

Rapport N°6

# MAREL Carnot

Valorisation des données d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer)

## Bilan de l'année 2011





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

Bilan de l'année 2011



## Fiche documentaire

<b>Numéro d'identification du rapport :</b> Ifremer/RST/LER.BL/12.05		<b>Date de publication :</b> Juillet 2012	
<b>Diffusion :</b> libre : <input checked="" type="checkbox"/> restreinte : <input type="checkbox"/> interdite : <input type="checkbox"/>		<b>Nombre de pages :</b> 36	
<b>Contact :</b> A. Lefebvre		<b>bibliographie :</b> Oui	
Adresse électronique : alain.lefebvre@ifremer.fr		<b>Illustration(s) :</b> Oui	
<b>Langue du rapport :</b> Français			
<b>Titre du rapport :</b> Valorisation des données d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer). Bilan de l'année 2011.			
Rapport intermédiaire <input type="checkbox"/>		Rapport définitif <input checked="" type="checkbox"/>	
<b>Auteur :</b> Alain Lefebvre Kévin Rousseuw Émilie Caillault		<b>Organisme / Direction / Service, laboratoire</b> Ifremer – LER/BL Ifremer – LER/BL Université du Littoral Côte d'Opale - LISIC	
<b>Collaborateurs :</b>			
<u>Nutriments</u> Vincent Duquesne		Ifremer – LER/BL	
<u>Maintenance</u> Michel Repecaud Jean-Valéry Facq Karenn Bucas David Le Piver Loïc Quémener		Ifremer – RDT-DSMI/Brest Ifremer – RDT/HO/BL Ifremer – RDT/EIM/Brest Ifremer – RDT-DSMI/Brest Ifremer – RDT-DSMI/Brest	
Cadre de la recherche : Action Ifremer « MAREL Carnot »			
<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. Le présent rapport n'est pas destiné à valoriser l'ensemble des données acquises en 2011 sous forme de tableaux et de figures car ces traitements dépendent de la question posée et donc de l'intérêt du lecteur. Un exemple de travail en cours dans le cadre d'une thèse Ifremer / Agence de l'Eau Artois-Picardie est développé.			
<b>Mots-clés</b> Manche orientale, détroit du Pas-de-Calais, Boulogne-sur-Mer, mesures à haute fréquence, MAREL, paramètres généraux de qualité du milieu marin			
<b>Comment citer ce rapport :</b> Lefebvre A., Rousseuw K., 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 pages.			





# sommaire

---

<b>1. INTRODUCTION .....</b>	<b>9</b>
<b>2. RAPPELS : FONCTIONNEMENT DE MAREL CARNOT.....</b>	<b>10</b>
<b>3. RÉSULTATS.....</b>	<b>12</b>
3.1. <i>Bilan de fonctionnement.....</i>	12
3.2. <i>Valorisation des données.....</i>	12
3.2.1. Publications des données 2005-2008.....	12
3.2.2. Statistiques des paramètres de base et pour l'année 2011.....	13
3.2.3. Développement d'un modèle mathématique pour la prédiction et le suivi des efflorescences phytoplanctoniques sur le littoral et les cours d'eau du bassin Artois Picardie.....	17

---

<b>4. REFERENCES.....</b>	<b>27</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. Une large gamme de paramètres est maintenant mesurée sur des sites très variés, la stabilité des mesures dans le temps étant assurée par la chloration des capteurs.

Le maintien de ces installations en bon état de fonctionnement a permis aux équipes concernées d'acquérir une solide expérience en maintenance opérationnelle. D'autre part, la multiplication des stations MAREL en France métropolitaine, regroupées en réseaux locaux, a nécessité la mise en place d'une structure chargée d'organiser ces différents réseaux : le projet ROSLIT (Figure 1). La métrologie, sous assurance qualité, représente un des aspects les plus importants de cette organisation.

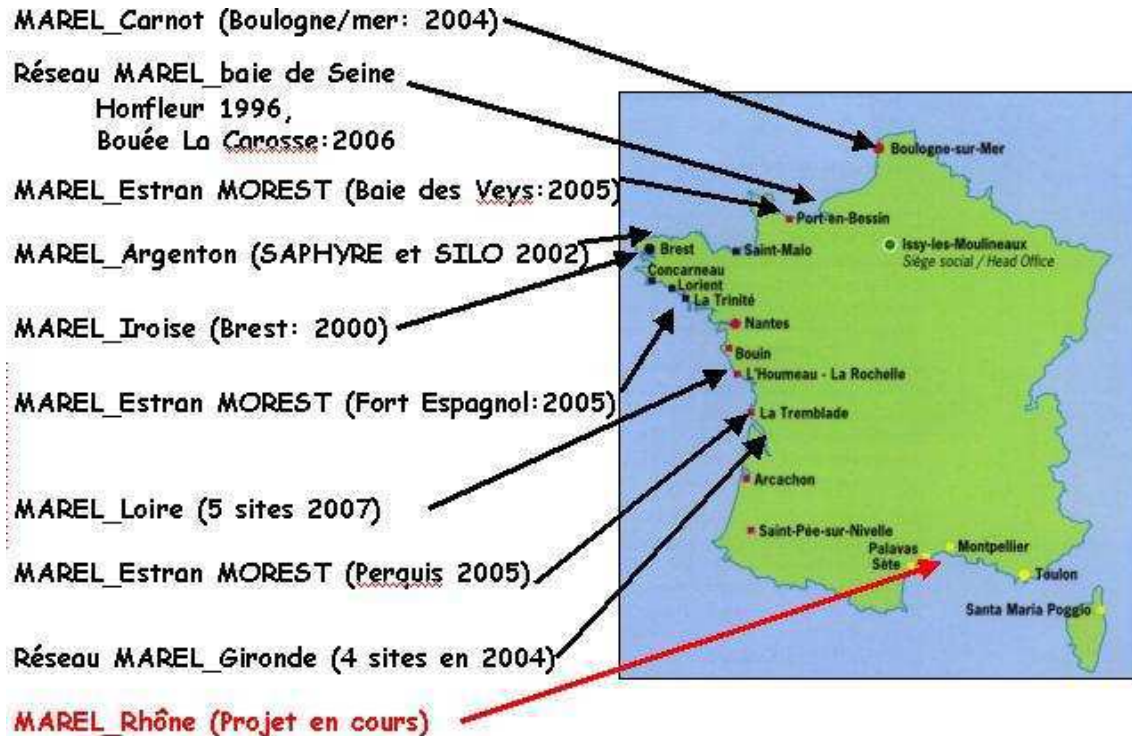


Figure 1. Localisation des stations instrumentées du réseau ROSLIT

## 2. RAPPELS : FONCTIONNEMENT DE MAREL CARNOT

Un premier rapport de 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 cœur du système est constitué d'une cellule de mesure regroupant plusieurs capteurs. L'originalité du système est le pompage de l'eau à travers la zone où elle est analysée, 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.

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). Ces fréquences sont ajustables.

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

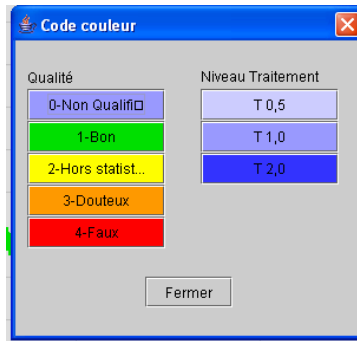


Figure 2 : Niveau de traitement et de qualité des données lors de la procédure de contrôle (capture d'écran de l'outil de contrôle qualité)

Une partie de ce contrôle est faite automatiquement (contrôle du format des fichiers, de la gamme de valeurs observées en référence à des valeurs de références) ; les données sont dans un niveau de traitement T0,5. Un contrôle visuel est également réalisé afin d'identifier « à dire d'experts » le niveau de qualité de la donnée.

Après cette étape, les données passent en niveau de traitement T1,0 et sont accessibles par l'internet via <http://www.ifremer.fr/difMarelCarnot/> (Figure 3). Les accès sont possibles via trois domaines : public, scientifique et technique en fonction du profil de l'utilisateur. **Les informations disponibles sont différentes en fonction du profil utilisateur.** Ainsi, le profil 'public' permet de visualiser les données et d'avoir accès aux rapports de métrologie alors que le profil 'scientifique' permet en plus de télécharger les données et d'avoir accès à d'autres informations sur le fonctionnement du système. Le profil 'technique' est principalement réservé aux personnes chargées de la maintenance du système.

