

MAREL Carnot - Partie 1

Bilan de la mise en place d'un système de mesures automatisées
à hautes fréquences en zone côtière de Boulogne-sur-Mer.



Marel Carnot et vue sur la rade de Boulogne-sur-Mer

Numéro d'identification du rapport : Diffusion : libre <input checked="" type="checkbox"/> restreinte <input type="checkbox"/> interdite <input type="checkbox"/> Validé par : LEFEBVRE Alain Version du document : définitive		date de publication Octobre 2006 nombre de pages 18 bibliographie (Oui / Non) illustration(s) (Oui / Non) langue du rapport Français
Titre et sous-titre du rapport : 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.		
Auteur(s) principal(aux) : Lefebvre Alain	Organisme / Direction / Service, laboratoire Ifremer/LER/Boulogne sur Mer	
Collaborateur(s) : Michel Repecaud	Organisme / Direction / Service, laboratoire Ifremer/TSI/Brest	
Travaux universitaires : diplôme : _____ discipline : _____ établissement de soutenance : _____ année de soutenance : _____		
Titre du contrat de recherche :	n° de contrat IFREMER	
Organisme commanditaire : Organisme(s) réalisateur(s) : Institut Français de Recherche pour l'exploitation durable de la mer (Ifremer) Boulogne – 150, quai Gambetta Responsable scientifique : LEFEBVRE Alain Ifremer/LER/Boulogne-sur-Mer.		
Cadre de la recherche : Programme : OCO (PGF03) Convention : SMCO / AEAP 55588 Projet : SMCO – ROSLIT – MAREL Carnot Autres (préciser) : _____ Campagne océanographique : (nom de campagne, année, nom du navire) Néant		
Résumé : Ce document constitue la première partie du bilan de mise en œuvre d'un système de mesures automatisées à haute fréquence en zone côtière de Boulogne-sur-Mer et plus précisément à l'extrémité nord de la digue Carnot (MAREL Carnot). Les différentes étapes depuis l'installation de l'infrastructure, la mise en place du flotteur ainsi que des capteurs jusqu'à la phase de transmission des données ainsi que les procédures de qualification – validation des données sont présentés. Afin de mettre en évidence les différents niveaux de variabilité temporelle que permet de caractériser MAREL Carnot, quelques résultats préliminaires sont présentés pour les paramètres suivants : la température, la salinité, l'oxygène, la turbidité, la luminosité, l'humidité relative, le vent.		
Mots-clés : Manche orientale – MAREL – Mesures hautes fréquences		

SOMMAIRE

1. Contexte de l'implantation de MAREL Carnot	4
2. De l'implantation du système aux mesures.....	5
2.1. Études préalables.....	5
2.2. Implantation du système de mesures automatisées.....	5
2.3. Inauguration de MAREL Carnot.....	7
2.4. Phase de tests.....	8
3. RESULTATS	9
3.1. Bilan de fonctionnement	9
3.2. Analyses des données.....	11
3.2.1. Préambule.....	11
3.2.2. Bilan provisoire	11
4. CONCLUSIONS.....	17

1. Contexte de l'implantation de MAREL Carnot

Certains phénomènes biologiques sont visibles à méso-échelle, ils se produisent en fait sur l'ensemble d'un bassin. Par exemple, les blooms de *Phaeocystis sp.* se produisent en Manche orientale et en mer du Nord. Ces blooms sont depuis quelques années d'une très longue durée, variant entre 6 et 7 semaines. Ils présentent plusieurs maxima qui se matérialisent par la présence de mousse à la surface de l'eau et sur les plages. La périodicité actuelle d'observation bi-hebdomadaire (réseau Suivi Régional des Nutriments sur le littoral Nord Pas de Calais Picardie mis en place depuis 1992) ne peut pas rendre compte de l'amplitude réelle du phénomène, ni de son déroulement entier. De plus, nous avons une très mauvaise connaissance de ce qui précède et de ce qui suit les blooms de *Phaeocystis*. Cette lacune ne peut être comblée que par une acquisition en continu de mesures hydrobiologiques, contribuant ainsi à mieux appréhender la complexité des processus à haute fréquence qui régissent le devenir des nutriments et leurs impacts dans un milieu côtier à haute variabilité et à haute hétérogénéité.

Le littoral du Nord-Pas-de-Calais est soumis à l'influence de plusieurs fleuves (Somme, Authie, Canche, Liane) qui génèrent des dessalures parfois importantes en zone côtière. Cette zone est caractérisée par l'existence d'une structure frontale dont la dynamique est contrôlée par la marée (Brylinski & Lagadeuc, 1990 ; Brylinski *et al.*, 1991). La connaissance fine à très haute fréquence de ces phénomènes est indispensable dans une mer à régime mégatidal où les dessalures se font par bouffées liées à des vidanges d'estuaires ou des ports lors du baissant.

Enfin, les océanographes ont en général une meilleure connaissance du fonctionnement de l'écosystème marin quand les conditions sont bonnes pour acquérir des vérités terrain. Nous n'avons qu'une connaissance fragmentaire des phénomènes qui se passent en cas de mauvais temps. Ceci est particulièrement vrai dans le Nord-Pas-de-Calais. L'acquisition de mesures régulières doit permettre de renforcer les connaissances et d'y intégrer la "jouvence" des masses d'eau que peuvent produire le brassage et le mélange intenses qui apparaissent lors des périodes de mauvais temps.

L'activité d'observation du milieu marin s'organise autour de deux axes : maintien des séries d'observation en cours : réseaux IFREMER (REPHY, REMI, RNO, SRN), et INSU (SOMLIT) et mise en place de nouveaux systèmes d'observation en acquisition automatique. Toutes les séries d'observation sont révélatrices de la qualité du milieu marin côtier et sont susceptibles de détecter des évolutions saisonnières et pluriannuelles. Elles contribuent également à étudier l'état d'eutrophisation des eaux côtières de la Manche Est tant au point de vue recherche que vis à vis des directives Européennes qu'il conviendra de respecter à terme. Un échantillonnage le plus régulier possible et plus dense est indispensable pour mieux comprendre la complexité des phénomènes et des processus. Les observations actuelles ne répondent que partiellement à la nécessité d'une cadence régulière ; en effet, il est apparu que la réalisation de sorties bi-mensuelles était difficilement applicable pour des questions de météorologie.

