



Rapport N° 10

MAREL Carnot

Bilan d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer).

Bilan de l'année 2015



**Bilan d'une surveillance à haute fréquence
en zone côtière sous influence
anthropique (Boulogne-sur-Mer)**

Bilan de l'année 2015

Fiche documentaire

Numéro d'identification du rapport : Ifremer/RST.LER.BL/16.06		Date de publication : Juin 2016	
Diffusion : libre : <input checked="" type="checkbox"/> restreinte : <input type="checkbox"/> interdite : <input type="checkbox"/>		Nombre de pages : 27	
Contact : A. Lefebvre Adresse électronique : alain.lefebvre@ifremer.fr		bibliographie : Oui	
		Illustration(s) : Oui	
		Langue du rapport : Français	
Titre du rapport : Bilan d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer). Bilan de l'année 2015.			
Rapport intermédiaire <input type="checkbox"/>		Rapport définitif <input checked="" type="checkbox"/>	
Auteurs : Alain Lefebvre Emilie Poisson-Caillault		Organisme / Direction / Service, laboratoire Ifremer – ODE/LER, Boulogne-sur-Mer. ULCO / LISIC, Calais.	
Collaborateurs : <u>Nutriments</u> Vincent Duquesne		Ifremer – ODE/LER, Boulogne-sur-Mer.	
<u>Maintenance</u> Michel Répécaud Jean-Valéry Facq Karenn Bucas Loïc Quémener		Ifremer – RDT, Brest. Ifremer – RDT/HO, Boulogne-sur-Mer. Ifremer – RDT, Brest. Ifremer – RDT, Brest.	
Cadre de la recherche : Action Ifremer « MAREL Carnot » (code analytique : A030803A)			
Résumé Installée dans la rade de Boulogne-sur-Mer et inaugurée le 25 novembre 2004, la station MAREL Carnot mesure toutes les 20 minutes la salinité, la température de l'eau et de l'air, la fluorescence, la turbidité, la concentration en oxygène dissous, le pourcentage de saturation en oxygène, le P.A.R., l'humidité relative, la direction et la vitesse du vent, la hauteur d'eau et toutes les 12 heures, la concentration en nitrate, en phosphate et en silicium. Ce rapport vise à présenter les principaux éléments utiles à l'utilisateur des données afin de pouvoir adapter son étude en fonction de la disponibilité des données, de leur qualité et bien entendu de son objectif. Les résultats des paramètres fluorescence, turbidité, concentration en oxygène, température de l'eau sont présentés de manière plus détaillée afin de mettre en évidence les cycles saisonniers caractéristiques, la variabilité inter-annuelle et les éventuelles tendances.			
Mots-clés Manche orientale, Boulogne-sur-Mer, haute fréquence temporelle, MAREL, hydrologie, fluorescence.			
Comment citer ce rapport : Lefebvre A., Poisson-Caillault E., 2016. MAREL Carnot : Rapport n° 10 : Bilan d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer). Bilan de l'année 2015. Ifremer/RST.LER.BL/16.06, 27 pages.			



sommaire

1. INTRODUCTION	8
2. RAPPELS : FONCTIONNEMENT DE MAREL CARNOT.....	8
2.1. <i>Le système MAREL Carnot jusque 2014.....</i>	9
2.2. <i>Le système MAREL Carnot depuis 2014.....</i>	11
2.2.1. <i>La base de données</i>	11
2.2.2. <i>Le système de mesures</i>	11
3. RÉSULTATS.....	12
3.1. <i>Bilan de fonctionnement.....</i>	12
3.2. <i>Valorisation des données.....</i>	13
3.2.1. <i>Utilisation des données issues du système MAREL Carnot.....</i>	13
3.2.2. <i>Valorisation scientifiques</i>	15
3.2.3. <i>Colloque « Instrumentation haute fréquence pour l'observation et la surveillance de l'environnement marin »</i>	17
3.2.4. <i>Projets scientifiques associés.....</i>	17
3.2.5. <i>Exemples de résultats</i>	18

1. INTRODUCTION

La prise de conscience générale des problèmes d'environnement, notamment au niveau du littoral, conduit à renforcer la surveillance qui s'y exerce.

Par l'expérience acquise depuis de nombreuses années dans l'exploitation des réseaux de surveillance de l'environnement, Ifremer a mis en évidence le besoin de développer des systèmes de surveillance automatisée de l'environnement et des effets directs et indirects des activités humaines sur le milieu marin. Les développements technologiques concernant les capteurs physico-chimiques permettent la réalisation de réseaux de stations instrumentées autonomes, effectuant des mesures à fréquence élevée et rapidement disponibles pour les utilisateurs (site web).

Depuis les années 1992-1995, le concept des stations MAREL a été validé puis décliné selon différentes familles de produits adaptés aux contraintes environnementales ainsi qu'aux demandes des utilisateurs. Une large gamme de paramètres est maintenant mesurée sur des sites très variés (Figure 1).



Figure 1. Localisation des stations instrumentées du réseau « Mise en œuvre et évolution des réseaux de mesure *in-situ* côtier »

2. RAPPELS : FONCTIONNEMENT DE MAREL CARNOT

Un rapport bilan n° 1 édité en 2006 présente les différentes étapes de mise en place du système depuis les études avant implantation jusqu'à l'inauguration du site (Lefebvre & Repecaud, 2006).

Les stations de mesure MAREL ont pour objectifs communs la mesure à haute fréquence et, de manière automatique, des paramètres physico-chimiques essentiels de l'eau de mer ainsi que de quelques autres indicateurs caractéristiques. L'ensemble de ces

grandeurs mesurées peut être transmis en temps réel vers un centre de traitement de données à terre.

Le système MAREL Carnot enregistre, toutes les 20 minutes, la température de l'air et de l'eau et la salinité de cette dernière, l'oxygène dissous, la fluorescence (chlorophylle), la turbidité, le pH, l'humidité relative et la radiation disponible pour la photosynthèse (P.A.R.). Les concentrations en sels nutritifs (nitrates, silicates et phosphates) sont mesurées toutes les 12 heures (Tableau 1).

L'évolution des technologies, et par conséquent l'obsolescence des systèmes mis en oeuvre en 2004, est telle que le système MAREL a subi une évolution majeure en 2014. Ainsi, le traitement de la série temporelle acquise depuis maintenant plus de 10 ans nécessite la prise en compte de ces changements pour un traitement optimal des données. Par ailleurs, il faut noter que l'évolution du système est en cours. L'utilisateur des données devra différencier la période de 2004-2014 de la période 2014-2015 conformément aux informations ci-dessous. Il faut également noter que la période en cours est une vraie phase de transition qui devrait permettre de passer de MAREL Carnot - Génération 1.0 à MAREL Carnot - Génération 2.0 d'ici à 2017-2018.

2.1. Le système MAREL Carnot jusque 2014

Le cœur du système était constitué d'une cellule de mesure regroupant plusieurs capteurs. L'originalité du système était le pompage de l'eau à travers la zone où elle est analysée, 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 bio-fouling. C'est donc cette chloration qui rend possible la bonne tenue dans le temps des capteurs qui restent en place sans intervention de maintenance pendant 3 mois théoriquement.