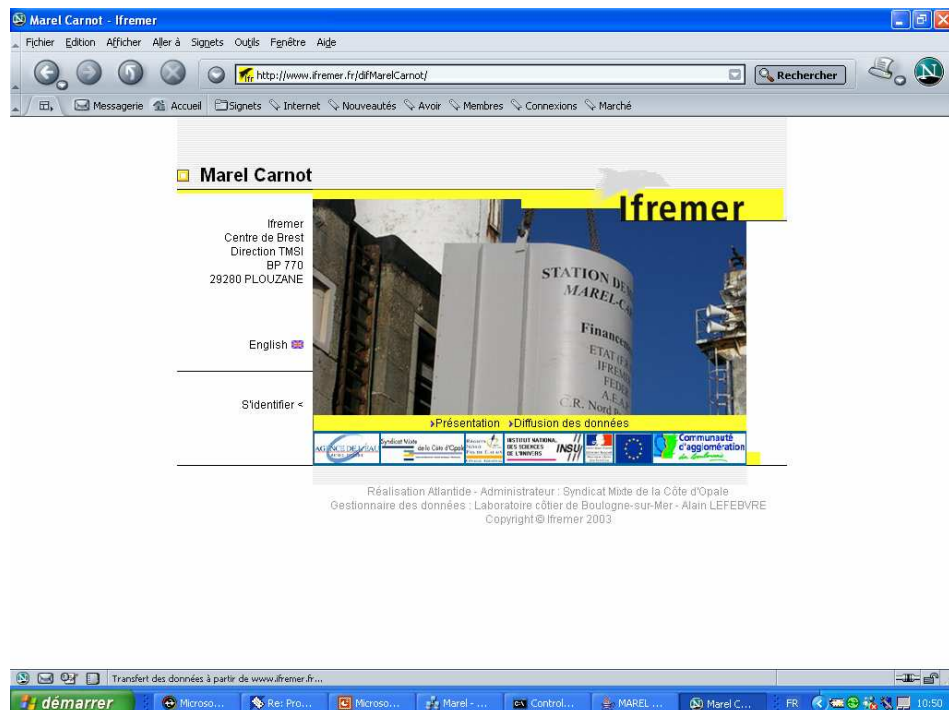


Figure 3 : Page d'accueil du site de consultation des données MAREL Carnot

La chambre de passage est changée trimestriellement et conduit à la vérification sous assurance de qualité de l'étalonnage des capteurs (Tableau 2). Un rapport de métrologie permet alors d'affecter un niveau de qualité définitif à la donnée qui passe 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

### 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). Ces rapports sont téléchargeables sur le site du laboratoire Environnement & ressources du centre Ifremer Manche Mer du Nord :

<http://wwz.ifremer.fr/manchemerdu nord/Environnement/LER-Boulogne-sur-Mer/Surveillance-et-Observation/MAREL-Carnot/Valorisations>

L'année 2011, comme l'année 2010, a été marquée par des dysfonctionnements majeurs des analyseurs de nutriments Systeac.

La chambre de passage, support des capteurs de salinité, température de l'eau, turbidité, concentration en oxygène et fluorescence, a fait l'objet de 3 rotations (changement de la chambre de passage pour une vérification métrologique).

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, .... 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. Publications des données 2005-2008

Les données de la période 2005-2008 ont été analysées et ont conduit au développement d'un premier système numérique permettant d'identifier des étapes clefs lors du

développement phytoplanctonique. Ceci a été publié et présenté dans les deux conférences internationales suivantes :

Alain Lefebvre and Émilie Caillault, 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. EGU 2011 - EGU General Assembly, Geophysical Research, Vol. 13, EGU2011-6165, Vienna, Austria, 06 April 2011.

Émilie Caillault Poisson, Alain Lefebvre, Phytoplankton monitoring system and countermeasures to prevent toxics algae blooms, 4<sup>th</sup> IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security, 7 - 10 February 2011 in Paris – France.

### 3.2.2. Statistiques des paramètres de base et pour l'année 2011

Les données ont tout d'abord été traitées avec une moyenne mobile s'étalant sur une semaine. Cette moyenne mobile permet d'éliminer les fluctuations les moins significatives. Les statistiques de base pour l'année 2011 sont visibles dans les tableaux 3 à 7.

L'évolution temporelle des principaux paramètres (fluorescence, turbidité, salinité, concentration en oxygène et pourcentage de saturation en oxygène) mesurés par Marel Carnot est présentée par les figures 4 à 8.

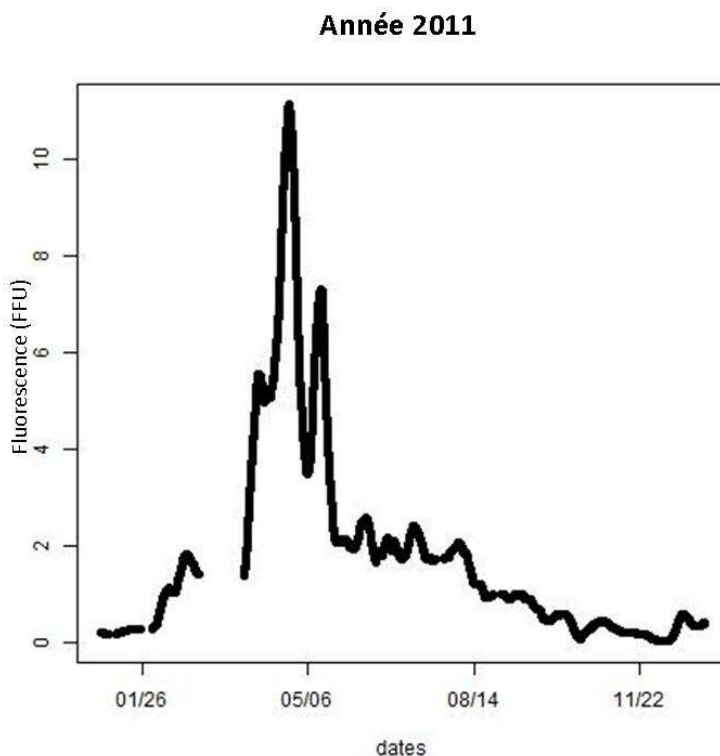


Figure 4. Évolution temporelle de la fluorescence (FFU) pour l'année 2011

Tableau 3. Paramètres de tendance centrale et de dispersion pour le paramètre Fluorescence (FFU) pour l'année 2011

Fluorescence	Min.	1st Qu.	Médiane	Moyenne	3rd Qu.	Max.
	0,03	0,36	1	1,8	2,07	11,11

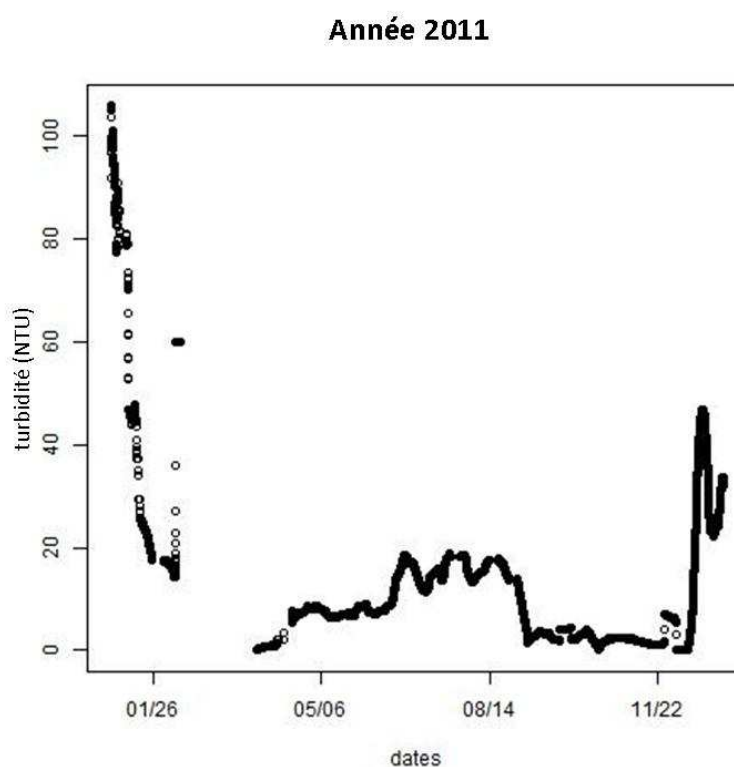


Figure 5. Évolution temporelle de la turbidité (NTU) pour l'année 2011

Tableau 4. Paramètres de tendance centrale et de dispersion pour le paramètre Turbidité (NTU) pour l'année 2011

Turbidité	Min.	1st Qu.	Médiane	Moyenne	3rd Qu.	Max.
	0,1	2,47	7,44	12,4	15,66	105,8