L'automatisation de l'acquisition de données *in situ* est indispensable pour rendre plus performant le suivi régulier des paramètres de l'environnement sur le long terme. Elle permettra d'autre part d'alimenter les modèles hydrodynamiques et de transport turbulent existant ou en cours de développement qui ont besoin d'être validés ou calibrés par des données à haut débit.

Le projet a consisté à mettre en place une station de mesure MAREL côtière dotée d'un système automatisé de mesures physico-chimiques et hydrologiques de l'eau de mer. La station de mesure analyse les eaux provenant du port de Boulogne et de l'estuaire de la Liane

et son implantation permet également une surveillance renforcée de la zone côtière, ce qui en fait un outil indispensable pour les scientifiques et pour les organismes susceptibles de participer à la gestion de la zone côtière (Agence de l'Eau, Services Maritimes, collectivités...).

2. De l'implantation du système aux mesures

2.1. Études préalables

Dans un premier temps, différentes campagnes de prélèvements ont été organisées en rade de Boulogne-sur-Mer afin de déterminer sur des critères environnementaux le site d'implantation de la station de mesure afin de répondre au mieux aux exigences des différents partenaires du projet. Deux hypothèses d'implantation ont été envisagées : la digue Carnot et le caisson nord entre la digue Carnot et la digue nord. L'ensemble des mesures *in situ* et le bilan de fonctionnement de l'écosystème côtier Boulonnais a également permis de définir les gammes de variation des différents paramètres physico-chimiques et biologiques, étape indispensable pour le choix des capteurs (Lefebvre *et al.*, 2002). Afin de mieux comprendre l'évolution spatiale et temporelle de certains paramètres biologiques et face à la diversité d'origine des eaux échantillonnées, une connaissance approfondie de la circulation des masses d'eaux à l'intérieur de la rade de Boulogne sur Mer, et plus précisément au niveau du site d'implantation de la station de mesure automatisée s'avérait nécessaire. Ainsi, une étude courantologique a été réalisée en collaboration avec le Laboratoire Géomorphologie Dynamique et Aménagement des Littoraux de l'Université du Littoral – Côte d'Opale. Lors de cette étude, un courantomètre à effet Doppler (ADCP) a été déployé, afin d'obtenir des mesures de courant, en continu, de la surface au fond. Différentes analyses physico-chimiques et biologiques ont été mises en œuvres selon le principe des transects et différents scénarii de circulation des masses d'eaux dans la rade et à ses abords ont été testés grâce à un modèle hydrodynamique 2D (Hébert et Lefebvre, 2004).

2.2. Implantation du système de mesures automatisées

Le premier trimestre 2003 a été consacré à la fin des études concernant les systèmes de mesures ainsi qu'à la fabrication des différents éléments constitutifs de l'infrastructure. Les travaux de génie civil terminés, la mise en place de l'élément principal de l'infrastructure (le tube constituant la protection de la station de mesure) a eu lieu le 18 décembre 2003 (Figure 1).



Figure 1 : Mise en place de l'infrastructure

Après la mise en place de la structure principale de l'installation, les finitions de l'installation ont pu débuter afin d'entamer dans les délais les plus réduits la mise en place du cœur de la station de mesure.

En février 2004 a été installée le module énergie, c'est à dire le système qui fournit l'énergie à la station de mesure. Ce module énergie comprend un groupe électrogène qui recharge un rack de batteries qui alimente la station de mesure en 24 volts. Après une période de fonctionnement « test » de deux semaines avec un simulateur de la station de mesure qui consommait l'énergie fournie par les batteries, le cœur de la station a pu être installé. La station de mesure elle-même a été testée en atelier un mois avant son installation sur site (Figure 2).



Figure 2 : La station de mesure en test en atelier, puis dans le tube sur site

En mars 2004, l'ensemble de l'installation fonctionnait en mode « test » *in situ*.

2.3. Inauguration de MAREL Carnot

La station de mesure automatisée haute fréquence a été inaugurée par Jean-François Minster, Président d'Ifremer, en compagnie de Michel Delebarre, Président du Syndicat Mixte de la Côte d'Opale et de Guy Lengagne, Président de la CAB (Communauté d'Agglomération du Boulonnais) le 25 novembre 2004.

2.4. Phase de tests

Les premières données non validées (sans assurance de qualité) ont été fournies dès avril à une fréquence d'une mesure de tous les paramètres toutes les 20 minutes.

Toutes les 20 minutes, le système enregistre 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.

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 3).

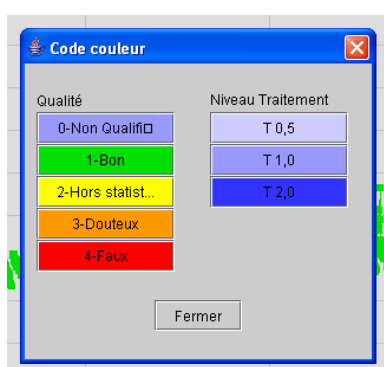


Figure 3 : Niveau de traitement et de qualité des données lors de la procédure de contrôle (capture d'écran de l'outil de contrôle qualité)

Une partie de ce contrôle est fait automatiquement (contrôle du format des fichiers, de la gamme de valeurs observées en référence à des valeurs de références) ; les données sont alors 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 4). Les accès sont possibles via trois domaines : public, scientifique et technique en fonction du profil de l'utilisateur.