Tableau 1 : Gamme et caractéristiques des paramètres mesurés

Paramètres physico-chimiques	Gamme	Incertitude
Température	- 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	0,2 UpH
Turbidité	0 à 4000 NTU	10 %
Fluorescence	0 à 150 FFU	10 %
Nitrate	0,1 à 100 µmol/L	5 %
Phosphate	0,1 à 100 µmol/L	5 %
Silicate	0,1 à 100 µmol/L	5 %

L'ensemble de ces données était transmis deux fois par jour au Centre Ifremer Manche Mer du Nord de Boulogne-sur-Mer par liaison GSM, ensuite débutait la validation et le traitement des données. Dès cette phase de transmission, les données étaient soumises à un ensemble de procédures de contrôle de qualité. Les données étaient alors caractérisées par un niveau de traitement et par un niveau de qualité (Figure 2).



Figure 2. Niveau de traitement et de qualité des données lors de la procédure de contrôle (capture d’écran de l’outil de contrôle qualité OCQ)

Une partie de ce contrôle était fait automatiquement (contrôle du format des fichiers, de la gamme de valeurs observées en référence à des valeurs de références) ; les données étaient alors affecter dans un niveau de traitement T0,5. Un contrôle visuel était également réalisé afin d’identifier « à dire d’experts » le niveau de qualité de la donnée. Après cette étape, les données passaient en niveau de traitement T1,0 et étaient accessibles par l’internet via <http://www.ifremer.fr/difMARELCarnot/> (Figure 3). Les accès étaient possibles via trois domaines : public, scientifique et technique en fonction du profil de l’utilisateur. Les informations disponibles étaient différentes en fonction du profil utilisateur sélectionné lors de l’étape d’identification (cadre rouge sur Figure 3). Ainsi, le profil ‘public’ permettait de visualiser les données et d’avoir accès aux rapports de métrologie alors que le profil ‘scientifique’ permettait en plus de télécharger les données et d’avoir accès à d’autres informations sur le fonctionnement du système. Le profil ‘technique’ était principalement réservé aux personnes chargées de la maintenance du système.



Figure 3. Page d’accueil du site de consultation des données MAREL Carnot jusque 2014.

La chambre de passage était changée trimestriellement et conduit à la vérification sous assurance de qualité de l'étalonnage des capteurs (Tableau 2). Un rapport de métrologie permettait alors d'affecter un niveau de qualité définitif à la donnée qui passait en niveau de traitement final T2,0.

Tableau 2 : Métrologie : Règle de conformité des capteurs de MAREL Carnot

Paramètres	Oxygène dissous (mg/L)	Conductivité (mS/cm)	pH	Turbidité (N.T.U.)	Fluorescence (FFU) Sans nettoyage	Température (° C)
Conformité	+/- 0,20	+/- 0,30	+/- 0,20	+/- 10 %	+/- 10 %	+/- 0,1

2.2. Le système MAREL Carnot depuis 2014

2.2.1. La base de données

L'année 2014 a été marquée par une migration des données vers la base CORIOLIS. Les données sont désormais accessibles via le site :

<http://www.ifremer.fr/co-en/eulerianPlatform?contextId=395&ptfCode=62443&lang=en#+qcgoodonly>

L'utilisateur des données se doit de citer la source en utilisant la formule suivante (modifier les termes entre crochets) :

Coriolis (2015). MAREL Carnot data and metadata from Coriolis Data Center. Data from [Date début] to [Date fin] (<http://www.ifremer.fr/co-en/eulerianPlatform?contextId=395&ptfCode=62443&lang=en#+qcgoodonly>). Ifremer. Contact: alain.lefebvre@ifremer.fr

Les caractéristiques de la base de données CORIOLIS ainsi que les différents documents d'aide pour l'utilisateur sont accessibles via le site :

<http://www.coriolis.eu.org/Data-Services-Products/Documentation/Format-documentations>

2.2.2. Le système de mesures

La station automatisée MAREL Carnot, qui a été implantée sur site en décembre 2004, regroupe des éléments électroniques, informatiques et mécaniques conçus dans les années 90. Le vieillissement général qui affecte tout particulièrement les systèmes exposés à l'environnement marin impose le remplacement d'un certain nombre d'éléments qui ne sont plus fonctionnels. Par ailleurs, l'obsolescence de bon nombre de composants électroniques a conduit à remplacer le système de mesure par un nouvel ensemble automate/cellule de mesure.

Le cœur du système se compose donc maintenant des éléments suivants :

- un automate de contrôle mesure de type MAREL ESTRAN,

- une pompe de circulation (pompage de l'eau sur la sonde),
- un débitmètre pour le contrôle de la pompe,
- un chlorateur pour la production de chlore par électrolyse,
- une sonde multi-paramètres de type MP 6 nke (Tableau 3 et figure 4).

Tableau 3. Caractéristiques principales de la sonde nke MP6

Paramètres	Précision	Résolution	Gamme
Pression	0,06 m	0,006 m	0 à 20 m
Température	0,0005 °C à 0°	0,05 °C	-5 à + 35 °C
Conductivité	0,05 mS/cm	0,0012 mS/cm	0 à 70 mS/cm
Oxygène dissous	5 %	0,01 %	0 à 120 %
Fluorescence	1 % gamme	0,08 µg/l	0 à 500 µg/l
Turbidité	2 % gamme	0,012 NTU	0 à 2000 NTU

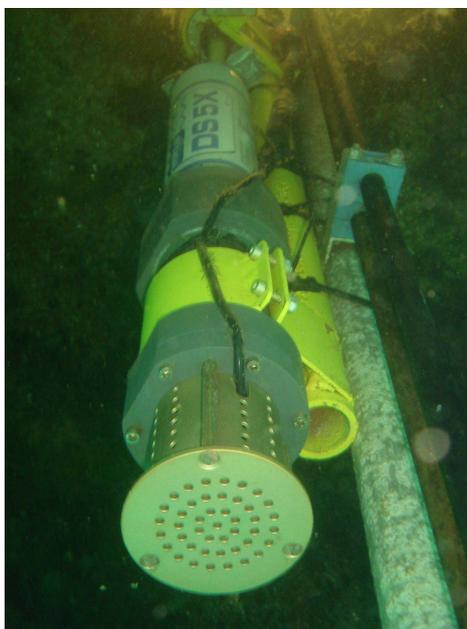


Figure 4. Système de mesure immergé en position sur sa perche

La phase de jouvence du système doit se poursuivre en 2016 et en 2017 pour permettre l'acquisition et la bancarisation, la mise à disposition des autres paramètres physico-chimiques et biologiques indisponibles à ce jour.

3. RÉSULTATS

3.1. Bilan de fonctionnement

Les informations relatives aux périodes de fonctionnement précédentes sont disponibles dans les rapports de Lefebvre & Repecaud (2006), Lefebvre (2007), Lefebvre (2008), Duval (2009), Lefebvre (2010), Lefebvre (2011), Lefebvre, Rousseeuw & Caillault (2012), Lefebvre & Rousseeuw (2013), Lefebvre & Rousseeuw (2014), Lefebvre & Devreker (2015). Ces rapports sont téléchargeables sur le site du laboratoire Environnement & ressources du centre Ifremer Manche Mer du Nord :

<http://wwz.ifremer.fr/manchemerdunord/Environnement/LER-Boulogne-sur-Mer/Surveillance-et-Observation/MAREL-Carnot/Valorisations> ou via la base Archimer (<http://archimer.ifremer.fr/>).

A ce jour, les analyses des nutriments ainsi que les paramètres mesurés dans l'air ne sont plus accessibles.

