

Département ODE/Unité Littoral  
Laboratoire côtier Environnement et Ressources  
de Boulogne-sur-Mer

Lefebvre Alain, Ifremer

En collaboration avec  
Poisson-Caillault Emilie, ULCO/LISIC

Juin 2018 – Ifremer/RST.LER.BL/18.05



Rapport N° 12

# MAREL Carnot

Bilan d'une surveillance à haute fréquence  
en zone côtière sous influence anthropique  
(Boulogne-sur-Mer). Bilan 2017





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

Opérations et actions scientifiques  
pour l'année 2017

Rapport édition 2018



## Fiche documentaire

<b>Numéro d'identification du rapport :</b> Ifremer/RST.LER.BL/18.05 <b>Diffusion :</b> libre : <input checked="" type="checkbox"/> restreinte : <input type="checkbox"/> interdite : <input type="checkbox"/> <b>Contact : A. Lefebvre</b> Adresse électronique : alain.lefebvre@ifremer.fr	<b>Date de publication :</b> Juin 2018 <b>Nombre de pages :</b> 24 <b>bibliographie :</b> Oui <b>Illustration(s) :</b> Oui <b>Langue du rapport :</b> Français
<b>Titre du rapport :</b> Bilan d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer). Bilan 2017.	
Rapport intermédiaire <input type="checkbox"/> Rapport définitif <input checked="" type="checkbox"/>	
<b>Auteurs :</b> Alain Lefebvre (Responsable scientifique) Emilie Poisson-Caillault <b>Collaborateurs :</b> <u>Scientifique</u> Kelly Grassi (Thèse Weather Force, Ifremer, ULCO/LISIC) <u>Maintenance</u> Michel Répécaud (Responsable technique) Jean-Valéry Facq Loïc Quémener <u>Interfaçage</u> Jean Marc Leblond	<b>Organisme / Direction / Service, laboratoire</b> Ifremer – ODE/LER, Boulogne-sur-Mer. ULCO / LISIC, Calais.  Ifremer – ODE/LER, Boulogne-sur-Mer.  Ifremer – RDT, Brest. Ifremer – RDT/HO, Boulogne-sur-Mer. Ifremer – RDT, Brest.  ULCO, Boulogne-sur-Mer.
Cadre de la recherche : Action Ifremer « MAREL Carnot » (eOTP SAP : P204-0029-01). Co-financement : Agence de l'Eau Artois-Picardie (Convention N° 99371).	
<b>Résumé</b> 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.	
<b>Mots-clés</b> Manche orientale, Boulogne-sur-Mer, haute fréquence temporelle, MAREL, hydrologie, fluorescence.	
<b>Comment citer ce rapport :</b> Lefebvre A., Poisson-Caillault E., Grassi K., 2018. MAREL Carnot : Rapport n° 12 : Bilan d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer). Bilan 2017. Ifremer/RST.LER.BL/18.05, 24 pages.	





# sommaire

---

<b>1. INTRODUCTION .....</b>	<b>8</b>
<b>2. FONCTIONNEMENT DE MAREL CARNOT DE 2004 A NOS JOURS.....</b>	<b>9</b>
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>	12
<b>3. RÉSULTATS.....</b>	<b>13</b>
3.1. <i>Bilan de fonctionnement.....</i>	13
3.2. <i>Valorisation des données.....</i>	15
3.2.1. <i>Utilisation des données issues du système MAREL Carnot.....</i>	15
3.2.2. <i>Valorisation scientifiques .....</i>	16
3.2.3. <i>Nouveau projet scientifique associé .....</i>	20
<b>4. CONCLUSIONS .....</b>	<b>20</b>

---



# 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. Récemment dans le cadre de l'Infrastructure de Recherche Littorale et Côtière ILICO, les équipes se sont structurées en un réseau national multi-organismes : le COAST-HF. Une large gamme de paramètres est maintenant mesurée sur des sites très variés (Figure 1).