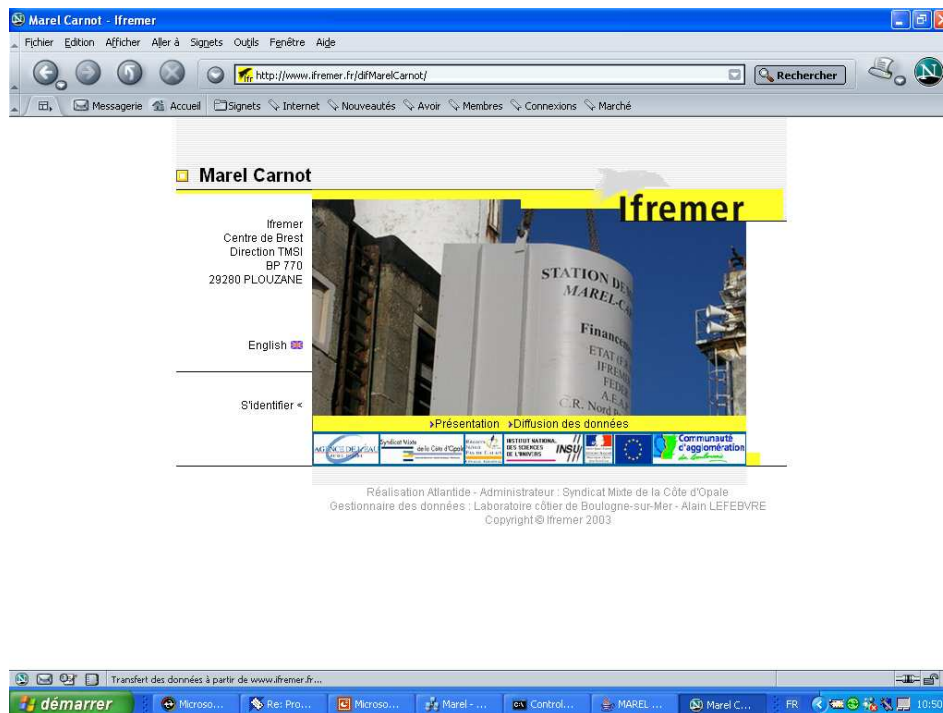


Figure 4 : Page d'accueil du site de consultation des données MAREL Carnot

La chambre de passage est changée trimestriellement et conduit à la vérification sous assurance de qualité de l'étalonnage des capteurs. 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.

Dès le second semestre 2004, la station a fonctionné en mode nominal, avec une fréquence d'acquisition des données de 20 minutes.

Un **CD Vidéo** de présentation du système MAREL Carnot (conception, mise en place, principe, maintenance, métrologie, gestion des données) est annexé à ce document.

3. RESULTATS

3.1. Bilan de fonctionnement

Le nombre théorique de données acquises avec une fréquence d'acquisition de 20 minutes est compris en 2016 et 2232. Le pourcentage de données acquises réellement varie entre 55,2 et 97,7 (Tableau 1). L'indisponibilité des données résulte généralement d'un arrêt du système pour maintenance de routine ou d'urgence, d'un problème de transmission ou d'un problème au niveau de la circulation de l'eau dans le circuit de mesure. L'expérience acquise depuis la

mise en marche du système a permis de remédier au problème de transmission et devrait permettre de réduire le temps d'intervention lors des maintenances.

Tableau 1 : Disponibilités des mesures entre mars 2004 et septembre 2006

Année	Mois	Nombre de valeurs théoriques	Pourcentage de données acquises	
2004	Mars	Phase de tests	Sans objet	
	Avril	2160	92,0	
	Mai	2232	68,7	
	Juin	2160	93,3	
	Juillet	2232	88,4	
	Août	2232	81,5	
	Septembre	2160	82,4	
	Octobre	2232	93,9	
	Novembre	2160	88,7	
	Décembre	2232	77,7	
	2005	Janvier	2232	79,2
		Février	2016	74,1
Mars		2232	83,4	
Avril		2232	91,9	
Mai		2232	97,7	
Juin		2160	90,1	
Juillet		2232	76,7	
Août		2232	55,2	
Septembre		2160	74,5	
Octobre		2232	94,9	
Novembre		2160	89,7	
Décembre		2232	67,9	
2006	Janvier	2232	87,1	
	Février	2016	80,8	
	Mars	2232	93,5	
	Avril	2160	89,7	
	Mai	2232	92,0	
	Juin	2160	89,4	
	Juillet	2232	88,4	
	Août	2232	90,7	
	Septembre	2160	84,2	
	Octobre	-	-	
	Novembre	-	-	
	Décembre	-	-	

La chambre de passage (support des capteurs fluorescence, température, salinité, oxygène) a fait l'objet d'un changement en mai 2004, septembre 2004, décembre 2004, avril 2005, juin 2005, septembre 2005, décembre 2005, mars 2006, juin 2006, septembre 2006). Ce changement implique une rotation entre la chambre en place et une seconde chambre ayant fait l'objet d'un contrôle métrologique (vérification des capteurs à la réception du matériel

puis nouvelle calibration). Ces opérations font l'objet de la rédaction d'un rapport téléchargeable depuis le site internet dédié à MAREL Carnot.

3.2. Analyses des données

3.2.1. Preamble

Cette partie fera l'objet d'un second rapport (MAREL Carnot – Partie 2 : Résultats de la surveillance à haute fréquence de la zone côtière de Boulogne-sur-Mer par le système de mesures automatisées MAREL). Les données de l'année N seront valorisées l'année N+1.

Face à la complexité du traitement des données à haute fréquence, un groupe de réflexion sera mis en place afin de proposer les outils statistiques les mieux adaptés, de développer des routines de traitements des données par des logiciels spécifiques. Un bulletin annuel devrait être proposé à terme selon un modèle commun à l'ensemble des implantations MAREL afin de permettre des comparaisons inter-annuelles et inter-sites.

3.2.2. Bilan provisoire

L'extraction des données entre avril 2004 et octobre 2006 permet de mettre en évidence la très forte variabilité des paramètres mesurés à différentes échelles temporelles : l'année, la saison, le cycle tidal (morte-eau / vive-eau, basse mer / pleine mer),...(Figures 5 à 10).

La fluorescence permet d'obtenir une information sur la biomasse phytoplanctonique. Alors que les années 2004 et 2006 sont caractérisées par une efflorescence intense, l'année 2005 présente plusieurs efflorescences de moindres ampleurs (Figure 5). A l'échelle de la saison et du cycle tidal, la variabilité est très importante et révèle une réponse rapide du système à différents paramètres qui restent à caractériser.

