

Laboratoire Environnement côtier & Ressources aquacoles (LER)

Coordonnateur : Elvire Antajan

Auteurs : Elvire Antajan, Régis Delesmont, Jean-Marie Dewarumez,
Alain Lefebvre, Christophe Luczak, Caroline Warembourg

Avril 2010 – LER/BL/RST/10/01

ifremer

Surveillance Écologique et Halieutique Site de Gravelines

Novembre 2008 - Octobre 2009



Cténaire du zooplancton de Gravelines – *Mnemiopsis leidyi*
(Photo : Karl Van Ginderdeuren)

FICHE DOCUMENTAIRE

Numéro d'identification du rapport : LER/BL/RST/10/01 Diffusion : libre <input checked="" type="checkbox"/> restreinte <input type="checkbox"/> interdite <input type="checkbox"/> Validé par : Groupe de lecture Ifremer - EDF Version du document : Définitive	date de publication Avril 2010 nombre de pages 151 bibliographie (Oui / Non) illustration(s) (Oui / Non) langue du rapport Français
Titre et sous-titre du rapport : Surveillance écologique et halieutique du site de production électronucléaire de Gravelines Novembre 2008 – Octobre 2009 Titre traduit : Ecological and fisheries monitoring of the Gravelines nuclear power plant November 2008 – October 2009	
Auteur(s) principal(aux) : ANTAJAN Elvire DELESMONT Régis DEWARUMEZ Jean Marie LEFEBVRE Alain LUCZAK Christophe WAREMBOURG Caroline	Organisme / Direction / Service, laboratoire Ifremer / DOP / LER, Boulogne Institut Pasteur / Gravelines Université de Lille / Station Marine de Wimereux Ifremer / DOP / LER, Boulogne Station Marine de Wimereux Ifremer / DOP, DCMMN / HMMN, RH Boulogne
Collaborateur(s) : BLONDEL Camille CABOCHE Josselin DELESMONT Edith DUQUESNE Vincent HEBERT Pascale LE ROY Didier LOOTS Christophe LOUIS Wilfried MENU Dominique PHILIPPON Xavier VERIN Françoise	Organisme / Direction / Service, laboratoire Ifremer / DOP / LER, Boulogne Ifremer / DOP / LER, Boulogne Institut Pasteur / Gravelines Ifremer / DOP / LER, Boulogne Ifremer / DOP / LER, Boulogne Ifremer / DOP, DCMMN / HMMN, RH Boulogne Ifremer / DOP, DCMMN / HMMN, RH Boulogne Ifremer / DOP, DCMMN / HMMN, RH Boulogne Université de Lille / Station Marine de Wimereux Ifremer / DOP / DCB / DYNECO, Pelagos Ifremer / DOP / LER, Boulogne
Titre du contrat de recherche : Surveillance du milieu marin et des ressources vivantes autour des CNPE du littoral pour la période 2006 à 2012 Organisme commanditaire : Electricité de France (E.D.F.) – Production transport – CNPE Gravelines BP 149 - 59820 Gravelines Organisme(s) réalisateur(s) : Institut Français de Recherche pour l'exploitation durable de la mer (Ifremer) Boulogne – 150, quai Gambetta BP 699 – 62321 Boulogne sur mer Ifremer Centre de Brest – BP 70 – 29280 Plouzané Ifremer Centre de Nantes – BP 21105 – 44311 Nantes cedex 03 Institut Pasteur de Gravelines – Route du Grand Colombier – 59820 Gravelines Station Marine de Wimereux – 28, avenue Foch BP 80 – 62930 Wimereux Responsable scientifique : ANTAJAN Elvire Ifremer/LER/BL	Marchés : EDF : C349C65050 Ifremer : 07/1216485/MF
Cadre de la recherche : Surveillance des centrales nucléaires littorales et estuariennes Programme : Surveillance et évaluation de la qualité du milieu marin Convention : Projet : Impacts des Grands Aménagements IGA Autres (préciser) : Campagne océanographique : (nom de campagne, année, nom du navire)	

Résumé

Ce travail constitue le 32^e rapport de surveillance du site électronucléaire de Gravelines dont la grande puissance est assurée par le fonctionnement de 6 tranches. Ce site, implanté sur le littoral, présente une prise d'eau de mer assurant le refroidissement du système et un rejet côtier d'eau chaude en surface. Le fonctionnement de la centrale a débuté en 1980 et elle a atteint la puissance maximale en 1986. La surveillance concerne le milieu halieutique (larves et œufs de Sole, de Sprat et crevettes grises), les milieux benthiques (intertidal et subtidal) et pélagique (hydrologie, microbiologie, phytoplancton, zooplancton). La stratégie de surveillance est basée sur une approche spatiale et temporelle (i) Etude de l'impact immédiat par comparaison de la station « Prise d'eau » et de la station « Canal de rejet » sur une surface limitée (ii) Etude de l'évolution à moyen ou à long terme du milieu marin par rapport à une situation de référence (échelle locale).

Voir les principaux résultats dans la section suivante

Abstract

This is the 32th annual surveillance report concerning the nuclear power plant of Gravelines. Its very high power level results from six plant units located on the shore and is characterised by a cooling system with a coastal surface input and output. The production of electricity began in 1980 and reached maximum in 1986. Surveillance studies concern monitoring of fish populations (larvae and eggs of Sole and Sprat) or crustaceans (shrimps), benthic system (intertidal and subtidal) and pelagic system (hydrology, microbiology, phytoplankton, zooplankton). This survey deals with spatial and temporal approaches (i) study of the direct impact by comparison of the input and output seawater stations, (ii) study of medium and long term evolution of the area by comparison with a reference station.

See review of the main results in the next section

Mots-clés :

Centrale nucléaire - Gravelines - Surveillance - Hydrologie - Halieutique - Plancton –
Microbiologie - Benthos

Keywords :

Nuclear power plant - Gravelines - Network survey - Hydrology - Fisheries - Plankton - Microbiology
- Benthos

RÉSUMÉ & CONCLUSIONS

Période de surveillance Novembre 2008 – Octobre 2009

Généralités

La stratégie reste inchangée pour l'ensemble des compartiments étudiés. Les campagnes pélagiques ont eu lieu le 25 mai et le 29 septembre 2009.

Chloration

La chloration de l'eau du système a été détectée pendant 8 mois. Les composés chimiques formés étaient essentiellement bromés et le plus abondant était le bromoforme (97,8 % du total des produits dérivés) avec une concentration moyenne de 14,8 µg/L, conforme à ce qui était mesuré lors des périodes de surveillance précédentes. Le 2-4-6 bromo-phénol a été détecté régulièrement en saison de chloration (maximum 2,6 µg/L). Les possibilités de sélection et de fixation sur le site d'espèces bactériennes sont fortement influencées par le pourcentage de re-circulation des masses d'eaux, estimé à partir de la mesure de persistance du bromoforme dans les dosages. Ce taux était de 6,8 %.

Bactériologie

Le passage de l'eau de mer dans l'ensemble du système constitué par la centrale et les installations aquacoles entraîne une multiplication importante du nombre de vibrions (d'un facteur 120 en moyenne géométrique annuelle). La concentration était de 129 vibrions/L au canal d'amenée et de 15 480 vibrions/L au canal de rejet. Cette concentration au canal de rejet est la deuxième valeur la plus importante enregistrée depuis le début des études de surveillance (précédente valeur importante, 17 460 vibrions/L en 2006-2007). L'amplitude du cycle d'abondance des vibrions était stable dans le rejet.

Vibrio alginolyticus reste l'espèce dominante observée sur le site avec 67,8 % d'isolement au niveau du canal de rejet. L'augmentation de la diversité des espèces présentes depuis le développement des activités aquacoles est confirmée cette année. Toutefois et comme depuis le début de la surveillance du site de Gravelines, les deux sérotypes de *V. cholerae* Nag présentant un risque sanitaire n'ont jamais été mis en évidence sur le site.

Phytoplancton

Cette année était caractérisée par une prolifération phytoplanctonique printanière plus précoce. La concentration en chlorophylle a été importante dès le mois de février avec un maximum début mars (32,45 mg·m⁻³).

La prymnésiofycée *Phaeocystis globosa* a été observée de mars à mai. L'abondance maximale observée le 28 avril avec 27·10⁶ était 1,5 fois moins élevée que l'an passé. En dehors des périodes de proliférations de *P. globosa*, les échantillons étaient dominés, par ordre décroissant de la fraction qu'ils représentaient, par les diatomées, les dinoflagellés, les cryptophycées, les dictyochophycées, les prasinophycées et les chlorophycées.

Aucun épisode toxique défini par la présence des genres *Alexandrium*, *Dinophysis* et *Pseudo-nitzschia* n'a eu lieu.

Zooplancton

Cette année est marquée par la découverte sur le site de Gravelines et dans les eaux environnantes d'une espèce invasive de cténaire, *Mnemiopsis leidyi*, réputée avoir des conséquences désastreuses

sur la structure de l'écosystème pélagique dans les milieux qu'elle envahit. Si les abondances ne semblent pas encore atteindre des niveaux alarmants, cette espèce fera l'objet d'une attention toute particulière en 2010 et dans les années à venir, afin d'en étudier les éventuels gènes pour le bon fonctionnement de la centrale.

Le dinoflagellé hétérotrophe, *Noctiluca scintillans*, était bien présent cette année de fin avril à début mai mais en plus faible abondance (2 430 ind. \cdot m⁻³), et il n'a pas entraîné le phénomène d'eau rouge observé sur le site l'an passé et en 2004.

Les copépodes qui constituaient le taxon dominant du zooplancton présentaient une succession saisonnière classique des espèces pour la région, même si les abondances des espèces habituellement plus estivales, comme *Acartia clausi* et *Centropages hamatus* ont montré un pic d'abondance plus printanier cette année.

L'impact de la centrale, s'il est réel pour certains groupes, comme les larves d'échinodermes, reste cependant très localisé au niveau du canal de rejet. Les variations d'abondance entre la côte (prise) et plus au large (référence) montre la difficulté d'évaluer si les différences observées sont dues à la variabilité naturelle du système ou à un effet directe de la centrale.

Zooplancton halieutique

La précocité de la période de ponte de la sole et du sprat (mars-avril) et l'occurrence des effectifs maximums de larves en mai sont confirmées en 2009.

Les abondances 2009 d'œufs de sole étaient inférieures à la moyenne des effectifs généralement observés sur le site (11 œufs par 10 m³). Les larves de sole étaient très peu abondantes (< 0,5 par m³).

Pour le sprat, la reproduction était moins précoce (avril) et avait une durée plus longue qu'en 2007 et 2008. Cependant les effectifs étaient en baisse par rapport à 2008.

La crevette grise, présente toujours des effectifs très faibles depuis la reprise des comptages en 2001 et par rapport à l'ensemble des valeurs obtenues avant 1990. Toutefois les prélèvements zooplanctoniques (chapitre 5) montrent que cette espèce est davantage présente sur le site de Gravelines en période estivale (entre 30 et 90 zoés par 10 m³ de juin à juillet).

Benthos intertidal

On ne note pas, en 2009, d'évolution de la morphologie de l'estran. Les résultats des analyses granulométriques ne font pas apparaître d'évolution majeure des sédiments intertidaux.

Cette année la richesse spécifique était stable par rapport à 2008 (29 taxons), par contre, la densité globale était en forte diminution du fait de la régression de la population de *Hydrobia ulvae*.

L'estran de Gravelines conserve l'intégralité de ses capacités productives à moyen terme et une certaine stabilité même si des oscillations autour d'une situation moyenne sont perceptibles et récurrentes.

Benthos subtidal

Le cycle sédimentaire classique (teneur en pélites du sédiment élevée et quasi constante, sables fins dominants en période hivernale et sables moyens en période estivale et printanière) au point B (dit non impacté) a été observé en 2009. Les caractéristiques granulométriques du point C (dit impacté) étaient classiques (absence de pélites).

L'étude de la composition bionomique des peuplements permet de mettre en évidence 65 taxons au point B et 26 taxons au point C. L'impact engendré par la mise en service de la centrale, constaté grâce à la comparaison des points avant la mise en œuvre du système de circulation d'eau nécessaire au refroidissement de l'installation, reste important sur les peuplements subtidaux au point C. Le déficit de densité et de biomasse entre le point C et le point B reste considérable en

2009 (respectivement, 98 et 97,8 %). Cependant, il faut noter que le peuplement installé au point C est tout à fait semblable, tant au point de vue de la composition faunistique qu'en ce qui concerne la densité et la biomasse globales, à ceux établis sur les sédiments similaires dans la région. De plus, la zone de déficit est localisée au débouché du canal de rejet et ne s'étend pas au-delà de quelques centaines de mètres. Enfin, ce déficit est uniquement dû à l'action de la courantologie. Les populations à *Abra alba* et à *Tellina fabula* n'atteignent toujours pas le niveau qu'elles avaient dans les années 80-90.

Sommaire

Préambule

1.	PRÉSENTATION DU SITE – STRATÉGIE D'ÉTUDE.....	17
1.1.	Rappel sur le site.....	19
1.2.	Hydrographie.....	19
1.3.	Description des installations.....	20
1.4.	Stratégie d'échantillonnage.....	21
2.	FONCTIONNEMENT DE LA CENTRALE ET HYDROLOGIE.....	25
2.1.	Fonctionnement de la Centrale.....	27
2.2.	Hydrologie.....	30
2.3.	Éléments de conclusion.....	34
3.	ÉTUDE DE LA CHLORATION ET BACTÉRIOLOGIE.....	37
3.1.	Chloration.....	39
3.2.	Bactériologie.....	40
3.3.	Campagnes pélagiques.....	47
3.4.	Éléments de conclusion.....	48
4.	PHYTOPLANCTON ET BIOMASSE CHLOROPHYLLIENNE.....	55
4.1.	Introduction.....	57
4.2.	Méthodologie.....	57
4.3.	Chlorophylle <i>a</i> et pourcentage de chlorophylle active au point <i>prise</i>	58
4.4.	Abondance, composition du phytoplancton et indices de diversité au point <i>prise</i> ...	60
4.5.	Campagnes pélagiques.....	65
4.6.	Dynamique de développement du phytoplancton à méso-échelle.....	69
4.7.	Éléments de conclusion.....	69
5.	DINOFLAGELLÉS NOCTILUQUES ET ZOOPLANCTON.....	75
5.1.	Méthodologie.....	77
5.2.	Surveillance au canal d'amenée.....	78
5.3.	Surveillance du milieu récepteur.....	86
5.4.	Éléments de conclusion.....	89
6.	ZOOPLANCTON HALIEUTIQUE.....	93
6.1.	Introduction.....	94
6.2.	Matériels et méthodes.....	94
6.3.	Résultats.....	95
6.4.	Éléments de conclusion.....	105
7.	LE DOMAINE BENTHIQUE INTERTIDAL.....	107
7.1.	Introduction.....	108
7.2.	Matériels et méthodes.....	108
7.3.	Terminologie utilisée.....	108
7.4.	Résultats.....	109
7.5.	Conclusion sur l'évolution de l'estran.....	119
7.6.	Éléments de conclusion.....	122
8.	LE DOMAINE BENTHIQUE SUBTIDAL.....	131
8.1.	Introduction.....	133
8.2.	Matériels et méthodes.....	133
8.3.	Résultats.....	133
8.4.	Étude des populations d' <i>Abra alba</i> et de <i>Tellina fabula</i> du point <i>B</i>	142
8.5.	Éléments de conclusion.....	145

Préambule

La commande d'exécution passée par EDF-CNPE de Gravelines à Ifremer (document référencé 5100-CPC-4200137165) pour les 3 années 2008 à 2010 prévoit la fourniture par Ifremer des documents contractuels suivants :

- Un état d'avancement des travaux réalisés au cours du premier semestre de l'année N, à remettre pour le 15 juillet.
- Un rapport annuel, dont la version provisoire est remise le 31 janvier de l'année N + 1.
- Un rapport annuel, dont l'édition définitive est remise au plus tard le 31 mars de l'année N + 1.

Pour le site de Gravelines, les travaux de prélèvement et d'analyses sont réalisés conformément à l'arrêté ministériel du 7 novembre 2003 (J.O. du 13 janvier 2004) « *autorisant Électricité de France à poursuivre les rejets d'affluents liquides et gazeux pour l'exploitation du site nucléaire de Gravelines* ».

Concernant la surveillance scientifique de la CNPE de Gravelines réalisée au cours de l'année 2009,

- L'état d'avancement a été adressé à EDF le 3 juillet 2009
- L'édition provisoire du rapport annuel a été transmise à EDF le 8 février 2010.
- L'édition définitive du rapport scientifique annuel fait l'objet du présent document prenant en compte les remarques formulées sur la version provisoire.

Dans le cadre de l'implantation d'une centrale électronucléaire sur le littoral de la commune de Gravelines (département du Nord) et du contexte législatif en vigueur, Électricité de France a confié à l'IFREMER les études écologique et halieutique du milieu marin encadrant ce site.

L'étude, dite d'**Avant-projet**, ayant pour but d'évaluer les principales caractéristiques écologiques du site pressenti pour l'implantation de la centrale, fut réalisée de septembre 1974 à décembre 1975.

L'**étude de Projet**, destinée à établir un bilan écologique de référence avant la mise en service de la centrale, fut conduite de août 1976 à juillet 1977.

L'**étude de surveillance** a commencé en février 1978, soit deux années avant la date de mise en fonctionnement de la première tranche de la centrale (mars 1980) et huit années avant que la Centrale n'ait atteint sa puissance maximale (1986).

Au cours de 2009, 29^{ème} année de fonctionnement de la Centrale, les études réalisées sur le site de Gravelines ont été menées sous la responsabilité de :

- **Elvire ANTAJAN** (DOP-LER-BL¹), pour le zooplancton et la coordination de l'ensemble des études sur ce site.
- **Régis DELESMONT** (Institut Pasteur – Gravelines), pour l'étude de la chloration et la bactériologie.
- **Alain LEFEBVRE** (DOP-LER-BL), pour le phytoplancton
- **Caroline WAREMBOURG** (DOP-HMMN-RH-BL²), pour l'ichtyoplancton
- **Jean-Marie DEWARUMEZ** et **Christophe LUCZAC** (Station Marine de Wimereux), pour le benthos intertidal et subtidal

¹ Direction des OPération (DOP), Laboratoire Environnement littoral et Ressources aquacoles – Boulogne sur Mer (LER/BL)

² Département Halieutique Manche Mer du Nord (HMMN), laboratoire Ressources Halieutique de Boulogne sur Mer (RH/BL)

1. PRÉSENTATION DU SITE – STRATÉGIE D'ÉTUDE

Auteurs : R. Delesmont, E. Antajan

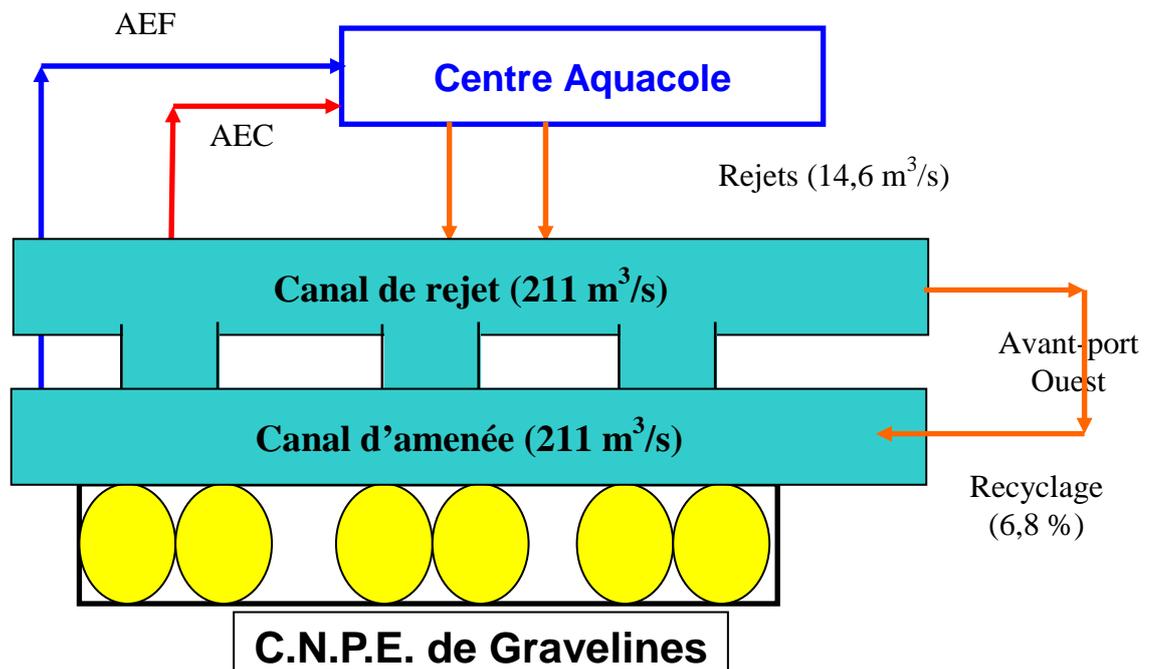
Collaborateurs : E. Delesmont, J. Caboche

L'influence de ces cours d'eau n'est pas prépondérante sur la qualité de l'eau de mer transitant par la centrale. Les dessalures significatives observées sur le site ont lieu par temps sec, quand le vent de nord-est, établi sur de longues périodes, modifie les courants et amène sur le site des eaux de la côte belge (Belgrano *et al.*, 1990¹).

1.3. Description des installations

Le Centre Nucléaire de Production d'Électricité (CNPE) de Gravelines est composé de six tranches d'une puissance unitaire de 900 MW. Le circuit de refroidissement est alimenté en eau de mer prélevée dans l'avant port de Dunkerque et son débit est de 40 m³ par seconde et par tranche. Le débit nominal total du rejet est ainsi de 240 m³ par seconde. L'eau réchauffée est rejetée dans un canal à ciel ouvert qui se déverse à la côte.

Depuis 1984, des installations aquacoles utilisent cette eau tiède pour l'élevage de bars et de daurades. La production actuelle est de l'ordre de 2000 tonnes de poisson par an. Les débits utilisés par la ferme aquacole ont été augmentés avec la mise en service d'une seconde station de pompage. Le rejet des eaux de la ferme aquacole se fait dans le canal de rejet de la centrale. Depuis l'été 2003, un second rejet situé plus en amont sur le canal de rejet est en service. Les effets observés au rejet de la centrale sont donc la résultante des influences conjuguées des deux installations, la centrale électrique et la ferme aquacole (figure 1.2).



AEC : Alimentation Eau Chaude (11,5 m³/s)

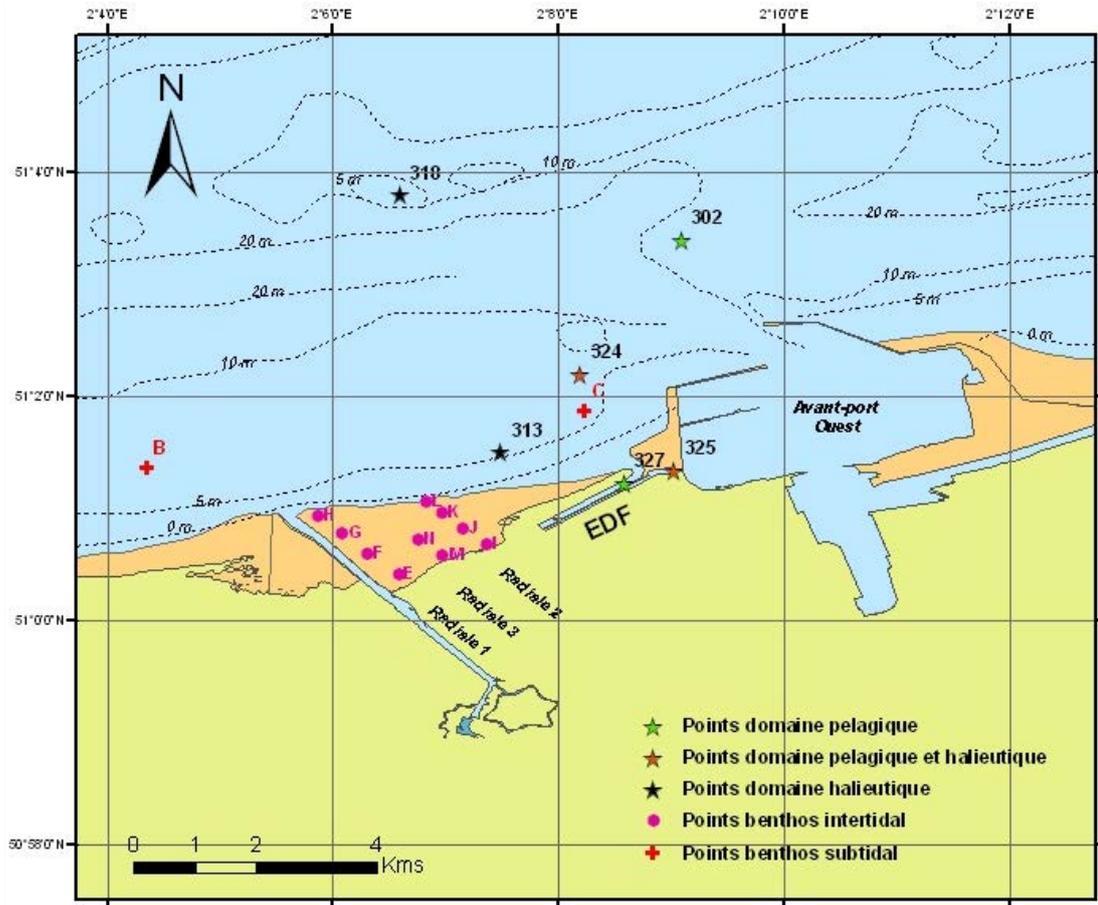
AEF : Alimentation Eau Froide (3,1 m³/s)

Figure 1.2 Schéma de la circulation de l'eau sur le site de Gravelines (Valeurs chiffrées en 2009)

¹ Belgrano A., Vincx M., Dewarumez J. M., Richard A., Craeymeersch J. & C. Heip, 1990. Recruitment of meroplanktonic larvae in the Southern Bight of the North Sea. *Oceanis*, 16 (3): 225-243.

1.4. Stratégie d'échantillonnage

Conformément à la stratégie mise en place pour la surveillance du site de Gravelines, les points échantillonnés sont localisés sur la carte de la figure 1.3.



Station (Réf. Quadrige)	Latitude	Longitude	Libellé
302	51°3'40 N	2°9'10 E	Référence
313	51°1'50 N	2°7'50 E	Côtier
318	51°3'80 N	2°6'60 E	Large
324	51°2'20 N	2°8'20 E	Contrôle
325	51°1'38 N	2°9'10 E	Canal d'amenée (Prise)
327	51°1'26 N	2°8'60 E	Canal de rejet (Rejet)
-	51°1'40 N	2°4'60 E	Point B (hors impact)
-	51°1'60 N	2°8'50 E	Point C (impacté)

Figure 1.3 Localisation des points de prélèvements tous domaines d'études confondus

La liste de l'ensemble des travaux réalisés sur ces points en 2009 est résumée dans le tableau 1.1.