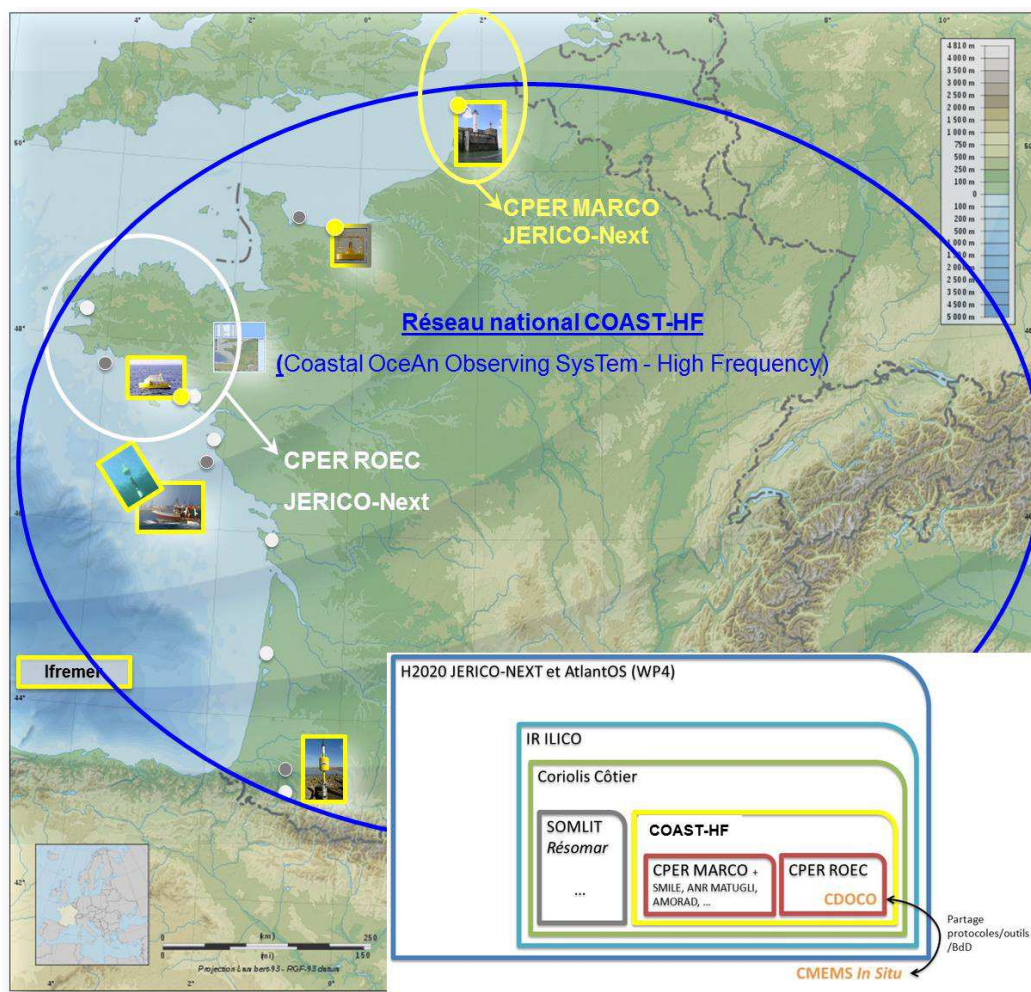


Figure 1. Localisation des stations instrumentées du réseau national COAST-HF. Lien avec les infrastructures de recherche, les projets scientifiques et techniques



## 2. FONCTIONNEMENT DE MAREL CARNOT DE 2004 A NOS JOURS

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 & Répécaud, 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).

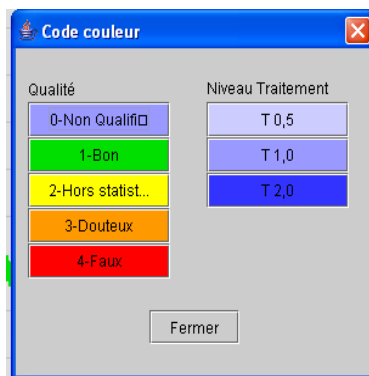


Figure 2. Niveau de traitement et de qualité des données lors de la procédure de contrôle (Capture d'écran de l'outil de contrôle qualité OCQ)

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 affectées 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 :

<https://wwz.ifremer.fr/Recherche-Technologie/Infrastructures-de-recherche/Infrastructures-d-observation-des-oceans/CORIOLIS>

Les données issues des plateformes de mesures à haute fréquence comme MAREL Carnot (Figure 4) sont collectées par CORIOLIS et diffusées par le Centre de données pour l'océanographie côtière opérationnelle (CDOCO). Elles sont accessibles/téléchargeables via : <http://www.coriolis.eu.org/Observing-the-Ocean/HF-Coastal-Network2>

Le code plateforme pour MAREL Carnot dans CORIOLIS est [62443](#)