La concentration en oxygène dissous corrigée de la salinité et le pourcentage de saturation en oxygène sont révélateurs des interactions entre les différents compartiments de l'écosystème (zooplancton, phytoplancton, bactéries, nutriments...). Les résultats montrent la nécessité de développer des procédures de validation des données et d'introduire une analyse a posteriori au regard des rapports de métrologie : certaines séries de données présentent un décalage les rendant « douteuses » ou « fausses » alors qu'il ne s'agit que d'un shift du capteur (Figure 6).

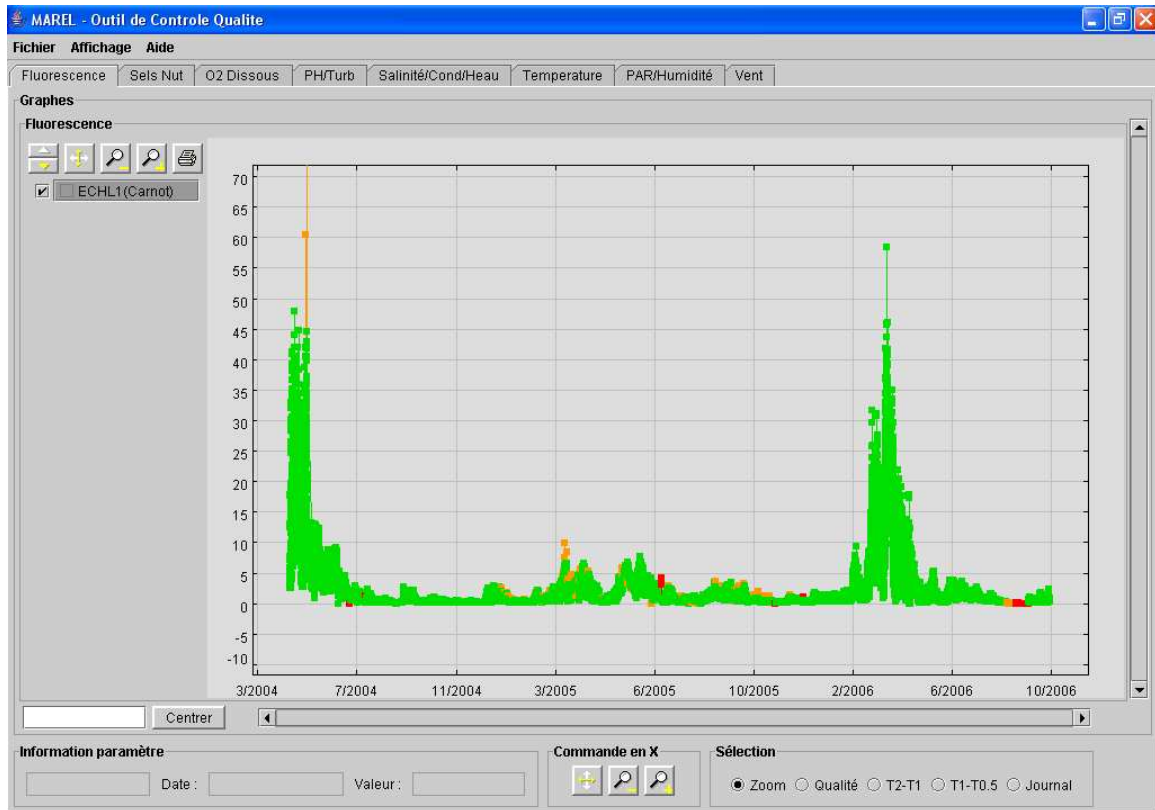


Figure 5 : Évolution temporelle de la fluorescence (F.F.U.) entre avril 2004 et octobre 2006

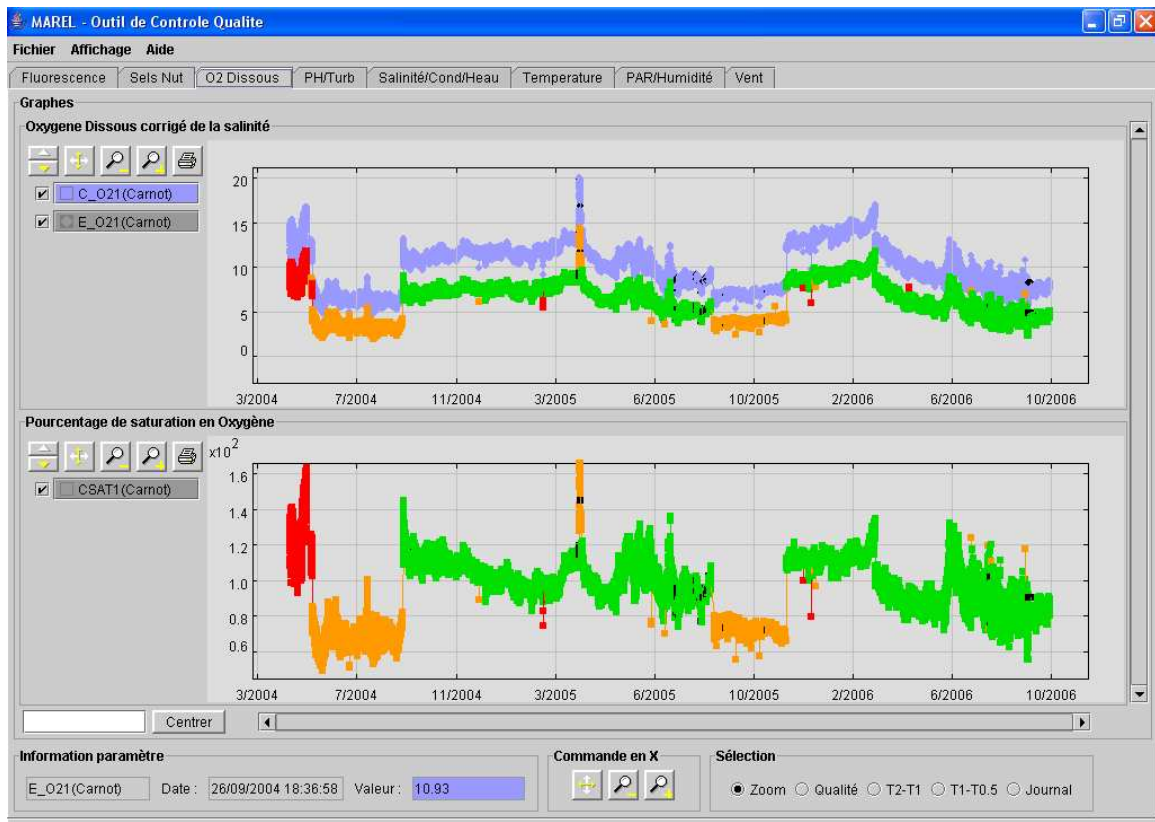


Figure 6 : Évolution temporelle de la concentration en oxygène dissous corrigée de la salinité (en haut) et du pourcentage de saturation en oxygène (en bas) entre avril 2004 et octobre 2006