Tableau 1.1 Ensemble des travaux réalisés lors de la surveillance 2009

2009	Paramètres	Périodicité par point			
		Prise	Rejet	Contrôle	Référence
DOMAINE PÉLAGIQUE					
Hydrologie	Température	hebdo.	hebdo.	25/05/09	
	Salinité	mensuel	25/05/09 29/09/09	29/09/09	
	Sels nutritifs : NH ₄ ⁺ , NO _x	hebdo.	hebdo.		
Chloration	Chlore, haloformes et bromoformes	hebdo.	hebdo.		
	Bromophénols		mensuel		
Bactériologie	Vibrions halophiles	hebdo.	hebdo.	25/05/09 29/09/09	
Phytoplancton	Pigments chlorophylliens Flore totale	hebdo.	25/05/09 29/09/09		
Zooplancton	Méso-zooplancton	mensuel			
DOMAINE HALIEUTIQUE					
Ichtyoplancton	Soles et sprats (œufs et larves)	27/03/09	14/04/09 13/05/09		
		14/04/09			
		28/04/09			
		13/05/09			
Macrofaune	Crevettes grises	27/03/09	14/04/09 13/05/09		
		14/04/09			
		28/04/09			
		13/05/09			
DOMAINE BENTHIQUE					
Benthos intertidal	Sédiment (granulométrie)	26/06/09			
	Macrofaune				
Benthos subtidal	Sédiment (granulométrie) Macrofaune				24/02/09
					13/05/09
					23/06/09
					13/10/09

1.4.1. Domaine pélagique

Deux campagnes annuelles sont réalisées pour le suivi de l'impact du rejet de la centrale par la comparaison des prélèvements selon un axe côte-large. En 2009 elles ont été réalisées le 25 mai pour la mission printanière et le 29 septembre pour la mission automnale, à bord du navire de pêche l'*Emeraude*. Lors de chaque mission quatre points sont étudiés (tableau 1.2) :

- Le point *prise* (situé au niveau du pont routier enjambant le canal d'amenée) ;
- Le point *rejet* (situé sur la rive est du canal de rejet, à la limite de l'enceinte EDF) ;
- Le point *contrôle* (avec échauffement résiduel de 3 à 4 °C dans le panache de rejet) ;
- Le point *référence* (situé au large, au-delà de la zone d'influence de la centrale).

Tableau 1.2 Dates et horaires des campagnes pélagiques 2009

Date	Pleine mer (heure locale)	Coeff. de marée	Prise	Rejet	Contrôle	Référence
25/05/09	14:02	95	14 :35	13 :24	13 :36	14 :48
29/09/09	10:26	35	07 :50	08 :50	08 :45	09 :15

En complément, des prélèvements hebdomadaires sont réalisés depuis les berges aux canaux d'amenée et de rejet, ils concernent la bactériologie (vibrions) et l'étude de la chloration. Le phytoplancton et les pigments chlorophylliens sont également échantillonnés hebdomadairement au canal d'amenée. Enfin, le zooplancton est échantillonné mensuellement au canal d'amenée.

1.4.2. Domaine halieutique

La surveillance du zooplancton halieutique comprend quatre campagnes:

- 2 campagnes à quatre points en mer (14 avril et 13 mai 2009) selon un gradient côte-large dans le milieu récepteur.
- 2 campagnes au canal d'amenée (27 mars et 28 avril 2009).

1.4.3. Domaine benthique

En zone intertidale, une campagne annuelle comprenant deux radiales de 4 points et 1 radiale à 2 points de hauts niveaux a été réalisée le 26 juin 2009.

En zone subtidale, la surveillance du peuplement à *Abra alba* consiste en la réalisation de 4 campagnes de deux points, l'un non impacté (Point B), l'autre potentiellement impacté (Point C) par le fonctionnement de la centrale (24 février, 13 mai, 23 juin et 13 octobre 2009).

2. FONCTIONNEMENT DE LA CENTRALE ET HYDROLOGIE

Auteur : R. Delesmont

Collaboratrice : E. Delesmont

2.1. Fonctionnement de la Centrale

Ce paragraphe est réalisé à partir des données de fonctionnement communiquées par la Centrale de Gravelines. La centrale de Gravelines comprend six réacteurs d'une puissance électrique unitaire de 900 MW. En 2008-2009, la puissance électrique produite par la centrale correspondait en moyenne hebdomadaire à l'équivalent de 3,4 à 5,9 tranches de 900 MW/h (figure 2.1 et tableau 2.1). La production était comme à l'habitude plus importante en saison froide. La puissance moyenne de la période était de 4156 MW/h, soit l'équivalent de 4,6 tranches.

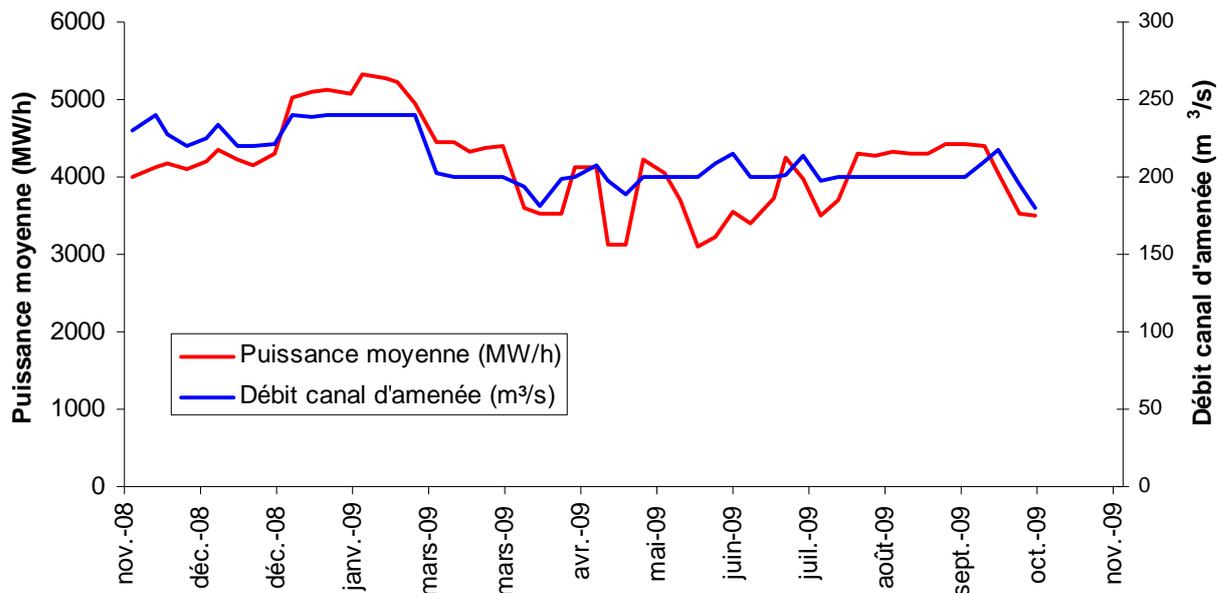


Figure 2.1 Fonctionnement de la centrale de Gravelines pour la période 2008-2009

En première approximation, on peut considérer que la production d'un mégawatt électrique s'accompagne de la dissipation dans l'eau de mer de deux mégawatts thermiques. Il est alors possible de calculer un échauffement théorique du rejet de la centrale sur la base des données hebdomadaires de puissance électrique. Dans la réalité, suite aux variations de la hauteur de l'eau de mer avec la marée, le débit des pompes de refroidissement varie légèrement et l'élévation de température observée fluctue d'environ 10 % autour de la valeur nominale calculée.

Les débits d'eau de mer de refroidissement des condenseurs ont varié de 180 à 240 m³/s, soit les débits unitaires de pompage de 4,5 à 6 tranches (figure 2.1 et tableau 2.1). Le débit moyen calculé sur une base hebdomadaire était de 211 m³/s, soit l'équivalent du débit de pompage de 5,3 tranches.

Les variations de production électriques ne s'accompagnent pas toujours de variations identiques du débit de l'eau de refroidissement pompée ce qui occasionne des variations de l'échauffement de l'eau par transit. Lors de la période 2007-2008, ces variations ont été relativement faibles (figure 2.2 et tableau 2.1) :

Échauffement moyen calculé par EDF : $9,4 \pm 0,9$ °C

Échauffement moyen (mesures IPL au canal de rejet) : $8,9 \pm 2,0$ °C

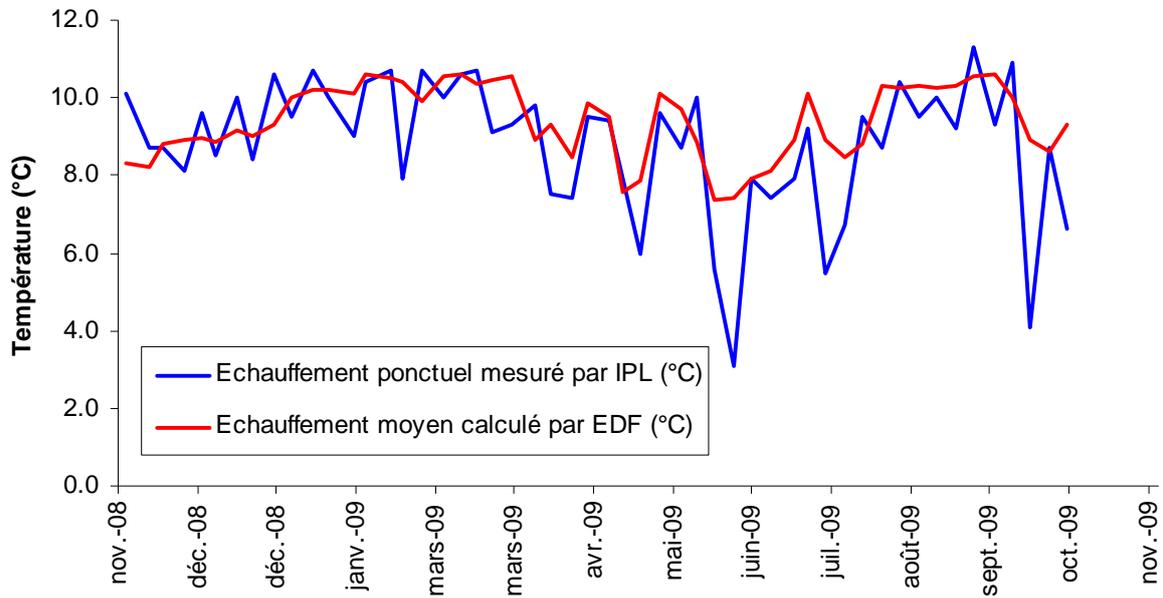


Figure 2.2 Comparaison entre les échauffements calculés et mesurés au canal de rejet

L'écart moyen des valeurs calculées par EDF et mesurées au point rejet lors de nos prélèvements ponctuels était de 1,4 °C.

Tableau 2.1. Fonctionnement de la centrale en 2008-2009
(Débit et puissance calculés à partir des données fournies par EDF)

Année	Semaine		Puissance moyenne MW/h	Débit canal m ³ /s	Echauffement moyen calculé par EDF (°C)	Echauffement ponctuel mesuré par IPL (°C)
	du	au				
2008	03-nov	09-nov	3994	230	8.3	10.1
	10-nov	16-nov	4130	240	8.2	8.7
	17-nov	23-nov	4186	227	8.8	8.7
	24-nov	30-nov	4105	220	8.9	8.1
	01-déc	07-déc	4205	225	8.9	9.6
	08-déc	14-déc	4347	234	8.9	8.5
	15-déc	21-déc	4213	220	9.2	10.0
	22-déc	28-déc	4150	220	9.0	8.4
2009	29-déc	04-janv	4304	221	9.3	10.6
	05-janv	11-janv	5015	240	10.0	9.5
	12-janv	18-janv	5096	239	10.2	10.7
	19-janv	25-janv	5118	240	10.2	10.0
	26-janv	01-févr	5067	240	10.1	9.0
	02-févr	08-févr	5316	240	10.6	10.4
	09-févr	15-févr	5269	240	10.5	10.7
	16-févr	22-févr	5229	240	10.4	7.9
	23-févr	01-mars	4958	240	9.9	10.7
	02-mars	08-mars	4447	202	10.5	10.0
	09-mars	15-mars	4439	200	10.6	10.6
	16-mars	22-mars	4322	200	10.3	10.7
	23-mars	29-mars	4380	200	10.5	9.1
	30-mars	05-avr	4406	200	10.5	9.3
	06-avr	12-avr	3612	194	8.9	9.8
	13-avr	19-avr	3518	181	9.3	7.5
	20-avr	26-avr	3528	199	8.5	7.4
	27-avr	03-mai	4130	200	9.9	9.5
	04-mai	10-mai	4128	208	9.5	9.4
	11-mai	17-mai	3118	197	7.6	7.9
	18-mai	24-mai	3116	189	7.9	6.0
	25-mai	31-mai	4220	200	10.1	9.6
	01-juin	07-juin	4061	200	9.7	8.7
	08-juin	14-juin	3710	200	8.9	10.0
	15-juin	21-juin	3089	200	7.4	5.6
	22-juin	28-juin	3237	209	7.4	3.1
	29-juin	05-juil	3553	215	7.9	7.9
	06-juil	12-juil	3401	200	8.1	7.4
	13-juil	19-juil	3725	200	8.9	7.9
	20-juil	26-juil	4255	201	10.1	9.2
	27-juil	02-août	3986	214	8.9	5.5
	03-août	09-août	3512	198	8.5	6.7
	10-août	16-août	3692	200	8.8	9.5
	17-août	23-août	4308	200	10.3	8.7
	24-août	30-août	4282	200	10.2	10.4
	31-août	06-sept	4318	200	10.3	9.5
	07-sept	13-sept	4295	200	10.3	10.0
	14-sept	20-sept	4303	200	10.3	9.2
	21-sept	27-sept	4421	200	10.6	11.3
	28-sept	04-oct	4430	200	10.6	9.3
05-oct	11-oct	4389	210	10.0	10.9	
12-oct	18-oct	4051	218	8.9	4.1	
19-oct	25-oct	3515	195	8.6	8.7	
26-oct	01-nov	3510	180	9.3	6.6	

2.2. Hydrologie

2.2.1. Canaux d'amenée et de rejet

2.2.1.1. Température

Une température minimale de 4,7 °C a été observée le 14/01/09 au point *prise*. Des températures supérieures à 20,0 °C ont été relevées au mois d'août seulement (figure 2.3). La moyenne des températures de l'eau au point *prise* était de 13 °C, cette valeur est conforme aux moyennes habituellement relevées à ce point variant de 13,0 à 13,2 °C.

Au point *rejet*, deux températures supérieures à 30,0 °C ont été relevées cette année (30,2 °C le 10/08/09 et 31,4 °C le 24/08/09).

Le transit de l'eau dans la centrale, calculé sur la base des prélèvements hebdomadaires réalisés, se traduit par un échauffement moyen de 8,8 °C, tout à fait dans l'ordre des valeurs habituelles alors que la période précédente avait été marquée par une élévation de température par transit de 9,4 °C.

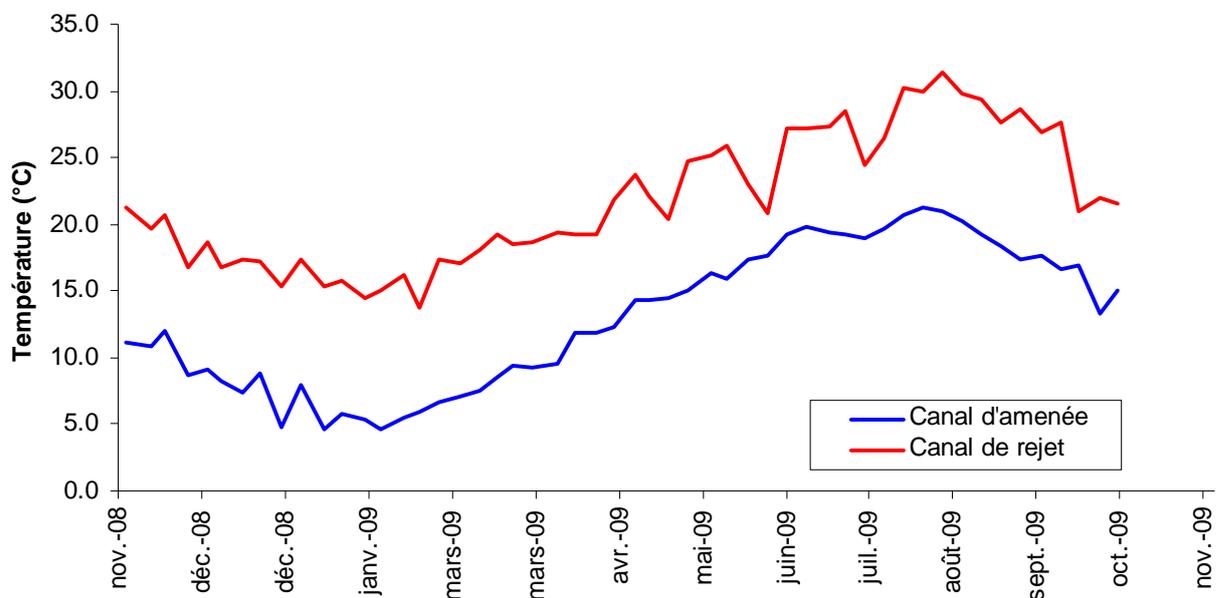


Figure 2.3 Température hebdomadaire de l'eau de mer (°C) aux canaux d'amenée et de rejet pour la période 2008-2009

2.2.1.2. Sels nutritifs

En raison des apports en azote dus à la ferme aquacole implantée sur le site et afin de mieux expliquer les phénomènes au niveau du phytoplancton, des dosages d'azote sont réalisés aux canaux d'amenée et de rejet. Deux formes d'azote sont mesurées : l'azote réduit ammoniacal (NH_4^+) et l'azote oxydé NO_x comprenant le nitrate (NO_3^-) plus le nitrite (NO_2^-).

Le stock hivernal de l'azote oxydé, composé principalement de nitrates, a été consommé en février par le phytoplancton. Du printemps à l'automne, les concentrations étaient plutôt plus élevées au canal de rejet qu'au canal d'amenée. Ce phénomène de faible ampleur a déjà été observé lors des sept cycles d'étude précédents. En moyenne annuelle, un apport en azote oxydé de 0,9 $\mu\text{mol/L}$ a été observé (figure 2.4 et tableau 2.2). Un apport de l'ordre de 2 $\mu\text{mol/L}$ au maximum avait été observé dans les cycles d'études antérieurs. Ce résultat confirme la stabilité des apports d'azote oxydé signalé lors des précédents cycles de surveillance.

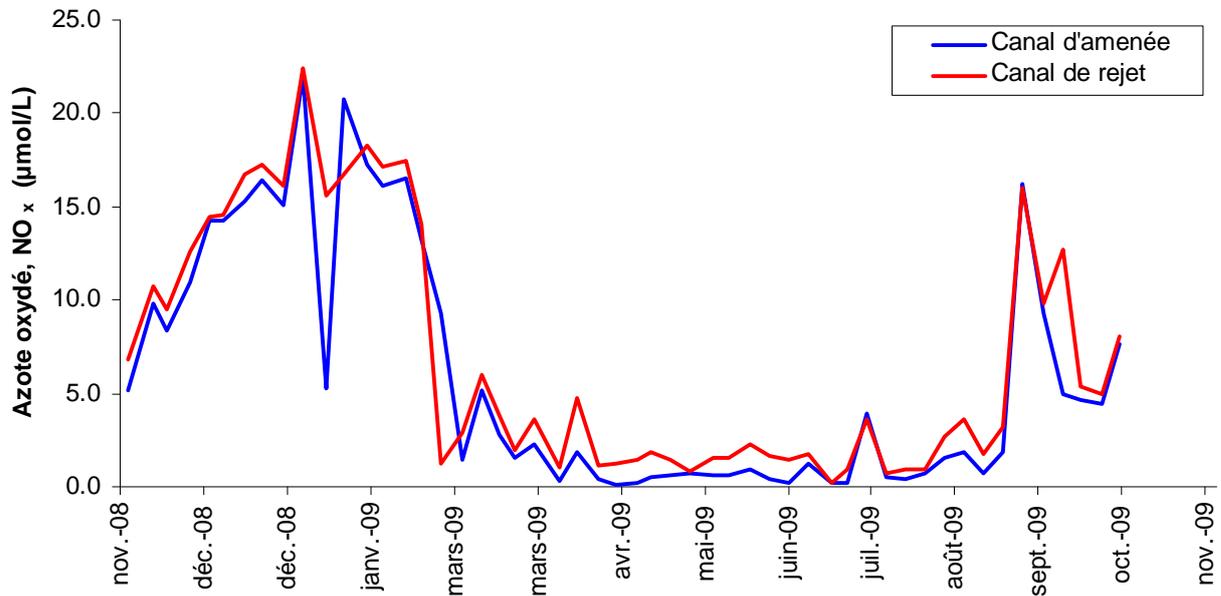


Figure 2.4 Nitrate (NO₃⁻ en µmol/L) aux canaux d'amenée et de rejet pour la période 2008-2009

Pour l'ammonium, les constatations étaient identiques à celles de la période précédente (figure 2.5 et tableau 2.2). Les concentrations observées sont restées faibles et aucune variation saisonnière importante ne s'est dégagée si ce n'est une hausse des concentrations durant la fin de l'été et l'automne. En bilan annuel, le transit s'est traduit cette année par un apport moyen négatif de 0,2 µmol/L.

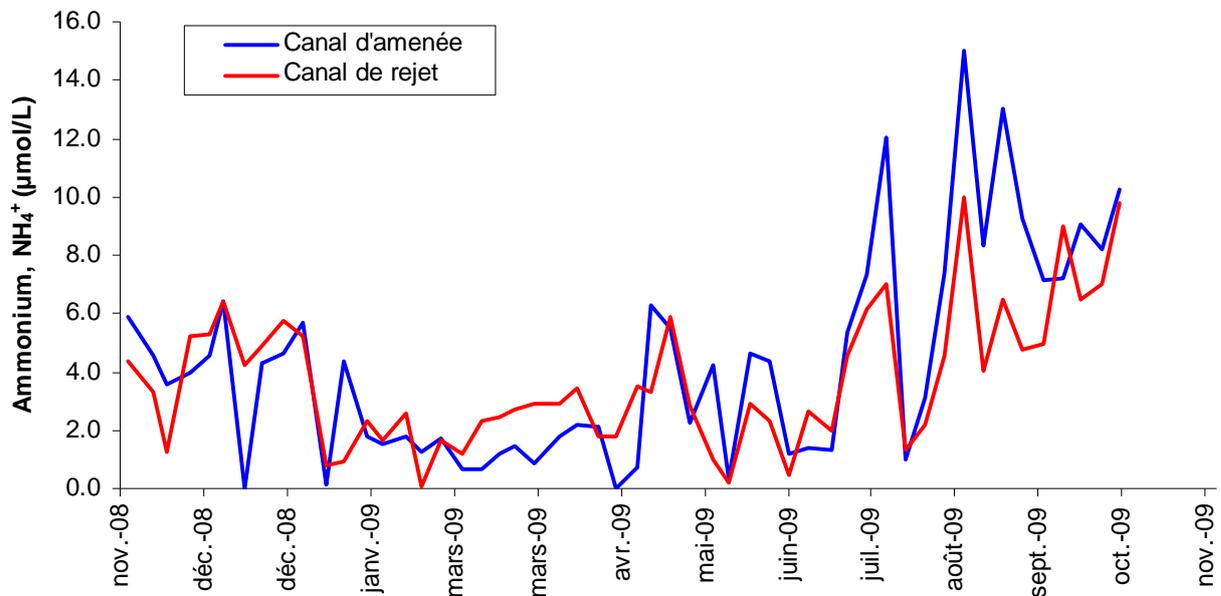


Figure 2.5 Ammonium (µmol/L) aux canaux d'amenée et de rejet pour la période 2008-2009

**Tableau 2.2 Évolution temporelle des concentrations en sels nutritifs aux canaux d'amenée et de rejet
(Ammonium, NH_4^+ ; Azote oxydé, $\text{NO}_x = \text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$)**

Date	Canal d'amenée		Canal de rejet	
	NH_4^+ ($\mu\text{mol.l}^{-1}$)	NO_x ($\mu\text{mol.l}^{-1}$)	NH_4^+ ($\mu\text{mol.l}^{-1}$)	NO_x ($\mu\text{mol.l}^{-1}$)
04/11/08	5.9	5.2	4.4	6.8
13/11/08	4.6	9.8	3.3	10.7
18/11/08	3.6	8.4	1.3	9.5
26/11/08	4.0	10.9	5.3	12.6
03/12/08	4.5	14.3	5.3	14.5
08/12/08	6.4	14.3	6.4	14.6
16/12/08	<	15.3	4.3	16.7
22/12/08	4.3	16.4	4.9	17.3
30/12/08	4.6	15.1	5.8	16.1
06/01/09	5.7	22.0	5.3	22.4
14/01/09	0.1	5.3	0.8	15.6
20/01/09	4.4	20.8	0.9	16.7
29/01/09	1.8	17.3	2.3	18.3
03/02/09	1.5	16.1	1.7	17.1
12/02/09	1.8	16.5	2.6	17.5
17/02/09	1.3	13.2	0.1	14.1
24/02/09	1.7	9.3	1.7	1.2
04/03/09	0.7	1.4	1.2	2.9
11/03/09	0.6	5.2	2.3	6.0
17/03/09	1.2	2.8	2.4	3.8
23/03/09	1.5	1.6	2.7	2.0
30/03/09	0.9	2.3	2.9	3.6
08/04/09	1.8	0.3	2.9	1.0
14/04/09	2.2	1.9	3.5	4.8
22/04/09	2.1	0.4	1.8	1.1
28/04/09	0.0	0.1	1.8	1.2
06/05/09	0.7	0.2	3.5	1.4
11/05/09	6.3	0.5	3.3	1.9
18/05/09	5.5	0.6	5.9	1.4
25/05/09	2.3	0.7	2.8	0.8
02/06/09	4.3	0.6	1.0	1.6
08/06/09	0.3	0.6	0.2	1.5
15/06/09	4.6	0.9	2.9	2.3
22/06/09	4.3	0.4	2.3	1.7
29/06/09	1.2	0.2	0.4	1.4
06/07/09	1.4	1.2	2.6	1.8
15/07/09	1.3	0.2	2.0	0.2
20/07/09	5.4	0.2	4.6	0.9
27/07/09	7.3	3.9	6.2	3.6
03/08/09	12.0	0.5	7.0	0.7
10/08/09	1.0	0.4	1.4	0.9
17/08/09	3.1	0.7	2.2	0.9
24/08/09	7.4	1.5	4.6	2.7
31/08/09	15.0	1.9	10.0	3.6
07/09/09	8.3	0.7	4.1	1.8
14/09/09	13.0	1.9	6.5	3.2
21/09/09	9.3	16.2	4.8	16.0
29/09/09	7.1	9.3	5.0	9.8
06/10/09	7.2	5.0	9.0	12.7
12/10/09	9.1	4.6	6.5	5.4
20/10/09	8.2	4.4	7.0	5.0
26/10/09	10.2	7.6	9.8	8.1

2.2.2. Campagnes pélagiques

2.2.2.1. Température

En raison des turbulences importantes régnant dans les canaux d'amenée et de rejet, leurs températures sont considérées comme homogènes. La différence de température entre le point *prise* et le point *rejet* était de 6,5 °C en mai et de 6,9 °C en septembre. Au point *contrôle*, la stratification thermique verticale habituelle du panache de rejet a été observée lors des campagnes de mai et de septembre malgré la faible profondeur (figures 2,6 et 2,7). Le gradient de température surface-fond était de 4,3 °C pour la campagne de mai et de 4,5 pour la campagne de septembre. Une stratification de moindre ampleur a été observée au niveau du point de *référence*: les écarts maximum entre surface et fond n'étaient que de 0,2 °C.