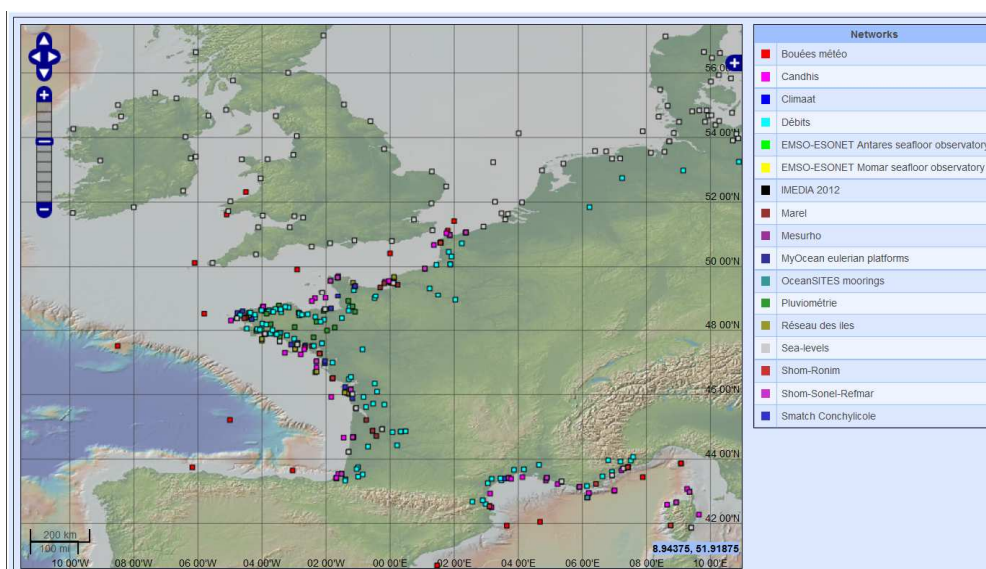


Figure 4. Localisation des différents sites de l'infrastructure CORIOLIS dont fait partie MAREL Carnot

On accède également directement à la visualisation et au téléchargement des données MAREL Carnot via le lien :

<http://data.coriolis-cotier.org/platform/62443/2018-02-15T00:00:00.000Z/2018-03-15T00:00:00.000Z>

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](mailto:alain.lefebvre@ifremer.fr)

## 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 5).

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

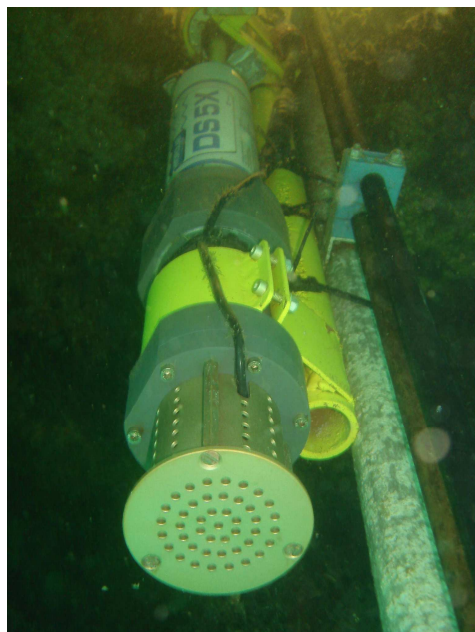


Figure 5. Système de mesure immergé en position sur sa perche

La phase de jouvence du système doit se poursuivre 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 et Répécaud (2006), Lefebvre (2007), Lefebvre (2008), Duval (2009), Lefebvre (2010), Lefebvre (2011), Lefebvre, Rousseuw et Caillault (2012), Lefebvre et Rousseuw (2013), Lefebvre et Rousseuw (2014), Lefebvre et Devreker (2015), Lefebvre et Caillault (2016, 2017). 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. Les systèmes de mesures devraient être de nouveau opérationnels à la fin de l'année 2018.

L'année 2017 a été marquée par un certain nombre de dysfonctionnements dont les causes ont été clairement identifiées. Des actions de corrections ont été mises en place et le système continuera de faire l'objet d'une jouvence en 2018 (dans le cadre du CPER MARCO) afin de réduire considérablement les périodes d'interruption de l'acquisition de données. D'une manière générale, les interruptions de mesures sont liées à des opérations de maintenance qui ont porté sur les galets de roulements, les batteries, le groupe électrogène.

Les figures 6 à 11 illustrent les périodes lors desquelles les données sont disponibles ainsi que les gammes de valeurs mesurées au cours de l'année 2017 (les périodes d'acquisition de données sont arbitrairement connectées entre elles par un trait continu).

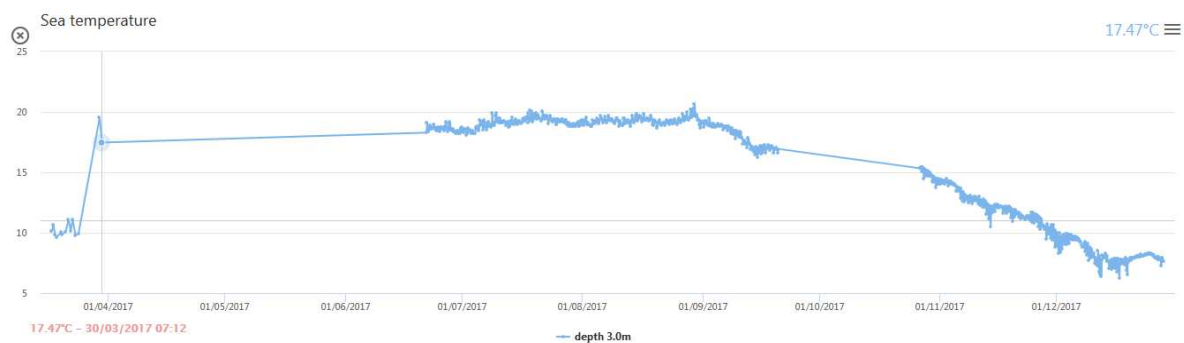


Figure 6. Évolution de la température de l'eau (°C) mesurée par le système MAREL Carnot au cours de l'année 2017