Les variations de la salinité sont caractéristiques d'un système côtier sous influence anthropique. En effet, la majorité des valeurs de salinité est supérieure à 30 et quelques périodes présentent des valeurs inférieures révélatrice des apports d'eau douce de la Liane (Figure 7). Afin de mieux comprendre le fonctionnement du système une collaboration a été engagée avec les Services Maritimes des Ports de Boulogne et Calais afin de disposer des données relatives à l'ouverture du barrage Marguet et des activités susceptibles de modifier les caractéristiques de la masse d'eau (Ex. : Dragages).

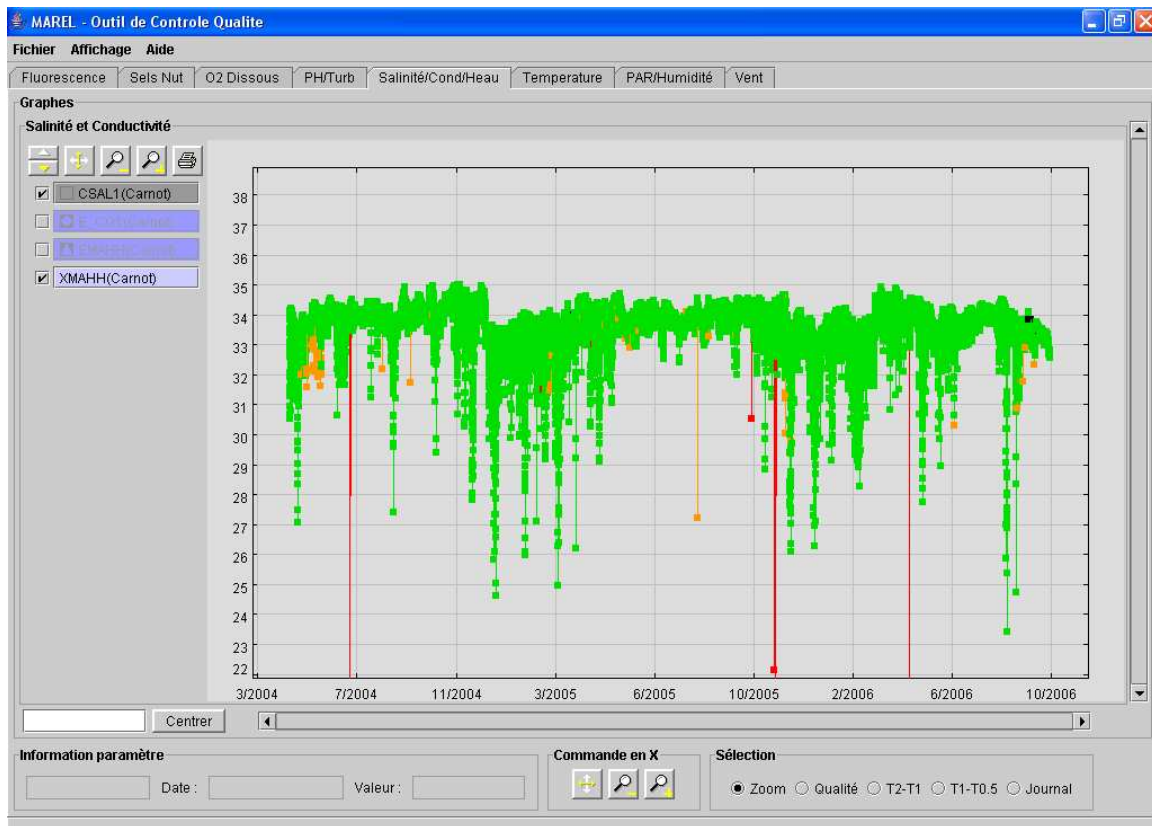


Figure 7 : Évolution temporelle de la salinité (P.S.U.) entre avril 2004 et octobre 2006