L'année 2015, comme les trois années précédentes, a été marquée par des dysfonctionnements majeurs liés principalement à l'obsolescence de la partie électronique du système qui devient par conséquent de plus en plus difficile à maintenir fonctionnelle.

D'une manière générale, les interruptions de mesures sont liées à des opérations de maintenance qui peuvent porter sur le système de communication, la pompe d'amorçage, la pompe de nettoyage, le module principal de commande, les jambes de prélèvement, le circuit hydraulique, les galets de roulements, les batteries, le groupe électrogène, etc. Certaines opérations sont liées au remplacement des pièces d'usures, d'autres peuvent être liées à des pannes.

3.2. Valorisation des données

L'utilisateur des données se doit de prendre connaissance des rapports de métrologie disponibles sur le site internet dédié à MAREL Carnot afin d'interpréter au mieux les données.

3.2.1. Utilisation des données issues du système MAREL Carnot

La valorisation et la diffusion des données MAREL Carnot via son numéro DOI (<http://www.seanoe.org/data/00286/39754/>) permet aujourd'hui d'accroître son utilisation à des fins de Recherche mais aussi d'Enseignement. Pour la nouvelle habilitation du Master Sciences de la Mer à l'université du Littoral Côte d'Opale, un module biostatistique 2 : Pratique de R et Etude des séries temporelles a été développé en 2015 pour une mise en oeuvre dès 2016 et ce pour une période de 4 ans. L'objectif de ce module est d'offrir des compétences en programmation R et analyse exploratoire de séries de données biologiques à diverses échelles. Pour appuyer l'ensemble des notions théoriques et la démarche scientifique d'analyse de données, les données MAREL-CARNOT vont servir de fil conducteur et de cas pratique pour toute l'architecture du cours et des travaux pratiques associés. Ce cours a été rédigé et sera enseigné par Emilie Poisson Caillault, enseignant-chercheur au ULCO/LISIC et membre associé IFREMER depuis septembre 2014. Le plan de ce module a été visé conjointement par Emile Poisson Caillault et Alain Lefebvre. Cette unité d'enseignement s'adresse à la fois aux étudiants de première année de Master Sciences de la Mer mais aussi aux étudiants de troisième cycle dans le cadre de leur formation doctorale.

Pour les besoins de cette formation un script R a été développé. Il permet, à partir d'un fichier de données brutes extrait de la base Coriolis, de :

- mettre en forme les données (alignement temporel, validation des données en fonction des gammes capteurs et experts),
- définir la taille de la matrice de données, le pourcentage de données acquises pour la période considérée et par paramètre,

- proposer les paramètres statistiques de base pour les différents paramètres pour la période considérée,
- étudier les variabilités saisonnière et interannuelle grâce à des boîtes à moustaches,
- de comparer les statistiques par paramètre entre les résultats acquis sur la période [Année 0, Année N-1] et ceux acquis l'année N.

Quelques exemples de résultats sont proposés en section 3.2.5.

La base de données MAREL-Carnot 2004-2015 du DOI a aussi été valorisée dans un package R comme jeu de test. Développé en collaboration Agence de l'Eau Artois Picardie – IFREMER – ULCO/LISIC, ce package uHMM (<https://cran.r-project.org/web/packages/uHMM/index.html>), contient à la fois des fonctions de visualisation, classification et modélisation de séries temporelles mais aussi une interface utilisateur. Ainsi toute personne sans bagage nécessaire de programmation informatique ou classification peut reproduire l'ensemble des travaux de la thèse de Kevin Rousseuw ou ceux présentés à ASLO 2015 sur les campagnes DYPHIMA. Cette interface fournit l'ensemble des résultats et outils statistiques d'analyse dans divers tableurs, images. Les figures 5 et 6 illustrent l'importation des données MAREL-Carnot via cette interface et le résultat de détection des événements caractéristiques de la période considérée.

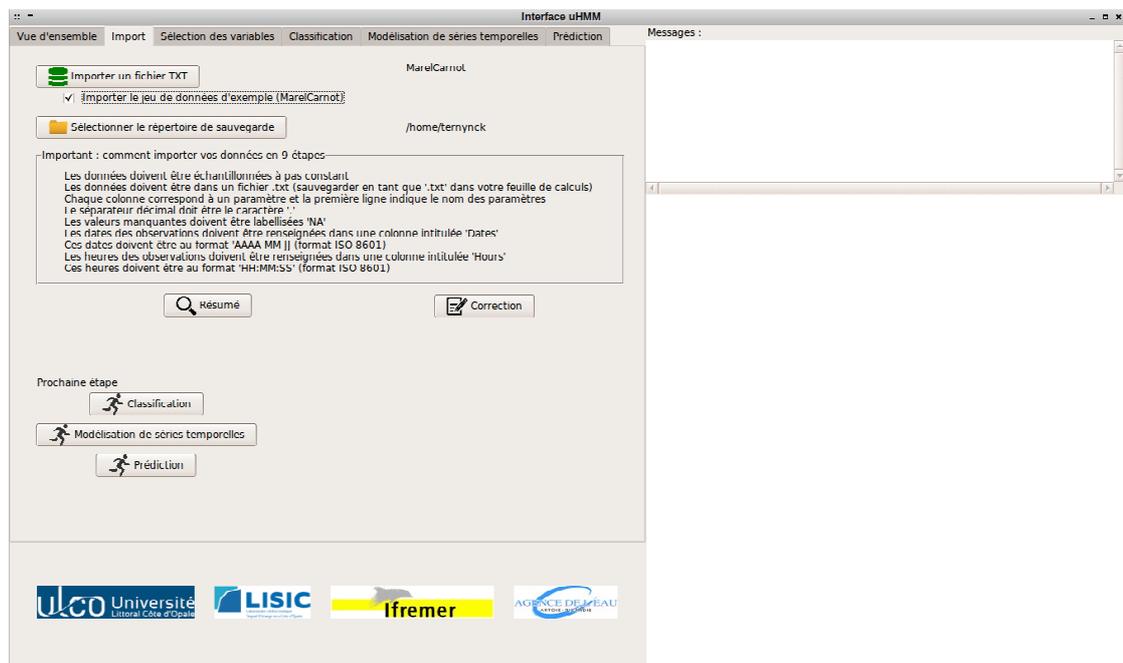


Figure 5. Copie d'écran de l'interface uHMM important les données MAREL-Carnot.

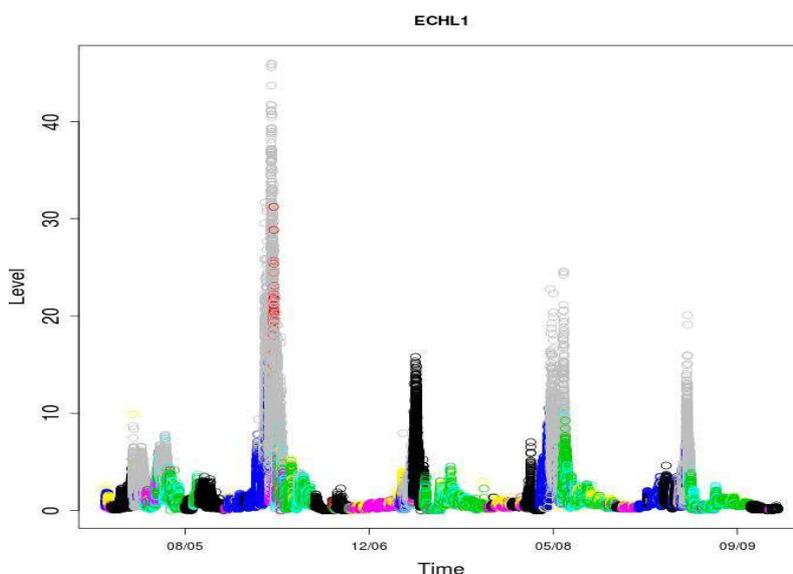


Figure 6. Projection colorée des évènements détectés sur le paramètre Fluorescence ECHL (FFU).