Figure 7. Évolution de salinité (PSU) mesurée par le système MAREL Carnot au cours de l'année 2017

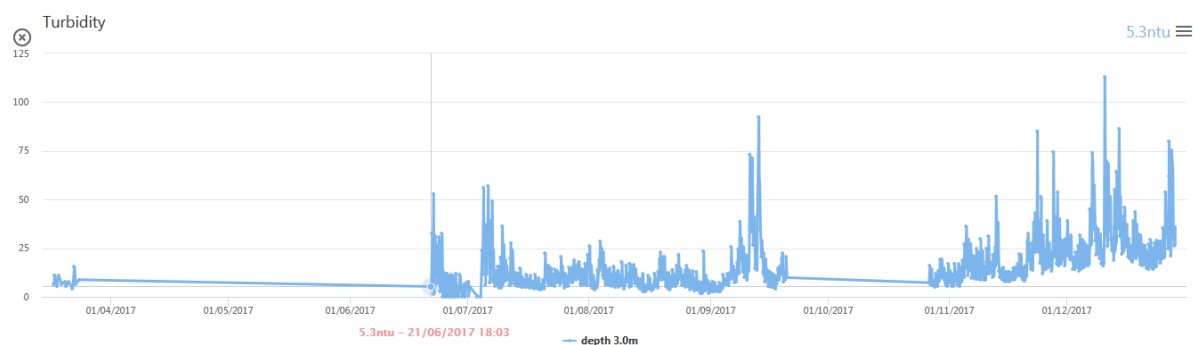


Figure 8. Évolution de la turbidité (NTU) mesurée par le système MAREL Carnot au cours de l'année 2017

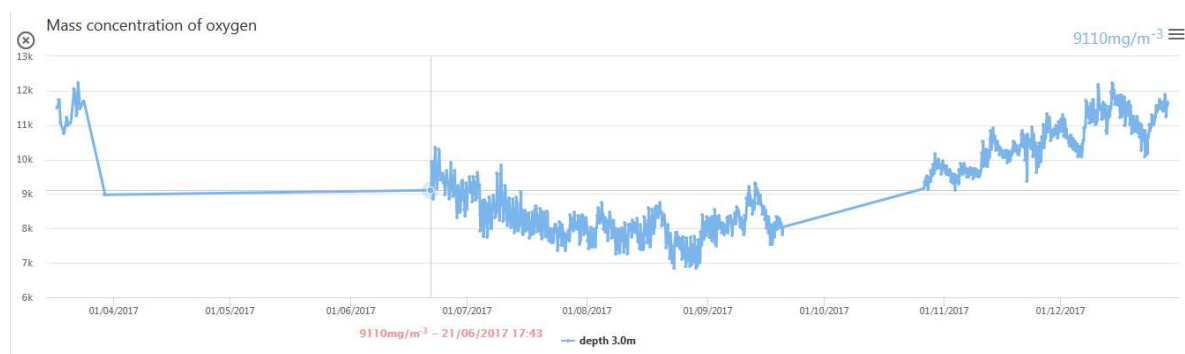


Figure 9. Évolution de la concentration en oxygène ( $\text{mg.m}^{-3}$ ) mesurée par le système MAREL Carnot au cours de l'année 2017

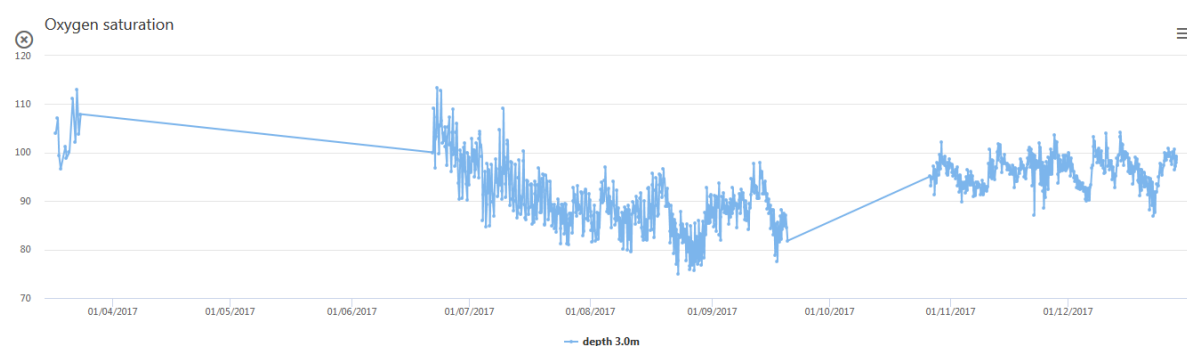


Figure 10. Evolution de la saturation en oxygène (%) mesurée par le système MAREL Carnot au cours de l'année 2017



Figure 11. Évolution de la fluorescence (FTU) mesurée par le système MAREL Carnot au cours de l'année 2017

## 3.2. Valorisation des 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.

Les données MAREL Carnot continuent d'être le support du module biostatistique du Master Sciences de la Mer à l'université du Littoral Côte d'Opale (ULCO). 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.