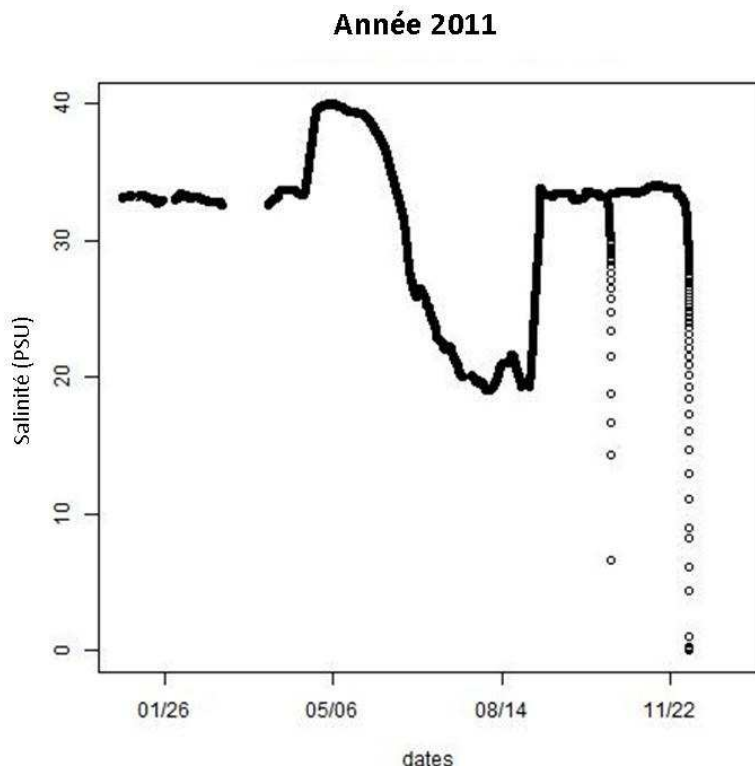


Figure 6. Évolution temporelle de la salinité (PSU) pour l'année 2011

Tableau 5. Paramètres de tendance centrale et de dispersion pour le paramètre Salinité (PSU) pour l'année 2011

Salinité	Min.	1st Qu.	Médiane	Moyenne	3rd Qu.	Max.
	0,01	32,23	33,26	31,79	33,8	39,95

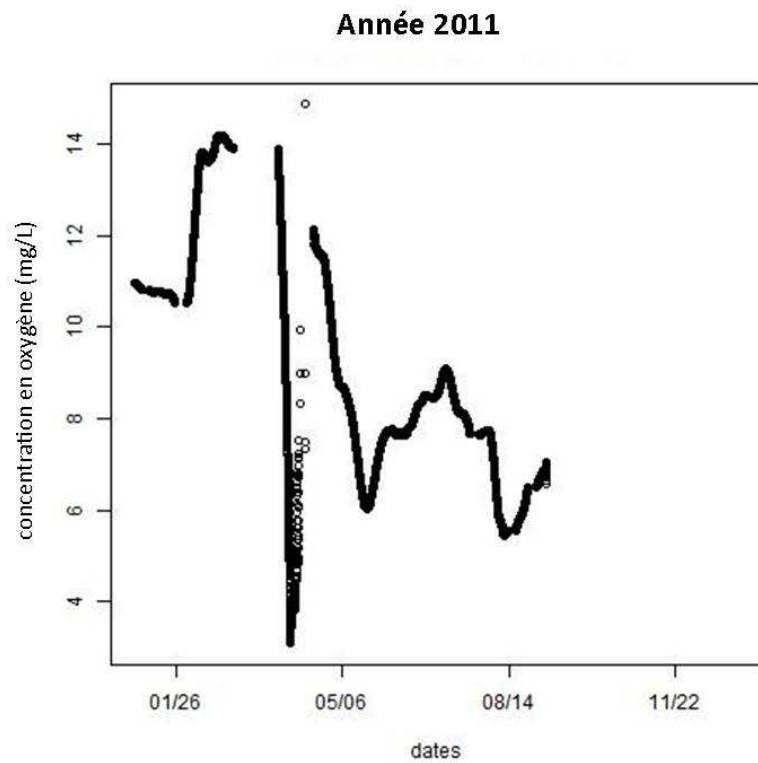


Figure 7. Évolution temporelle de la concentration en oxygène (mg/L) pour l'année 2011

Tableau 6. Paramètres de tendance centrale et de dispersion pour le paramètre concentration en oxygène (mg/L) pour l'année 2011

Concentration en oxygène	Min.	1st Qu.	Médiane	Moyenne	3rd Qu.	Max.
	3,08	7,42	8,39	8,99	10,77	14,87



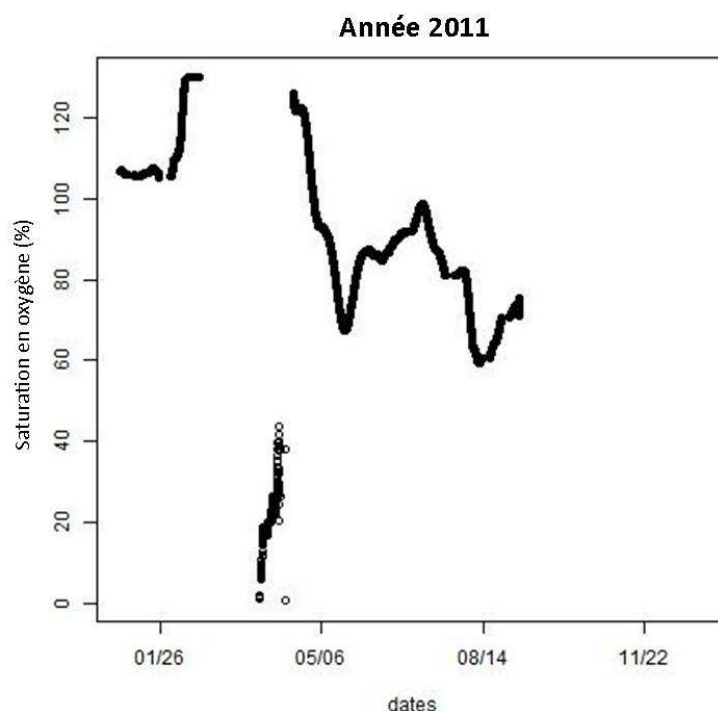


Figure 8. Évolution temporelle de la saturation en oxygène (%) pour l'année 2011

Tableau 7. Tableau - Paramètres de tendance centrale et de dispersion pour le paramètre saturation en oxygène (%) pour l'année 2011

Pourcentage de saturation en oxygène	Min.	1st Qu.	Médiane	Moyenne	3rd Qu.	Max.
	0,76	74,4	87,62	86,57	105,5	129,8

Les boîtes à moustaches (ou boxplot) pour chaque paramètre et pour chaque mois sont disponibles en annexe 1.

### 3.2.3. Développement d'un modèle mathématique pour la prédiction et le suivi des efflorescences phytoplanctoniques

Ce paragraphe résume les objectifs et les premiers résultats acquis dans le cadre de la thèse intitulée « Modélisation de signaux temporels hautes fréquences, multi-capteurs à valeurs manquantes. Application à la prédiction des efflorescences phytoplanctoniques dans les rivières et les écosystèmes marins côtiers » financée par l'Ifremer et l'Agence de l'Eau Artois-Picardie (2011-2014).

#### 3.2.3.1. Objectifs

L'objectif de la thèse est de mieux comprendre les conditions de déclenchement, de maintien et de fin des efflorescences (augmentation rapide de la concentration du Phytoplancton) de l'écosystème côtier à partir de l'ensemble des données multi-capteurs

---

de la station MAREL Carnot située dans la rade de Boulogne-sur-Mer. Cette station dispose de multiples capteurs qui mesurent toutes les vingt minutes : la concentration d'oxygène dissous corrigée, la salinité, le pourcentage de saturation en oxygène, la température de l'air, la conductivité, la luminosité, la concentration d'oxygène dissous non corrigé, le PH, la turbidité, la direction et la vitesse (en moyenne et en rafale) du vent, la fluorescence, la hauteur d'eau, la température de l'eau et le niveau de la mer ; et toutes les douze heures, la concentration en nitrate, en phosphate et en silicium.

L'interprétation de cette richesse de données permettra un meilleur suivi de l'état de la mer au jour le jour et une meilleure prévisibilité des efflorescences. Pour cela, il est nécessaire de modéliser la dynamique de cette efflorescence en intégrant les connaissances passées disponibles. Ce modèle devra être robuste aux données multi-capteurs bruitées, redondantes, aberrantes voire manquantes et soumises à des phénomènes physiques et climatiques imprévus. Pour cela, il est nécessaire, d'une part, de tenir compte de la qualité des données du système d'acquisition et, d'autre part, de détecter toute perturbation éventuelle (panne, maintenance, calibration,...). Le modèle, représentant par essence un environnement non stationnaire, doit être adaptatif afin d'intégrer des connaissances et mesures nouvelles. A partir de ce modèle, une mesure de la caractérisation du signal et des cohérences des mesures devra être établie afin de faciliter le suivi de la qualité du milieu marin pour les utilisateurs aussi bien que les décideurs.

### 3.2.3.2. Bilan d'avancement

Dans le but de pouvoir décrire précisément les différents phénomènes à l'origine des schémas de variations observées dans les données de Marel Carnot, une classification avec la méthode des k-means est utilisée. Cependant, afin d'optimiser les temps de calcul, qui peut être relativement long au regard de la taille des fichiers de données (plusieurs milliers de lignes et plusieurs dizaines de colonnes), une analyse en composante principale (ACP) est réalisée afin de réduire le nombre de variables à étudier sans nuire à l'interprétation des résultats.