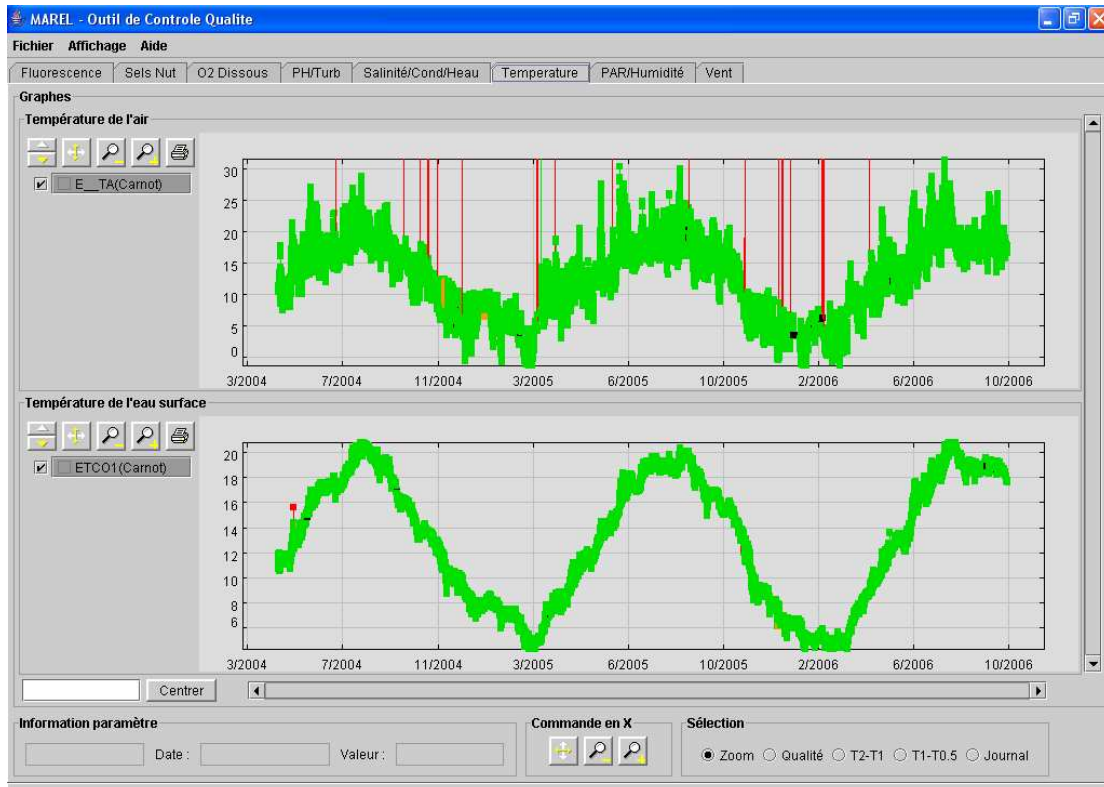


Figure 8 : Évolution temporelle de la température de l'air et de l'eau de surface (°C) entre avril 2004 et octobre 2006

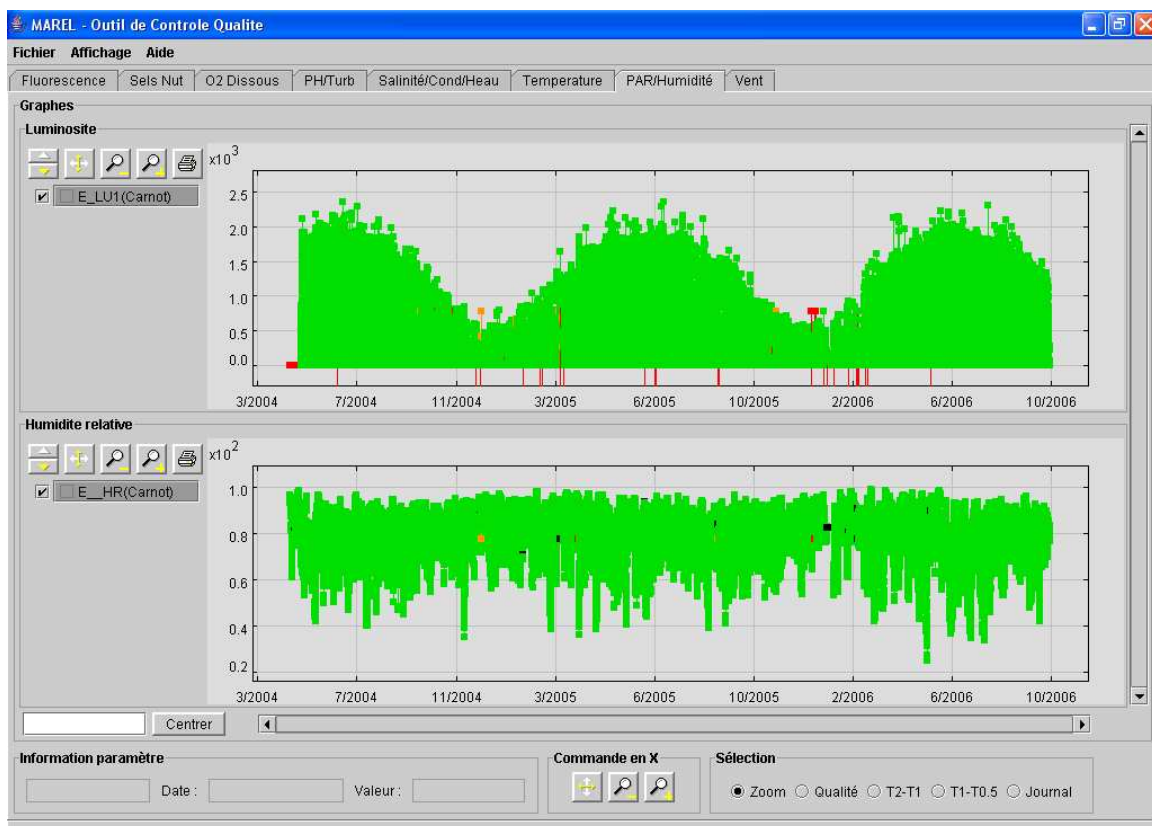


Figure 9 : Évolution temporelle de la luminosité ($\mu\text{mol/s/m}^2$) et de l'humidité relative (%) entre avril 2004 et octobre 2006

Le système MAREL Carnot est équipé depuis le 17 mai 2006 d'un anémomètre (positionné sur le phare) permettant ainsi de connaître la direction et la vitesse du vent (Figure 10).