Les utilisateurs des données MAREL Carnot (comme d'autres systèmes HF) peuvent avoir accès via le site officiel R à un package permettant une analyse et une prédiction des données basées sur l'utilisation conjointe d'une méthode de classification non supervisée et d'un modèle de Markov caché.

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. Cette interface fournit l'ensemble des résultats et outils statistiques d'analyse dans divers tableurs, images. Cette interface est également intégrée dans le module d'enseignement module biostatistique du Master Sciences de la Mer à l'université du Littoral Côte d'Opale (ULCO).

### 3.2.2. Valorisation scientifiques

#### Actes de colloque avec comité de lecture [3]

Phan T.-T.-H., Poisson Caillault E., Lefebvre A., Bigand A., 2017. Which DTW method applied to marine univariate time series imputation. OCEANS17 MTS/IEEE A vision for sustaining our marine futures, 19-22 juin 2017, Aberdeen, Scotland.

Phan T.-T.-H., Poisson Caillault E., Bigand A., Lefebvre A., 2017. A novel approach for uncorrelated multivariate time series imputation. 2017 IEEE International Workshop on Machine Learning for signal processing, 25-28 septembre 2017, Tokyo, Japon.

Phan, Hong & Poisson Caillault, Emilie & Lefebvre, A & Bigand, André. (2017). Dynamic Time Warping-based imputation for univariate time series data. *Pattern Recognition Letters*. Available online 16 August 2017. In Press, Accepted Manuscript. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2017.08.019>

#### Communications scientifiques nationales [13]

Phan T.T.H., Poisson-Caillault E., Lefebvre A., Bigand A., 2017. Complétion intelligente de séries temporelles de données fortement manquantes : quelle métrique, quelle approche choisir ? Atelier Méthodologie du GIS Campus de la Mer, 3 avril 2017, Boulogne-sur-Mer.



Poisson-Caillault E., Lefebvre A., 2017. Extraction intelligente de signatures caractéristiques dans des séries temporelles. Atelier Méthodologie du GIS Campus de la Mer, 3 avril 2017, Boulogne-sur-Mer.

Caillault-Poisson E., Rizik A., Ternynck P., Bigand A., Lefebvre A., 2017. New developments to fill gap in high frequency data series and to integrate knowledge in Markov modeling of phytoplankton dynamics. Colloque Oceanography and Geoscience of the eastern English Channel - Past, present, future (EEC 2017). 6-7 juin 2017, Wimereux, France.

Sautour B., Breton E., Dauvin J.C., Goberville E., Lefebvre A., Luczak C., Poisson-Caillault E., Schmitt F., 2017. Twenty years of observations in the French coastal waters : the case of the eastern English Channel. Colloque Oceanography and Geoscience of the eastern English Channel - Past, present, future (EEC 2017). 6-7 juin 2017, Wimereux, France.

Lefebvre A., Caillault E., 2017. Développement d'outils numérique pour une évolution de l'observation à haute fréquence. Journées techniques du Résomar, atelier fluorescence, 14-15 juin 2017, SHOM, Brest.

Lefebvre A., 2017. Fluorescence et mesures à haute fréquence : MAREL Carnot, mesures d'opportunités de type Ferry Box. Journées techniques du Résomar, atelier fluorescence, 14-15 juin 2017, SHOM, Brest.

Caillault-Poisson E., Lefebvre A., Hébert P.A., Ternynck P., Marson Q., Wacquet G., Artigas F., Bigand A., 2017. Méthodologie(s) du traitement du signal à la classification/modélisation pour la compréhension de la dynamique des efflorescences phytoplanctoniques. Journée du CPER MARCO, 26 juin 2017, Boulogne sur Mer.

Louchart, A., Lizon F., Lefebvre A., Bouchaud F., Dédécker C., Delarbre J., Watiez H., Cornille V., Lécuyer E., Schmitt F., Artigas L.F. Suivi à haute résolution spatiale et temporelle de la distribution des groupes phytoplanctoniques en eaux côtières. Journée du CPER MARCO, 26 juin 2017, Boulogne sur Mer.

Phan T.T.H., Poisson-Caillault E., Bigand A., Lefebvre A., 2017. DTW-approach for uncorrelated multivariate time series imputation. Cinquième édition de la journée doctorale du GIS Campus de la Mer, novembre 2017, Boulogne-sur-Mer.