3.2.2. Valorisation scientifiques

En 2015, les données MAREL Carnot ont pu être valorisées sous différentes formes :

Rapports et communications scientifiques :

- Rousseeuw K., Lefebvre A., Caillault-Poisson E., 2015. Synthèse des résultats de la thèse de Rousseeuw K. (2011-2014). Modélisation de signaux temporels hautes fréquences, multicapteurs à valeurs manquantes. Application à la prédiction des efflorescences phytoplanctoniques dans les rivières et les écosystèmes marins côtiers. Rapport Ifremer ODE/LITTORAL/LER.BL/15.04, 29 p.
- Lefebvre A., Devreker D., 2015. MAREL Carnot : Rapport n° 9 : Bilan d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer). Bilan de l'année 2014. Ifremer/RST.LER.BL/15.06, 37 pages.
- Rousseeuw K., Poisson-Caillault E., Lefebvre A., Hamad D., 2015. Hybrid Hidden Markov Model for Marine Environment Monitoring. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 8 (1), 204-213 (IF: 2.827),
- Lefebvre A., Poisson-Caillault E., Rousseeuw K., 2015. Towards a Better Understanding of Phytoplankton Bloom Dynamics and Assessment of Ecological Status Using Unsupervised Dynamic modeling (Communication orale). Colloque ASLO, Aquatic Science Meeting 2015, 22-27 février 2015, Granada, Espagne.
- Lefebvre A., Poisson-Caillault E., Rousseeuw K., 2015. Spatio-temporal dynamics of phytoplankton biomass in the English Channel: high resolution strategy and modeling using unsupervised classification and Hidden Markov Model. Conférence GDR PhycoTox / GIS Cyano, 31 mars – 2 avril 2015, IUEM, Brest.
- Rousseeuw K., Caillault-Poisson E., Lefebvre A., 2015. Modélisation de signaux temporels hautes fréquences, multi-capteurs à valeurs manquantes. Application à la compréhension et à la prédiction des efflorescences phytoplanctoniques. Journée Coriolis Côtier, 19/11/2015, Montpellier.

Communication grand public :

Lefebvre A., 2015. L'observation et la surveillance de l'environnement marin en Manche orientale : de la basse fréquence vers la haute fréquence. Comité de bassin de l'Agence de l'Eau Artois Picardie, CAB, 24/04/2015, Boulogne-sur-Mer.

Autres valorisations en lien avec la HF (et pas uniquement avec MAREL Carnot) :

- Bonato S, Christaki U, Lefebvre A, Lizon F, Thyssen M, Artigas F. High spatial variability of phytoplankton assessed by flow cytometry, in a dynamic productive coastal area, in spring: the eastern English Channel. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 154: 214-223.

- Thyssen M., Alvain S., Lefebvre A. , Dessailly D. , Rijkeboer M. , Guiselin N. , Creach V. , Artigas L.-F. , 2015. High-resolution analysis of a North Sea phytoplankton community structure based on in situ flow cytometry observations and potential implication for remote sensing. *Biogeosciences*, 12, 4051-4066.

- Artigas L.F, Bonato S., Creach V., Hébert P.A., Lefebvre A., Lizon F., Poisson-Caillault E., Rijkeboer M., Thyssen M., Veen A., 2015. On the combination of semi-automated approaches and tools for measuring phytoplankton dynamics in coastal waters: implications for monitoring networks. Colloque ASLO, Aquatic Science Meeting 2015, 22-27 février 2015, Granada, Espagne.

- Artigas L.F., Bonato S., Créach V., Didry M., Gomez F., Guiselin N., Hamad D., Hébert P.A., Houliez E., Lefebvre A., Lampert L., Lizon F., Poisson-Caillault E., Prévost E., Rijkeboer M., Thyssen M., Veen A., Rutten T., Wacquet G., 2015. Monitoring of phytoplankton and Harmful Algal Blooms in coastal waters by combining innovative semi-automated tools (scanning flow cytometry & spectral fluorometry). Conférence GDR PhycoTox / GIS Cyano, 31 mars – 2 avril 2015, IUEM, Brest.

- A.M. Doglioli, G.Grégori, J.-M. André, N.Barrier, L.Bellomo, L.Berline, F.Carlotti, V.Cornet-Barthaux, A.Costa, F.d'Ovidio, F.Diaz, M.Dugenne, C.Estournel, O.Grosso, S.Helias-Nunige, K.LebLANC, A.Lefebvre, D.Lefevre, D.Malengros, P.Marsaleix, T.Moutin, F.Nencioli, D.Nerini, I.Pairaud, A.Petrenko, C.Pinazo, E.Pulido, B.Quéguiner, O.Ross, G.Rougier, S.Schintu-Jacquet, I.Taupier-Letage, M.Thyssen, T.Wagener, B.Zakardji, 2015. OSCAHR - Observing Submesoscale Coupling At High Resolution. MERMEX 2015 Workshop, 7-10 avril 2015, Marseille-Luminy campus, Marseille (Poster).

Encadrements de projets

Marwane BATKOUM, étudiant de Master 1 ULCO TSI, projet : Etude de la complétion par EMD de séries temporelles multidimensionnelles à données manquantes sur des périodes de tailles variables. Applications aux données MAREL Carnot

Moez DALHOUMI, étudiant de Master 1 ULCO TSI, projet : Validation des données et complétion par analyse de tendance. Etudes des données HF MAREL Carnot et mesures à Courcelles.

BENKIRANE Houda et DELABASSERUE Rémi, étudiants ING3 EILCO, étude bibliographique : Appariement élastique (DTW, Elastic matching) et programmation optimisée avec une perspective multi-CPU et GPU pour la complétion de données manquantes ou aberrantes.

Autres

On peut également noter que l'année 2015 a été marquée par le montage d'une convention AEAP / ULCO-LISIC, en partenariat avec l'Ifremer LER-BL pour le développement d'une interface utilisateur basée sur les résultats de la thèse de Kévin Rousseeuw (2010-2014).

En parallèle, l'ULCO/LISIC encadre la thèse de Phan Thi Thu Hong (2015-2018) intitulée "Appariement élastique (par métrique classique et floue), critères et méthodes pour la classification et la modélisation des séries temporelles incomplètes". Directeur de thèse : Bigand A. Encadrante : Poisson-Caillault E. L'Ifremer, LER/BL collabore à ce travail pour le volet "expertise environnementale".

La convention d'accueil d'Emilie Poisson-Caillault (MCF, ULCO/LISIC) a été renouvelée afin de permettre la poursuite du travail engagé dans le projet InterReg 2 Mers 2010-2014 DYMAPHY et lors de la thèse de K. Rousseeuw sur le traitement et la modélisation des signaux HF (2010-2014).