#### 3.2.3.2.1 Analyse en Composantes Principales

L'analyse en composantes principales (A.C.P.) est une méthode mathématique d'analyse graphique de données qui consiste à rechercher les directions de l'espace qui représentent le mieux les corrélations entre  $n$  variables aléatoires (relation linéaire entre elles). Cette analyse a été menée dans le but d'identifier les composantes essentielles qui expliquent au mieux la structuration des données.

Ainsi, il apparaît que pour représenter l'ensemble des données, la réduction des données à dix composantes permet d'obtenir une adéquation de 90 % par rapport aux données originales et 15 composantes pour une adéquation parfaite (Tableau 8 et figure 9).

Tableau 8. Variance Cumulée issue de l'analyse en composante principale des 19 paramètres mesurés par Marel Carnot

Composante	1	2	3	4	5	6	7
Variance Cumulée	25,82	41,50	53,80	61,57	67,25	72,58	77,73
Composante	8	9	10	11	12	13	14
Variance Cumulée	82,15	86,11	89,86	92,92	95,63	97,91	99,47
Composante	15	16	17	18	19		
Variance Cumulée	99,87	99,97	99,99	99,99	100		

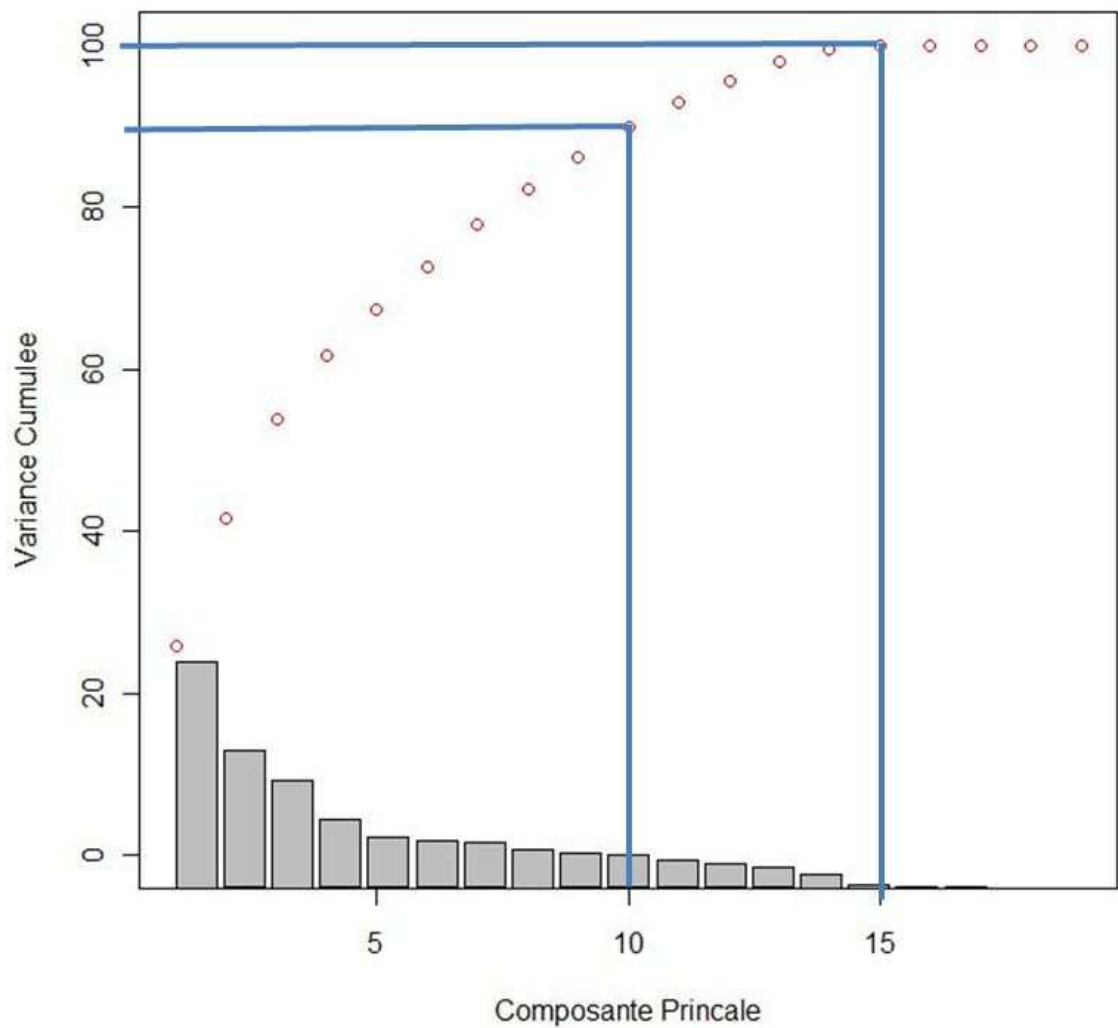


Figure 9. Représentation graphique de la variance cumulée issue de l'analyse en composante principale des 19 paramètres mesurés par Marel Carnot

La représentation graphique de la projection des paramètres dans les deux plans principaux de l'ACP est donnée à la Figure 10.

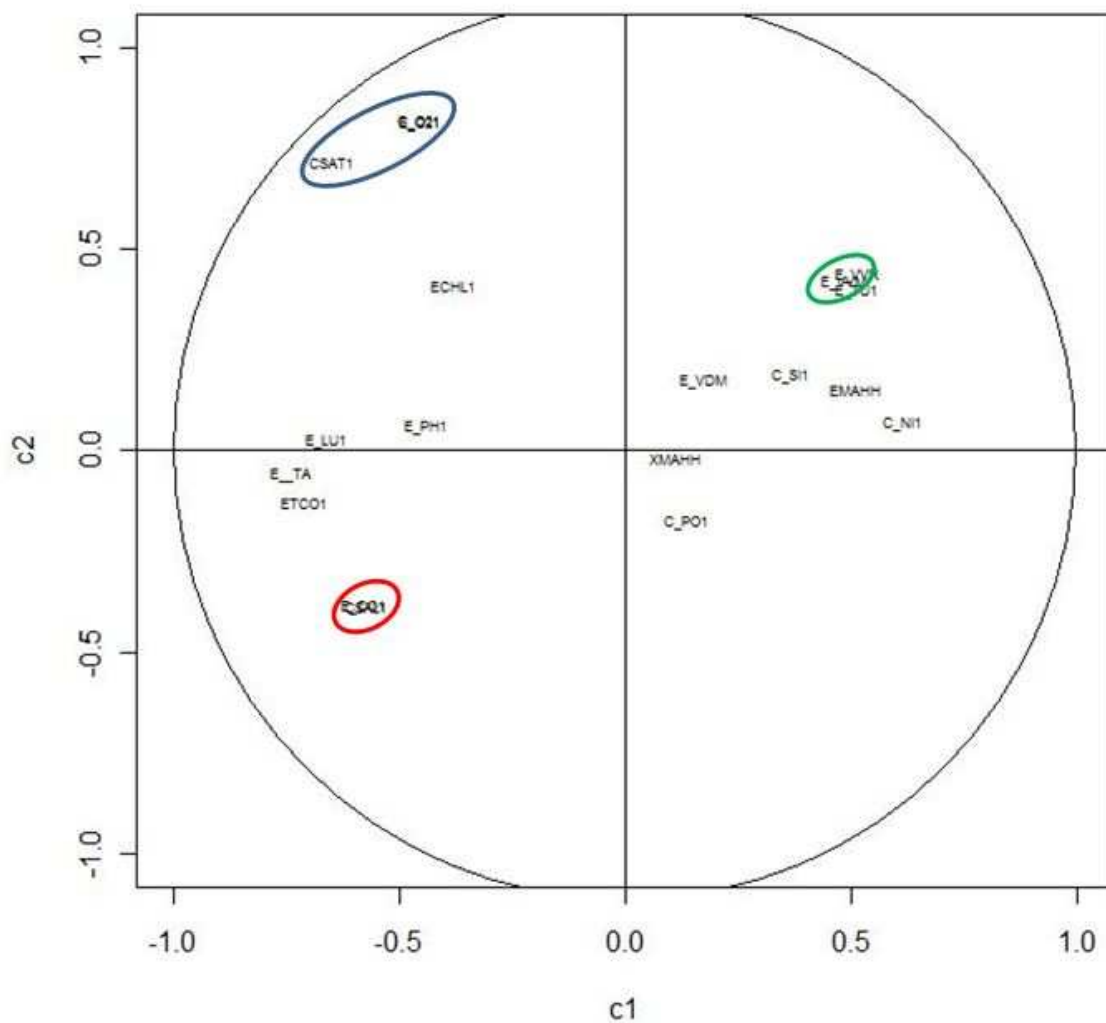


Figure 10. Représentation des 2 premières composantes principales

Plusieurs corrélations peuvent être mises en évidence entre les paramètres (variables) ci-dessous (cercles de couleur sur la figure 10) :

- Pourcentage de saturation en oxygène (CSAT1) - Oxygène dissous corrigé (C\_O21) - Oxygène dissous non corrigé (E\_O21).
- Vitesse du Vent en Moyenne (VVM) - Vitesse du Vent en Rafale (VVR).
- Salinité de surface (CSAL1) - Conductivité de surface (E\_CO1).