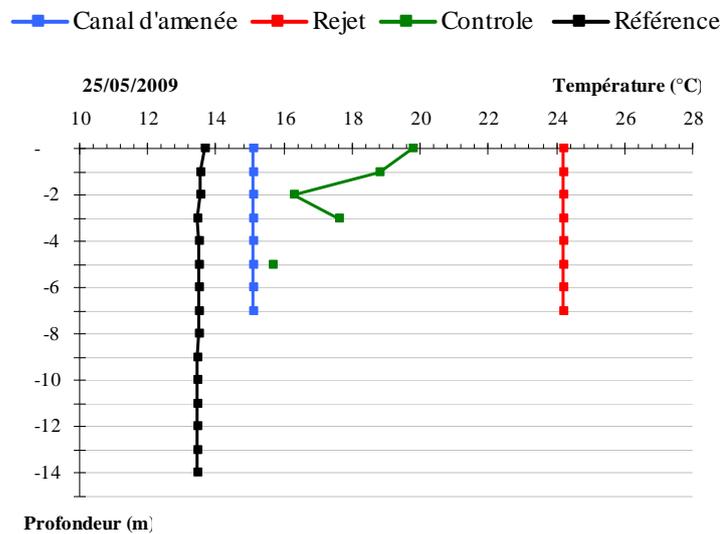


Figure 2.6 Profils de température lors de la campagne de prélèvements du 25/05/2009

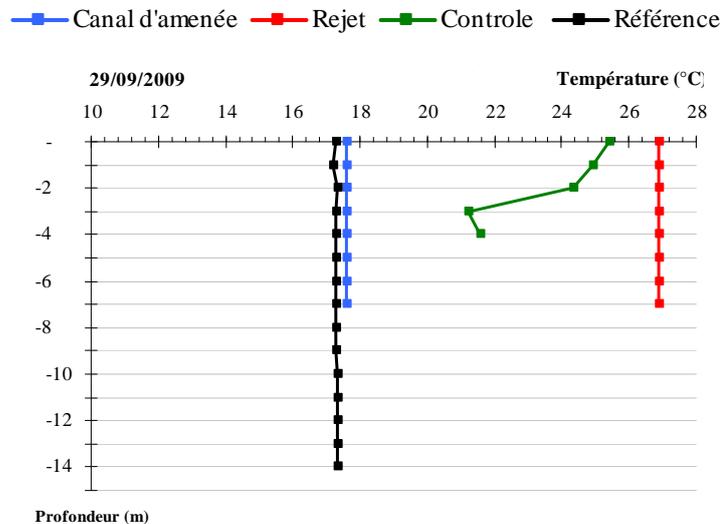


Figure 2.7 Profils de température lors de la campagne de prélèvements du 29/09/2009

2.2.2.2. Salinité

Lors des deux campagnes pélagiques, les mesures de salinité mettaient en évidence une grande homogénéité de l'ensemble de la zone d'étude (tableaux 2.3 et 2.4). Seul, un léger gradient côte-large était perceptible. La salinité était forte, supérieure à 34*, c'est à dire sans influence côtière nette lors des deux campagnes (tableaux 2.3 et 2.4).

Tableau 2.3 Salinités mesurées lors de la campagne pélagique du 25 mai 2009

Profondeur (m)	Prise	Rejet	Contrôle	Référence
Surface	34,5	34,5	34,5	34,7

Tableau 2.4 Salinités mesurées lors de la campagne pélagique du 29 septembre 2009

Profondeur (m)	Prise	Rejet	Contrôle	Référence
Surface	34,4	34,5	34,4	34,5

* : La salinité est exprimée par un nombre sans dimension qui est un rapport de conductivité (P.S.U. ou « *Practical Salinity Unit* »). Sur le plan pratique, elle est proche du gramme par kilogramme d'eau.

2.3. Éléments de conclusion

On observe un apport moyen sur l'année de 0,9 $\mu\text{mol/L}$ d'azote oxydé du probablement à l'influence de la ferme aquacole. Cet apport est toutefois en diminution par rapport aux années précédentes.

Les températures mesurées au point *référence* n'ont pas indiqué un réchauffement des eaux par rapport au point *prise*, ce qui montre bien que l'étendue du panache de rejet reste toujours géographiquement très limité.

3. ÉTUDE DE LA CHLORATION ET BACTÉRIOLOGIE

Auteur : Delesmont R.

Collaboratrice : Delesmont E.

3.1. Chloration

Afin de limiter les proliférations biologiques, du chlore produit par électrolyse de l'eau de mer est injecté dans les circuits de refroidissement. L'oxydant injecté est consommé de façon rapide par l'eau de mer. Cette disparition s'accompagne de la formation de composés chimiques stables, essentiellement des trihalométhanes (essentiellement du bromoforme) et d'autres composés en quantités beaucoup plus faibles comme le tri-bromo phénol. La figure 3.1 permet de visualiser la concentration en bromoforme en relation avec la température de l'eau au canal d'amenée.

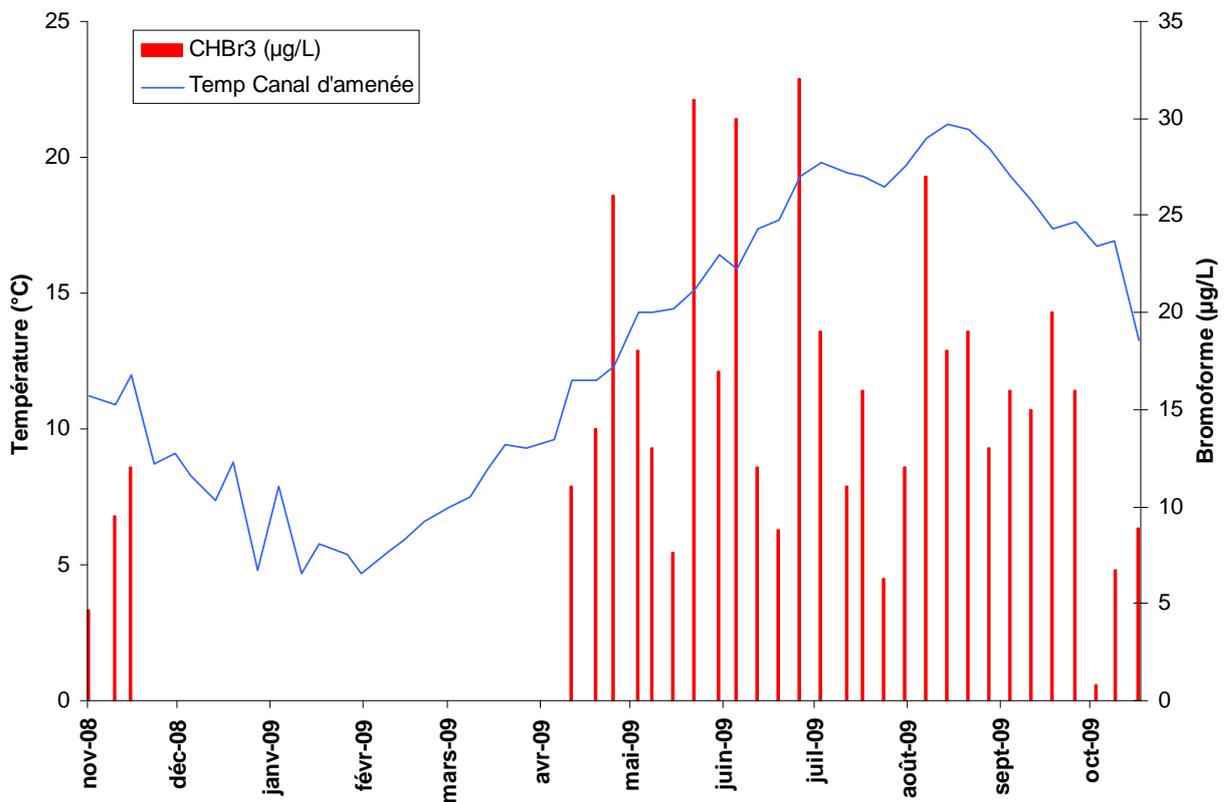


Figure 3.1 Bromoforme (en µg/L) au canal de rejet (histogrammes) en relation avec la température (en °C) de l'eau au canal d'amenée (courbe)

La disparition du chlore s'accompagne de la formation de dérivés stables. Le bromoforme est, en eau de mer, le plus abondant de ces produits de réaction. En période de chloration, il représentait cette année 97,8 % des haloformes avec une concentration moyenne de 14,8 µg/L (figure 3.1 et tableau 3.1). Cette concentration moyenne était voisine des valeurs habituellement observées les années précédentes (environ 14 à 19,9 µg/L).

Les deux autres composés formés et mis en évidence étaient également des composés bromés :

- monochlorodibromométhane (CHClBr_2) : 2,16 % du total formé avec une concentration moyenne de 0,33 µg/L

- dichlorobromométhane (CHCl_2Br) : il représente moins de 0,3 % des produits formés et n'a pas été détecté cette année au seuil de 0,05 µg/L.

Ces concentrations moyennes étaient du même ordre que les valeurs habituellement observées sur le site.

En se basant sur les résultats du dosage du bromoforme au canal de rejet, on observe que la chloration a été mise en œuvre durant 8 mois (Figure 3.1). Le bromoforme n'est pas détecté au rejet en mer entre le 26/11/08 et le 08/04/09.

La persistance du bromoforme en mer permet également de quantifier le pourcentage d'eau de refroidissement qui passe une seconde fois dans la centrale (« taux de re-circulation »). La valeur calculée en 2008-2009 était de 6,8 % au cours de la période de chloration. Ce pourcentage a une grande importance sur le plan bactériologique car le recyclage de l'eau du rejet permet de sélectionner et de fixer sur le site des espèces bactériennes.

Des recherches de bromo-phénols, composés issus de la chloration de masses molaires plus importantes que les trihalométhanes, ont été réalisées de façon mensuelle. Les dosages ont été réalisés en chromatographie en phase gazeuse après dérivation. De faibles quantités de 2,4,6 tri-bromo phénol ont été régulièrement détectées durant la saison de chloration (tableau 3.2). Les autres tri-bromo phénols recherchés n'ont pas été détectés cette année contrairement à la période 2007-2008.

3.2. Bactériologie

Depuis 1989, les études bactériologiques portent uniquement sur les vibrions. En effet, cette catégorie de bactéries marines est particulièrement sensible aux modifications du milieu engendrées par le fonctionnement de la centrale et par d'importantes activités aquacoles en constant développement sur le site même du rejet. Les mesures ne concernent que les vibrions capables de cultiver à 37 °C, ces bactéries marines pouvant présenter des caractères pathogènes pour l'homme. Dans le milieu marin, l'abondance des vibrions varie avec la température de l'eau : peu nombreux en hiver, leur maximum est observé à la fin de l'été. À Gravelines, le transit de l'eau de mer dans la centrale (et les installations aquacoles) entraîne une importante multiplication des vibrions qui amplifie le cycle naturel d'abondance de ces bactéries.

3.2.1. Aspect quantitatif

Au point *prise*, la concentration moyenne des vibrions en 2008-2009 était de 64 par litre, valeur nettement plus faible que celles enregistrées lors des périodes précédentes (105 à 129 vibrions/L) à l'exception de 2006-2007 où une concentration moyenne record de 206 vibrions/litre avait été mesurée (tableaux 3.3 et 3.4).

Entre le point *prise* et le point *rejet*, leur nombre est, en moyenne géométrique (rapport des moyennes du logarithme des concentrations) annuelle, multiplié par 43. Ce facteur de multiplication inhabituellement faible se traduit par une concentration au canal de 2742 vibrions/L en moyenne géométrique (figure 3.3). La plus grande valeur enregistrée à ce jour est de 17 460 vibrions/L en 2006-2007.

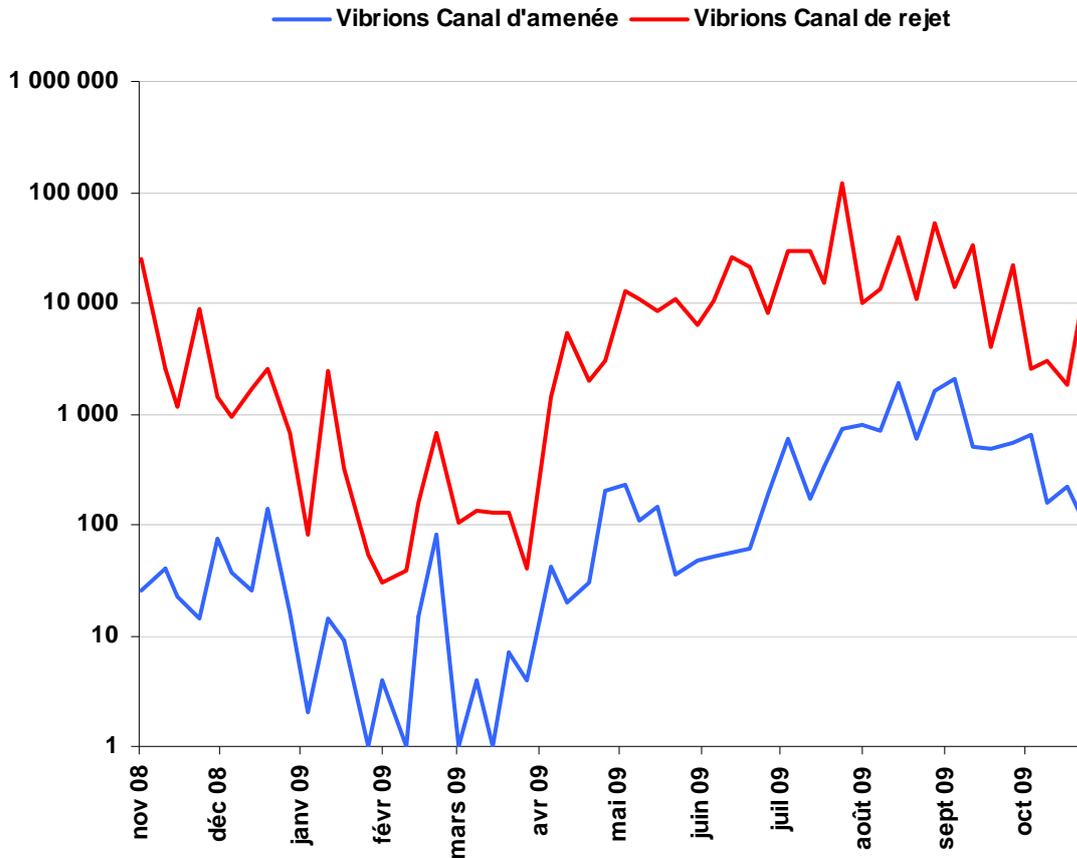


Figure 3.2 Abondance des vibrions cultivables à 37 °C
(Vibrions/L en échelle logarithmique)

La température de l'eau de mer est, depuis le début des études de surveillance, le facteur du milieu expliquant le mieux les variations de la concentration en vibrions. Au-dessus de 4 °C, un accroissement de la température de l'eau de 6 °C se traduit par une abondance en vibrions environ 10 fois plus grande (figure 3.2 – tableaux 3.4 et 3.5). Pour les mesures réalisées aux canaux d'amenée et de rejet lors de ce cycle d'étude, les relations entre concentration en vibrions et température sont résumées sur la figure 3.3.

En dépit de variations liées aux conditions climatiques, l'abondance des vibrions dans le canal de rejet est relativement stable depuis la mise en service des six tranches de la centrale de Gravelines (figure 3.4 ; flèches noires).

Le développement de l'aquaculture (phase expérimentale en 1984 puis extensions en 1991, 1992 et 2003) ne semble pas avoir eu d'influence majeure sur les vibrions en termes d'abondance (figure 3.4 ; flèches bleues). Si les concentrations maximales observées semblent se stabiliser, l'amplitude des cycles annuels semble se réduire. La clémence des hivers et le développement de l'aquaculture pourraient être à l'origine de ce phénomène (Fig. 3.4).

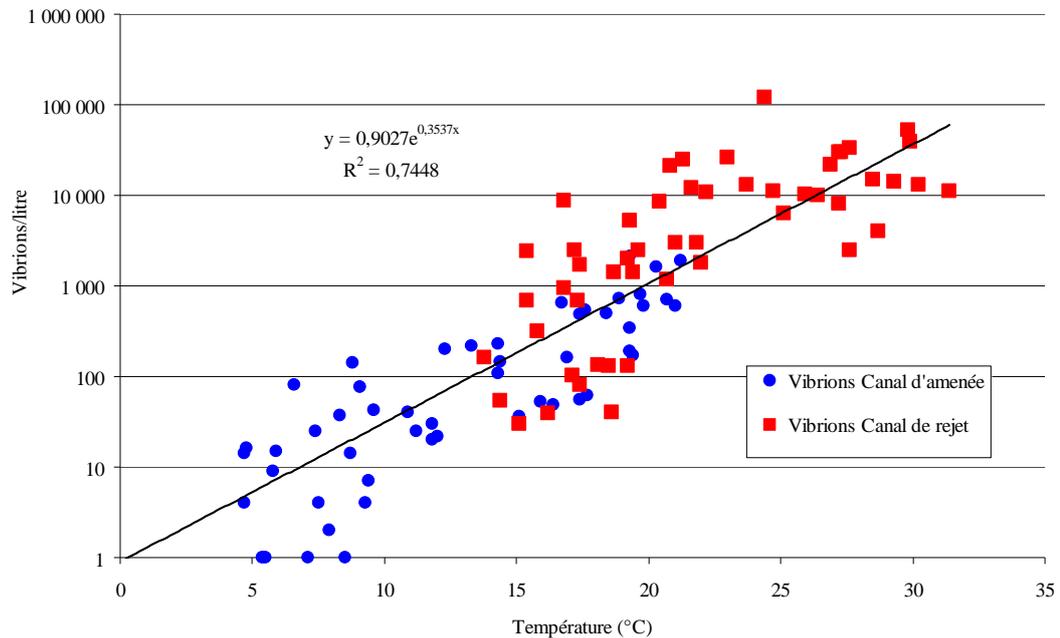


Figure 3.3 Relations entre température et concentration en vibrions aux canaux d'amenée et de rejet

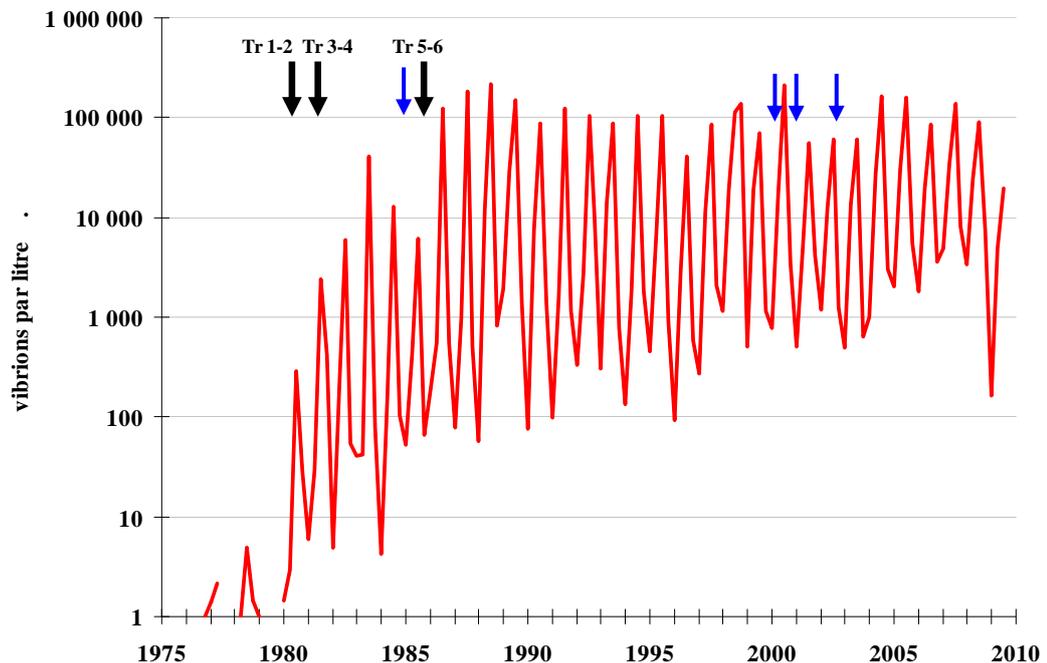


Figure 3.4 Moyenne géométrique des abondances trimestrielles de 1976 à 2009 (Vibrions par litre)
 (Flèches noires : mise en service des différentes tranches du CNPE : 1-2, 3-4 puis 5-6)
 (Flèches bleues : début d'expérimentation des installations aquacoles en 1984, puis phases d'agrandissement)

En traitant les concentrations en vibrions trimestre par trimestre depuis le début des études, on observait la stabilisation des concentrations estivales et la croissance constante des concentrations hivernales (figure 3.5). Les valeurs inhabituellement basses de cette période viennent contredire cette tendance.

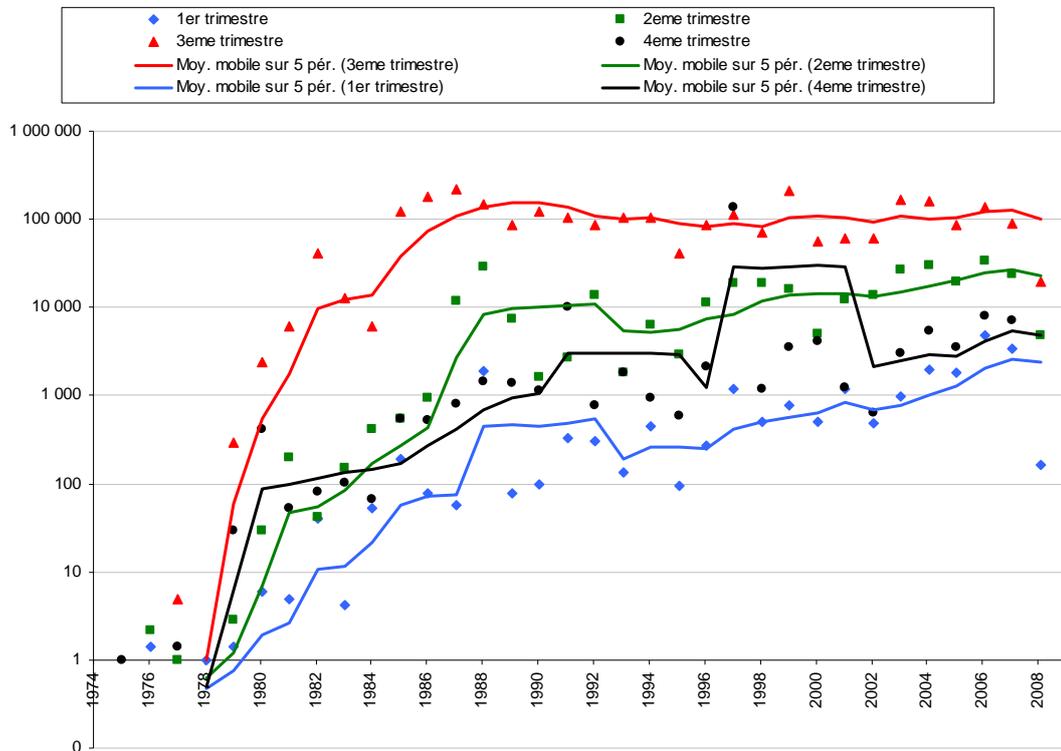


Figure 3.5 Moyenne géométrique des abondances en vibrions classées par trimestre de 1976 à 2009 (Vibrions par litre)

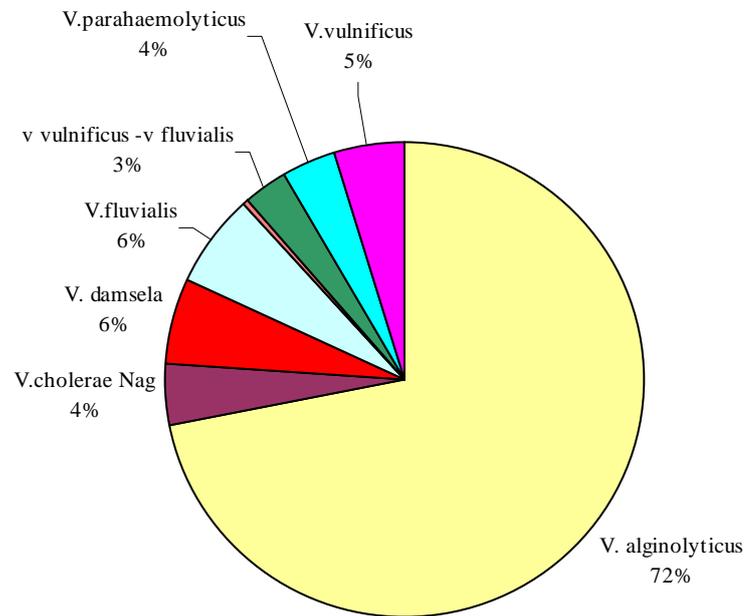
3.2.2. Aspect qualitatif

Une modification dans l'interprétation des profils biochimiques utilisés pour affecter des noms d'espèces aux vibrions isolés est intervenue en 2006 suite à la parution d'un nouveau catalogue analytique API 20 E. L'utilisation de ce nouveau catalogue a surtout des incidences en ce qui concerne l'espèce *Vibrio cholerae*. De nombreux germes auparavant classés *V. cholerae* sont maintenant considérés comme mal-discriminés entre *V. cholerae* et d'autres espèces ce qui a pour conséquence de diminuer le nombre de *Vibrio cholerae* isolés sur le site. Ceci permet d'écartier du groupe *V. cholerae*, un certain nombre de souches de l'environnement très éloignées du véritable *V. cholerae* épidémique.