Une convention d'accueil est en cours de montage avec l'ULCO afin de pouvoir renforcer la collaboration sur le sujet HF avec Mr Jean-Marc Leblond dans le cadre du CPER MARCO et du projet H2020 JERICO-Next.

Les réflexions sont en cours afin de proposer le système MAREL Carnot dans le dossier de labellisation HOSEA proposé par l'Ifremer à la CSOA (Commission Spécialisée Océan Atmosphère du CNRS - INSU).

3.2.3. Colloque « Instrumentation haute fréquence pour l'observation et la surveillance de l'environnement marin »

Faisant suite au colloque qui s'est déroulé à Boulogne-sur-mer les 12 et 13 juin 2014, un ouvrage de synthèse proposé par F.G. Schmitt (UMR CNRS 8187 LOG, Wimereux) et A. Lefebvre (Ifremer, LER/BL, Boulogne-sur-Mer) sera disponible courant 2016 aux éditions du CNRS.

3.2.4. Projets scientifiques associés

Le projet de **CPER MARCO** – Recherches marines et littorales en Côte d'Opale : des milieux aux ressources, aux usages et à la qualité des produits aquatiques, est un projet structurant multi-laboratoires, multi-organismes associant la mise en place d'instruments et d'outils (enquêtes, indicateurs) pour une approche globale de l'étude du milieu marin, de la ressource et de la qualité des produits aquatiques. Pour répondre à ces enjeux académiques et sociétaux, le projet s'articule autour de 6 axes :

- 1- Observation et évaluation de l'environnement marin
- 2- Structure, fonctionnement et dynamique des écosystèmes
- 3- Productivité et durabilité des ressources halieutiques et aquacoles
- 4- Qualité et sécurité des ressources aquatiques
- 5- Vulnérabilité et usages des éco-socio-systèmes marins et littoraux
- 6- Ingénierie marine et littorale.

Le système MAREL Carnot est un des piliers de l'axe 1 qui vise à la jouvence ou la mise en oeuvre de nouveaux systèmes instrumentés qui contribuera ainsi à l'optimisation ou au développement des réseaux d'observation et de surveillance et donnera donc une vision, à la fois à proximité des côtes avec des systèmes fixes instrumentés et au large via les mesures d'opportunité, des évolutions de l'environnement côtier dans son ensemble. Il permettra ainsi d'avoir un suivi étendu des évolutions à long terme. Grâce au caractère haute fréquence des acquisitions, il favorisera également l'anticipation et la compréhension de certains processus, parfois nuisibles pour l'écosystème et/ou pour l'Homme et permettra de quantifier, par exemple, l'impact d'évènements intermittents et d'évènements extrêmes.

A l'échelle européenne, dans la continuité de la démarche scientifique engagée dans le cadre du projet InterReg IVa-2 Mers DYMAPHY (2010-2014), le LER/BL et ses partenaires sont impliqués dans le **projet H2020 JERICO-Next** (New European eXpertise for coastal observatories) et plus particulièrement dans les axes 3 et 4 dédiés, respectivement, (i) au développement de technologies et de méthodologies, avec pour notre groupe un projet orienté vers le développement et la mise en oeuvre de plateformes automatisées pour l'observation du phytoplancton et (ii) à des cas d'étude en Manche et en mer du Nord. Il s'agira pour notre groupe de travailler à l'étude de l'eutrophisation, des blooms d'algues nuisibles et à la diversité du plancton. Le système MAREL Carnot servira de plateforme test à une campagne de mesures à haute résolution couplant le système à un cytomètre en flux et à un analyseur spectral en 2017. Ce projet s'inscrit dans le cadre des besoins d'amélioration des connaissances en lien avec la mise en oeuvre de la **DCSMM** (Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin, 2010/56/EU).

3.2.5. Exemples de résultats

Caractérisation de la matrice :

Le script R fournit automatiquement les noms des différentes colonnes et la taille de la matrice (exemple basé sur une extraction de données entre le 01/01/2014 et le 31/12/2015) :

- A chaque instant, combien de données sont enregistrées? A quoi correspondent-elles?

```
nbc=dim(df)[2]; nbc
[1] 26
Noms.para=names(df); Noms.para
[1] "PLATFORM" "DATE..yyyy.mm.ddThh.mi.ssZ."
[3] "LATITUDE..degree_north." "LONGITUDE..degree_east."
[5] "DRYT.LEVEL0..degree_Celsius." "GSPD.LEVEL0..meter.second."
[7] "RELH.LEVEL0...." "SLEV.LEVEL0..meter."
[9] "WDIR.LEVEL0..degree." "WSPD.LEVEL0..meter.second."
[11] "TEMP.LEVEL1..degree_Celsius." "PSAL.LEVEL1..psu."
[13] "BATTERY.LEVEL1..volt." "CNDC.LEVEL1..S.m."
[15] "DEPH.LEVEL1..meter." "DOX1.LEVEL1..ml.l."
[17] "END_CYCLE_FLOW.LEVEL1..l.minute." "FLU3.LEVEL1..FFU."
[19] "LGH4.LEVEL1..micromole.photon..m2.s.." "MASS_DOXY.LEVEL1..milligram.m3."
[21] "OSAT.LEVEL1...." "PHPH.LEVEL1..none."
[23] "START_CYCLE_FLOW.LEVEL1..l.minute." "TUR4.LEVEL1..ntu."
[25] "QC" "MAREL_DATASTATE_1"
```

Le fichier fourni contient 16982 instants de mesures et 26 paramètres (données et métadonnées confondues).

Le script R fournit également les paramètres de tendance centrale et de dispersion pour chaque paramètre de la série considérée avant et après application des gammes capteur et experts :

	DRYT	GSPD	SLEV	WDIR
1	Min. :22	Min. : 1	Min. : 9	Min. : 0
2	1st Qu.:22	1st Qu.: 7	1st Qu.:10	1st Qu.: 71
3	Median :22	Median :10	Median :12	Median :132
4	Mean :22	Mean :11	Mean :11	Mean :146
5	3rd Qu.:22	3rd Qu.:14	3rd Qu.:12	3rd Qu.:230
6	Max. :23	Max. :51	Max. :13	Max. :359
7	NA's :16966	NA's :8090	NA's :16966	NA's :8090

	WSPD	TEMP	PSAL	CNDC
1	Min. : 0	Min. : 6	Min. : 1	Min. :3
2	1st Qu.: 6	1st Qu.:13	1st Qu.: 28	1st Qu.:4
3	Median : 8	Median :17	Median : 33	Median :4
4	Mean : 9	Mean :16	Mean : 31	Mean :4
5	3rd Qu.:11	3rd Qu.:18	3rd Qu.: 34	3rd Qu.:4
6	Max. :30	Max. :24	Max. :318	Max. :4
7	NA's :8090	NA's :4886	NA's :4886	NA's :12371

Les valeurs aberrantes au regard des gammes capteurs et expert sont surlignées en rouge. Les gammes sont identifiées par des traits pointillés (Figure 7).