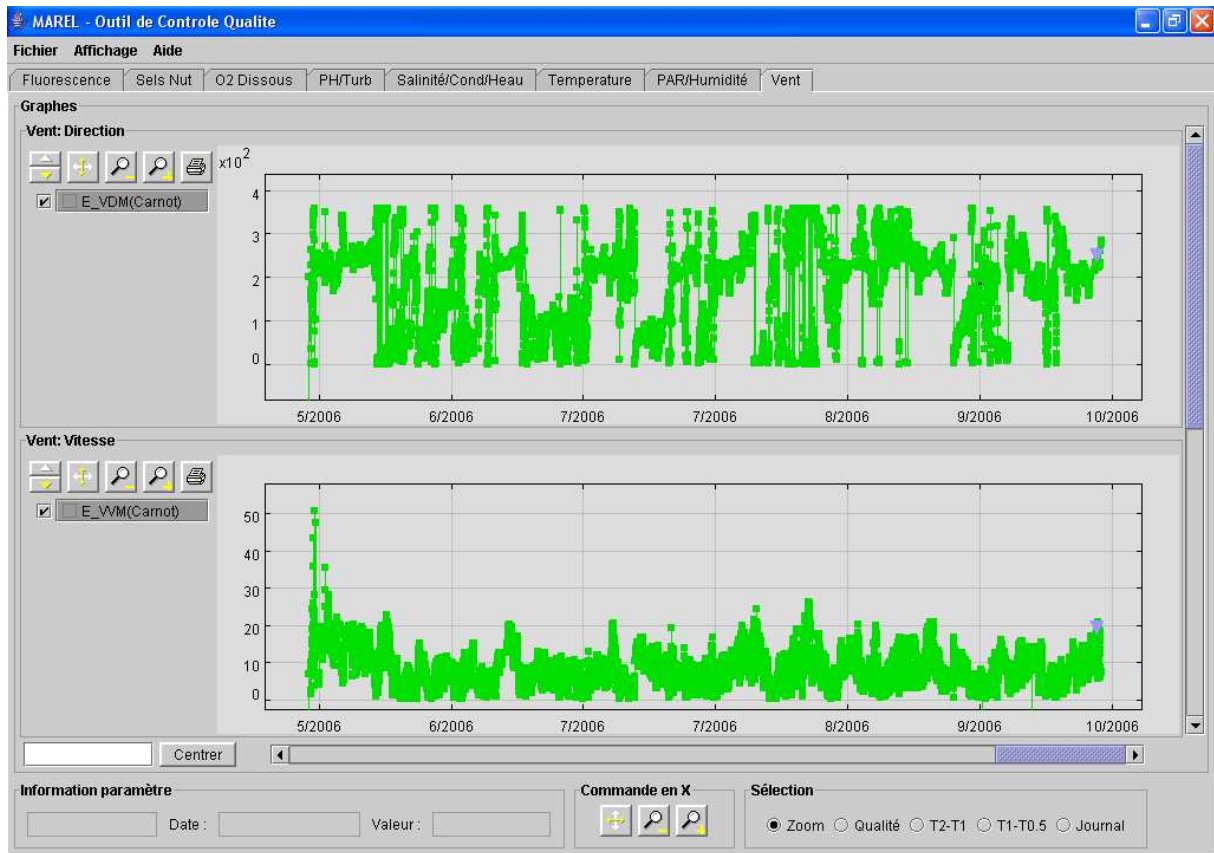


Figure 10 : Évolution temporelle de la direction (degrés) (en haut) et de la vitesse (m/s) (en bas) entre mai 2005 et octobre 2006

La spécificité du système MAREL Carnot est d'être équipé d'un analyseur de sels nutritifs « SYSTEA » pour le nitrate, le silicate et le phosphate. Après une phase de test longue mais indispensable, les premières séries de mesures en phase opérationnelle à une fréquence bi-journalière sont encourageantes (Figures 11 à 13). Ce système nécessite cependant une surveillance toute particulière eu égard à la haute technicité de celui-ci. Les premiers résultats enregistrés constituent une première internationale, et de futures publications sont en préparation.

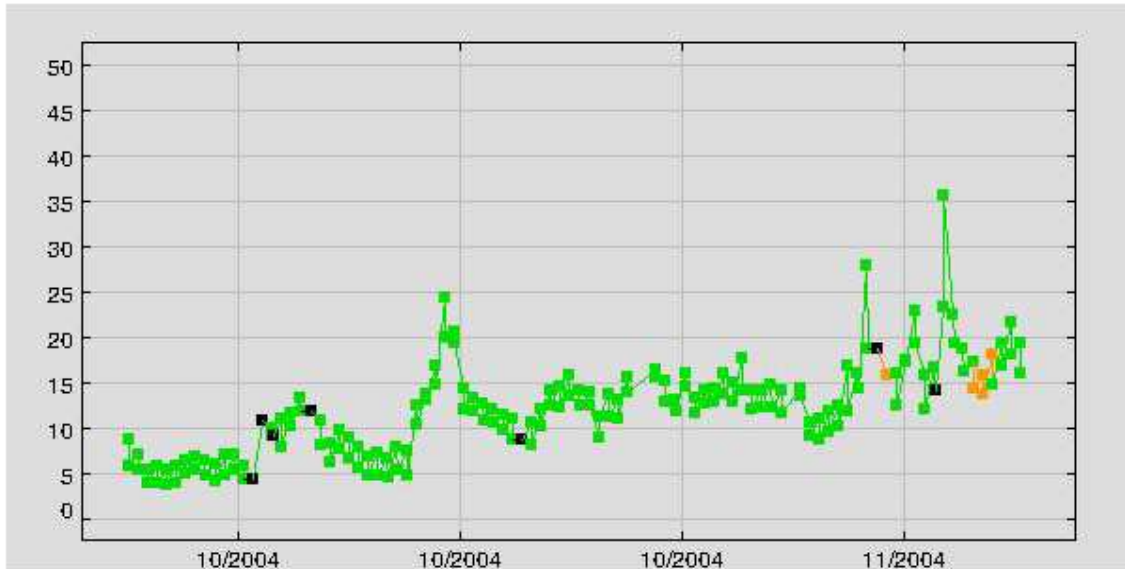


Figure 11 : Évolution temporelle de la concentration en nitrate ($\mu\text{mol/L}$) entre le 15 septembre et le 30 novembre 2004