Ces corrélations nous permettent d'optimiser le temps de calcul de la classification. En effet, les paramètres corrélés auront la même incidence sur la classification, il est donc possible ne pas utiliser un des paramètres de chaque corrélation lors du calcul de la classification. Les paramètres corrélés conservés sont les suivants :

- Oxygène dissous corrigé (C\_O21) et pourcentage en saturation en oxygène (CSAT1)
- Vitesse de Vents en Rafale (E\_VVR)
- Salinité (CSAL1)

De plus, le paramètre indiquant la hauteur d'eau (EMAHH) étant imprécis, il ne sera pas pris en compte lors du calcul de notre classification.

Par conséquent, au lieu d'utiliser les 19 paramètres initiaux, la classification sera réalisée en utilisant 15 paramètres.

### 3.2.3.2..2 Classification

La méthode utilisée pour notre classification est la méthode des k-means. Il met en œuvre un algorithme simple et efficace de classification qui se découpe en différentes étapes (Figure 11) :

- 1 - Choix d'une métrique pour le calcul des distances,
- 2 - Définition d'un nombre k de classes sur un ensemble d'échantillons,
- 3 - Initialisation aléatoire des k centres de gravité,
- 4 - Affectation de chaque échantillon à son centre le plus proche suivant la métrique précédente,
- 5 - Calcul des nouveaux centres suivant les affectations effectuées à l'étape précédente,
- 6 - Répétition des étapes 4 et 5 jusqu'à ce que la position des centres n'évolue plus.

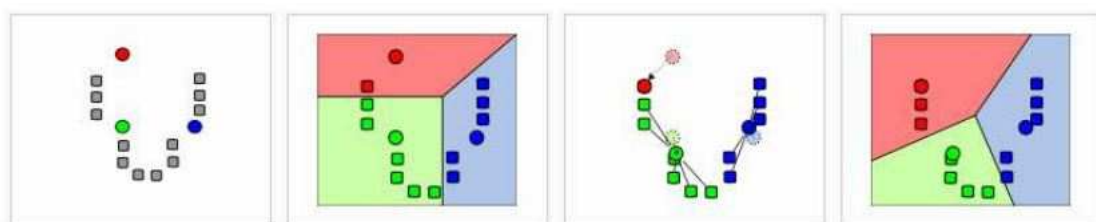


Figure 11. Schéma du fonctionnement d'une analyse de type k-means

Pour avoir la meilleure compréhension des phénomènes intervenants au court de l'année, plusieurs classifications ont été réalisées :

- sur l'ensemble des paramètres (19 paramètres)
- sur les paramètres non corrélés issus de l'ACP (15 paramètres)
- sur les paramètres non corrélés issus de l'ACP sans le vent (12 paramètres)

Des classifications ont aussi été réalisées en fonction de la catégorie des paramètres :

- sur les nutriments (3 paramètres)
- sur les paramètres physiques (15 paramètres)
- sur les paramètres pressions (13 paramètres)
- sur les paramètres réponses (5 paramètres)

Un tableau de synthèse des paramètres retenus pour chaque catégorie est disponible dans l'Annexe 2.

Une fois la classification effectuée, une séquence de classe est obtenue en fonction du temps. La figure 12 représente la séquence de classe obtenue pour une classification de 2005 à 2007 avec les paramètres non corrélés de l'ACP sans le vent. Chaque couleur représente une classe (classe 1 = rouge, classe 2 = vert, classe 3 = bleu, classe 4 = cyan, classe 5 = rose).

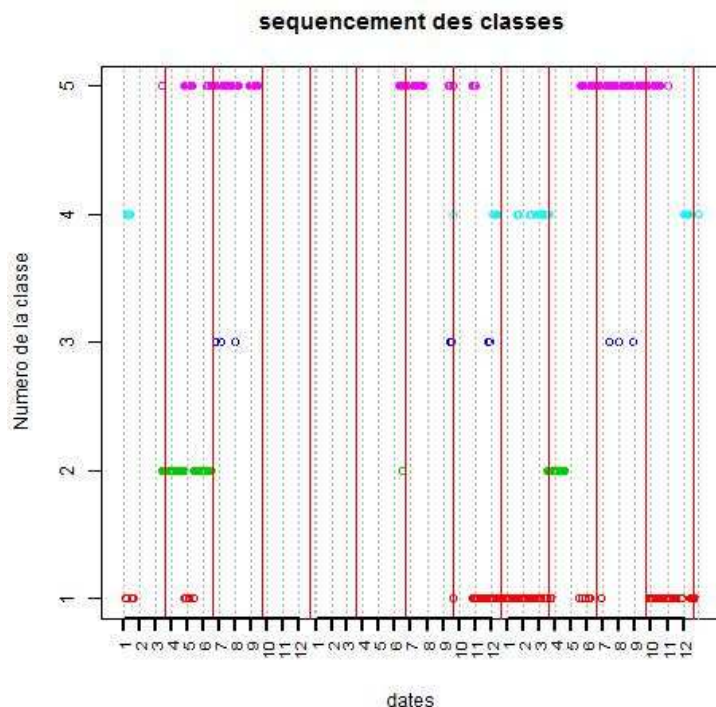


Figure 12. Représentation de la séquence de classification pour la période 2005-2007 utilisant les paramètres non corrélés issus de « l'ACP sans vent »

Il y a une évolution quant à l'apparition des classes au court du temps. Pour comparer les séquencements de classes obtenues selon les paramètres utilisés, les matrices de confusion sont utilisées. Chaque classe est associée ainsi à la classe de référence dont la séquence d'apparition est la plus ressemblante.

La mise en évidence de l'influence des paramètres sur les différentes classes est possible grâce à une étude statistique. Par exemple, la figure 13 représente les statistiques sur la concentration du phosphate ( $\mu\text{mol/L}$ ) en fonction des classes, la classification a été réalisée avec les paramètres non redondants issus de l'analyse en composante principale sans les paramètres de vent. La classe 3 est dominante, ce qui signifie que l'influence principale de ce paramètre se situe dans cette classe. En prenant la température de l'eau comme deuxième exemple, La figure 14 met en évidence une influence du paramètre température de l'eau sur la création des classes 3 et 5.

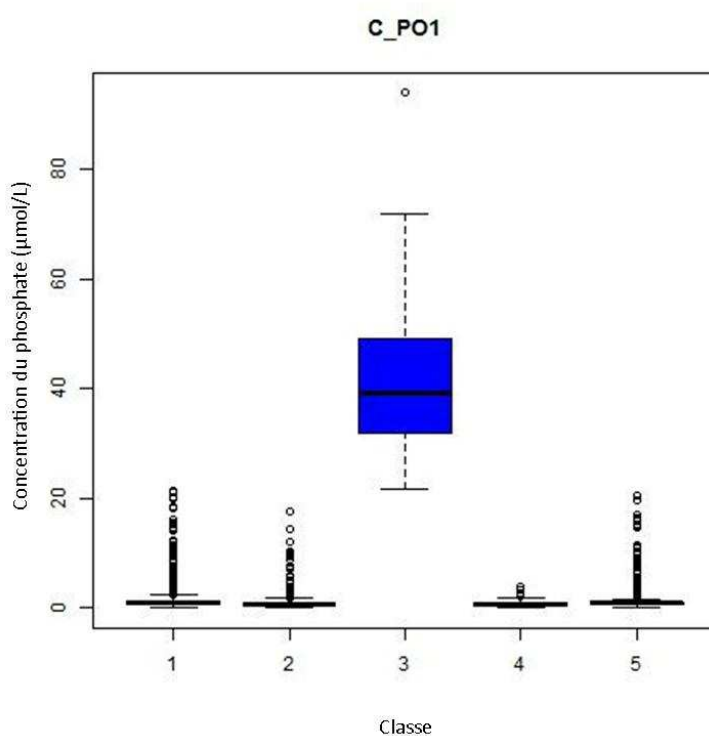


Figure 13. Boîte à moustache de la concentration du phosphate ( $\mu\text{mol/L}$ ) en fonction des classes