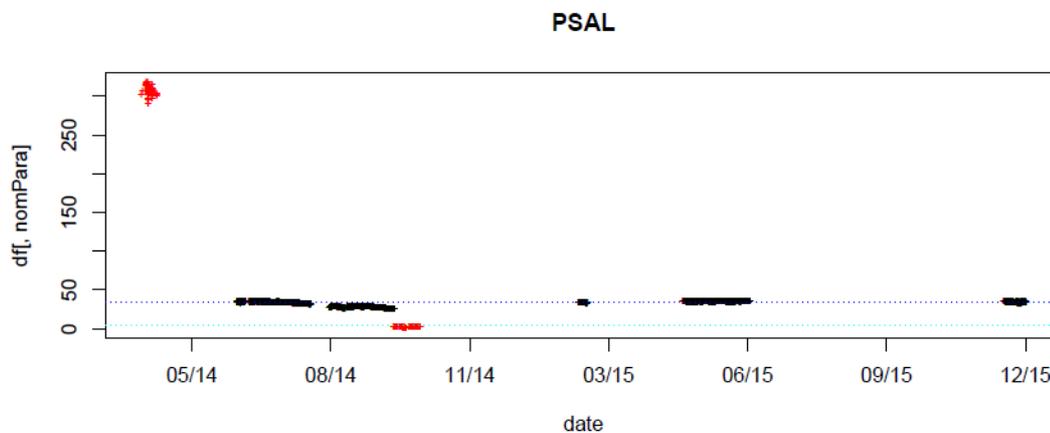


Figure 7. Série de données de salinité (PSU) : en noir les données considérées comme valides, en rouge les données aberrantes.

Les statistiques de base par paramètre sont synthétisées via une représentation en boîte à moustaches (Figure 8).

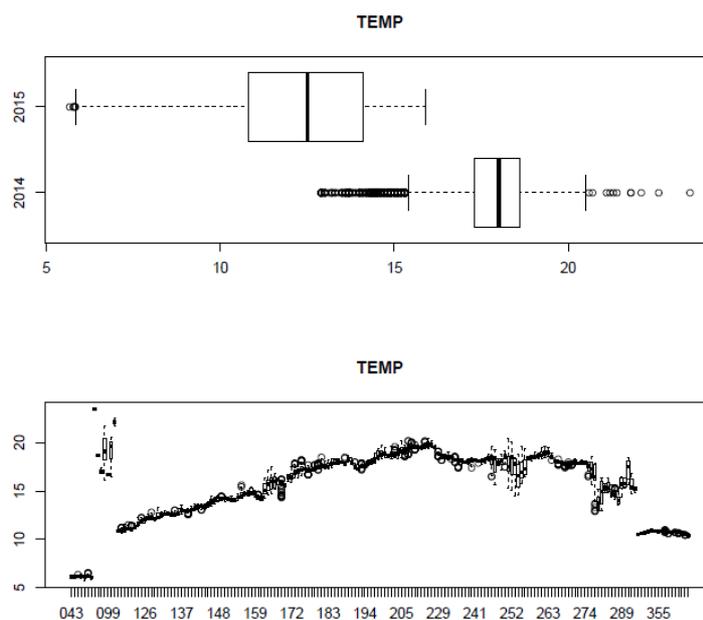


Figure 8. Boîte à moustache par année et par jour de la température (°C).

Différents diagrammes sont proposés pour illustrer l'importance d'une acquisition haute fréquence avec notamment des analyses multi-échelles illustrées ci-après sur le paramètre fluorescence, analyses sur la période 2004-2015 (Figure 9).

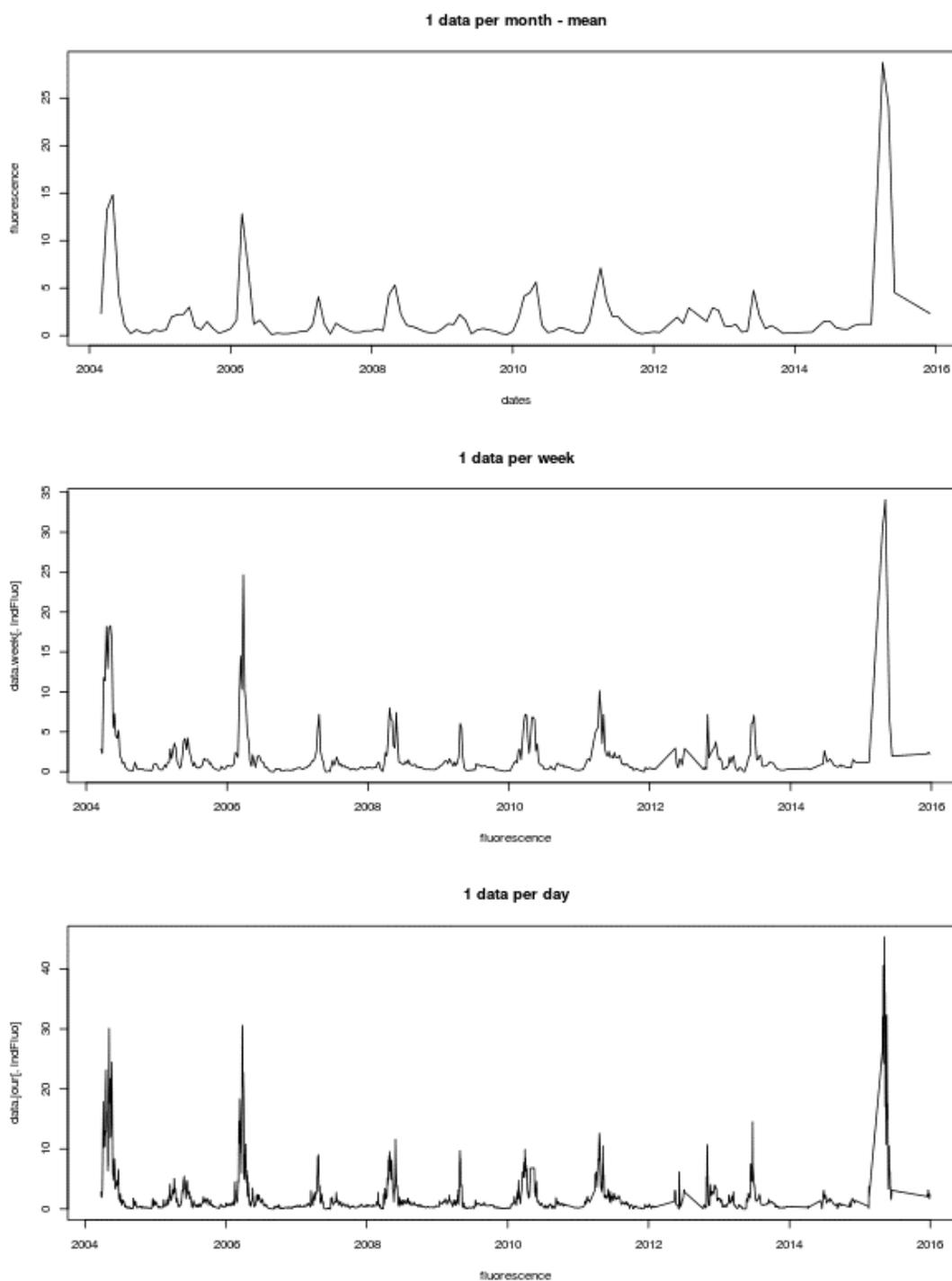


Figure 9. Modification du signal en fonction de la fréquence d'échantillonnage considérée (mensuelle, hebdomadaire et journalière).

Plus la période d'échantillonnage est grande et plus la biomasse phytoplanctonique est sous-estimée, notamment en période de bloom. En 2015, on relève des pics de fluorescence supérieurs à $50 \mu\text{g/L}$ pour une résolution de 20 minutes, $45 \mu\text{g/L}$ pour un échantillonnage journalier, $34 \mu\text{g/L}$ en hebdomadaire et $27 \mu\text{g/L}$ à l'échelle du mois.