Caillault Poisson E., Lefebvre A., Prygiel J., 2017. uHMM : unsupervised Hidden Markov Model. Interface pour détecter et caractériser des états environnements dans des séries temporelles multi-paramètres. Journée connaissance au service de l'action de l'Agence de l'Eau Artois Picardie : La qualité des milieux aquatiques. 3 octobre 2017, Université de Lille 1, Villeneuve d'Ascq.

Lefebvre A., Devreker D., Grassi K., Poisson-Caillault E., 2017. Analyse de tendance et classification spectrale couplée à un modèle de Markov caché. Colloque EVOLECO : EVOLution à Long terme des Ecosystèmes COTiers : Vers une mise en évidence des forçages et des processus associés, 5-7 décembre 2017, Bordeaux.

Gohin F., Lefebvre A., Devreker D., 2017. Evaluation de l'eutrophisation de la mer du Nord à partir de données satellite et in situ. Colloque EVOLECO : EVOLution à Long terme des Ecosystèmes COTiers : Vers une mise en évidence des forçages et des processus associés, 5-7 décembre 2017, Bordeaux.

### **Encadrement de stage [1]**

Poisson-Caillault E., Lefebvre A., 2017. Stage de Marson Quentin, Master Sciences de la mer mention FOGEM M1 de l'Université du Littoral Côte d'Opale. Période : 4 avril au 2 juin 2017. Sujet : Détection des événements et leurs caractérisations biologiques.

## Encadrement de thèse [1]

Grassi K., Thèse 2017-2020. Titre : Caractérisation de la dynamique de la biomasse phytoplanctonique par définition d'états environnementaux multicritères avec apprentissage profond semi-supervisé et classification spectrale à partir de données hautes fréquences. Directeur de thèse : A. Lefebvre (Ifremer). Encadrants : E. Poisson-Caillault, A. Bigand (ULCO/LISIC). Financement CIFRE (WeatherForce, Toulon).

## Projets scientifiques liés à MAREL Carnot et à la mesure à Haute Fréquence



### CPER MARCO – Axe 1

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 (2014-2019) 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'événements intermittents et d'événements extrêmes.



### H2020 JERICO-Next – WP4 – JRAP#1

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 devrait servir de plateforme test à une campagne de mesures à haute résolution couplant le système à un cytomètre en flux et à un

analyseur spectral. Ce projet s'inscrit dans le cadre des besoins d'amélioration des connaissances en lien avec la mise en œuvre de la **DCSMM** (Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin, 2010/56/EU).

### **Thèse de Kelly GRASSI (2017-2020)**

Le titre du sujet de thèse est « Caractérisation de la dynamique de la biomasse phytoplanctonique par définition d'états environnementaux multicritères avec apprentissage profond semi-supervisé et classification spectrale à partir de données hautes fréquences ».

- Directeur de thèse : Alain Lefebvre (HDR, Ifremer)
- Encadrants de thèse : André Bigand (HDR, MCF ULCO), Emilie Poisson-Caillault (Dr, MCF, ULCO)
- Laboratoire/unité, département d'accueil : Département Océanographie et Dynamique des Ecosystèmes, Unité Littoral, Laboratoire Environnement et Ressources de Boulogne-sur-Mer
- Ecole doctorale de rattachement : ED 104 - Sciences de la Matière, du Rayonnement et de l'Environnement (SMRE).

Ce projet de thèse bénéficie d'un financement CIFRE par WeatherForce, Toulouse.

#### Résumé :

Les systèmes automatisés de mesures à haute fréquence (HF) déployés dans des écosystèmes contrastés doivent permettre de mieux comprendre (i) la dynamique de l'environnement (et notamment du phytoplancton) en réponse aux pressions d'origine naturelle et anthropiques, ainsi que (ii) les effets directs et indirects des proliférations du phytoplancton pouvant conduire à des dysfonctionnements des écosystèmes pélagiques et benthiques. Alors que les données basses fréquences (BF) continuent de livrer leurs secrets, la complexité de ce type de données HF (bases volumineuses, non linéarité, données manquantes,...) rend leur exploitation complexe. Ce projet vise à proposer un système numérique innovant, optimisé afin d'améliorer l'extraction de l'information contenue dans les bases de données HF via une approche semi-supervisée en couplant apprentissage profond et classification spectrale contrainte. Ce système permettra d'envisager une prédiction en temps (quasi) réel des modifications environnementales (paramètres physico-chimiques de base et biomasse du phytoplancton) en réponse aux forçages naturels et anthropiques afin de définir des schémas de fonctionnement des efflorescences du phytoplancton dans des écosystèmes contrastés, de disposer d'un système de prédiction et d'alerte, de pouvoir adapter en temps (quasi) réel les stratégies d'échantillonnage (pour les besoins de la Surveillance et de la Recherche).