Avant 1984, la quasi totalité de la flore des vibrions isolés sur le site était représentée par *Vibrio alginolyticus*. Parallèlement au développement de l'aquaculture sur le site, une diversité croissante des espèces de vibrions a été observée. En 2008-2009, au canal de rejet, *Vibrio alginolyticus* restait encore l'espèce la plus souvent isolée avec un pourcentage moyen d'isolement de 67,8 % (figure 3.6) en proportion croissante depuis deux ans (59,7 % en 2006-2007 et 65% en 2007-2008).

En 2009, la seconde espèce la plus fréquente après *V. alginolyticus* était *V. fluvialis* avec un pourcentage d'isolement de 11,5 %. *Vibrio cholerae* non agglutinable (Nag), qui était la seconde espèce par ordre d'importance, avait vu son pourcentage chuter à 4,6 % au canal de rejet en 2006-2007, puis 0,6 % en 2007-2008. Cette année, aucun *Vibrio cholerae* Nag n'a été isolé dans le rejet (figure 3.6).

Canal d'amenée



Canal de rejet

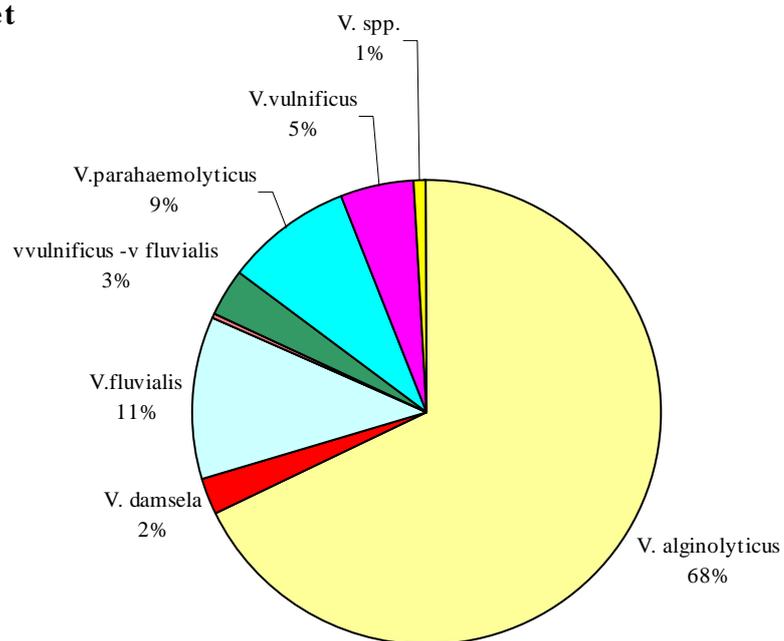


Figure 3.6 Pourcentages moyens d'isolement des diverses espèces de vibrions aux canaux de prise et de rejet pour la période 2008-2009

Cette évolution n'est donc pas uniquement due aux modifications des clés d'identification. Les souches de *Vibrio cholerae* isolées sur le site n'étaient pas agglutinables par les sérums anti-

Vibrio cholerae O1 et anti-*Vibrio cholerae* O139 et étaient, de plus, halophiles strictes, ce qui permet de les différencier des souches épidémiques.

Les autres espèces mises en évidence en 2008-2009 au canal de rejet étaient par ordre d'importance : *V. parahaemolyticus* (8,7 %), *V. vulnificus* (4,9%) *V. vulnificus/fluviialis* (3,4%), *V. damsela* (2,3%), *V. spp* (0,9%), *V. hollisae* (0,3%).

Vibrio spp est un ensemble qui regroupe regroupant les vibrions non identifiés ou mal discriminés.

Ces pourcentages sont à rapprocher des valeurs moyennes pour l'ensemble de la période 1989 à 2008 au canal de rejet.

<i>V. alginolyticus</i>	68,4 %	<i>V. cholerae</i> Nag	11,2 %
<i>V. fluviialis</i>	5,7 %	<i>V. damsela</i>	4,6 %
<i>V. parahaemolyticus</i>	3,6 %	<i>V. mimicus</i>	2,5 %
<i>V. vulnificus</i>	1,6 %		

Depuis 2006-2007, les différences dans la composition de la microflore des vibrions entre les points *prise* et *rejet* tendent à s'estomper.

En moyenne géométrique, *Vibrio alginolyticus* reste l'espèce la plus adaptée aux conditions actuelles du site avec un facteur moyen de multiplication proche de 40 entre le point *prise* et le point *rejet* (moyenne des rapports du logarithme des concentrations) (figures 3.7 et 3.8).

Vibrio cholerae Nag qui occupait souvent depuis quelques années la seconde place par l'importance de sa multiplication sur le site, a cette année un facteur de multiplication non mesurable entre les deux points de prélèvement (moyenne géométrique des logarithmes des concentrations). Ce facteur est en baisse depuis quatre ans alors qu'il était auparavant proche de celui mesuré pour *Vibrio alginolyticus*. Ce facteur est affecté par le changement de codeur microbiologique intervenu en 2006 mais sa faiblesse est également observée si l'on utilise l'ancien codage d'identification.

En ce qui concerne les autres espèces mises en évidence sur le site, des facteurs de multiplication calculés ont été également important pour *V. fluviialis* (11,9), *V. parahaemolyticus* (8,9) et *V. vulnificus/V. fluviialis* (8,2).

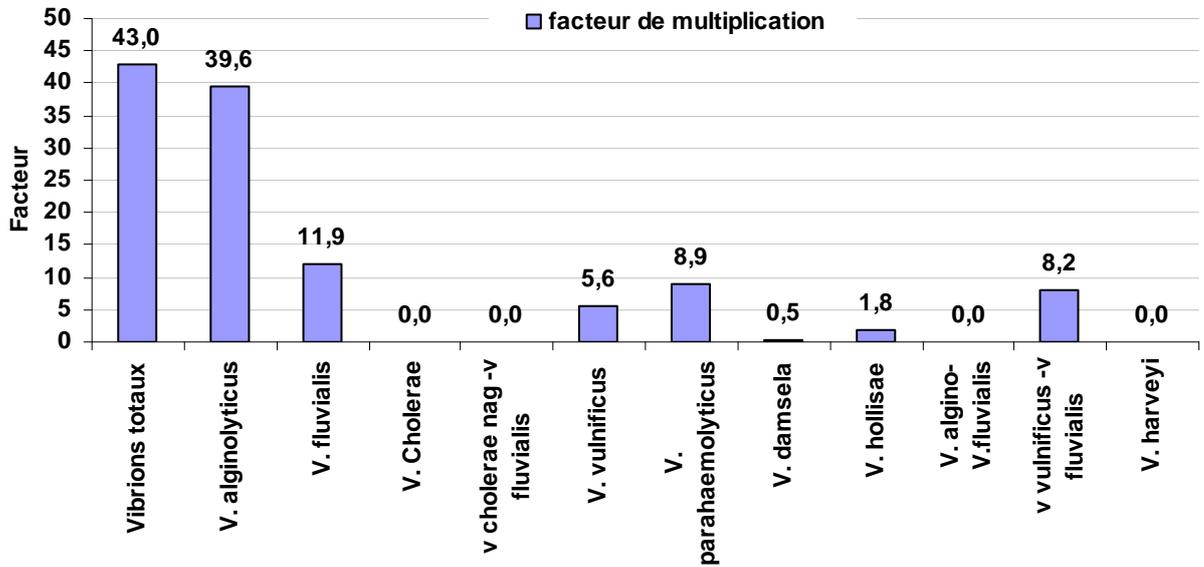


Figure. 3.7 Rapport (%) des concentrations moyennes des diverses espèces de vibrions entre le canal d'amenée et le canal de rejet (Axe des abscisses : espèces du genre *Vibrio*)

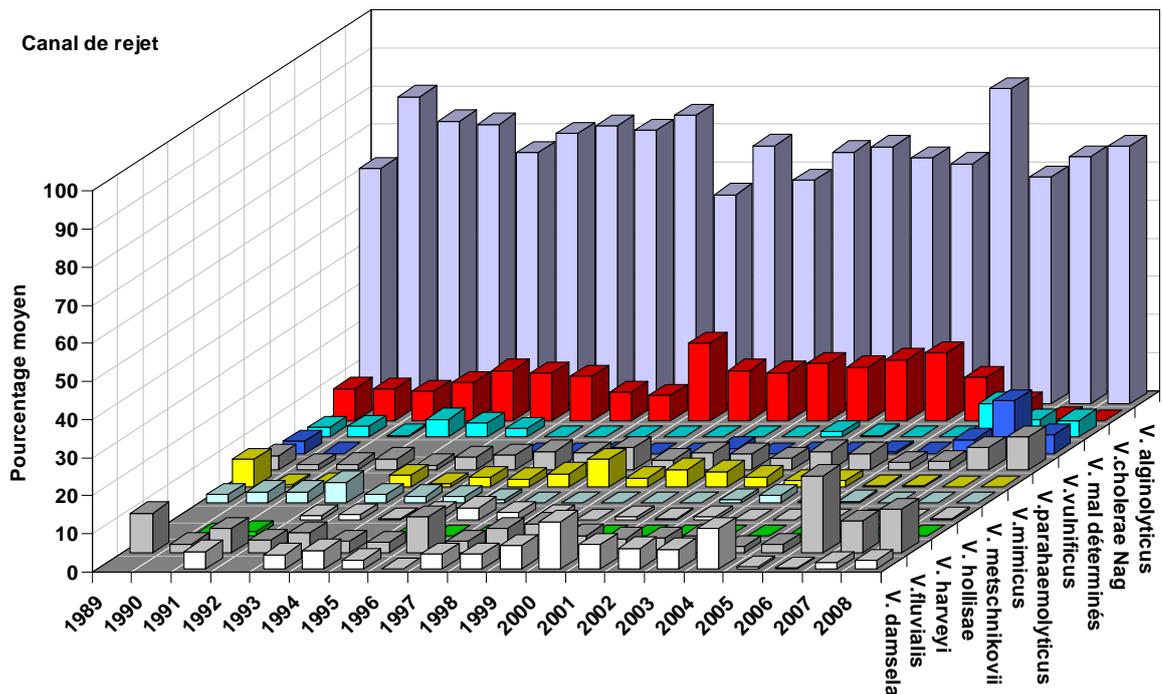


Figure 3.8 Évolution de l'abondance relative des diverses espèces de vibrions de 1989 à 2008 au point canal de rejet (moyennes des pourcentages d'abondances hebdomadaires) (Pour les années : par exemple, 2006 signifie période de novembre 2006 à octobre 2007)

3.3. Campagnes pélagiques

Les données bactériologiques relatives aux campagnes de surveillance pélagique de mai et de septembre 2009 sont résumés dans le tableau 3.3 et les figures 3.9, 3.10 et 3.11. Lors de ces campagnes un point supplémentaire (point *radeau*) est réalisé dans la partie amont du canal de rejet sur le radeau de pompage, à l'extrémité de la partie rectiligne du canal d'où se font les prélèvements au filet à plancton (cf. chapitre 5).

Les températures observées au canal d'amenée (figure 3.9) étaient très proches de celles relevées au point *référence* en surface lors des deux campagnes. La campagne de mai est marquée par un taux de dilution important entre le canal de rejet et le point *contrôle*.

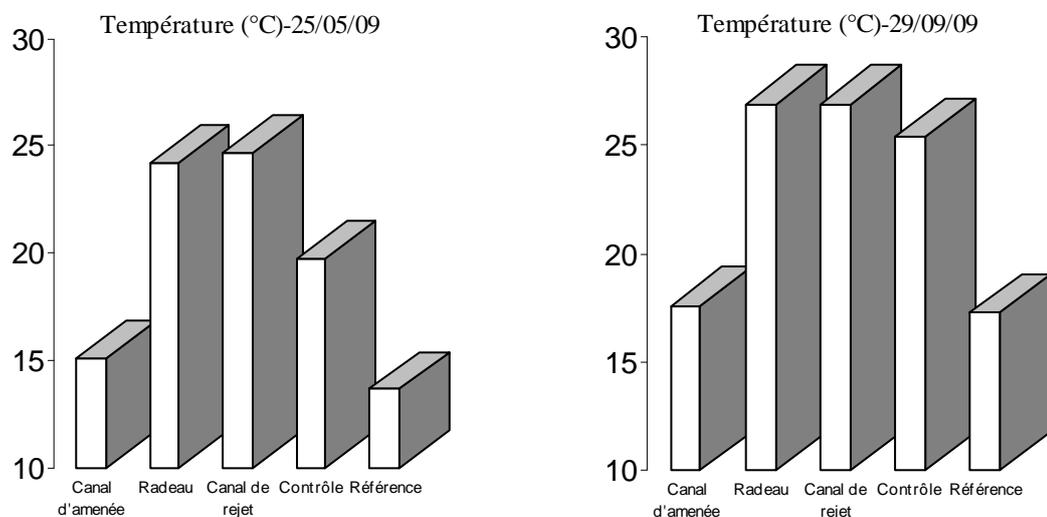


Figure 3.9 Campagnes pélagiques – Températures de surface (en °C) pour chaque point

Au niveau du *radeau*, la multiplication des vibrions n'est qu'amorcée en raison de la substance d'oxydant résiduel. Cette augmentation des concentrations en vibrions se poursuit de manière importante dans la partie terminale du canal de rejet. En effet les concentrations retrouvées au point *rejet* sont de 11 000 vibrions/L le 25/05/09 et de 22 000 Vibrions/L le 29/09/09.

La dilution l'emporte au point *contrôle* et des concentrations inférieures à la concentration côtière sont retrouvées au point *référence* (figure 3.10).

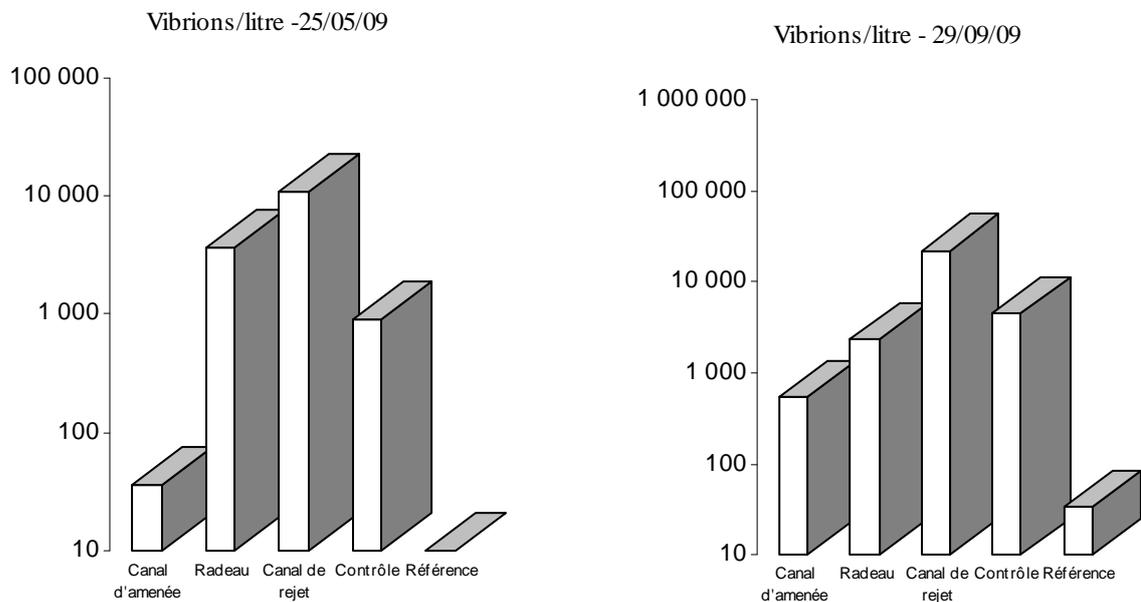


Figure 3.10 Campagnes pélagiques – Vibrions par litre pour chaque point

3.4. Éléments de conclusion

Les résultats obtenus cette année précisent et confirment les observations de ces dernières années d'étude de surveillance écologique du site de Gravelines.

La chloration de l'eau a été en service durant 8 mois sur 12 au cours de la période 2008-2009. Les composés chimiques formés étaient essentiellement bromés et le plus abondant était le bromoforme avec une concentration moyenne de 14,8 µg/L (97,8 % du total des haloformes). Cette concentration moyenne était voisine de celles observées les années précédentes.

Les dosages d'haloformes (et en particulier du plus abondant d'entre eux, le bromoforme), permettent, outre leur rôle de traceur de la chloration, de mesurer l'étendue du panache de rejet et d'estimer le taux de re-circulation de l'eau de refroidissement (3,5 % cette année). Parmi les tri-bromo-phénols, seul le 2,4,6-tribromo-phénol a été mis en évidence comme lors des périodes précédentes.

Le passage de l'eau dans l'ensemble constitué par la centrale électrique et les installations aquacoles a entraîné une multiplication du nombre des vibrions (d'un facteur 120 en moyenne géométrique annuelle). Les concentrations de vibrions dans le canal de rejet ont été relativement stables depuis la mise en service des six tranches de la centrale (1986). Les faibles valeurs observées cette année restent donc à confirmer. Cependant l'amplitude du cycle annuel semble se réduire depuis quelques années. Les évolutions climatiques et le développement de l'aquaculture sur le site peuvent être des facteurs d'explication.

Une modification dans l'interprétation des profils biochimiques utilisés pour affecter des noms d'espèces aux vibrions isolés est intervenue en 2006 en raison de la parution d'un nouveau catalogue analytique API 20 E. L'utilisation de ce nouveau catalogue a principalement des incidences pour l'espèce *Vibrio cholerae*. De nombreux germes auparavant classés *V. cholerae* sont maintenant considérés comme mal-discriminés entre *V. cholerae* et d'autres espèces (Ceci permet

d'écarter du groupe *V. cholerae*, un certain nombre de souches de l'environnement très éloignées du véritable *V. cholerae* épidémique). En 2008-2009, aucun *Vibrio cholerae* n'a été isolé dans le rejet.

Avant 1984, la quasi totalité de la flore des vibrions isolés sur le site était représentée par *Vibrio alginolyticus*. Parallèlement au développement de l'aquaculture sur le site, une diversité croissante des espèces de vibrions a été observée. *Vibrio alginolyticus* qui était auparavant la seule espèce de vibron mise en évidence sur le site, reste l'espèce majoritaire dans le rejet de la centrale avec 67,8 % des isolements. Au rejet, *Vibrio fluvialis* est l'espèce la plus fréquemment isolée après *V. alginolyticus* avec un pourcentage de 11,5 %.

Tableau 3.1 Chlore résiduel et haloformes

Date	Canal de prise			Chlore tot.DPD (mg/L)	Canal de rejet		
	CHCl ₃ Br (µg/L)	CHClBr ₂ (µg/L)	CHBr ₃ (µg/L)		CHCl ₃ Br (µg/L)	CHClBr ₂ (µg/L)	CHBr ₃ (µg/L)
04/11/2008	<0,05	<0,05	0,1	<0,05	<0,05	0,82	4,6
13/11/2008	<0,05	<0,05	0,1	<0,05	<0,05	0,18	9,5
18/11/2008	<0,05	<0,05	0,1	0,10	<0,05	0,24	12,0
26/11/2008	<0,05	<0,05	0,1	<0,05	<0,05	<0,05	<0,5
03/12/2008	<0,05	<0,05	<0,5	<0,05	<0,05	<0,05	<0,5
08/12/2008	<0,05	<0,05	<0,5	<0,05	<0,05	<0,05	<0,5
16/12/2008	<0,05	<0,05	<0,5	<0,05	<0,05	<0,05	<0,5
22/12/2008	<0,05	<0,05	<0,5	<0,05	<0,05	<0,05	<0,5
30/12/2008	<0,05	<0,05	<0,5	<0,05	<0,05	<0,05	<0,5
06/01/2009	<0,05	<0,05	<0,5	<0,05	<0,05	<0,05	<0,5
14/01/2009	<0,05	<0,05	<0,5	<0,05	<0,05	<0,05	<0,5
20/01/2009	<0,05	<0,05	<0,5	0,09	<0,05	<0,05	<0,5
29/01/2009	<0,05	<0,05	<0,5	<0,05	<0,05	<0,05	<0,5
03/02/2009	<0,05	<0,05	<0,5	<0,05	<0,05	<0,05	<0,5
12/02/2009	<0,05	<0,05	<0,5	<0,05	<0,05	<0,05	<0,5
17/02/2009	<0,05	<0,05	<0,5	<0,05	<0,05	<0,05	<0,5
24/02/2009	<0,05	<0,05	<0,5	<0,05	<0,05	<0,05	<0,5
04/03/2009	<0,05	<0,05	<0,5	<0,05	<0,05	<0,05	<0,5
11/03/2009	<0,05	<0,05	<0,5	<0,05	<0,05	<0,05	<0,5
17/03/2009	<0,05	<0,05	<0,5	<0,05	<0,05	<0,05	<0,5
23/03/2009	<0,05	<0,05	<0,5	<0,05	<0,05	<0,05	<0,5
30/03/2009	<0,05	<0,05	<0,5	<0,05	<0,05	<0,05	<0,5
08/04/2009	<0,05	<0,05	<0,5	<0,05	<0,05	<0,05	<0,5
14/04/2009	<0,05	<0,05	<0,5	<0,05	<0,05	0,22	11,0
22/04/2009	<0,05	<0,05	<0,5	<0,05	<0,05	0,22	14,0
28/04/2009	<0,05	<0,05	1,3	<0,05	<0,05	0,50	26,0
06/05/2009	<0,05	<0,05	2,3	0,17	<0,05	0,32	18,0
11/05/2009	<0,05	<0,05	0,9	<0,05	<0,05	0,26	13,0
18/05/2009	<0,05	<0,05	0,6	<0,05	<0,05	0,16	7,6
25/05/2009	<0,05	<0,05	0,8	<0,05	<0,05	0,54	31,0
02/06/2009	<0,05	<0,05	<0,5	<0,05	<0,05	0,34	17,0
08/06/2009	<0,05	<0,05	0,7	0,08	<0,05	0,65	30,0
15/06/2009	<0,05	<0,05	1,2	0,10	<0,05	0,25	12,0
22/06/2009	<0,05	<0,05	1,1	0,08	<0,05	0,19	8,8
29/06/2009	<0,05	<0,05	0,8	0,08	<0,05	0,67	32,0
06/07/2009	<0,05	<0,05	1,6	0,15	<0,05	0,35	19,0
15/07/2009	<0,05	<0,05	1,6	0,11	<0,05	0,20	11,0
20/07/2009	<0,05	<0,05	1,5	<0,05	<0,05	0,30	16,0
27/07/2009	<0,05	<0,05	0,9	<0,05	<0,05	0,12	6,3
03/08/2009	<0,05	<0,05	1,1	<0,05	<0,05	0,23	12,0
10/08/2009	<0,05	<0,05	<0,5	0,07	<0,05	0,53	27,0
17/08/2009	<0,05	<0,05	1,7	<0,05	<0,05	0,36	18,0
24/08/2009	<0,05	<0,05	0,9	0,14	<0,05	0,41	19,0
31/08/2009	<0,05	<0,05	1,1	<0,05	<0,05	0,29	13,0
07/09/2009	<0,05	<0,05	0,6	0,06	<0,05	0,36	16,0
14/09/2009	<0,05	<0,05	<0,5	<0,05	<0,05	0,32	15,0
21/09/2009	<0,05	<0,05	<0,5	0,06	<0,05	0,42	20,0
29/09/2009	<0,05	<0,05	1,4	<0,05	<0,05	0,27	16,0
06/10/2009	<0,05	<0,05	0,7	<0,05	<0,05	<0,05	0,8
12/10/2009	<0,05	<0,05	1,1	<0,05	<0,05	0,14	6,7
20/10/2009	<0,05	<0,05	<0,5	<0,05	<0,05	0,21	8,9
26/10/2009	<0,05	<0,05	<0,5	<0,05	<0,05	0,07	3,3

Tableau 3.2 Dosages des bromo-phénols au point canal de rejet (valeurs en µg/L)

	2,4,6-tribromo-phénol	2,6-dibromo-phénol	2,4-dibromo-phénol	4-bromo-phénol	3-bromo-phénol	2-bromo-phénol
04/11/08	0,12	<0,05	<0,05	<1	<1	<1
03/12/08	<0,01	<0,05	<0,05	<1	<1	<1
06/01/09	<0,01	<0,05	<0,05	<1	<1	<1
03/02/09	<0,01	<0,05	<0,05	<1	<1	<1
04/03/09	<0,01	<0,05	<0,05	<1	<1	<1
09/04/09	0,06	<0,05	<0,05	<1	<1	<1
06/05/09	0,17	<0,05	<0,05	<1	<1	<1
02/06/09	<0,01	<0,05	<0,05	<1	<1	<1
06/07/09	0,06	<0,05	<0,05	<1	<1	<1
03/08/09	0,04	<0,05	<0,05	<1	<1	<1
07/09/09	0,02	<0,05	<0,05	<1	<1	<1
06/10/09	0,74	<0,05	<0,05	<1	<1	<1

Tableau 3.3 Campagnes pélagiques. Bactériologie (Vibrions par Litre) et chloration

Date	Point	Vibrions 37°C/litre										Haloformes			
		Température (°C)	Vibrions totaux	<i>V. alginolyticus</i>	<i>V. vulnificus</i> ou <i>fluviatilis</i>	<i>V. damsela</i>	<i>V. fluviatilis</i>	<i>V. vulnificus</i>	<i>V. parahaemolyticus</i>	<i>V. mimicus</i>	<i>V. spp.</i>	<i>V. vulnificus</i>	CHCl ₂ Br (µg/litre)	CHClBr ₂ (µg/litre)	CHBr ₃ (µg/litre)
25/5/09	Canal d'aménée	15,1	36	28	4	2			2				<0,05	<0,05	0,8
	Radeau	24,2	3 700	2 800						900			<0,05	0,76	46
	Canal de rejet	24,7	11 000	9 200					200			1 600	<0,05	0,54	31
	Contrôle	19,8	900	600	300								<0,05	<0,05	14
	Référence	13,7	6	2	1		3						<0,05	<0,05	<0,5
29/9/09	Canal d'aménée	17,6	540	500		40							<0,05	<0,05	1,4
	Radeau	26,9	2 300	800			100	900			500	500	<0,05	0,37	21
	Canal de rejet	26,9	22 000	22 000									<0,05	0,27	16
	Contrôle	25,4	4 500	1 700	200		100	2 500					<0,05	0,26	15
	Référence	17,3	34	33		1							<0,05	<0,05	1,6

Tableau 3.4 Bactériologie -mesures hebdomadaires au point canal d'aménée (vibrions/L)