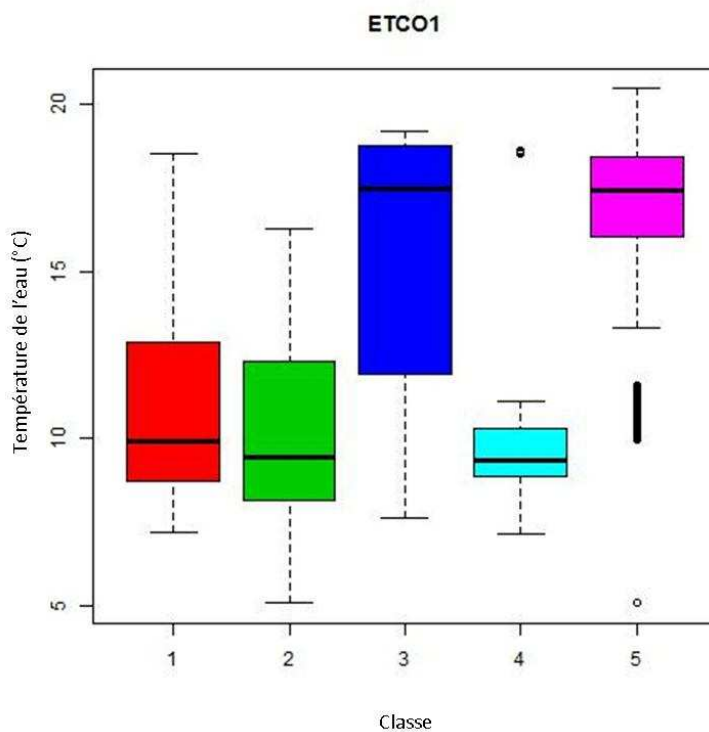


Figure 14. Boîte à moustache de la température de l'eau ( $^{\circ}\text{C}$ ) en fonction des classes



Il est possible de suivre la dynamique temporelle de ces paramètres comme illustré figure 15:

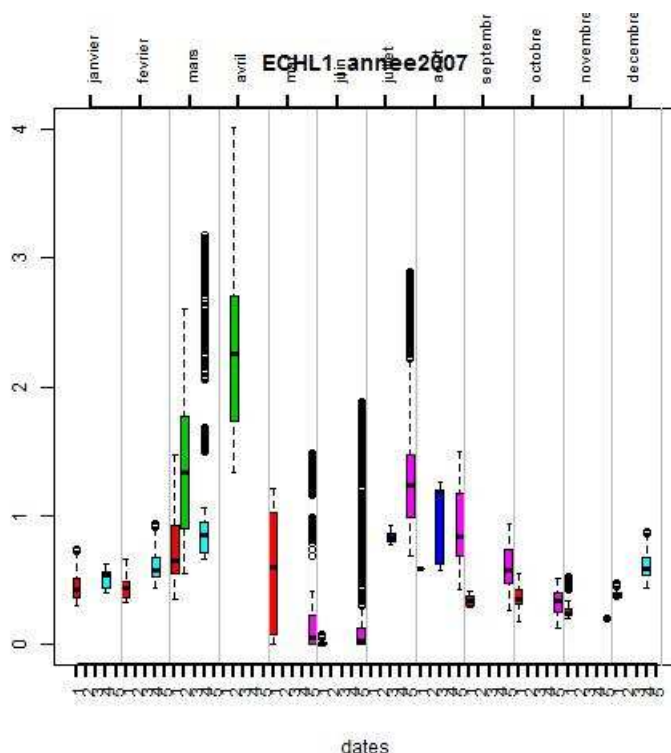


Figure 15 : Évolution temporelle de la Fluorescence ( $\mu\text{mol/L}$ ) en 2007

Au cours d'une même année, il y a une succession de classes liée à ces paramètres. Pour intégrer la connaissance du passé, les modèles de Markov sont utilisés. Notamment, pour connaître les probabilités de passer d'une classe à une autre, on utilise le processus de Markov.

### 3.2.3.2.3 Processus de Markov

Le processus de Markov est un moyen de déterminer les probabilités de transitions d'une classe à une autre, ou la probabilité de rester dans la même classe dans la séquence obtenue avec la classification. On obtient également le vecteur  $P_i$  des probabilités initiales.

Pour calculer la matrice de transition, l'équation des chaînes de Markov homogènes est utilisée (Équation 1) :

- Équation 1

$$P(X_{n+1} = j \mid X_n = i, X_{n-1} = i_{n-1}, \dots, X_1 = i_1, X_0 = i_0) = P(X_{n+1} = j \mid X_n = i)$$

De plus, la matrice de transition est régie par l'Équation 2 (avec  $i$  le numéro de la ligne et  $j$  celui des colonnes).

- Équation 2

$$\sum_{j=1}^{nbClasse} X_{ij} = 1$$

Le tableau 10 représente la matrice de transition pour une classification avec les paramètres non redondants issus de l'analyse en composante principale et le tableau 11 le vecteur Pi des probabilités initiales :

Tableau 10. Matrice de transition

	Classe1	Classe2	Classe3	Classe4	Classe5
Classe1	<b>9,98.10<sup>-1</sup></b>	2,11.10 <sup>-47</sup>	1,76.10 <sup>-4</sup>	2,70.10 <sup>-5</sup>	1,15.10 <sup>-3</sup>
Classe2	2,87.10 <sup>-48</sup>	<b>9,99.10<sup>-1</sup></b>	6,76.10 <sup>-5</sup>	2,12.10 <sup>-5</sup>	3,22.10 <sup>-4</sup>
Classe3	6,47.10 <sup>-5</sup>	1,94.10 <sup>-4</sup>	<b>9,99.10<sup>-1</sup></b>	2,11.10 <sup>-4</sup>	3,87.10 <sup>-7</sup>
Classe4	1,43.10 <sup>-4</sup>	3,48.10 <sup>-4</sup>	1,33.10 <sup>-3</sup>	<b>4,89.10<sup>-1</sup></b>	<b>5,08.10<sup>-1</sup></b>
classe5	2,68.10 <sup>-4</sup>	6,13.10 <sup>-4</sup>	1,30.10 <sup>-7</sup>	<b>5,31.10<sup>-2</sup></b>	<b>9,45.10<sup>-1</sup></b>

Cette matrice montre qu'il est plus probable de rester dans la même classe et les enchaînements les plus forts, par exemple de la classe 5 à la classe 4 et vice versa.

Tableau 11. Vecteur Pi des probabilités initiales

Pi classe1	Pi classe2	Pi classe3	Pi classe4	Pi classe5
1,33.10 <sup>-64</sup>	1,38.10 <sup>-43</sup>	5,48.10 <sup>-33</sup>	0.43	0.57

Une fois le vecteur Pi de probabilités initiales et la matrice de transitions obtenus, l'utilisation de l'algorithme de Viterbi permet d'avoir la séquence la plus optimale. Sur la figure 15, la séquence obtenue par la classification est de couleur verte et la séquence optimale apprise obtenue par l'algorithme de Viterbi est en rouge.

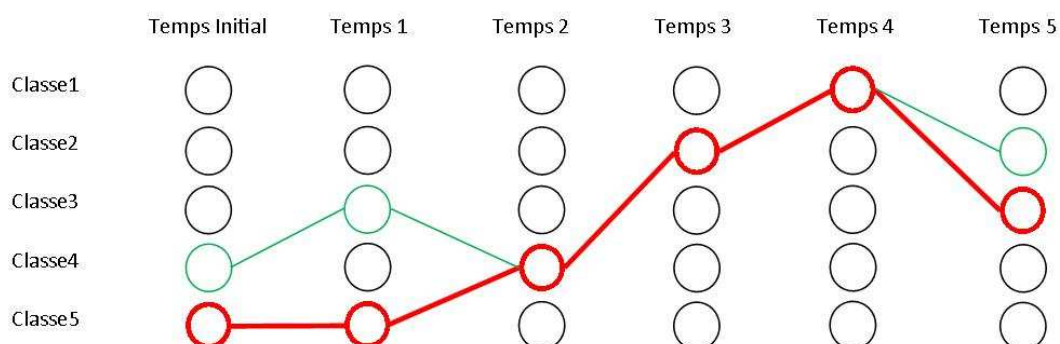


Figure 15. Séquence optimale obtenue par l'algorithme de Viterbi (rouge) et la séquence obtenue par la classification (vert)