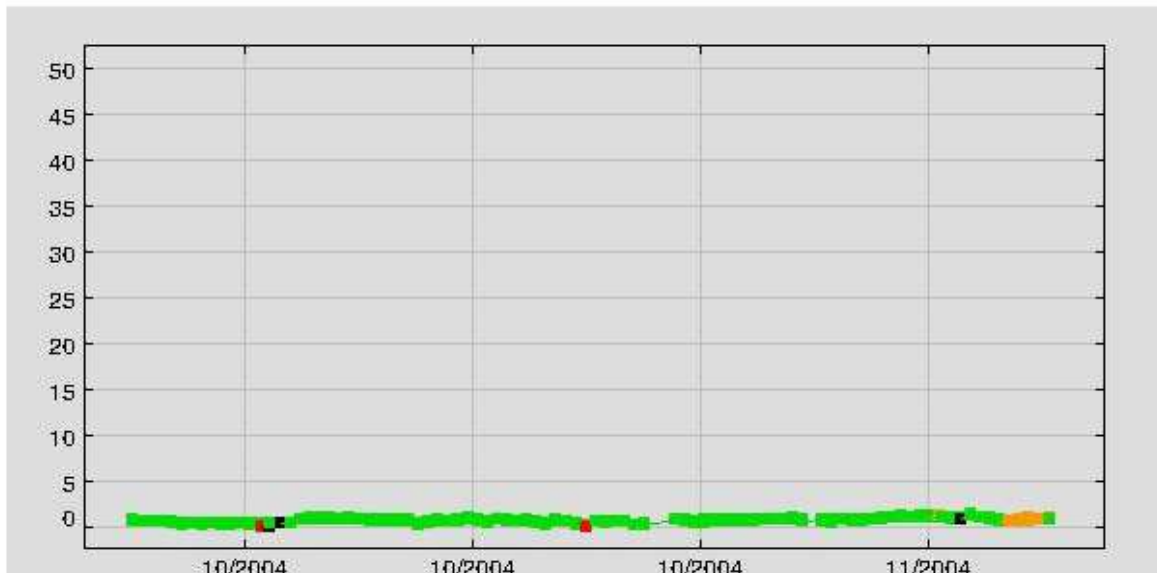


Figure 12 : Évolution temporelle de la concentration en phosphate ($\mu\text{mol/L}$) entre le 15 septembre et le 30 novembre 2004

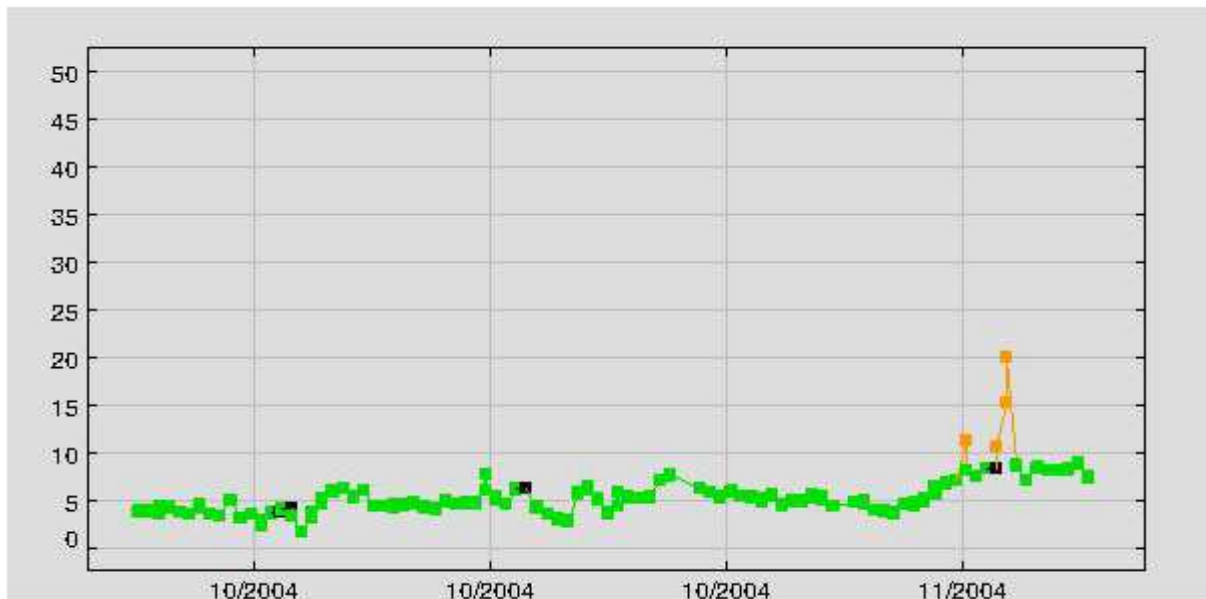


Figure 13 : Évolution temporelle de la concentration en silicate ($\mu\text{mol/L}$) entre le 15 septembre et le 30 novembre 2004

4. CONCLUSIONS

Le système de mesures automatisées MAREL Carnot est implanté à l'extrémité nord de la digue Carnot de Boulogne-sur-mer depuis 2004. Les paramètres hydrologiques et météorologiques sont acquis à une fréquence tri-horaire. Le pourcentage d'acquisition de données varie entre 55,2 et 97,7. Cette variabilité s'explique par des arrêts pour maintenance et/ou défaillance de certains éléments du système. L'expérience acquise depuis le déploiement du système permet de limiter la perte de données.

La présentation des résultats acquis entre avril 2004 et octobre 2006 permet de mettre en évidence la capacité de MAREL Carnot à appréhender des phénomènes à différentes échelles temporelles. Les résultats mettent également en évidence la capacité de MAREL Carnot à restituer une image du fonctionnement de l'écosystème côtier de Boulogne-sur-Mer sous influence marine et anthropique (Liane).

La prochaine étape du travail consistera à traiter le signal haute fréquence de MAREL Carnot afin de mieux comprendre les relations entre les paramètres, les cycles temporelles, la dynamique du système (par croisement avec des données d'autres réseaux, *i.e.* le phytoplancton).

5. BIBLIOGRAPHIE

- Brylinski J.-M. & Y. Lagadeuc, 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.
- Brylinski J.M., Lagadeuc Y., Gentilhomme V., Dupont J.P., Lafite R., Dupeuple P.A., Huault M.F., Auger Y., Puskaric E., Wartel M. & L. Cabioch, 1991. Le fleuve côtier: un phénomène hydrologique important en Manche Orientale. Exemple du Pas de Calais. *Oceanol. Acta*, 11 (Vol. spec.): 197-203.
- Hébert C. & A Lefebvre, 2004. Circulation des masses d'eau dans la rade de Boulogne sur Mer – Etude préalable à l'implantation de la station de mesures automatisées MAREL Carnot - *Rapport Ifremer DEL/BL/RST/04/08*, 18 pages.
- 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.