Date	Temp Canal d'aménée	Vibrions Canal d'aménée	V. alginolyticus	v cholerae nag -v fluvialis	V. cholerae Nag	V. damsela	V. fluvialis	V. harveyi	V. hollisae	V. algino-V. fluvialis	v vulnificus -v fluvialis	V. parahaemolyticus	V. vulnificus	V. spp.
04/11/08	11,2	25	22							1	1	1		
13/11/08	10,9	40	12		5						21		2	
18/11/08	12,0	22	14			2	4						2	
26/11/08	8,7	14	5		5		4							
03/12/08	9,1	76	24				16				8	8	20	
08/12/08	8,3	37	32			1	3						1	
16/12/08	7,4	25	12		3	1	3					6		
22/12/08	8,8	140	110				30							
30/12/08	4,8	16	8		5		1						2	
06/01/09	7,9	2	2											
14/01/09	4,7	14	13									1		
20/01/09	5,8	9	9											
29/01/09	5,4	1			1									
03/02/09	4,7	4	4											
12/02/09	5,5	1	1											
17/02/09	5,9	15	15											
24/02/09	6,6	80	30				50							
04/03/09	7,1	1	1											
11/03/09	7,5	4	3							1				
17/03/09	8,5	1	1											
23/03/09	9,4	7	7											
30/03/09	9,3	4	4											
08/04/09	9,6	42	42											
14/04/09	11,8	20	16			2								
22/04/09	11,8	30	10				5				2		5	
28/04/09	12,3	200	140								10		60	
06/05/09	14,3	230	200			30								
11/05/09	14,3	108	55				13				25	15		
18/05/09	14,4	146	56			20	70							
25/05/09	15,1	36	28			2					4	2		
02/06/09	16,4	48	42				2					4		
08/06/09	15,9	52	14			2	2						34	
15/06/09	17,4	56	28			4	2					4	18	
22/06/09	17,7	62	24			16					8	14		
29/06/09	19,3	190	140			40	10							
06/07/09	19,8	600	600											
15/07/09	19,4	170	60			50						60		
20/07/09	19,3	340	300			20						20		
27/07/09	18,9	720	160		220	280							60	
03/08/09	19,7	800	420			200	160						20	
10/08/09	20,7	700	640			60								
17/08/09	21,2	1 900	1 500			100	300							
24/08/09	21,0	600	400			100	100							
31/08/09	20,3	1 600	1 400			200								
07/09/09	19,3	2 100	2 000			100								
14/09/09	18,4	500	420						20			40	20	
21/09/09	17,4	480	400			20			20	20		20		
29/09/09	17,6	540	500			40								
06/10/09	16,7	660	560									100		
12/10/09	16,9	160	100			20				40				
20/10/09	13,3	220	180									20	20	
26/10/09	15,0	110	60			20						10	20	

Tableau 3.5 Bactériologie - mesures hebdomadaires au point canal de rejet (vibrions/L)

Date	Temp. rjt	Vibrions Canal de rejet	V. alginolyticus	v cholerae nag - v fluvialis	V. cholerae Nag	V. damsela	V. fluvialis	V. harveyi	V. hollisae	V. algin-V.fluvialis (I)	v vulnificus -v fluvialis (I)	V. parahaemolyticus	V. vulnificus	V. spp.
04/11/08	21,3	25 000	22 000									3 000		
13/11/08	19,6	2 500	2 100									100		300
18/11/08	20,7	1 160	710			110	250						90	
26/11/08	16,8	8 700	4 500				3 600					600		
03/12/08	18,7	1 420	780			40	500						100	
08/12/08	16,8	940	120			180	420				140	80		
16/12/08	17,4	1 700	1 200			100						400		
22/12/08	17,2	2 500	1 400				200					100	700	100
30/12/08	15,4	680	540										140	
06/01/09	17,4	80	58			4	10					8		
14/01/09	15,4	2 400	2 000				400							
20/01/09	15,8	320	280				40							
29/01/09	14,4	54	22				4				12	8	8	
03/02/09	15,1	30	30											
12/02/09	16,2	39	25			3	10					1		
17/02/09	13,8	160	106				28					26		
24/02/09	17,3	680	560				20					100		
04/03/09	17,1	104	68			16					8		12	
11/03/09	18,1	136	14									120	2	
17/03/09	19,2	130	40									90		
23/03/09	18,5	130	120				10							
30/03/09	18,6	40	10									30		
08/04/09	19,4	1 400	1 200				100					100		
14/04/09	19,3	5 300	2 000				3 000					300		
22/04/09	19,2	2 000	2 000											
28/04/09	21,8	3 000	1 000				1 000						1 000	
06/05/09	23,7	12 900	9 600			1 600				1 500	200			
11/05/09	22,2	10 800	6 200				2 400				2 200			
18/05/09	20,4	8 600	4 600			3 400	600							
25/05/09	24,7	11 000	9 200									200	1 600	
02/06/09	25,1	6 300	5 900										400	
08/06/09	25,9	10 400	6 400				1 400			1 200			1 400	
15/06/09	23,0	26 000	20 000							6 000				
22/06/09	20,8	21 000	16 000			1 000							4 000	
29/06/09	27,2	8 000	4 000									1 000	3 000	
06/07/09	27,2	30 000	23 000									5 000	2 000	
15/07/09	27,3	30 000	17 000				7 000					6 000		
20/07/09	28,5	15 000	15 000											
27/07/09	24,4	120 000	120 000											
03/08/09	26,4	10 000	9 000										1 000	
10/08/09	30,2	13 100	3 000				10 000				100			
17/08/09	29,9	39 000	33 000				6 000							
24/08/09	31,4	11 000	11 000											
31/08/09	29,8	52 000	20 000				28 000				4 000			
07/09/09	29,3	14 000	6 000								5 000		3 000	
14/09/09	27,6	33 000	33 000											
21/09/09	28,7	4 000	2 100				400	200		1 200			100	
29/09/09	26,9	22 000	22 000											
06/10/09	27,6	2 500	2 200				300							
12/10/09	21,0	3 000	3 000											
20/10/09	22,0	1 800	1 100				200	200		100	200			
26/10/09	21,6	12 000	6 000							1 000	1 000			4 000

4. PHYTOPLANCTON ET BIOMASSE CHLOROPHYLLIENNE

Auteur : A. Lefebvre

Collaborateurs : P. Hébert, C. Blondel, V. Duquesne, R. Delesmont

4.1. Introduction

Le phytoplancton représente l'ensemble des algues microscopiques qui flottent dans les eaux. C'est le premier maillon de la chaîne alimentaire dans l'écosystème marin et sa biomasse va dépendre de la disponibilité des nutriments pour sa croissance. Il existe environ 4000 espèces phytoplanctoniques au niveau mondial : certaines d'entre elles (environ 250) peuvent proliférer de façon importante en formant des eaux rouges, brunes ou vertes, d'autres espèces (environ 70) sont toxiques pour la faune marine ou pour l'homme par consommation de coquillages (processus de bioaccumulation de toxines), mais la plupart d'entre elles sont totalement inoffensives.

Le phytoplancton est couramment utilisé comme indicateur ou élément de qualité environnementale aussi bien dans les programmes de monitoring que dans les directives européennes (dir. 2000/60/CE ou Directive Cadre sur l'Eau) ou dans les conventions de mers régionales (ex. convention OSPAR). En réponse à des apports excessifs de nutriments, le développement du phytoplancton peut provoquer des dysfonctionnements au sein des écosystèmes pélagiques et benthiques (diminution de la concentration en oxygène, mortalité,...). C'est le processus d'eutrophisation.

La dynamique des communautés phytoplanctoniques se caractérise par la succession d'assemblage d'espèces selon des schémas pouvant présenter une forte variabilité spatio-temporelle. La succession de ces assemblages est principalement contrôlée par les conditions environnementales et par la réponse des populations phytoplanctoniques à leurs variations. La diversité et la dynamique des populations phytoplanctoniques résultent d'interactions complexes entre des facteurs hydrodynamiques, physico-chimiques et biologiques.

4.2. Méthodologie

4.2.1. Stratégie de prélèvements du phytoplancton

Le phytoplancton et la biomasse chlorophyllienne sont habituellement suivis lors des campagnes de prélèvements hydrologiques du printemps et de l'automne. Ils permettent de comparer les valeurs des prélèvements aux points *prise* (canal d'aménée), *rejet* (canal de rejet) et *contrôle* (situé dans la tache thermique). Ces 3 points sont comparés à un point *référence* éloigné de la centrale et caractéristique du milieu marin hors influence de la centrale.

Des prélèvements d'eau hebdomadaires au point *prise* permettent de caractériser les variations saisonnières de la biomasse chlorophyllienne et du phytoplancton. Ils permettent de situer les deux campagnes de prélèvements hydrologiques par rapport au cycle saisonnier de l'écosystème.

Les prélèvements d'eau se font en surface à l'aide d'un seau. Pour la mesure des pigments chlorophylliens un litre d'eau est conservé au frais et à l'abri de la lumière. Pour connaître la composition spécifique et l'abondance du phytoplancton cent ml d'eau environ, sont fixés au lugol (2,5 ml/L).

4.2.2. Mesure des pigments chlorophylliens

La méthode trichromatique du SCOR-UNESCO (1966¹) est appliquée pour définir les concentrations brutes en chlorophylle *a*, indicateur de la biomasse phytoplanctonique, et le pourcentage de chlorophylle active, qui permet de caractériser l'importance de la biomasse phytoplanctonique dotée de pigments photosynthétiques actifs par rapport au phytoplancton en voie

¹ SCOR-UNESCO. 1966. Determination of photosynthetic pigments in sea water. UNESCO Monographs on Oceanographic Methodology, 1. Paris, France. 69 pp.

de dégradation. Les échantillons d'eau de un litre sont filtrés sur des filtres en fibre de verre Whatman GF/C de 47 mm. Les pigments chlorophylliens concentrés sur ces filtres sont ensuite extraits dans un solvant (acétone à 90 %). Après centrifugation de 20 minutes à 6000 tr/mn, l'absorbance du surnageant est mesurée par spectrophotométrie.

4.2.3. Composition spécifique et dénombrement du phytoplancton

Un volume de 10 ml, prélevé dans les échantillons d'eau fixée au lugol, est mis à décanter pendant au moins 12 heures dans une cuve de sédimentation, selon la méthode d'Utermöhl (1958¹). La caractérisation spécifique du phytoplancton et leur dénombrement s'effectuent au moyen d'un microscope inversé IX-51 Olympus ($\times 40$ à $\times 600$). Un minimum de 100 cellules est dénombré afin d'obtenir une précision d'au moins ± 20 % (Lund, 1958²). Les résultats sont exprimés en nombre de cellules par litre.

4.3. Chlorophylle a et pourcentage de chlorophylle active au point prise

Le développement phytoplanctonique a été particulièrement précoce en 2009 avec des concentrations importantes dès la fin du mois de février (19,64 mg/m³ le 24/02) (Figure 4.1. et annexe 1). Ce développement s'est poursuivi jusqu'à la première quinzaine du mois de mars (22,35 mg/m³ le 11/03). L'année 2009 était caractérisée par une concentration en chlorophylle *a* relativement importante (32,45 mg/m³ le 04/03) au regard de la série 2000-2009. Des poussées phytoplanctoniques de moindres importances ont eu lieu en avril (12,45 mg/m³ le 08/04 et 17,61 mg/m³ le 28/04), en mai (13,91 mg/m³ le 11/05) et en août (11,77 mg/m³ le 10/08). Alors que lors du bloom précoce, les concentrations étaient supérieures aux médianes mensuelles de la série 2000-2009, lors de la deuxième phase, les concentrations étaient presque toujours inférieures à ces médianes (Figure 4.1. B et C).

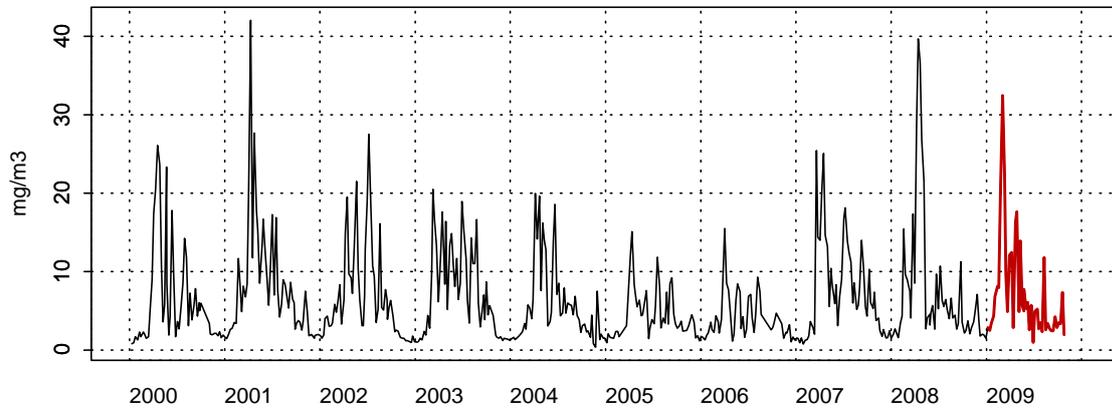
Le pourcentage de chlorophylle active (Figure 4.2. et annexe 1) était compris entre 48,6 (17/08/2009) et 97,6 (04/03/2009) au cours de la période de surveillance 2008-2009. Les valeurs les plus importantes (> 80 %) ont été relevées entre la fin du mois de janvier et la fin du mois de mai.

¹ Utermöhl, H. 1958. Zur Vervollkommnung der quantitativen Phytoplankton-Methodik. Mitt. Int. Ver. Limnol., 9: 1-38

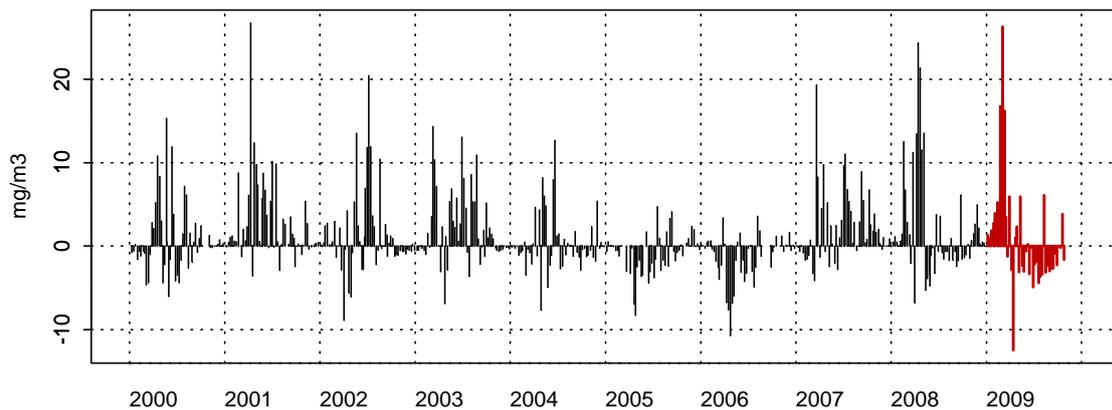
² Lund, J.W.G., KIPLING, C., LE CREN, E.D. 1958. The inverted microscope method of estimating algal number and the statistical basis of estimations by counting. Hydrobiologia 11: 143-178

(A)

1001325 - Gravelines canal d'amenée - Chlorophylle a



(B)

1001325 - Gravelines canal d'amenée - Anomalies Chlorophylle a
Méthode de calcul des anomalies : médiane par mois

(C)

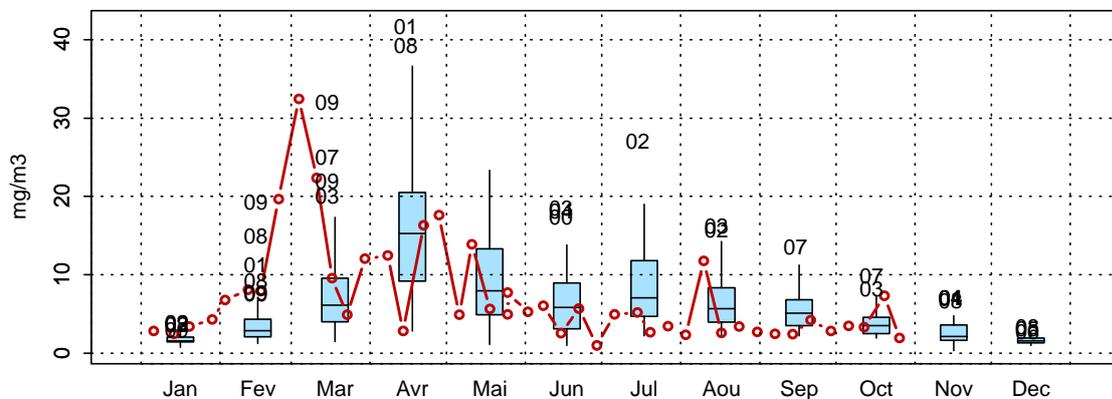
1001325 - Gravelines canal d'amenée - Variations saisonnières 2009 Chlorophylle a
Boxplots calculés sur la période : 2000 - 2009

Figure 4.1 (A) Evolution de la concentration en chlorophylle a (mg/m^3) au point prise, (B) anomalies de concentration par rapport à la médiane mensuelle et (C) boîtes de dispersion mensuelles pour la période 2000 à 2009 (en rouge les données de l'année 2009) (Les résultats mensuels atypiques sont indiqués par l'année concernée).

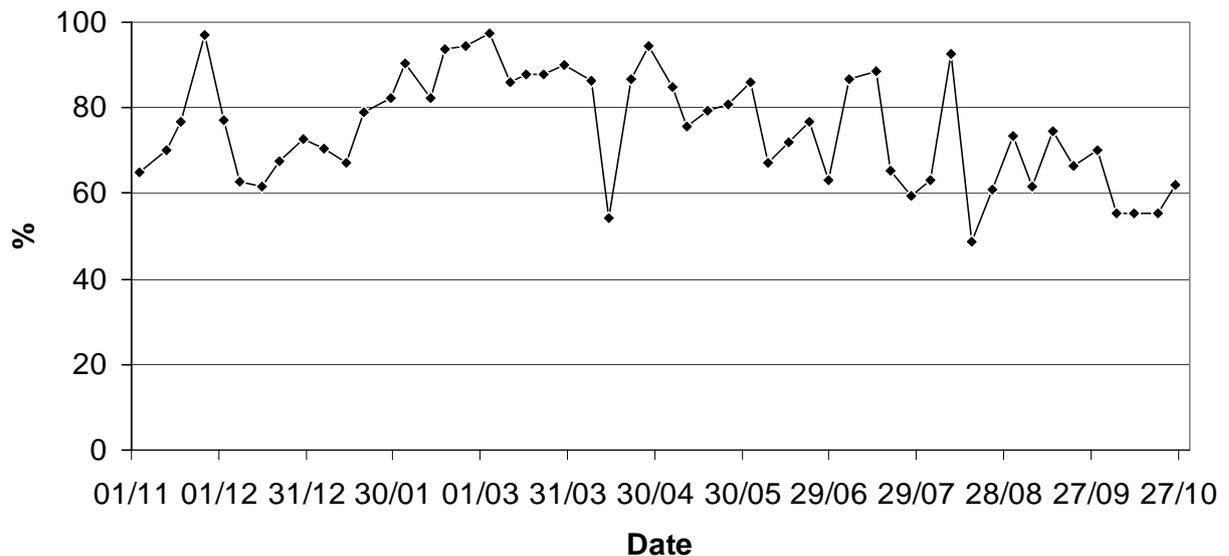


Figure 4.2 Évolution du pourcentage de chlorophylle active au point *prise* au cours de la période 2008-2009

4.4. Abondance, composition du phytoplancton et indices de diversité au point prise

4.4.1. Principe de l'Indice de Sanders

L'indice biologique d'une espèce est l'addition des rangs occupés par cette espèce pour toutes les dates (dates auxquelles l'espèce a été dénombrée). Le rang de l'espèce pour une date donnée est fonction de sa dominance par rapport à celles des autres espèces présentes.

L'indice biologique est calculé selon la méthode de Sanders (1960¹). Pour chaque date, les espèces sont classées en fonction de leur abondance. La plus abondante, donc la plus dominante à cette date, est notée 10. La seconde 9, la troisième 8 jusqu'à la dixième 1, les suivantes étant notées 0. Ainsi pour chaque date, 10 espèces sont classées. Pour chaque espèce, les notes obtenues à toutes les dates sont additionnées et leur somme correspond à l'indice de Sanders rencontré dans les tableaux de résultats. Guille (1970²) propose la classification biocénétique suivante des espèces, en fonction de la valeur de l'indice de SANDERS, pour un site donné :

- Les espèces classées dans les dix premières sont appelées espèces préférantes du site.
- Les espèces classées dans les dix suivantes sont les espèces accompagnatrices du site.
- Les espèces dont l'indice de SANDERS est égal à 0 sont dites accessoires du site.

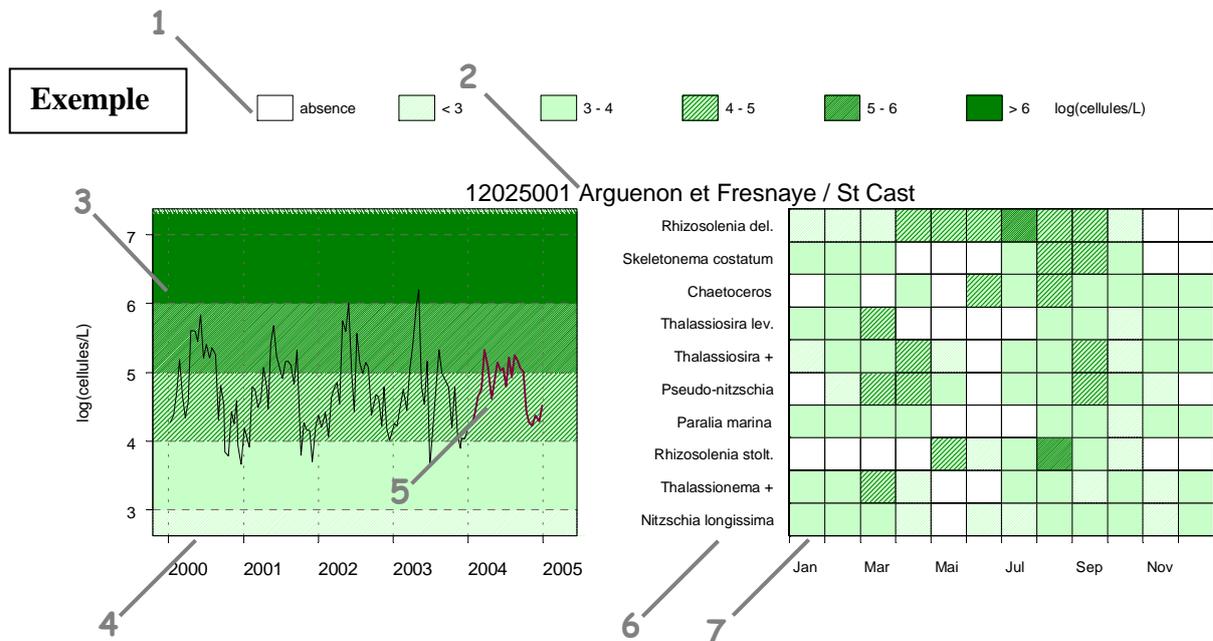
Les 10 taxons dominants, ou préférants, pour le point *prise* et par trimestre pour l'année considérée sont représentés dans un tableau qui indique une classe d'abondance. Ces taxons sont ordonnés de haut en bas en fonction de leur indice de Sanders. Le taxon en première ligne est jugé le plus caractéristique du point pour l'année considéré. Lorsque différentes classes phytoplanctoniques sont mentionnées dans le tableau, les diatomées sont libellées en bleu foncé, les dinoflagellés en

¹ Sanders, H.L., 1960. Benthic studies in Buzzards Bay III. The structure of the soft-bottom community. *Limnology and Oceanography*, Vol. 5 (2): 138-153

² Guille, A, 1970. Bionomics of the benthos of the continental plateau of the French Catalan coast. II. The macrofauna communities. *Vie Milieu (B)*. Vol. 21, (I-B): 149-280

magenta, les cryptophycées en bleu vif, les prymnésiofycées en vert et les autres espèces en noir. Au cours de ce cycle d'étude, seules des diatomées ont été mises en évidence dans les dix premiers rangs.

Un graphique de flores totales sur 5 ans est systématiquement associé à un tableau présentant les 10 taxons dominants de la dernière année, afin de décrire la diversité floristique du point.



- 1 Légende. Les chiffres correspondent à la puissance de 10 du dénombrement ; par exemple, « 3-4 » indiquent des valeurs comprises entre 10³ et 10⁴, soit entre 1 000 et 10 000 cellules par litre.
- 2 Point (identifiant) Site (libellé) / Point (libellé).
- 3 Somme des taxons dénombrés dans les flores totales (sauf ciliés).
L'étendue de l'échelle verticale est commune à tous les graphiques.
L'unité est exprimée en « log(cellules/L) ». Par exemple, « 6 » indique 10⁶, soit un million de cellules par litre
- 4 La période d'observation s'étend du 01/10/2000 au 31/10/2005.
- 5 Les observations de l'année 2005 sont mises en relief au moyen d'une couleur rouge.
- 6 Les 10 taxons dominants, de l'année 2005 pour ce point, sont représentés dans un tableau qui indique la classe d'abondance par mois.
Le libellé des taxons est placé en en-tête de ligne (ce sont des libellés abrégés, les libellés exacts, ainsi que leur classe, sont indiqués dans le tableau des taxons dominants).
Ces taxons sont ordonnés de haut en bas en fonction de leur indice de Sanders (le taxon en première ligne est jugé le plus caractéristique du point pour l'année 2005).
- 7 Les mois de l'année 2005 sont placés en en-tête de colonne.

4.4.2. Principe de l'indice de Shannon

La diversité des éléments d'une communauté est une « qualité » qui s'impose d'emblée à l'analyse. En fait, la notion recouvre deux aspects :

- (1) le nombre de catégories d'éléments : nombre de taxons distincts ; on dénombre couramment les espèces (on parlera alors de *diversité spécifique*), dans d'autres cas les genres (*diversité générique*), etc.
- (2) la régularité : façon plus ou moins égale ou inégale selon laquelle les individus, pour un nombre de catégories (par exemple espèces) donné, se répartissent entre celles-ci.

La seconde notion est plus élaborée que le simple « nombre d'espèces ». Elle correspond cependant à l'intuition courante : si, parmi les espèces dénombrées, l'une d'entre elles (ou un très petit nombre) représente la plus grande partie des individus recensés, les autres étant beaucoup plus rares, on tend à dire que la communauté est « peu diversifiée ». Si au contraire on rencontre un grand nombre d'espèces moyennement abondantes, on tend à qualifier la communauté de « très diversifiée ».

L'indice de diversité, retenu ici pour caractériser la diversité spécifique, est l'indice de Shannon, noté H.

$$H = - \sum P_i \log_2(P_i)$$

avec P_i , la fréquence de l'espèce i dans l'échantillon, soit $P_i = (N_i / N)$

N_i est l'effectif de l'espèce i dans l'échantillon et N l'effectif total ($\sum N_i = N$).