## 4. REFERENCES

*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.*

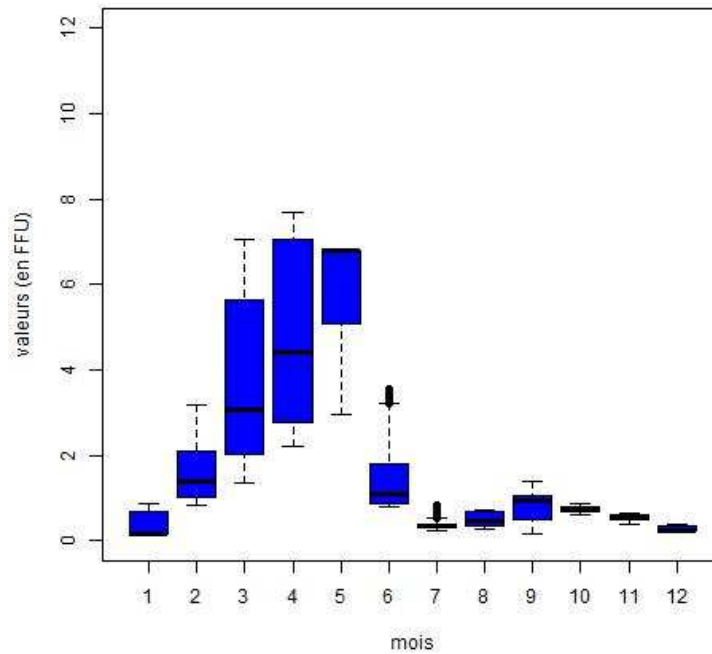
- Aminot, A., Kirkwood, D. et Kérouel, R., 1997. Determination of ammonia in seawater by the indophenol-blue method: evaluation of the ICES NUTS I/C 5 questionnaire. *Marine Chemistry*, 56 : 59-75.
- Aminot A. & R. Kérouel, 2004. Hydrologie des écosystèmes marins. Paramètres et analyses. Éd. Ifremer, 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., 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 E. & Lefebvre A., 2011. Phytoplankton monitoring system and countermeasures to prevent toxics algae blooms. Communication lors du 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 prymnésiofycée *Phaeocystis globosa* au large de Boulogne sur Mer. Ifremer/TMR.LER.BL/09.06, 44 pages (Encadrement A. Lefebvre).
- 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. & Caillault E., 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.
- Plat, T., Denman, K. L., 1975. Turbulent structure function in turbulent shear flows. *Ann, Rev, Ecol, Syst*, 6, 189-210.
- 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.
- Schiffrine N., 2010. Origine, dynamique et conséquences de la prolifération des annélides polydores sur la zone mytilicole de la Baie de Somme : Mise en place d'un suivi à haute fréquence des paramètres physico-chimiques et biologiques. Ifremer/RST.LER.BL/10.04/Laboratoire côtier de Boulogne-sur-Mer, 71 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.
- 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.

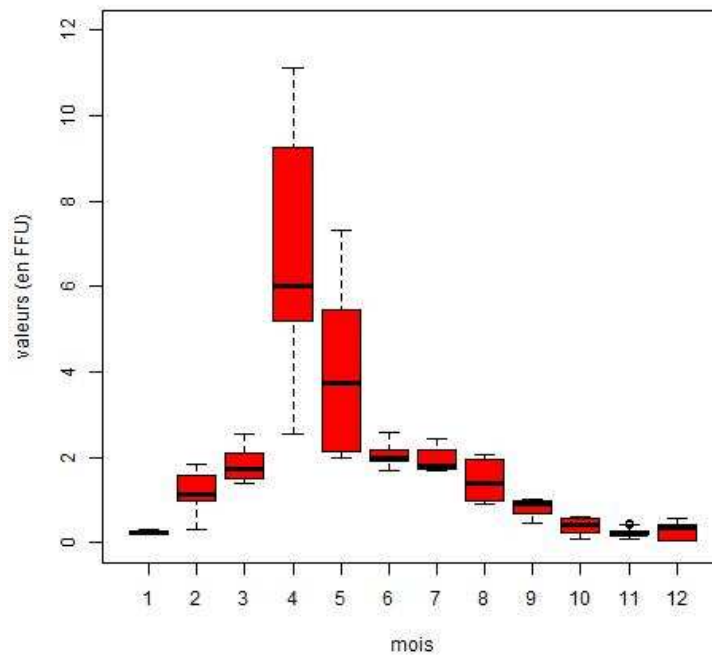
**ANNEXE 1 : Boîtes à moustache par mois et pour chaque paramètre mesuré par la station Marel Carnot pour l'année 2010 (en bleu) et pour l'année 2011 (en rouge)**

