENDRE L., Numerical Ecology, Elsevier, Amsterdam, 1998, 870 p.
- LOVATO T., CIAVATTA S., BRIGOLIN D., RUBINO A., PASTRES R., « Modelling dissolved oxygen and benthic algae dynamics in a coastal ecosystem by exploiting real-time monitoring data », Estuarine, Coastal and Shelf Science, 119, 2013, p. 17-30.
- LUBAC B., LOISEL H., GUISELIN N., ASTORECA R., ARTIGAS L.F., MÉRIAUX X., « Hyperspectral and multispectral ocean color inversions to detect *Phaeocystis globosa* blooms in coastal waters », Journal of Geophysical Research, 113, 2008, C06026.
- MONCHY S., GRATTEPANACHE J.-D., BRETON E., MELONI D., SANCIU G., CHABÉ M., DELHAES L., VISOGLIOSI E., SIME-NGANDO T., CHRISTAKI U., « Microplanktonic community structure in a coastal system relative to a *Phaeocystis* bloom inferred from morphological and tag pyrosequencing methods », PLoS ONE, 7, 2012, e39924.
- NAM S., KIM G., KIM K.-R., KIM K., CHENG L.O., KIM K.-W., OSSI H., KIM Y.-G., « Application of real-time monitoring buoy systems for physical and biogeochemical parameters in the coastal ocean around the Korean peninsula », Marine Technology Society Journal, 39, 2005, p. 70-80.
- OBUKHOV A. M., « On the distribution of energy in the spectrum of a turbulent flow », Doklady Akademia Nauk SSSR, 32, 1941, p. 22-24.
- OBUKHOV A. M., « The structure of the temperature field in a turbulent flow », Izvestia Akademia Nauk. SSSR Geografie Geofiziks, 13, 1949, p. 58-69.
- PLATT T., DENMAN K. L., « Turbulence structure function in turbulent shear flows », Annual Review in Ecology and Systematics, 6, 1975, p. 189-210.
- RIMMELIN-MAURY P. *et al.*, « MAREL-Iroise/SOMLIT-Brest : un outil fonctions multiples, pour l'observation des eaux côtières », ce volume (I2).
- SCHAPIRA M., VINCENT D., GENTILHOMME V., SEURONT L., « Temporal patterns of phytoplankton assemblages, size spectra and diversity during the wane of a *Phaeocystis globosa* spring bloom in hydrologically contrasted coastal waters », Journal of the Marine Biological Association of the UK, 88, 2008, p. 649-662.
- SCHMITT F. G., MOLINERO J. C., ZONGO BRIZARD S., « Nonlinear dynamics and intermittency in a long term copepod time series », Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulations 13, 2008, p. 407-415.
- SCHMITT F. G., DUR G., SOUISSI S., ZONGO S. B., « Statistical properties of turbidity, oxygen and pH fluctuations in the Seine river estuary (France) », Physica A, 387, 2008b, p. 6613-6623.
- SEURONT L., SCHMITT F. G., LAGADEUC Y., SCHERTZER D., LOVEJOY S., FRONTIER S., « Multifractal analysis of phytoplankton biomass and temperature variability in the ocean », Geophysical Research Letters, 23, 1996a, p. 3591-3594.
- SEURONT L., SCHMITT F. G., SHERTZER D., LAGADEUC Y., LOVEJOY S., « Multifractal intermittency of eulerian and Lagrangian turbulence of ocean temperature and plankton fields », Nonlinear Processes in Geophysics, 3, 1996b, p. 236-246.
- SEURONT L., VINCENT D., « Increased seawater viscosity, *Phaeocystis globosa* spring bloom and *Temora longicornis* feeding and swimming behaviours », Marine Ecology Progress Series, 363, 2008, p. 131-145.
- SPILMONT N., DENIS L., ARTIGAS L. F., CALOIN F., COURCOT L., CREACH A., DESROY N., GEVAERT F., HACQUEBART P., HUBAS C., JANQUIN M.-A., LEMOINE Y., LUCZAK C., MIGNE A., RAUCH M., DAVOULT D., « Impact of the *Phaeocystis globosa* spring bloom on the intertidal benthic compartment in the eastern English Channel: a synthesis », Marine Pollution Bulletin, 58(1), 2009, p. 55-63.
- WANG Z., QI Y., CHEN J., XU N., YANG Y., « Phytoplankton abundance, community structure and nutrients in cultural areas of Daya Bay, South China Sea », Journal of Marine Systems, 62, 2006, p. 85-94.
- WIDDICOMBE C., ELOIRE D., HARBOUR D., HARRIS R., SOMERFIELD P., « Long-term phytoplankton community dynamics in the Western English Channel », Journal of Plankton Research, 32(5), 2010, p. 643-655.
- ZONGO S., SCHMITT F. G., « Scaling properties of pH fluctuations in coastal waters of the English Channel: pH as a turbulent active scalar », Nonlinear Processes in Geophysics, 18, 2011, p. 829-839.

Jonathan Derot

Univ. Littoral Côte d'Opale, CNRS, Univ. Lille, UMR 8187,
LOG, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, F
62930 Wimereux, France, jonathan.derot@univ-lille1.fr.

François G. Schmitt

CNRS, Univ. Lille, Univ. Littoral Côte d'Opale, UMR 8187,
LOG, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, F
62930 Wimereux, France, francois.schmitt@cnrs.fr.