L'indice de diversité donne une information synthétique sur la richesse spécifique et l'équilibre du peuplement considéré. Toutefois, il dépend à la fois du nombre d'espèces et de leurs abondances relatives, donc une faible valeur peut traduire deux situations différentes :

- quand le nombre d'espèces est faible,
- quand le nombre d'espèces est élevé, mais quelques espèces dominent.

Il est généralement admis que la diversité est faible lorsque l'indice de Shannon est proche de 0,5. On dit qu'elle est forte lorsque l'indice est voisin de 6.

4.4.3. Résultats

L'abondance phytoplanctonique totale a fluctué entre 500 et plus de $40 \cdot 10^6$ cellules par litre entre 2005 et 2009 (Figure 4.3 gauche). Les abondances ont nettement progressées entre 2005 et 2008 (de plus de $2 \cdot 10^6$ à plus de $40 \cdot 10^6$ cellules par litre). Cette progression est principalement liée au développement massif de *Phaeocystis globosa* (plus de $2 \cdot 10^6$, $8 \cdot 10^6$, $13 \cdot 10^6$ puis $40 \cdot 10^6$ cellules par litre, respectivement, en 2005, 2006, 2007 et 2008). En 2009, l'abondance maximale était moindre, mais était de plus de $27 \cdot 10^6$ cellules par litre en raison du développement de *Phaeocystis globosa*. La communauté phytoplanctonique était dominée par les diatomées (Tableau 4.1), sauf lors de la prolifération de la prymnésiophycée *Phaeocystis globosa*.

Les taxons préférants pour la période de surveillance 2008-2009 ont été définis sur la base du calcul de l'indice de Sanders (Figure 4.3. droite).

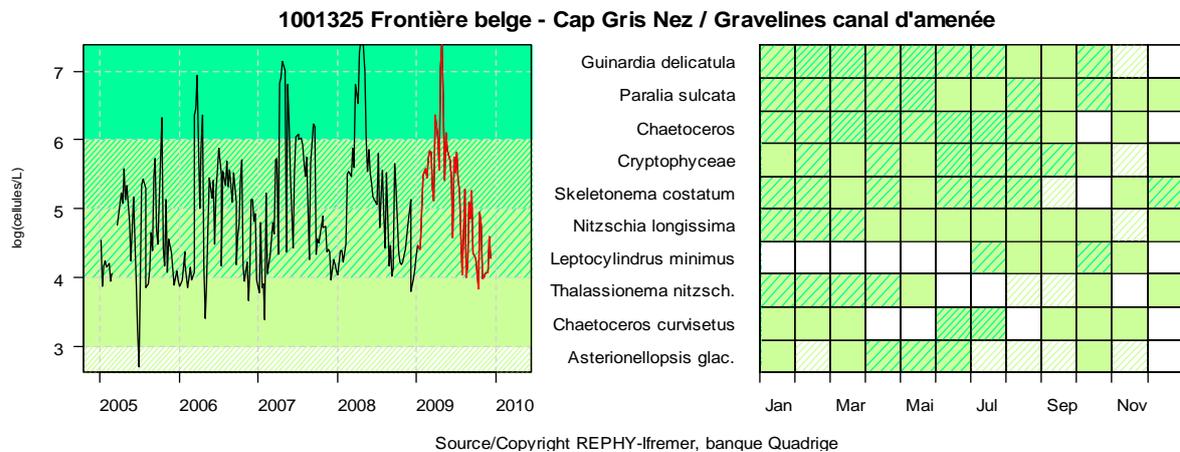


Figure 4.3 Évolution de l'abondance phytoplanctonique totale entre 2005 et 2009 et classement des 10 taxons dominants (Indice de Sanders) par mois au point prise

L'indice de Shannon a fluctué entre 0,02 et 4,08 au cours de la période de surveillance novembre 2008 – octobre 2009, en accord avec les résultats des années précédentes (Figure 4.4 et annexe 1).

Les valeurs les plus élevées, représentatives d'une communauté diversifiée composée de taxons équi-dominants, étaient plutôt observées de novembre 2008 à février 2009 et de juin à octobre 2009 (même schéma que pour la période de surveillance précédente).

La chute de l'indice au cours du printemps est principalement liée à la dominance de la prymnésiophyceée *Phaeocystis globosa*, espèce polymorphe dont le développement conduit à la formation d'une mousse abondante et nauséabonde. Ce taxon est reconnu comme à l'origine de problème d'eutrophisation du type HAB-HB, c'est à dire « Harmful Algal Bloom - High Biomass ». L'excès de biomasse injecté dans l'écosystème peut conduire à des dysfonctionnements des compartiments pélagiques et/ou benthiques (hypo- ou anoxie, mortalités,...). Son abondance était de plus de 11.10^6 et 27.10^6 cellules par litre le 22/04 et le 28/04, respectivement.

Le 18/05, la chute de l'indice était liée à la présence de *Protoctista* ($1,3.10^6$ cellules par litre), alors que le 25/05, c'était la diatomée *Guinardia delicatula* qui dominait la communauté phytoplanctonique (644595 cellules par litre).

En dehors de cette période de floraison printanière, favorable selon les conditions environnementales (nutriments, turbidité, turbulence...) aux diatomées ou à *Phaeocystis globosa*, la chute plus marquée de l'indice était liée :

- le 26/11/2008 à la dominance de *Rhizosolenia imbricata* + *styliformis* sur les autres groupes,
- le 03/12/2008 à la dominance de *Rhizosolenia imbricata* + *styliformis* et de *Paralia sulcata*,
- le 04/03/2009 à la dominance de *Guinardia delicatula*, de *Chaetoceros sp.*, de *C. socialis* et de Nitzschiacées,
- le 06/10/2009 à la dominance de *Paralia sulcata* et de *Leptocylindrus minimus*.

**Tableau 4.1 Liste des taxons dominants pour la période 2008-2009 aux points *prise, rejet, contrôle et référence*
REPHY - Taxons dominants - signification des libellés**

Intitulé graphe	Intitulé Quadrigé	Classe
<i>Cryptophyceae</i>	<i>Cryptophyceae</i>	<i>Cryptophyceae</i>
<i>Asterionellopsis glac.</i>	<i>Asterionellopsis glacialis</i>	<i>Diatomophyceae</i>
<i>Bellerochea</i>	<i>Bellerochea</i>	<i>Diatomophyceae</i>
<i>Chaetoceros</i>	<i>Chaetoceros</i>	<i>Diatomophyceae</i>
<i>Chaetoceros curvisetus</i>	<i>Chaetoceros curvisetus</i>	<i>Diatomophyceae</i>
<i>Diatomophyceae</i>	<i>Diatomophyceae</i>	<i>Diatomophyceae</i>
<i>Guinardia delicatula</i>	<i>Guinardia delicatula</i>	<i>Diatomophyceae</i>
<i>Guinardia flaccida</i>	<i>Guinardia flaccida</i>	<i>Diatomophyceae</i>
<i>Leptocylindrus danicus</i>	<i>Leptocylindrus danicus</i>	<i>Diatomophyceae</i>
<i>Leptocylindrus minimus</i>	<i>Leptocylindrus minimus</i>	<i>Diatomophyceae</i>
<i>Navicula</i>	<i>Navicula</i>	<i>Diatomophyceae</i>
<i>Nitzschia longissima</i>	<i>Nitzschia longissima</i>	<i>Diatomophyceae</i>
<i>Paralia sulcata</i>	<i>Paralia sulcata</i>	<i>Diatomophyceae</i>
<i>Plagiogramma</i>	<i>Plagiogramma</i>	<i>Diatomophyceae</i>
<i>Pseudo-nitzschia</i>	<i>Pseudo-nitzschia</i>	<i>Diatomophyceae</i>
<i>Rhizosolenia</i>	<i>Rhizosolenia</i>	<i>Diatomophyceae</i>
<i>Rhizosolenia imbr.</i>	<i>Rhizosolenia imbricata</i>	<i>Diatomophyceae</i>
<i>Skeletonema costatum</i>	<i>Skeletonema costatum</i>	<i>Diatomophyceae</i>
<i>Thalassionema nitzsch.</i>	<i>Thalassionema nitzschioides</i>	<i>Diatomophyceae</i>
<i>Thalassiosira ant.</i>	<i>Thalassiosira antarctica</i>	<i>Diatomophyceae</i>
<i>Gymnodinium</i>	<i>Gymnodinium</i>	<i>Dinophyceae</i>
<i>Lithodesmium undulatum</i>	<i>Lithodesmium undulatum</i>	<i>Dinophyceae</i>
<i>Protoperidinium</i>	<i>Protoperidinium</i>	<i>Dinophyceae</i>
<i>Eutreptiella</i>	<i>Eutreptiella</i>	<i>Eutreptiaceae</i>
<i>Phaeocystis</i>	<i>Phaeocystis</i>	<i>Prymnesiophyceae</i>

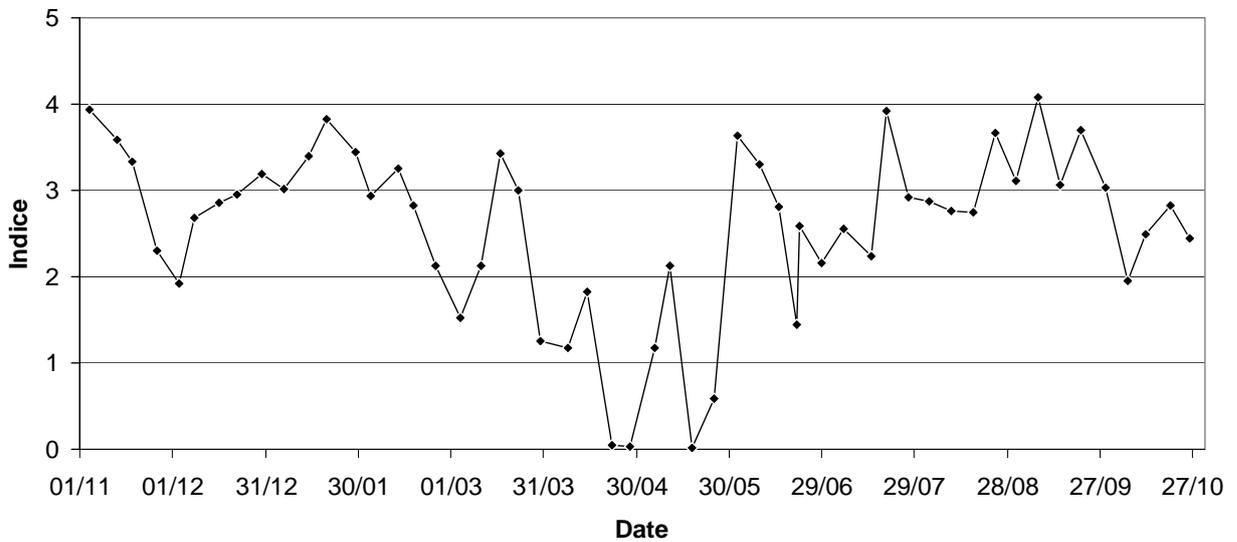


Figure 4.4 Évolution de l'indice de Shannon au point *prise* au cours de la période novembre 2008 - octobre 2009

4.5. Campagnes pélagiques

Les campagnes pélagiques permettent de mettre en évidence un impact éventuel de la centrale sur le milieu par la comparaison de 4 points de prélèvement (*prise*, *rejet*, *contrôle* et *référence*) diversement concernés par les rejets d'eau chaude de la centrale. Les campagnes de 2009 ont eu lieu les 25 mai et 29 septembre.

Pour les points *prise* et *rejet*, les prélèvements ne concernaient que la sub-surface alors qu'ils ont été réalisés au fond et en surface pour le point *contrôle* et au fond, à mi-profondeur et en surface pour le point *référence*.

4.5.1. Chlorophylle *a* et phéopigments

Lors de la campagne du 25 mai, la concentration en chlorophylle *a* au point *rejet* était inférieure à celle du point *prise* ($\Delta = - 3,94 \text{ mg/m}^3$) (Figure 4.5. et annexe 2). Les concentrations les plus fortes ont été observées au point *contrôle*. La différence de concentration entre le fond et la surface pour les points *contrôle* et *référence* était importante (respectivement, $\Delta_c = 3,92 \text{ mg/m}^3$ et $\Delta_{ref} = 3,4 \text{ mg/m}^3$) ; les concentrations les plus fortes étant celles du fond.

Lors de la campagne du 29 septembre, le schéma d'évolution de la concentration en chlorophylle *a* n'était pas conforme aux observations habituelles (Figure 4.5. et annexe 2). En effet, la concentration au point *rejet* était supérieure à celle du point *prise* ($\Delta = + 2,57 \text{ mg/m}^3$). Le laps de temps entre le prélèvement au point *prise* (7h50, proche de l'étalement de basse mer) et au point *rejet* (8h50, plus proche de la pleine mer) peut expliquer ce schéma (hétérogénéité spatiale de la composition du phytoplancton contrôlée par l'hydrodynamisme). Les différences fond - surface pour les points *contrôle* et *référence* étaient faibles.

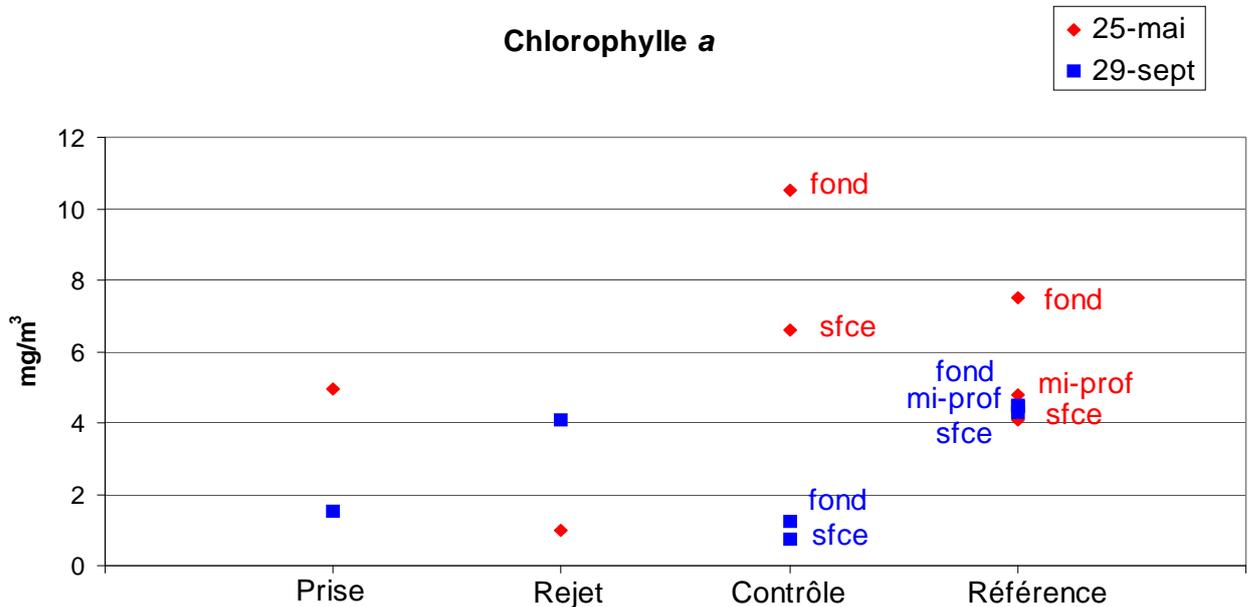


Figure 4.5 Évolution spatiale de la concentration en chlorophylle a (mg/m^3) lors des campagnes pélagiques

L'évolution du pourcentage de chlorophylle active était conforme au schéma habituel (Figure 4.6. et annexe 3). Ce pourcentage était supérieur au printemps quel que soit le point considéré. La différence entre la *prise* et le *rejet* était nettement plus marquée au printemps ($\Delta = - 26,2 \%$) qu'à l'automne ($\Delta = - 4,9 \%$). Les valeurs étaient légèrement plus importantes aux points *contrôle* et *référence* par rapport aux autres points. Les différences fond – surface étaient relativement faibles pour ces points (de l'ordre de 10 à 15 %).

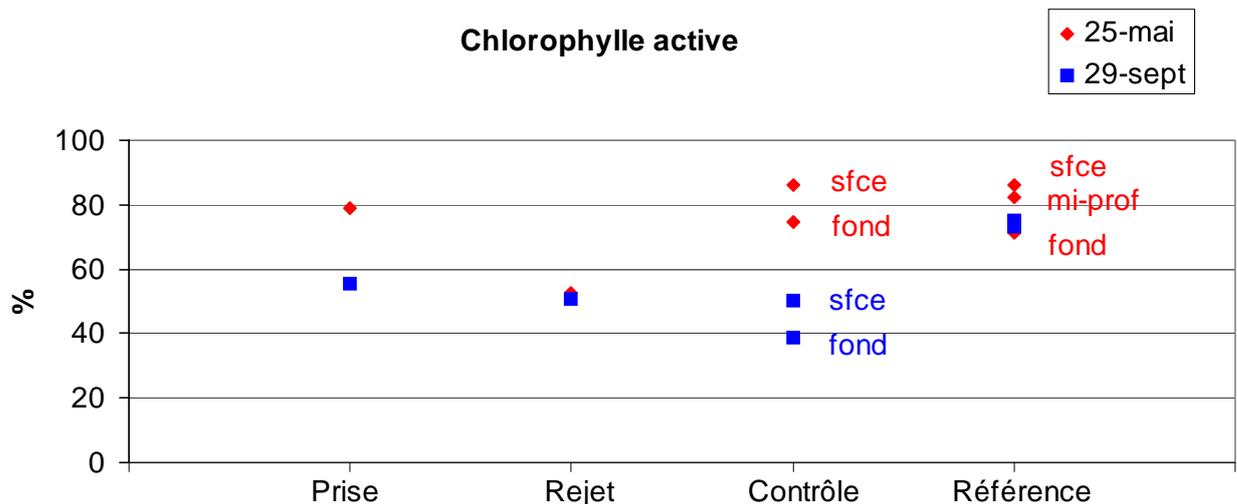


Figure 4.6 Évolution spatiale du pourcentage de chlorophylle active lors des campagnes pélagiques 2009

4.5.2. Phytoplankton

Les échantillons prélevés lors des campagnes de mai et de septembre contenaient, respectivement, entre 12 et 23, et entre 16 et 36 taxons (Tableau 4.2). La campagne printanière s'est déroulée après l'efflorescence de *Phaeocystis globosa* qui domine alors l'écosystème au détriment des diatomées.

Tableau 4.2 Évolution spatiale du nombre total d'espèces phytoplanctoniques en surface lors des campagnes pélagiques du 25 mai et du 29 septembre 2009.

Campagnes	Points			
	<i>Prise</i>	<i>Rejet</i>	<i>Contrôle</i>	<i>Référence</i>
25 mai 2009	20	12	23	22
29 septembre 2009	21	16	22	36

Les diatomées dominaient la communauté phytoplanctonique quel que soit le point considéré lors de ces campagnes (Tableau 4.3). Par ailleurs, cette communauté était également composée de dinoflagellés, de cryptophycées, de prymnésiofycées et de ciliés en moindre abondance (Tableau 4.3). Les autres classes couramment observées sur le site (Chlorophycées, Chrysophycées, Dictyochophycées, Prasinophycées) étaient absentes lors de ces campagnes 2009.

Tableau 4.3 Répartition par classe des abondances phytoplanctoniques (cellules par litre) observées lors des campagnes pélagiques du 25 mai et du 29 septembre 2009 (- : données non disponibles)

date	points	Chlorophycées	Cryptophycées	Diatomées	Dinoflagellés	Prymnésiophycées	Ciliés	Total
25/05	<i>Prise surface</i>		7893	677013	8870		200	693976
25/05	<i>Canal de rejet surface</i>			118718	2631		100	121449
25/05	<i>Contrôle surface</i>		7016	558892	7816		100	573824
25/05	<i>Contrôle fond</i>		6139	1445456	10824		877	1463296
25/05	<i>Référence surface</i>		10524	657042	12678	46278		726522
25/05	<i>Référence mi-profondeur</i>	-	-	-	-	-	-	-
25/05	<i>Référence fond</i>		1754	784061	6239			792054
29/09	<i>Prise surface</i>	100	3500	14400	1000			19000
29/09	<i>Canal de rejet surface</i>			3500	800			4300
29/09	<i>Contrôle surface</i>			61036	1077			62113
29/09	<i>Contrôle fond</i>	-	-	-	-	-	-	-
29/09	<i>Référence surface</i>		12278	231327	14032		100	257737
29/09	<i>Référence mi-profondeur</i>		7016	2314226	7893			2329135
29/09	<i>Référence fond</i>	-	-	-	-	-	-	-

Les taxons contribuant significativement (plusieurs milliers de cellules par litre) à l'abondance totale lors des campagnes pélagiques du 25 mai et du 29 septembre 2009 sont présentés dans le tableau 4.4. La planche I présente 3 taxons régulièrement échantillonnés sur le site.

Tableau 4.4 Taxons présentant les plus fortes abondances relatives (seuils arbitraires et liste par ordre décroissant d'abondance) lors des campagnes pélagiques du 25 mai et du 29 septembre 2009 (pour comparaison qualitative uniquement).

Points / date	25 mai 2009	29 septembre 2009
Prise	<i>Guinardia delicatula</i> , <i>Chaetoceros sp.</i> , Cryptophycées, <i>Protoberidinium sp.</i>	<i>Leptocylindrus minimus</i> , Cryptophycées
Rejet	<i>Guinardia delicatula</i> , <i>Chaetoceros sp.</i>	Pas de taxons dominants
Contrôle surface	<i>Guinardia delicatula</i> , <i>Paralia sulcata</i> , <i>Chaetoceros sp.</i> , <i>Chaetoceros curvisetus</i>	<i>Chaetoceros sp.</i> , <i>Lithodesmium undulatum</i> , <i>Plagiogramma sp.</i> , <i>Paralia sulcata</i>
Contrôle fond	<i>Guinardia delicatula</i> , <i>Paralia sulcata</i> , <i>Asterionellopsis glacialis</i>	Données non disponibles
Référence surface	<i>Guinardia delicatula</i> , <i>Phaeocystis globosa</i> , <i>Chaetoceros sp.</i>	<i>Chaetoceros curvisetus</i> , <i>Chaetoceros sp.</i> , <i>Skeletonema costatum</i> , Cryptophycées
Référence mi-profondeur	Données non disponibles	<i>Guinardia delicatula</i> , <i>Chaetoceros sp.</i> , <i>Leptocylindrus</i>
Référence fond	<i>Guinardia delicatula</i> , <i>Paralia sulcata</i>	Données non disponibles

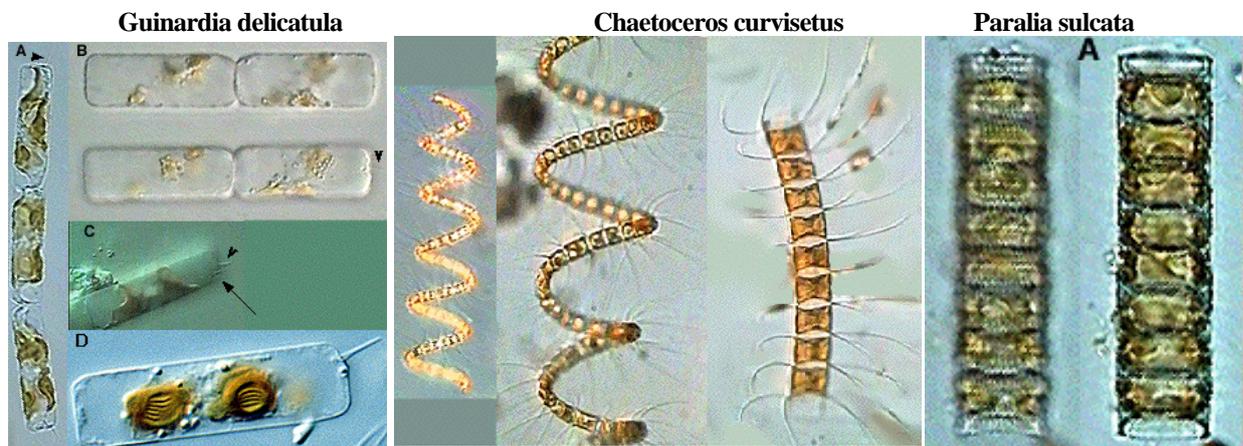


Photo 4.1 Observation microscopique de quelques taxons dominants les échantillons lors des campagnes pélagiques 2009 (Source : <http://www.smhi.se>)

4.6. Dynamique de développement du phytoplancton à méso-échelle

Afin d'appréhender la dynamique des efflorescences phytoplanctoniques à une échelle moins régionale, un certain nombre d'images satellites ont été extraites de l'interface web Ifremer NAUSICAA (NAvigating throUgh Satellite and In situ data over loCAL Areas). Ces images correspondent à une représentation de l'estimation de la concentration en chlorophylle *a* à partir de paramètres optiques acquis par le capteur MODIS (Gohin *et al.*, 2002¹ ; Gohin *et al.*, 2008²).

Il apparaît ainsi qu'une initiation du bloom printanier en baie sud de la mer du Nord et le long des côtes anglaises pouvait être observée de mars à avril (Figure 4.7). Le développement phytoplanctonique s'est poursuivi ensuite le long des côtes françaises de la Manche orientale (mai) puis en baie de Seine (juin). Au mois d'août, la biomasse phytoplanctonique était encore importante en baie de Seine. Au mois de septembre, elle était faible sur l'ensemble de la zone étudiée.

4.7. Éléments de conclusion

Le suivi hebdomadaire au point *prise* met en évidence la conformité de l'évolution de la concentration en chlorophylle *a*, et en phéopigments ainsi que de l'évolution de l'abondance phytoplanctonique par rapport à la connaissance acquise sur le site depuis 1973. La période de surveillance 2008-2009 a été caractérisée par un bloom printanier précoce. La concentration en chlorophylle *a* était en effet importante dès le mois de février et était supérieure à la médiane 2005-2009. La concentration en chlorophylle *a* était maximale au début du mois de mars (32,45 mg/m³). Elle était plus faible ensuite, généralement inférieure à la médiane 2005-2009. Le pourcentage de chlorophylle active, maximum lors du printemps, était conforme aux observations précédentes.

Après une augmentation régulière de l'abondance phytoplanctonique totale entre 2005 et 2008, principalement liée au développement de la prymnésiofycée *Phaeocystis globosa*, l'abondance était moindre en 2009. Elle atteignait cependant plus de $27 \cdot 10^6$ cellules par litre à la fin du mois d'avril. Cette valeur était le résultat de la prolifération de *Phaeocystis globosa*, présente de mars à mai, mais donc l'abondance était maximale à la fin du mois d'avril 2009. En dehors de cette période, les diatomées représentaient l'essentielle de la biomasse phytoplanctonique.