#### **Autres informations**

L'ULCO/LISIC et l'Ifremer poursuivent leur collaboration dans le cadre de 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 collaboration avec Mr Jean-Marc Leblond (ULCO) dans le cadre du CPER MARCO et du projet H2020 JERICO-Next se poursuit. Elle permet d'engager un travail sur l'interfaçage entre MAREL Carnot et l'analyseur de nutriments WIZZ (Systea) ainsi qu'avec les capteurs de mesures océano-météo. Ce travail se fait également en collaboration avec les équipes Ifremer/RDT de Brest, Ifremer/LERN de Port en Bessin et l'Université de Caen (UMR

BOREA), afin d'assurer la cohérence des actions entre les systèmes de mesures MAREL Carnot et SMILE.

Le système MAREL Carnot est identifié comme l'un des dispositifs de collecte de données pertinents pour les besoins du plan de gestion du Parc Marins des Estuaires Picards et de la Mer d'Opale.

Par ailleurs, dans le cadre de la mise en œuvre du Programme de Surveillance de la Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM) et plus particulièrement pour les programmes Eutrophisation et Habitats Pélagiques, les systèmes automatisés de mesures à haute fréquence ont été identifiés comme des dispositifs pertinents afin d'améliorer les évaluations couramment réalisées via des approches conventionnelles à basse fréquence (Lefebvre, 2013).

### 3.2.3. Nouveau projet scientifique associé

L'année 2017 a été marquée par le montage du projet Ifremer inter-centres intitulé « **EXTREMIME-HF** : Événements EXTrêmes et Réponse des Ecosystèmes en Manche, mer d'Iroise et MÉditerranée à Haute-Fréquence » (2018-2019). Ce projet regroupe les équipes Ifremer du LOPS, du LER-BL et du LER-PAC qui collaborent également avec l'ULCO/LISIC et l'iUEM de Brest. Les objectifs principaux de ce projet sont :

- L'étude de l'impact des événements extrêmes sur les écosystèmes côtiers,
- l'étude des différentes réponses HF à l'échelle d'une même zone côtière,
- la meilleure compréhension de la réponse d'écosystèmes aux événements extrêmes,
- l'optimisation du traitement des données mesurées par les systèmes HF,
- le développement et la mutualisation des outils statistiques pour analyser les séries temporelles des données HF.

## 4. CONCLUSIONS

En 2017, le système MAREL Carnot est toujours dans une phase de transition liée à une volonté de jeunesse majeure. Cette phase est financée par les projets CPER MARCO, JERICO-Next, par l'Agence de l'Eau Artois-Picardie et par le Parc Marin des Estuaires Picards et de la Mer d'Opale. 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 (Figure 12). Par ailleurs, les responsables techniques et scientifiques du système MAREL Carnot poursuivent leurs implications dans les groupes RESOMAR, COAST-HF (Coastal Ocean Observing System - High Frequency) dans la logique d'une reconnaissance au niveau national dans un système labellisé en lien avec l'Infrastructure de Recherche Littorale et Côtière IR - ILICO. A terme, il s'agit donc de bénéficier d'un système complet depuis l'acquisition des données jusqu'à leur valorisation optimale.