La figure 10 illustre la forte variabilité journalière de la valeur de fluorescence toute année confondue. Un écart de fluorescence de l'ordre de 10 à 20 FFU peut être observé à l'échelle d'une journée en considérant soit l'écart entre les quantiles Q1 et Q3, soit l'écart entre les moustaches.

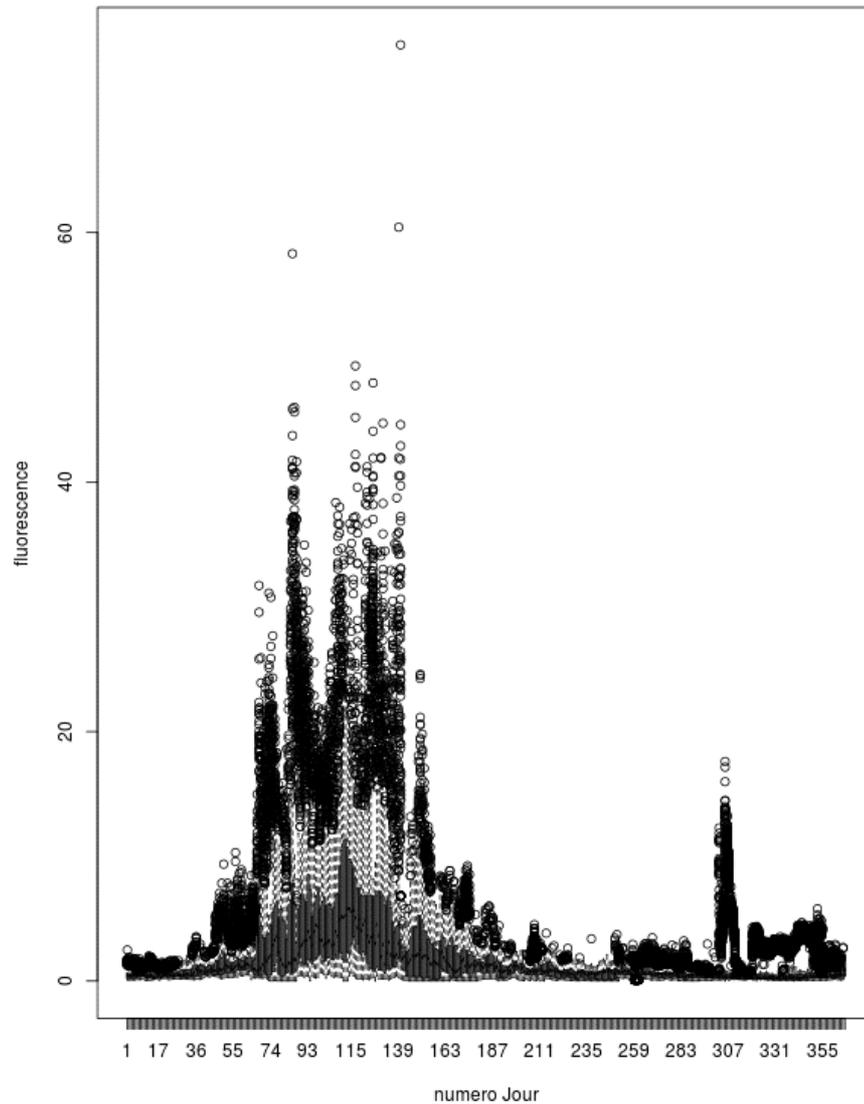


Figure 10. Visualisation des boîtes à moustache par jour (fréquence d'échantillonnage de 20 min) de la fluorescence.

La figure 11 propose une comparaison de la concentration en oxygène (mg/L) entre l'année 2012 et les années précédentes.

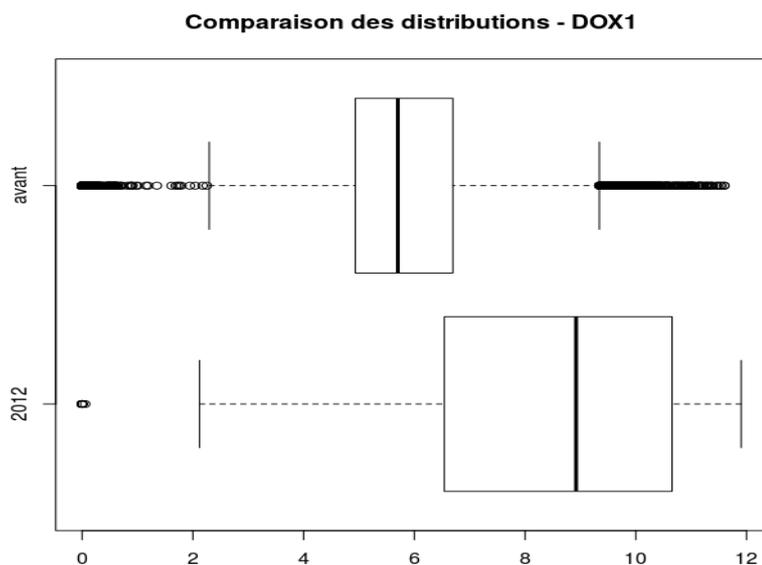


Figure 11. Boîtes à moustache de la concentration en oxygène (mg/L) pour l'année 2012 et pour les années précédentes.

Pour conclure, il faut donc noter que le système MAREL Carnot est dans une phase de transition liée à une volonté de jouvence majeure financée par les projets CPER MARCO et JERICO-Next. Pendant cette phase, l'acquisition des données en mode nominal est rendue délicate. Ainsi, l'effort est porté sur le développement d'outils d'aide à l'importation depuis la base de données Coriolis, le pré-traitement et l'analyse exploratoire des données, la classification des états environnementaux et la modélisation. A terme, il s'agit donc de bénéficier d'un système complet depuis l'acquisition des données jusqu'à leur valorisation optimale.

RÉFÉRENCES

La liste ci-dessous correspond aux documents cités dans ce rapport ou aux documents de base utiles pour l'interprétation des résultats ou aux documents relatifs à des mesures à haute fréquence. Cette liste n'est pas exhaustive mais permet aux personnes intéressées de disposer d'un minimum de documents pour appréhender le sujet de la mesure à haute fréquence.

- Aminot, A., Kirkwood, D. et Kérouel, R., 1997. Determination of ammonia in seawater by the indophenol-blue method: evaluation of the ICES NUTS I/C 5 questionnaire. *Marine Chemistry*, 56 : 59-75.
- Aminot A. & R. Kérouel, 2004. Hydrologie des écosystèmes marins. Paramètres et analyses. Éd. Ifremer, 336 p.
- Aminot, A., Kérouel, R. et Birot D., 2001. A flow injection-fluorometric method for the determination of ammonium in fresh and saline waters with a view to in situ analysis. *Water Research*, 35 (7) :1777-1785.
- Brylinski J.-M. & Lagadeuc Y., 1990. L'interface eaux côtières/eaux du large dans le Pas-de-Calais (côte française) : une zone frontale. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 311, Série II, p. 535-540.