**Fluorescence (FFU)**

**boxplot pour l'année 2010**

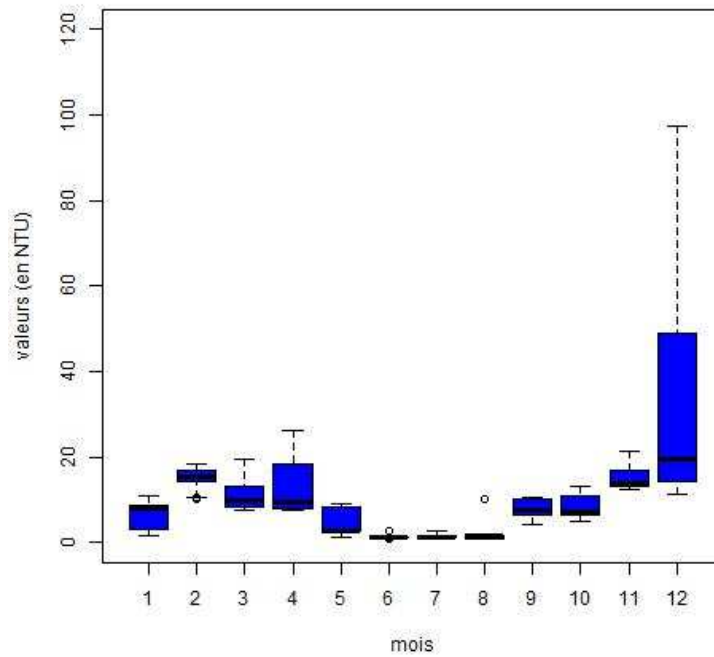


**boxplot pour l'année 2011**

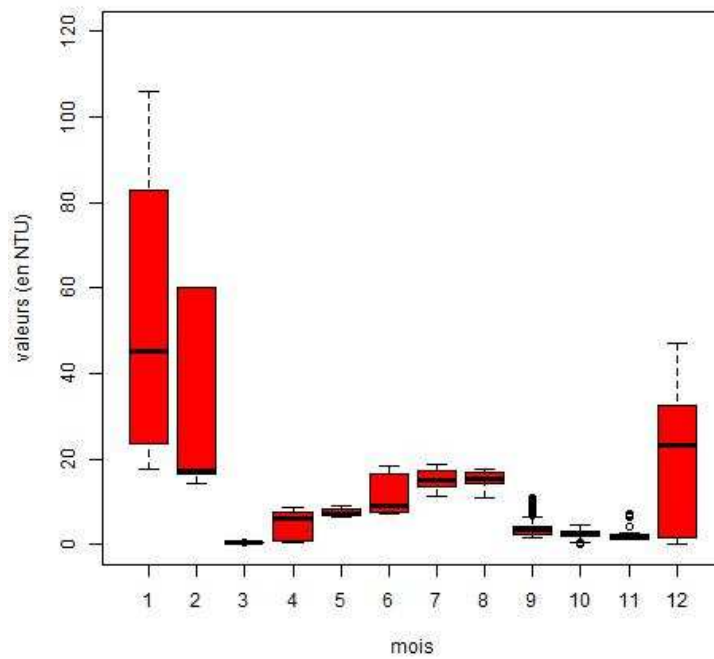


## Turbidité (NTU)

boxplot pour l'année 2010

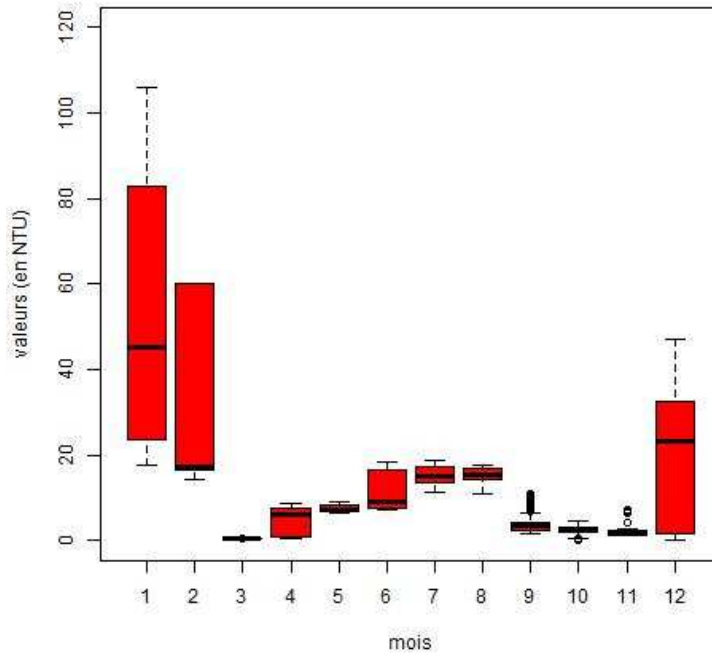


boxplot pour l'année 2011

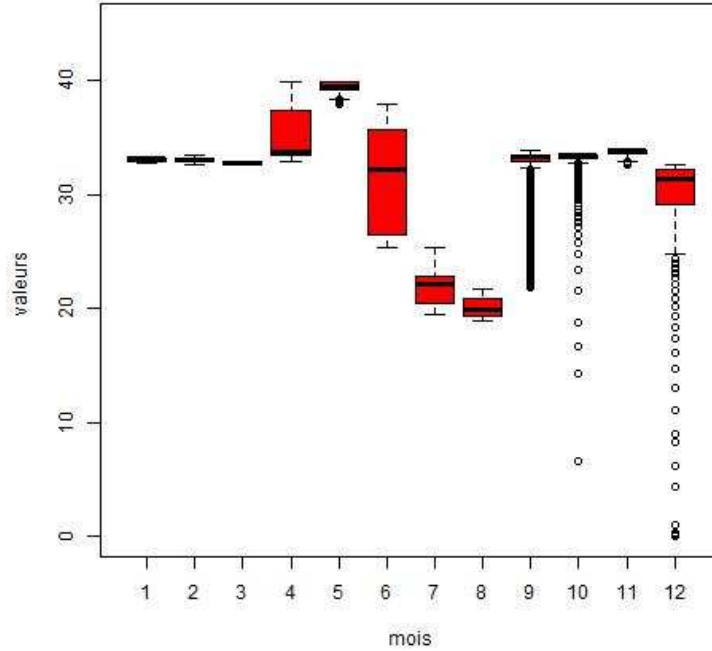


## Salinité (PSU)

boxplot pour l'année 2011

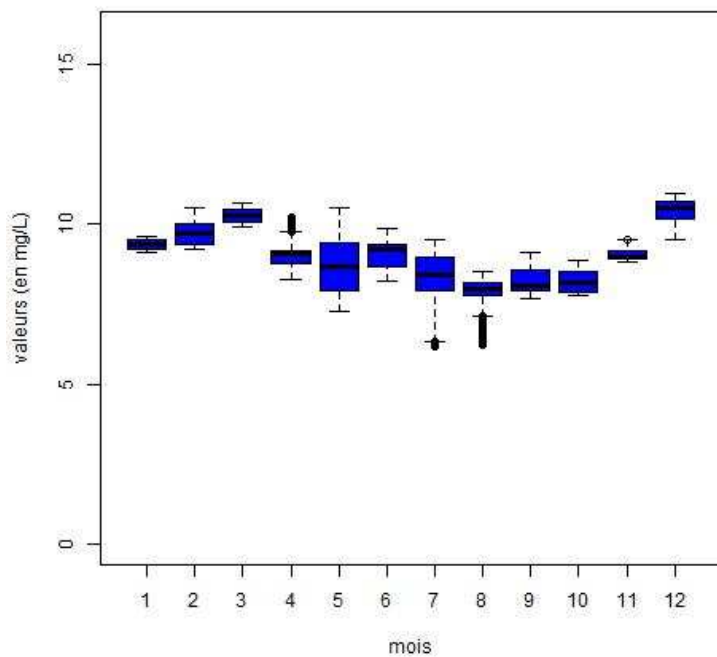


boxplot pour l'année 2011

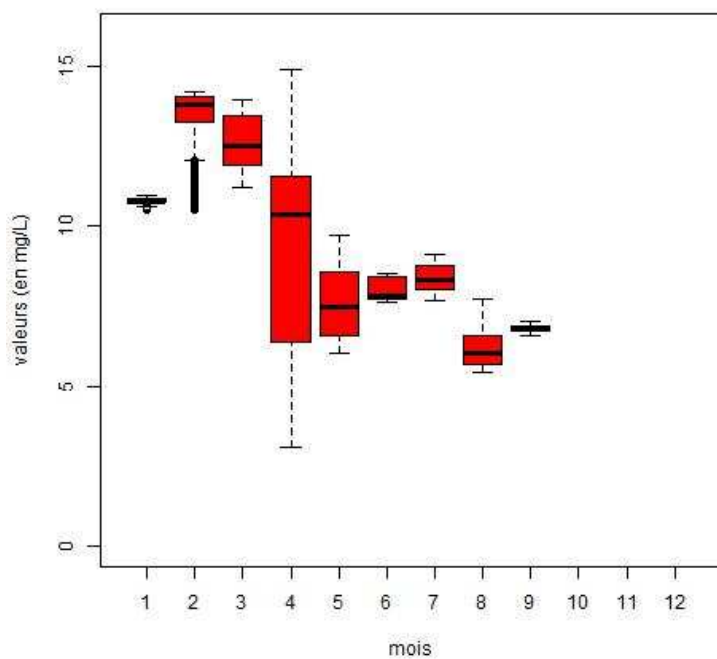


## Concentration en oxygène (mg/L)

boxplot pour l'année 2010



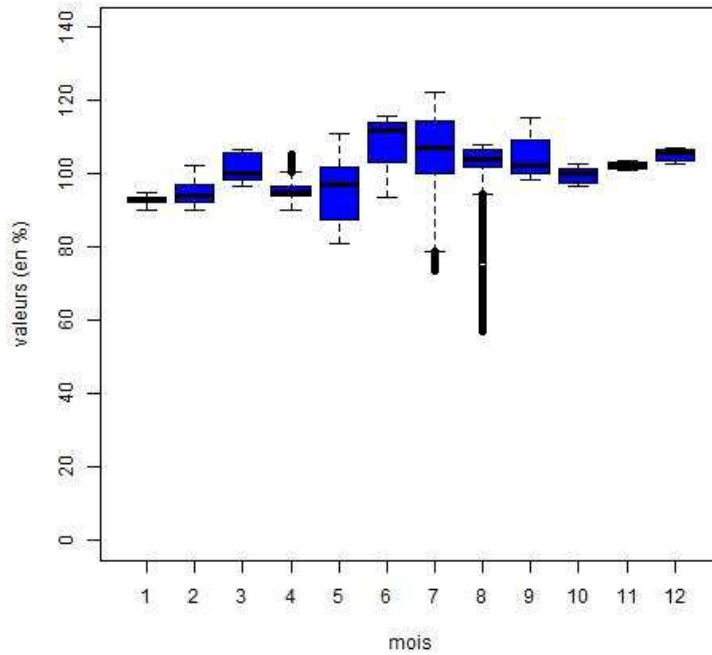
boxplot pour l'année 2011



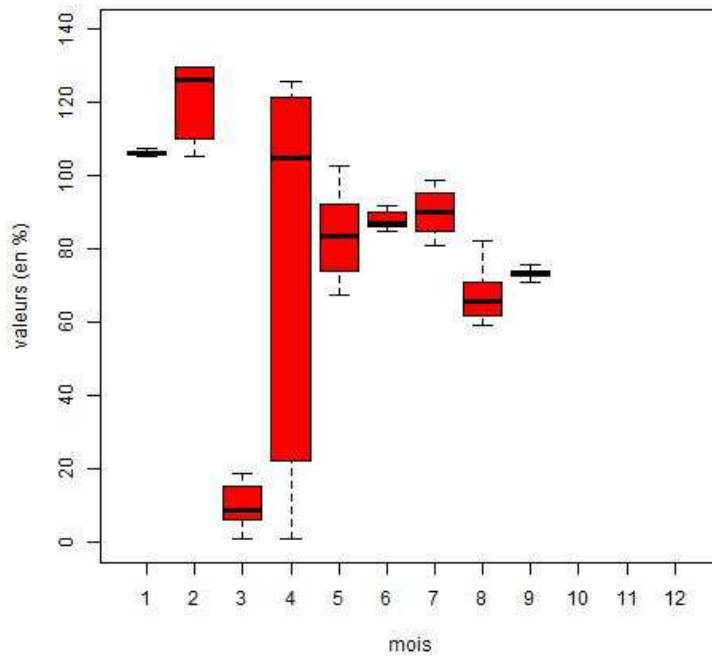


## Saturation en oxygène (%)

boxplot pour l'année 2010



boxplot pour l'année 2011



## ANNEXE 2 : Tableau de synthèse des paramètres retenus pour chaque catégorie

Paramètres	Tout	ACP	ACP sans vent	Nutriments	Physiques	Pressions	Réponses
Nitrates C_NI1	X	X	X	X		X	
Oxygène dissous corrigé C_O21	X	X	X		X		X
Phosphates C_PO1	X	X	X	X		X	
Silicates C_SI1	X	X	X	X		X	
Salinité CSAL1	X	X	X		X	X	
Pourcentage de saturation en oxygène CSAT1	X				X		X
Température air E_TA	X	X	X		X	X	
Conductivité E_CO1	X				X	X	
Luminosité E_LU1	X	X	X		X	X	
Oxygène dissous non corrigé E_O21	X				X		X
PH E_PH1	X	X	X		X		X
Turbidité E_TU1	X	X	X		X	X	
Vent Direction Moyenne E_VDM	X				X	X	
Vent Vitesse Rafale E_VVR	X	X			X	X	
Vent Vitesse Moyenne E_VVM	X				X	X	

Fluorescence ECHL1	X	X	X		X		X
Hauteur d'eau EMAHH	X						
Température eau ETCO1	X	X	X		X	X	
Niveau de la mer XMAHH	X	X	X		X	X	

## PARTENAIRES DU PROJET



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*