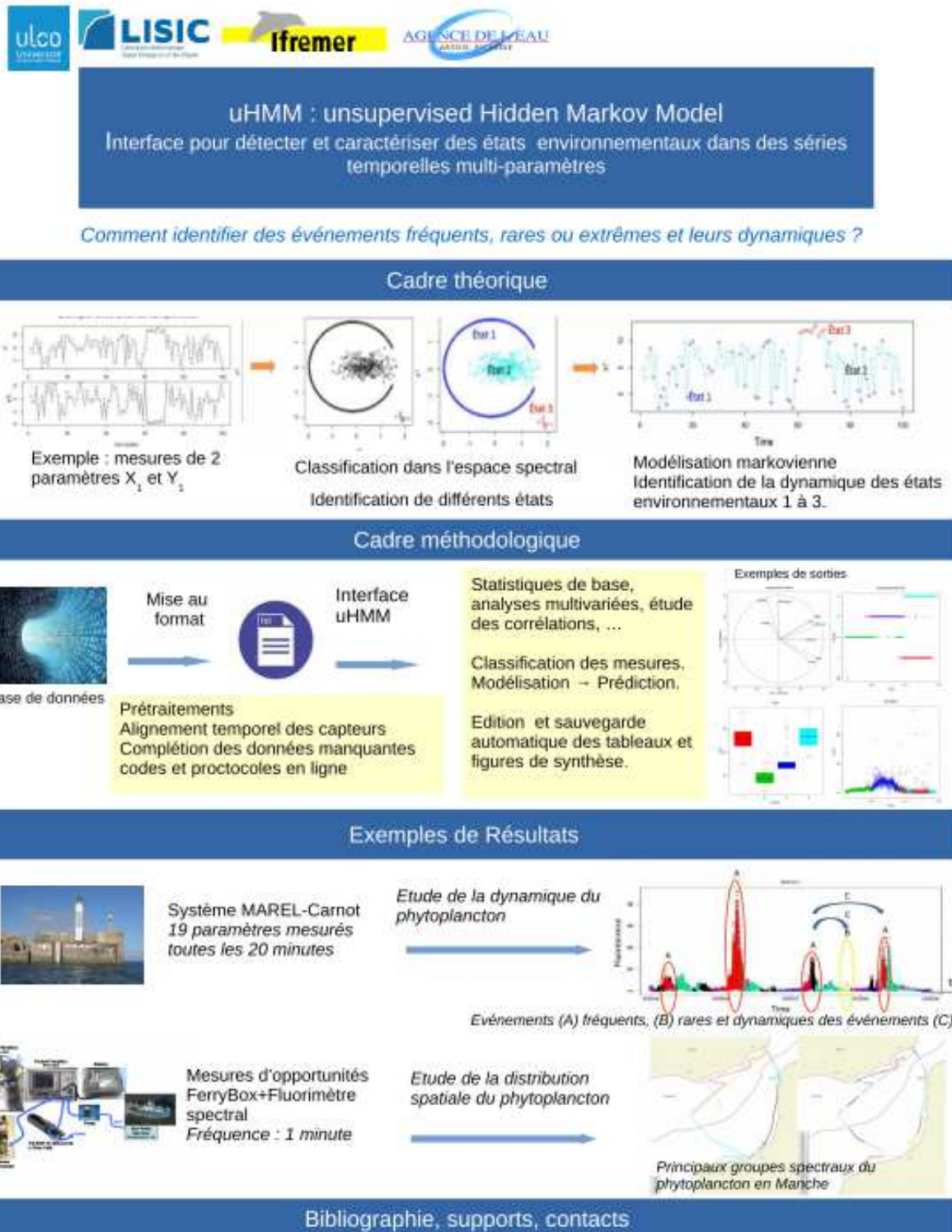


Figure 12 : Poster présenté lors des Journées Connaissances de l'Agence de l'Eau Artois-Picardie (Octobre 2017) et résumant les principales activités de développements numériques en cours

## 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 E., Lefebvre A., Ternynck P., 2016. Interface uHMM : Une interface utilisateur graphique sous R, pour construire un modèle de Markov caché non supervisé. Convention ULCO/LISIC-AEAP. Rapport ULCO/LISIC, 16 pages.
- Duval P., 2009. Étude à haute fréquence de la dynamique de l'écosystème côtier sous influence anthropique : contexte des efflorescences de la prymnésiophyce *Phaeocystis globosa* au large de Boulogne-sur-Mer. Ifremer/TMR.LER.BL/09.06, 44 pages (Encadrement A. Lefebvre).
- Derot J., 2014. Utilisation des données de MAREL Carnot pour la compréhension des mécanismes des extrêmes dans la qualité des eaux à Boulogne-sur-mer. Thèse de doctorat de l'université de Lille I.
- 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., Répécaud 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. Répécaud, 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., 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., 2013. Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (2008/56/CE) - Programme de surveillance - Livrable 5 : Proposition scientifique et technique de paramètres et de dispositifs de suivis associés. Rapport Ifremer ODE/RST/LERBL/13.02, 60 pages.
- 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., 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.
- 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, 26 pages.
- Lefebvre A., Poisson-Caillault E., 2017. MAREL Carnot : Rapport n° 11 : Bilan d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer). Opérations lors de l'année 2016. Ifremer/RST.LER.BL/17.06, 24 pages.
- Lefebvre A., Poisson-Caillault E., Rousseeuw K., Hamad D., Soudant D., Soudant A., Gohin F., Répécaud M., 2016. La station instrumentée MAREL Carnot : retours d'expérience de 10 ans d'observation à haute fréquence d'une zone côtière sous influence anthropique. In Mesures à haute résolution dans l'environnement marin côtier, Schmitt, F.G. et Lefebvre A. (Eds.) CNRS Editions, 2016, pp. 17-30.

- 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.
- Rousseuw 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
- Rousseuw 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.
- Rousseuw 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.
- Rousseuw K., Caillault E., Lefebvre A., Hamad D., 2016. Modèle de Markov caché hybridé pour la surveillance de l'environnement marin. In Mesures à haute résolution dans l'environnement marin côtier, Schmitt, F.G. et Lefebvre A. (Eds.) CNRS Editions, 2016, pp. 111-120.
- 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.
- Schmitt F. G., Lefebvre A. (Eds.), 2016. Mesures à haute résolution dans l'environnement marin côtier, CNRS Editions. ISBN 978-2-271-08592-4.
- Schmitt F. G., Zongo S. B., Lefebvre A., 2016. Dynamique multi-échelle et extrêmes dans les ratios stochiométriques mesurés en Manche orientale : MAREL Carnot et SOMLIT. In Mesures à haute résolution dans l'environnement marin côtier, Schmitt, F.G. et Lefebvre A. (Eds.) CNRS Editions, 2016, pp. 91-98.
- 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.