- Caillault É., Lefebvre A., Hamad D., 2009. Modélisation de la dynamique de l'efflorescence de l'écosystème côtier. Atelier du Réseau National des Stations Marines sur les mesures à haute fréquence dans l'environnement marin, Wimereux, 22-23 octobre 2009.
- Caillault É. & Lefebvre A., 2011. Phytoplankton monitoring system and countermeasures to prevent toxics algae blooms. Colloque NTMS INNOVATIVE PROJECTS 2011 (Fourth International Conference on New Technologies, Mobility and Security) in conjunction with IFIP NTMS 2011, 10 février 2011, Paris.
- Duval P., 2009. Etude à haute fréquence de la dynamique de l'écosystème côtier sous influence anthropique : contexte des efflorescences de la prymnésiophycée *Phaeocystis globosa* au large de Boulogne-sur-Mer. Ifremer/TMR.LER.BL/09.06, 44 pages (Encadrement A. Lefebvre).
- Forney G. J., "The Viterbi Algorithm," Proceedings of the IEEE, vol. 61, no. 3, pp. 268–278, 1973
- Hartigan J.A. & Wong M.A., "A K-means Clustering Algorithm" vol. 28, no.1, pp. 100-108, 1979.
- Hébert C. & A Lefebvre, 2004. Circulation des masses d'eau dans la rade de Boulogne-sur-Mer – Étude préalable à l'implantation de la station de mesures automatisées MAREL Carnot - *Rapport Ifremer DEL/BL/RST/04/08*, 18 pages.
- Ihaka R. & R. Gentleman, 1996. R : a language for data analysis and graphics. *J. Comput. Graphics Stat.*, 5 : 299-314.
- Lefebvre A., Repecaud M., Facq J.-V., Lefebvre G. & B. Hitier, 2002. Projet d'implantation de la station de mesures automatisées MAREL dans le port de Boulogne-sur-Mer - Mesures *in situ* et résultats du modèle d'advection-diffusion Mars 2D. *Rapport Ifremer DEL/BL/RST/02/07*, 51 pages.
- Lefebvre A. & M. Repecaud, 2006. MAREL Carnot - Partie 1 : Bilan de la mise en place d'un système de mesures automatisées à haute fréquence en zone côtière de Boulogne-sur-Mer. *Rapport Ifremer/RST.LER.BL/06.09*, 18 pages + CD ROM.
- Lefebvre A., 2007. MAREL Carnot : Partie 2 : Valorisation des données d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer). Données de l'année 2006. Ifremer/RST.LER.BL/07.08, 44 pages.
- Lefebvre A., 2008. MAREL Carnot : Partie 3 : Valorisation des données d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer). Données de l'année 2007. Ifremer/RST.LER.BL/08.04, 23 pages.
- Lefebvre A., 2009. Mise en œuvre d'un système de Mesures Automatisées en Réseau de l'Environnement Littoral (MAREL Carnot) en Manche orientale : Une zone à problème potentiel au regard de l'eutrophisation sous haute surveillance. Atelier du Réseau National des Stations Marines sur les mesures à haute fréquence dans l'environnement marin. Wimereux, 22-23 octobre 2009.
- Lefebvre A., 2010. MAREL Carnot : Rapport n° 4 : Valorisation des données d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer). Bilan de l'année 2009. Ifremer/RST.LER.BL/10.08, 20 pages.
- Lefebvre A., 2011. MAREL Carnot : Rapport n°5 : Valorisation des données d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer). Bilan de l'année 2010. Ifremer/RST.LER.BL/11.04, 19 p.

- Lefebvre A., Rousseeuw Kévin, Caillault Émilie, 2012. MAREL Carnot : Rapport n°6 : Valorisation des données d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer) Bilan de l'année 2011. Ifremer/RST.LER.BL/12.05, 36 p.
- Lefebvre A., Rousseeuw K., 2013. MAREL Carnot : Rapport n° 7 : Bilan d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer). Bilan de l'année 2012. Ifremer/RST.LER.BL/13.09, 25 p.
- Lefebvre A., Rousseeuw K., 2014. MAREL Carnot - Rapport n° 8 : Bilan d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer). Bilan de l'année 2013. Rapport Ifremer ODE/LITTORAL/LER.BL/14.02, 28 p.
- Lefebvre A., Devreker D., 2015. MAREL Carnot : Rapport n° 9 : Bilan d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer). Bilan de l'année 2014. Ifremer/RST.LER.BL/15.06, 37 pages.
- Lefebvre A. & Caillault É., 2011. Study of the dynamic of the Phytoplankton bloom in the eastern English Channel using an high frequency instrumented station (MAREL) and a naive clustering classification method. Colloque EGU (European Geosciences Union) General Assembly 2011, Vienna, Austria, 3-8 April 2011.
- Lefebvre A., Guiselin N., Barbet F., Artigas L. F. Long-term hydrological and phytoplankton monitoring (1992-2007) of three potentially eutrophicated systems in the eastern English Channel and the southern bight of the North Sea. *ICES Journal of Marine Science*, 68(10): 2029-2043.
- Legendre L. & P. Legendre, 1998. *Numerical Ecology*. Elsevier, Amsterdam, 853 p.
- Liao T.W., "Clustering of time series data – survey", *Pattern Recognition*, vol.38, no.11, pp. 1857-1874, Nov 2005.
- Plat, T., Denman, K. L., 1975. Turbulent structure function in turbulent shear flows. *Ann, Rev, Ecol, Syst*, 6, 189-210.
- Rabiner L., "A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition", *Proceedings of the IEEE*, 1989.
- Rousseeuw K., É. Caillault, A. Lefebvre, and D. Hamad, "Monitoring system of phytoplankton blooms by using unsupervised classifier and time modeling," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2013 IEEE International, July 2013, pp. 3962–3965
- Rousseeuw K., Poisson Caillault É., Lefebvre A., Hamad D., 2013. Detection of contrasted physico-chemical and biological environmental status using unsupervised classification tools. 5th FerryBox Workshop, Helsinki, Finland, 24-25 April 2013.
- Samen F., Aoustin Y., Repecaud M., Rolin J.F., Woerther P., 2010. Monitoring à Haute Fréquence pour la surveillance du milieu littoral. Rapport Ifremer RDT/IPR/10/074, 158 p.
- Schmitt, F. G., 2005. Relating lagrangian passive scalar scaling exponents to eulerien scaling exponents in turbulence. *European Physical Journal*, B48, 129-137.
- Soudant A., Soudant D., Lefebvre A., 2008. Influence de la période et de la fréquence d'échantillonnage sur le percentile 90 de la fluorescence. Ifremer/R.INT. DOP/DYNECO/VIGIES2008.17, 36 p.
- Viterbi A., "Error bounds for convolutional codes and an asymptotically optimum decoding algorithm," *Information Theory, IEEE Transactions on*, 1967

Zongo S., 2010. Fluctuations multi-échelles dans les séries temporelles biogéochimiques à moyen et long terme en milieu marin côtier. Thèse de doctorat de l'université de Lille I, 308 pages.

**PARTENAIRES DU PROJET LORS DE LA PHASE DE
MISE EN OEUVRE DU SYSTEME EN 2004**

AGENCE DE L'EAU
ARTOIS . PICARDIE

Syndicat Mixte
de la Côte d'Opale

Audomarois - Boulonnais - Calaisis - Dunkerquois - Montreuillois

RÉGION
NORD
PAS DE CALAIS



INSTITUT NATIONAL
DES SCIENCES
DE L'UNIVERS



**Communauté
d'agglomération**
du Boulonnais

L'Agence de l'Eau Artois-Picardie et l'Ifremer assure le financement du fonctionnement annuel du système.