Lors des campagnes pélagiques, la richesse spécifique phytoplanctonique était inférieure au point *rejet*. Toutefois, au point *contrôle* la richesse spécifique était équivalente à celle du point *prise* ce qui indique que l'influence du panache thermique de rejet de la centrale a une étendue géographique très limitée.

¹ Gohin F., Druon J.N. & L. Lampert, 2002. A five channel chlorophyll algorithm applied to SeaWIFS data processed by SeaDAS in coastal waters. International Journal of Remote Sensing, 23: 1639-1661

² Gohin F., Saulquin B., Oger-Jeanneret H., Lozac'h L., Lampert L., Lefebvre A., Riou P. and F. Bruchon, 2008. Using satellite-derived chlorophyll concentrations for monitoring the eutrophication risk of coastal waters. Remote Sensing of Environment, 112: 3329-3340.

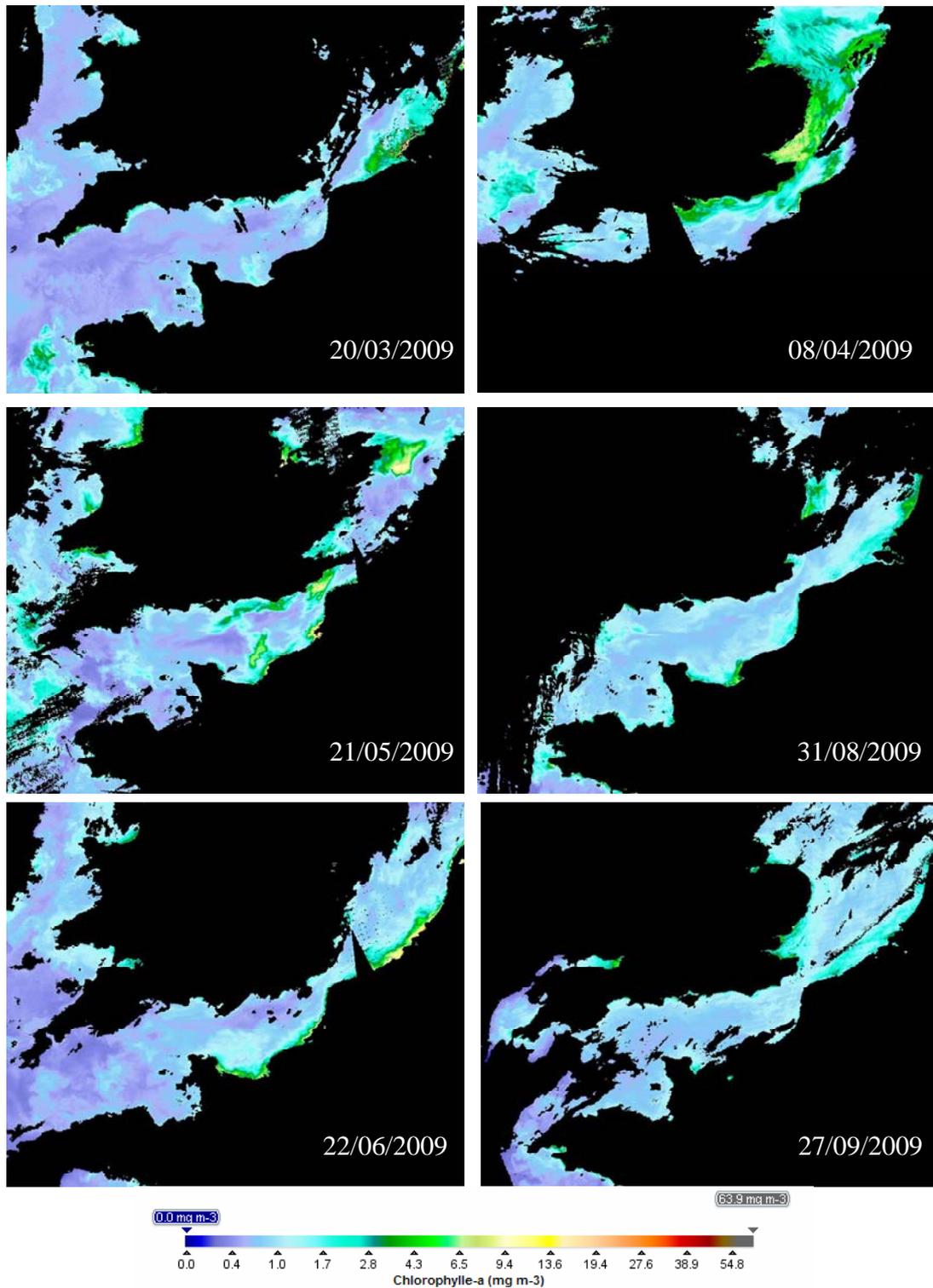


Figure 4.7 Illustration à méso-échelle de la dynamique de développement phytoplanctonique via l'estimation de la concentration en chlorophylle *a* par le capteur MODIS (algorithme OC5 IFR)
(Masque noir : terre ou couverture nuageuse)

ANNEXE 1 : Surveillance hebdomadaire au point *prise* : concentrations en chlorophylle *a* (mg/m³) et en phéopigment (mg/m³), pourcentages de chlorophylle active, indices de Shannon (*les résultats des 3 premières colonnes sont acquis sur un échantillon différent de celui nécessaire au calcul du résultat de l'indice de Shannon*).

Date	Chlorophylle <i>a</i>	Phéopigment	Chlorophylle active	Shannon
04/11/08	2,79	0,97	65,09	3,93
13/11/08	3,59	1,08	70,00	3,59
18/11/08	4,75	1,11	76,67	3,33
26/11/08	7,09	0,21	97,06	2,30
03/12/08	3,73	0,86	76,95	1,93
08/12/08	1,79	0,67	62,66	2,69
16/12/08	2,04	0,79	61,46	2,85
22/12/08	1,92	0,63	67,41	2,96
30/12/08	1,51	0,41	72,73	3,19
06/01/09	2,83	0,83	70,64	3,02
14/01/09	2,48	0,82	67,06	3,39
20/01/09	3,40	0,71	78,97	3,83
29/01/09	4,31	0,77	82,14	3,45
03/02/09	6,81	0,65	90,41	2,94
12/02/09	8,10	1,43	82,30	3,26
17/02/09	7,94	0,51	93,55	2,83
24/02/09	19,64	1,10	94,37	2,13
04/03/09	32,45	0,79	97,58	1,52
11/03/09	22,35	3,13	85,99	2,13
17/03/09	9,59	1,18	87,72	3,43
23/03/09	4,90	0,59	87,91	3,00
30/03/09	12,05	1,22	89,87	1,25
08/04/09	12,45	1,69	86,45	1,17
14/04/09	2,82	1,30	54,07	1,82
22/04/09	16,30	2,18	86,61	0,05
28/04/09	17,61	0,98	94,45	0,04
06/05/09	4,90	0,75	84,75	1,18
11/05/09	13,91	3,40	75,54	2,13
18/05/09	5,65	1,17	79,28	0,02
25/05/09	7,72	1,47	80,91	0,59
02/06/09	5,27	0,74	85,96	3,63
08/06/09	6,06	1,99	67,21	3,30
15/06/09	2,54	0,71	72,13	2,81
22/06/09	5,69	1,33	76,62	2,59
29/06/09	0,98	0,36	63,28	2,16
06/07/09	4,94	0,65	86,78	2,55
15/07/09	5,21	0,59	88,72	2,24
20/07/09	2,69	0,94	65,17	3,93
27/07/09	3,44	1,40	59,36	2,91
03/08/09	2,33	0,86	63,12	2,88
10/08/09	11,77	0,87	92,60	2,77
17/08/09	2,57	1,32	48,58	2,74
24/08/09	3,39	1,33	60,78	3,66

31/08/09	2,70	0,72	73,35	3,11
07/09/09	2,45	0,94	61,73	4,08
14/09/09	2,42	0,62	74,53	3,06
21/09/09	4,22	1,42	66,27	3,69
29/09/09	2,84	0,85	70,02	3,04
06/10/09	3,50	1,56	55,28	1,95
12/10/09	3,31	1,48	55,28	2,49
20/10/09	7,34	3,29	55,24	2,83
26/10/09	1,93	0,74	61,85	2,45

ANNEXE 2 : Variabilité spatiale de la biomasse chlorophyllienne (mg/m³)

Points	Concentrations moyennes en chlorophylle <i>a</i> (mg/m ³)	
	25 mai 2009	29 septembre 2009
<i>Prise</i>	4,95	1,52
<i>Rejet</i>	1,01	4,09
<i>Contrôle surface</i>	6,61	0,73
<i>Contrôle fond</i>	10,53	1,23
<i>Référence surface</i>	4,09	4,30
<i>Référence milieu</i>	4,77	4,47
<i>Référence fond</i>	7,49	4,49

ANNEXE 3 : Variabilité spatiale de la concentration en phéopigments (mg/m³) et de la chlorophylle active (%)

Points	Concentrations en phéopigments (mg/m ³) – chlorophylle active (%)	
	25 mai 2009	29 septembre 2009
<i>Prise</i>	1,33 – 78,8	1,21 – 55,7
<i>Rejet</i>	0,91 – 52,6	3,97 – 50,7
<i>Contrôle surface</i>	1,07 – 86,1	0,72 – 50,3
<i>Contrôle fond</i>	3,60 – 74,5	1,96 – 38,6
<i>Référence surface</i>	0,65 – 86,3	1,48 – 74,4
<i>Référence milieu</i>	1,01 – 82,5	1,49 – 75,0
<i>Référence fond</i>	3,02 – 71,3	1,64 – 73,2

5. DINOFLAGELLÉS NOCTILUQUES ET ZOOPLANCTON

Auteur : Elvire Antajan

Collaborateurs : Blondel C., Caboche J., Duquesne V., Philippon X., Vérin F., Warembourg C.

Ce chapitre présente l'évolution du zooplancton, maillon de la chaîne alimentaire qui intègre les développements phytoplanctoniques, eux-mêmes dépendants des nutriments disponibles dans l'eau de mer et soumis aux conditions météorologiques.

5.1. Méthodologie

5.1.1. Stratégie de prélèvements du zooplancton

Deux campagnes annuelles sont réalisées pour le suivi de l'impact du rejet de la centrale par la comparaison des prélèvements selon un axe côte-large. En 2009 elles ont été réalisées le 25 mai pour la mission printanière et le 29 septembre pour la mission automnale. Lors de chaque mission quatre points sont étudiés :

- Le point *Prise* (situé à l'entrée du canal d'amenée de la centrale) ;
- Le point *rejet* (situé dans la partie amont du canal de rejet sur le radeau de pompage) ;
- Le point *contrôle* (situé au large du rejet) ;
- Le point *référence* (situé au large, au-delà de la zone d'influence de la centrale).

En complément, les variations saisonnières du zooplancton dans le milieu naturel (non impacté) sont estimées par une surveillance mensuelle au point *prise*. Les résultats obtenus peuvent être comparés aux données de concentration de chlorophylle *a* et de température mesurées au même point selon une fréquence hebdomadaire. Cette surveillance permet de suivre l'évolution du plancton en relation avec les conditions météorologiques et de situer les deux campagnes de prélèvements annuelles par rapport au cycle saisonnier de l'écosystème.

5.1.2. Prélèvements du zooplancton

Les échantillons zooplanctoniques sont collectés à l'aide d'un filet à plancton de type WP2 (ouverture 0,25 m², hauteur 261 cm, cylindro-conique, vide de maille 200 µm – Tranter 1968¹).

- Pour les prélèvements en mer aux points *contrôle* et *référence* le filet est descendu jusqu'à environ trois mètres au dessus du fond puis est ramené à la surface à une vitesse de 1 m·s⁻¹.
- Pour les prélèvements à terre aux points *prise* (depuis le pont enjambant le canal d'amenée) et *rejet* (depuis le radeau amarré au canal de rejet), le filet est maintenu à un mètre sous la surface en raison du courant et des remous qui homogénéisent la colonne d'eau.

Un volucompteur est attaché à l'entrée du filet WP2 afin de connaître précisément le volume d'eau filtré. Pour chaque point de prélèvement deux traits de filet à plancton sont effectués. L'un des deux échantillons collectés sera filtré au laboratoire sur des soies pré-pesées de 100 µm de vide de maille, puis congelées afin d'évaluer la biomasse sestonique (mesure du poids sec et composition en carbone et azote). Le deuxième échantillon est immédiatement formolé en vue du dénombrement et de l'identification des espèces animales.

¹ Tranter, D. J., and P. E. Smith. 1968. Filtration performance. In *Reviews on zooplankton sampling methods, Part I* (D. J. Tranter, ed.), p. 27-56. Monogr. Oceanogr. Methodol. 2, Zooplankton Sampling. UNESCO (United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization) Press, Paris.

5.1.3. Mesure de la biomasse sestonique

Pour la mesure de la biomasse sestonique, les soies congelés sont mises à l'étuve à 60 °C pendant 48 heures. Les soies comportant le plancton séché sont alors pesées et les poids secs, ou biomasses du seston, déduits. Le poids sec récolté et le volume filtré permettent d'évaluer le poids sec (mg) par unité de volume (m^3).

Les échantillons de poids sec sont par la suite broyés pour être analysés au CHN LECO pour les dosages de carbone (C) et d'azote (N). L'expression des résultats est obtenue en poids carbone (mg C) ou d'azote (mg N) par unité de volume (m^3).

5.1.4. Analyse taxinomique

Les prélèvements zooplanctoniques destinés au dénombrement des espèces animales sont rincés sur un tamis de 200 μm afin d'éliminer le formol et les particules les plus fines qui gênent le comptage du zooplancton. En fonction de la concentration de l'échantillon celui-ci est fractionné en sous-échantillons à la boîte de Motoda (Motoda 1983¹). Le sous-échantillon est alors placé dans une cuve de Dolffus et dénombré dans sa totalité à la loupe binoculaire (grossissement maximum X 80) en éclairage diascopique. Le dénombrement s'arrête lorsque une classe de tri (*Temora longicornis* : femelle, mâle ou copépodite ; *Oikopleura dioica* ; nauplii de cirripèdes....) atteint un minimum de 100 individus. D'après Frontier (1972)² l'erreur relative sur l'estimation du nombre total d'individus est de $\pm 30\%$. Le nombre d'individus comptés est ensuite ramené au volume total de l'échantillon ($ind. \cdot m^{-3}$).

La bibliographie utilisée pour l'identification des zooplanctontes est très variée et inclue notamment : les fiches d'identification du plancton CIEM – (1939-1986), un manuel d'identification du zooplancton côtier (Todd *et al.*, 1996³), et des clés de détermination pour des groupes spécifiques tels que les copépodes pélagiques (Rose, 1933⁴) ou les larves de décapodes (Martin, 2001⁵) par exemple.

5.2. Surveillance au canal d'aménée

5.2.1. Biomasse sestonique

On appelle seston, l'ensemble des particules en suspension dans l'eau qu'elles soient d'origine minérales ou organiques. Dans les eaux du large ou dans des milieux oligotrophes, peu turbides, le seston récolté avec un filet à plancton est essentiellement constitué de zooplancton et sa biomasse peut donc être assimilée à celle du zooplancton. Par contre dans les eaux côtières, souvent peu profondes (< 40 m), avec un fort hydrodynamisme le seston comprend également une part non négligeable de sables, vases, débris végétaux, etc. dû à la remise en suspension des sédiments dans la colonne d'eau. Dans ce cas il est difficile d'attribuer la biomasse sestonique à celle du zooplancton.

¹ Motoda S (1959). Devices of simple plankton apparatus. Memoirs. Faculty of Fisheries. Hokkaido University 7, 73-94.

² Frontier (1972) Calcul de l'erreur sur un comptage de zooplancton. J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 8, pp. 121-132.

³ Todd CD, Laverrack MS, Boxshall GA (1996) Coastal marine zooplankton – a practical manual for students. Cambridge University Press, pp. 106.

⁴ Rose M. (1933) Faune de France, 26. Copépodes pélagiques. Ed. Lechevalier, Paris, pp. 374 .

⁵ Martin J (2001) Les larves des crustacés décapodes des côtes françaises de la Manche. IFREMER, France, pp. 175.

En 2009, la biomasse sestonique était très importante au printemps avec un maximum de $351,7 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ fin avril pendant le bloom de *Phaeocystis globosa* (figure 5.1). La biomasse est restée élevée en mai ($> 100 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$) avant de diminuer fortement au début de l'été et atteindre un minimum de $13,8 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ fin septembre.

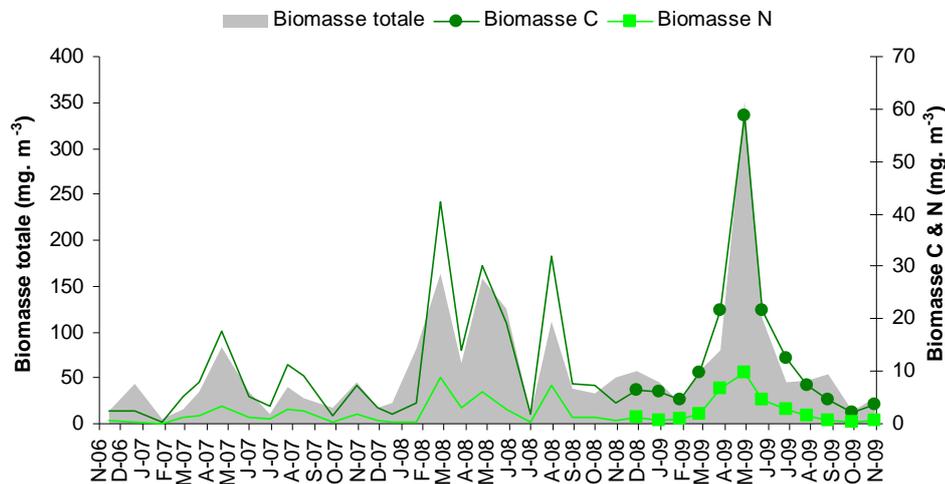


Figure 5.1 : Évolution mensuelle de la biomasse sestonique (poids sec, poids C et poids N) entre novembre 2006 et octobre 2009

La relation entre biomasse sestonique et abondance zooplanctonique n'est pas toujours directe (cf. figure 5.3) et cela se confirme lorsque l'on considère les rapports C/N des échantillons filtrés de seston (figure 5.2). Ces rapports C/N ont fluctué entre 3,2 et 8,4 en 2009. Le rapport C/N peut habituellement caractériser un compartiment tel que le zooplancton (rapport C/N ~ 4 ; Mauchline, 1998)¹ ou le phytoplancton (C/N > 5).

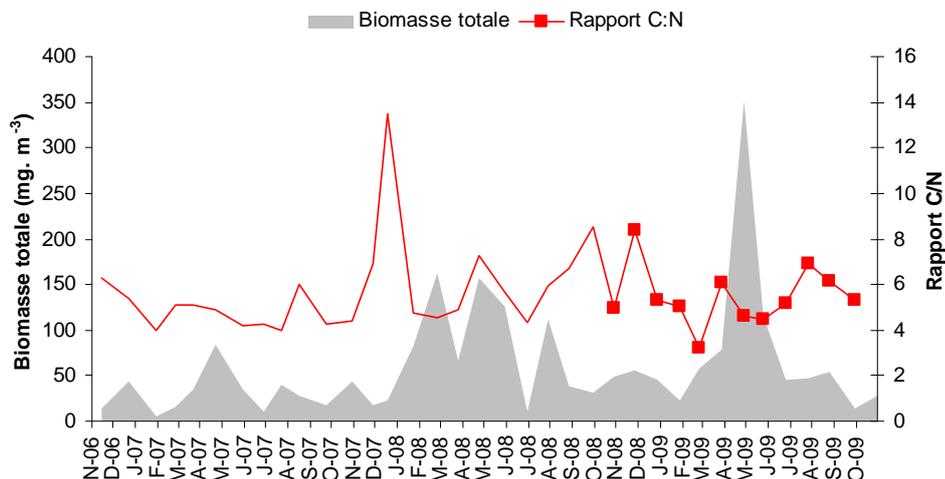


Figure 5.2 : Évolution mensuelle du rapport C/N du seston entre novembre 2006 et octobre 2009

La forte remise en suspension des sédiments sur le site (sable, débris coquilliers, fragments d'algues,...) du fait de la faible profondeur et du courant important à l'entrée du canal, ou bien la prolifération d'algue comme *Phaeocystis globosa* (fin avril), ont contribué à ce que le rapport C/N

¹ Mauchline, J. (1998). The biology of calanoid copepods. *Advances in Marine Biology* 33: 1-710

mesurait au point *prise* en 2009 soit souvent > 6 . Il semble donc difficile d'utiliser, sur le site de Gravelines, la biomasse sestonique comme une approximation de la biomasse zooplanctonique.

5.2.2. Abondance et composition du zooplancton

Les dénombrements zooplanctoniques totaux effectués en 2009 sont présentés sur la figure 5.3 avec ceux des deux années précédentes, et sont exprimés en nombre d'individus par m^3 d'eau de mer. Les plus faibles abondances ont été observées en automne 2009 ($< 300 \text{ ind.}\cdot\text{m}^{-3}$). Deux pics d'abondance des zooplanctontes ont été observés en avril et juin (respectivement, $10\,695 \text{ ind.}\cdot\text{m}^{-3}$ et $3\,567 \text{ ind.}\cdot\text{m}^{-3}$).

La forte augmentation des abondances par rapport à 2007 est la conséquence du changement de filet à plancton utilisé pour les prélèvements réguliers au point *prise*. Le petit filet qui était utilisé auparavant à terre avait une plus petite ouverture et une forme conique qui le rendaient plus sensible aux effets de colmatage et de reflux, surtout au printemps et en été quand les algues (*Phaeocystis globosa*, *Coscinodiscus* sp...) ou les noctiluques prolifèrent. Le filet WP2, déjà utilisé lors des campagnes à la mer, avec sa plus large ouverture et sa forme cylindro-conique permet d'éviter le reflux dans le filet et est alors mieux adapté pour capturer efficacement le zooplancton d'un point de vue quantitatif.

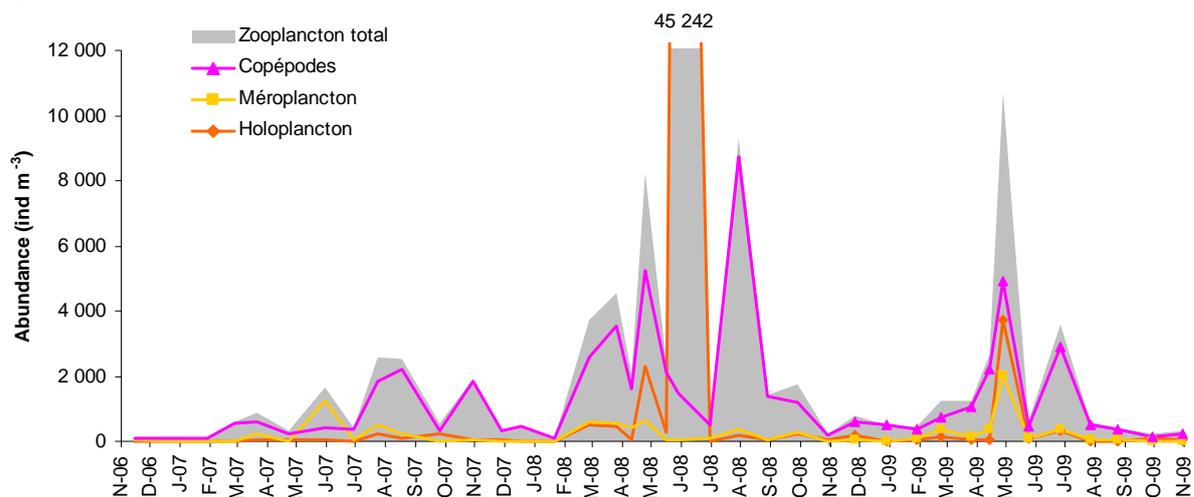


Figure 5.3 : Évolution de l'abondance du zooplancton et de ses fractions holo- et méroplanctonique au point *prise* entre novembre 2006 et octobre 2009

Les abondances zooplanctoniques ont coïncidé avec les proliférations phytoplanctoniques printanières (avec un décalage de 15 jours à un mois, temps nécessaire à l'intégration de la production primaire par le zooplancton), comme l'indique l'évolution de la concentration en chlorophylle *a* au point *prise* au cours de la même période d'étude (figure 5.4). La prolifération de *Phaeocystis globosa* fin avril, semble avoir affecté au mois de mai l'abondance du zooplancton total qui avait bien profité de la forte prolifération des petites diatomées formant des chaînes (*Guinardia delicatula*, *Chaetoceros* spp.) de mars.

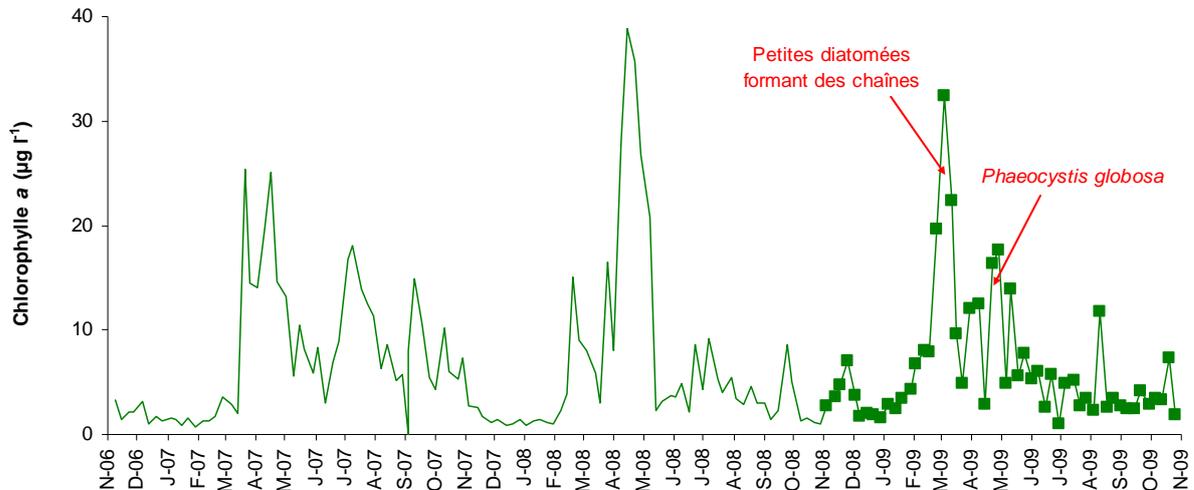


Figure 5.4 : Évolution de la concentration en chlorophylle a au point prise entre novembre 2006 et octobre 2009

Un certain nombre d'espèces accomplisse l'intégralité de leur cycle biologique (œufs, larves, adultes) au sein du milieu pélagique ; ce sont les espèces holoplanctoniques. En 2009, l'holoplancton représentait généralement plus de 70 % du zooplancton total (Figure 5.5). Cette fraction était essentiellement composée de crustacés copépodes (46 à 96 %). Selon la saison, s'y ajoutent quelques espèces moins abondantes, appartenant à d'autres embranchements comme les appendiculaires et les chaetognathes. D'autres organismes holoplanctoniques comme les cténaïres, les cladocères et les mysidacés ont été très peu présents cette année (tableau 5.1).

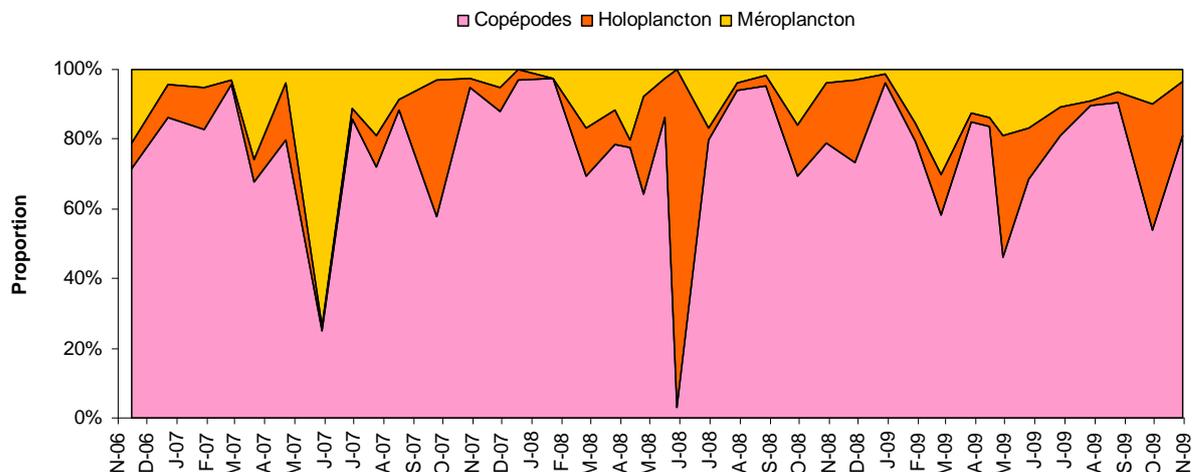


Figure 5.5 : Proportion de copépodes, d'holoplancton et de méroplancton dans le zooplancton total au point prise entre novembre 2006 et octobre 2009

Par opposition à l'holoplancton, le méroplancton constitue la fraction temporaire du zooplancton. Il regroupe les organismes dont seule une partie du cycle vital est planctonique. Il s'agit principalement de larves à vie pélagique émises par de nombreuses espèces à phase adulte benthique errante (crabes, annélides...) ou fixée : annélides, mollusques (moules...) et crustacés cirripèdes (balanes...), nombreux sur l'estran rocheux. Le méroplancton est aussi constitué de phases pélagiques d'espèces fixées (méduses, qui représentent les phases sexuées libres de cnidaires), ou bien des œufs et larves de poissons qui ne peuvent encore lutter contre les courants. Il

est donc de fait plus abondant au printemps, pendant les périodes de reproduction des espèces benthiques (figure 5.5 et tableau 5.1).

Tableau 5.1 : Abondance et dominance des principaux groupes zooplanctoniques au point prise au cours de la période de surveillance 2008-2009

	27/11/2008		29/12/2008		29/01/2009		24/02/2009		27/03/2009		14/04/2009		28/04/2009		25/05/2009		26/06/2009		27/07/2009		25/08/2009		29/09/2009		30/10/2009			
	ind. m ⁻³	%																										
HOLOPLANCTON																												
Noctiluques	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	2430	28	25	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cténaires	1	0	1	0	3	1	0	0	0	0	11	0	60	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cladocères	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	13	1	0	0	3	1	19	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nauplii (copépodes)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0
Copépodes	586	75	505	97	358	94	729	84	1039	97	2216	97	4933	57	452	83	2886	90	527	99	364	97	119	60	119	60	242	84
Ostracodes	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mysidacés	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	7	6	2
Appendiculaires	131	17	10	2	13	3	139	16	29	3	39	2	1242	14	65	12	271	8	6	1	6	2	13	6	13	6	19	7
Chaetognathes	59	8	3	0	7	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	0	0	0	0	0	5	1	53	27	20	7
Holoplancton total	777	97	519	99	381	84	872	70	1068	87	2284	86	8665	81	548	83	3189	89	534	91	377	94	199	90	199	90	288	96
MEROPLANCTON																												
Cnidaires	0	0	0	0	0	0	0	0	6	4	2	1	24	1	7	6	0	0	2	3	0	2	3	14	3	14	2	22
Annélides	7	29	2	29	8	12	28	7	53	35	87	24	400	20	23	21	23	6	1	2	2	7	6	28	2	17		
Mollusques	1	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	78	4	2	2	23	6	2	3	2	9	4	17	4	17	1	8
Bryozoaires	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	221	11	3	3	0	0	0	0	4	15	0	0	0	0	0	3
Cirripèdes	9	38	2	35	59	84	344	91	91	59	244	67	1242	61	36	32	268	71	12	23	12	46	0	0	4	39		
Isopodes	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	3	0	0	0	0
Amphipodes	1	5	1	18	2	2	1	0	2	1	0	0	6	0	3	3	19	5	2	3	1	4	1	3	1	6		
Cumacés	1	5	1	12	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Décapodes	1	5	0	0	0	0	1	0	0	0	4	1	24	1	8	7	35	9	33	63	4	17	7	34	1	6		
Echinodermes	2	10	0	0	1	1	0	0	0	0	7	2	12	1	27	24	6	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Téléostéens	1	5	0	0	0	0	4	1	2	1	13	4	24	1	2	2	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Méropplancton total	24	3	6	1	70	16	379	30	154	13	366	14	2030	19	112	17	377	11	53	9	26	6	21	10	21	10	11	4
Zooplancton total	801		525		451		1251		1222		2650		10695		659		3567		588		403		220		299		299	

5.2.2.1. L'holoplancton

Les copépodes

Les copépodes, qui constituaient le taxon dominant de l'holoplancton, ont montré la même évolution saisonnière que celui-ci (figure 5.6). Les plus faibles abondances de copépodes ont été observées en automne 2009 (< 250 ind.·m⁻³) et les plus fortes abondances en mars-avril et juin (2 000 à 5 000 ind.·m⁻³). La diminution de l'abondance des copépodites (stade larvaire) faisant suite à la prolifération de *Phaeocystis globosa* confirme bien le peu d'appétence des copépodes pour cette algue (Gasparini *et al.*, 2000¹ ; Nesjtgaard *et al.*, 2006²).

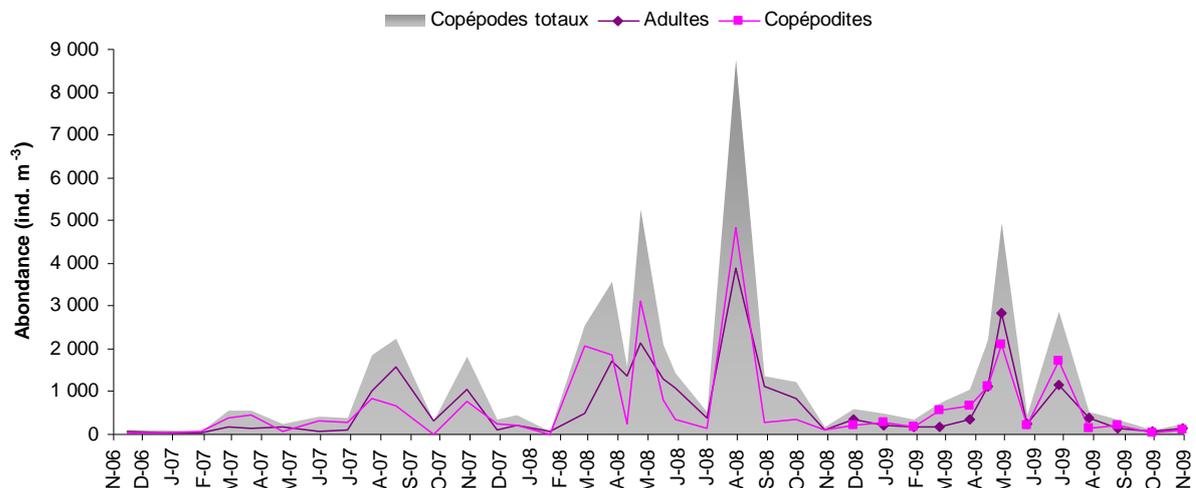


Figure 5.6 : Évolution de l'abondance des copépodes (adultes et copépodites) au point prise entre novembre 2006 et octobre 2009

¹ Gasparini S., Daro M.-H., Antajan E., Tackx M., Rousseau V., Parent J.-Y., Lancelot C. (2000). Mesozooplankton grazing during the *Phaeocystis globosa* bloom in the Southern Bight of the North Sea. *Journal of Sea Research* 43: 345-356.

² Nejstgaard J.C., Tang K.W., Steinke M., Dutz J., Koski M., Antajan E., Long J.D., 2007. Zooplankton grazing on *Phaeocystis*: a quantitative review and future challenges. *Biogeochemistry* 83: 147-172.

La prédominance des copépodes adultes par rapport aux copépodites est aussi liée à la succession des espèces au cours de l'année (figure 5.7).

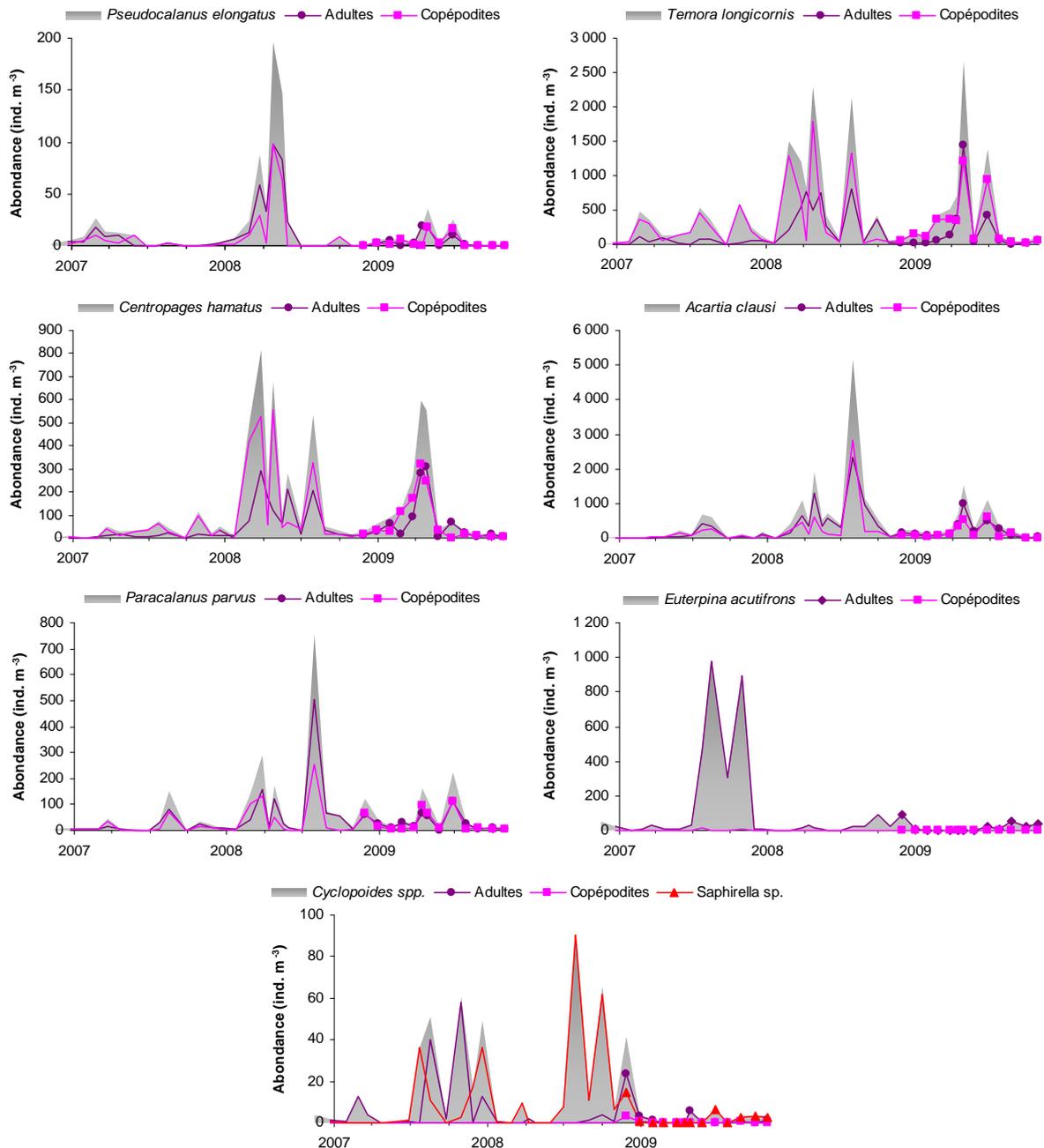


Figure 5.7 : Abondance (adultes et copépodites) des principales espèces de copépodes au point prise entre novembre 2006 et octobre 2009

A l'exception de *Temora longicornis* et *Centropages hamatus*, les abondances spécifiques des copépodes ont été plus faibles cette année qu'en 2008. De plus des espèces habituellement plus estivales comme *C. hamatus* et *Acartia clausi*, ont été cette année plus abondante au printemps (en avril surtout), qu'en juin ou juillet. *Paracalanus parvus*, était également moins abondant à la fin de l'été par rapport aux deux années précédentes. Ces espèces sont de taille moyenne et correspondent bien à la taille cible des organismes retenus par la maille des filets à plancton (200 à 2 000 μm). Les

trois derniers stades copépodites de ces espèces (qui en comptent 5) sont également d'une taille suffisante pour être correctement échantillonnés. Ce qui explique leur importance dans les échantillons.

A la fin de l'été et en automne, des espèces de plus petites tailles apparaissent dans les prélèvements. Il s'agit de diverses espèces de cyclopoïdes le plus souvent des stades copépodites C1 (67 à 100 %) de la forme *Saphirella* correspondant au stade larvaire pélagique d'individus dont les autres stades de développement sont parasites ou commensaux d'autres espèces d'invertébrés (annélides, bivalves et crustacés). Brylinski (2009)¹, a publié cette année une description détaillée de la forme présente sur les sites de Gravelines, de Penly et de Paluel. L'espèce automnale *Euterpina acutifrons* était bien présente mais en faible abondance également. Cette espèce est de plus petite taille que les autres espèces précédemment citées et à un mode de vie étroitement lié aux sédiments. En général seuls les adultes (surtout des femelles) sont collectés dans la colonne d'eau avec les filets à plancton, soit que les copépodites soient trop petits et passent à travers la maille du filet, soit qu'ils vivent trop près du fond pour être collectés.

Les autres espèces holoplanctoniques

En dehors des copépodes d'autres espèces holoplanctoniques ont présenté des abondances parfois importantes en 2009 (figure 5.8) :

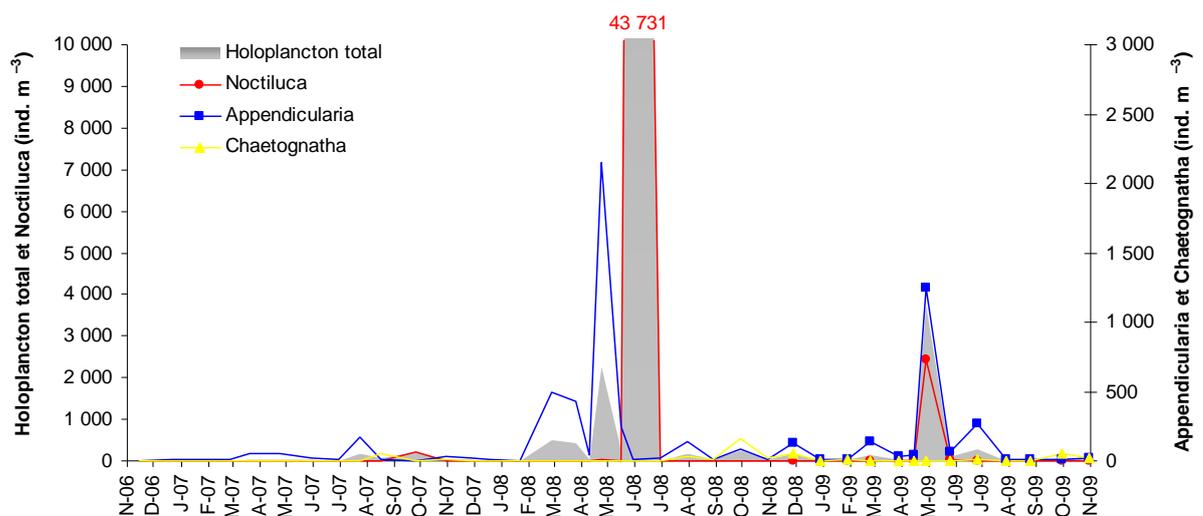


Figure 5.8 : Abondance de certaines espèces holoplanctoniques au point prise entre novembre 2006 et octobre 2009

Les **noctiluques** *Noctiluca scintillans* (dinoflagellés) ont été abondant fin avril (2 430 ind. \cdot m⁻³). Cette prolifération pourrait expliquer en partie la diminution au mois de mai (i) des copépodes adultes avec qui ils sont en compétition pour l'ingestion du phytoplancton, et (ii) des copépodites dont ils se nourrissent parfois ainsi que des œufs de copépodes, d'où une plus grande mortalité et moins de copépodites (photo 5.1).

¹ Brylinski J-M., 2009. The pelagic copepods in the Strait of Dover (Eastern English Channel). A commented inventory 120 years after Eugène Canu. Cah. Biol. Mar. 50 :251-260

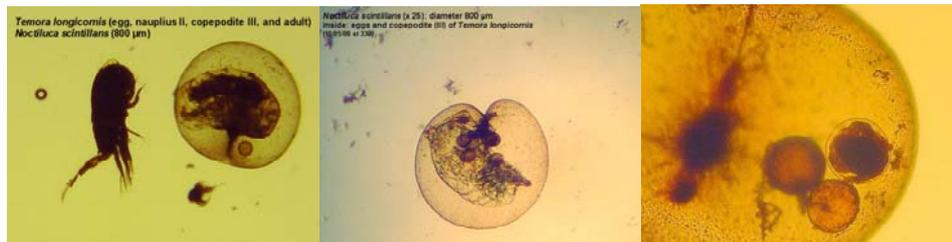


Photo 5.1 : Ingestion d'œufs, de nauplii et de copépodites par *Noctiluca scintillans*
(photos : Elvire Antajan)

Les **appendiculaires** (chordés) sont des organismes filtreurs, en partie phytophages. Leurs abondances dépendent des fluctuations du phytoplancton et de la température de l'eau. L'espèce *Oikopleura dioica* est favorisée par des peuplements phytoplanctoniques abondants et des températures tempérées. En 2009, un maximum de $1\,242 \text{ ind.}\cdot\text{m}^{-3}$ a été observé pendant le bloom de *Phaeocystis globosa* ce qui représentait 14 % de l'holoplancton. Fin septembre et octobre nous avons également quelques individus de *Fritillaria borealis* ($1 \text{ à } 4 \text{ ind.}\cdot\text{m}^{-3}$), un espèce généralement caractéristique d'eau plus froide venant du large (Acuña et al. 1995)¹.

Les **chætognathes** du genre *Parasagitta* sont carnivores et se nourrissent principalement aux dépens des stocks de copépodes. Leur population est plus abondante en automne ($20 \text{ à } 60 \text{ ind.}\cdot\text{m}^{-3}$; figure 5.8). Les individus récoltés dans nos échantillons sont généralement juvéniles, les rares adultes identifiés appartenaient à l'espèce *Parasagitta setosa*.

Cette année est marquée par l'identification le 24 septembre sur le site de Gravelines d'une nouvelle espèce de cténaire, *Mnemiopsis leidyi* ($0.9 \text{ ind.}\cdot\text{m}^{-3}$), espèce invasive originaire du Golf du Mexique (Photo 5.2). L'apparition de cette espèce dans les mers du nord de l'Europe (Mer Baltique, Kattegat, Skagerrak et Mer du Nord) est connue depuis 2006 (Faasse & Bayha 2006)², mais n'avait encore jamais été signalée sur les côtes de la région Nord-Pas de Calais. Cette espèce très vorace, se nourrit d'œufs et de larves de poisson ainsi que des petits crustacés zooplanctoniques (copépodes, larves de cirripèdes et de décapodes) et peut avoir des conséquences désastreuses sur la structure de l'écosystème pélagique.

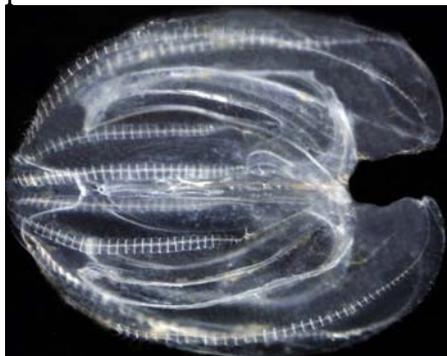


Photo 5.2 : Le cténaire *Mnemiopsis leidyi* (taille : 4 cm)
(photo : Karl Van Ginderdeuren)

¹ Acuña JL, Bedo AW, Harris RP, Anadon R 1995. The seasonal succession of appendicularians (Tunicata : Appendicularia) off Plymouth. J. mar. biol. Ass. U.K. 75: 755-758

² Faasse MA, Bayha K 2006 The ctenophore *Mnemiopsis leidyi* A. Agassiz 1865 in coastal waters of the Netherlands: an unrecognized invasion? Aquatic Invasions (2006) Volume 1, Issue 4: 270-277

Etant euryhaline et eurytherme, elle tolère des variations de salinité et de température importantes et supporte aussi des taux d'oxygène très bas. Elle est donc capable de coloniser et d'envahir n'importe quel milieu même pollué comme les ports et les estuaires par exemple. Sa découverte sur le site de Gravelines, le port Ouest de Dunkerque (cette étude) et le port de Calais (Dorothee Vincent, communication personnelle) nous incite donc pour l'avenir à porter une attention toute particulière à cette espèce.

5.2.2.2. Le méroplancton

En 2009, la fraction méroplanctonique représentait entre 1 et 30 % du zooplancton total. Contrairement à ce que l'on avait observé en 2007 les larves de mollusques et d'échinodermes ont été très peu présentes dans les échantillons cette année (figure 5.9).

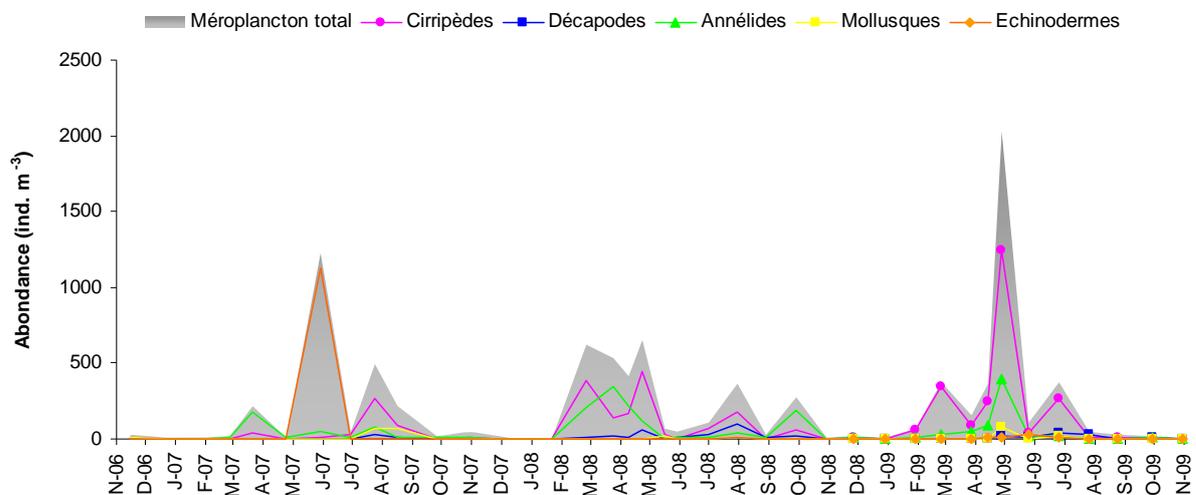


Figure 5.9 : Abondance de certaines espèces méroplanctoniques au point prise entre novembre 2006 et octobre 2009

Les crustacés **cirripèdes** sont des espèces encroûtantes contribuant aux salissures marines. En 2009, leurs stades larvaires planctoniques (*nauplii* et stades âgés *cypris*) représentés entre 60 et 90 % du méroplancton de fin février à fin juin avec un maximum de 1 242 ind. \cdot m⁻³ en avril.

Les larves d'**annélides** étaient essentiellement représentées par l'espèce des fonds sablo-vaseux *Lanice conchilega* et par des larves de spionidés (groupe non identifié à l'espèce). Comme pour les larves de cirripèdes, le maximum d'abondance a été observé fin avril (400 ind. \cdot m⁻³).

5.3. Surveillance du milieu récepteur

La surveillance du milieu récepteur est assurée par deux missions annuelles, l'une printanière, l'autre au début de l'automne. En 2009, les deux missions ont été effectuées respectivement le 25 mai et le 29 septembre.

5.3.1. Biomasse sestonique

Lors de la mission de mai, la biomasse sestonique était décroissante du point *prise* (74,4 mg \cdot m⁻³) au point *contrôle* (36,8 mg \cdot m⁻³). En septembre, la biomasse était maximale aux points *rejet* et *référence* (respectivement, 139,6 et 104 mg \cdot m⁻³).

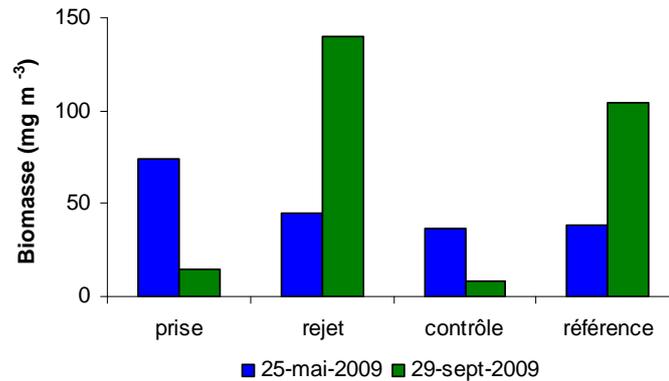


Figure 5.10 : Évolution de la biomasse sestonique au cours des deux missions de surveillance 2009

Comme expliqué plus haut, les rapports C/N > 5 (figure 5.11) indiquent ici aussi que le seston filtré contenait une fraction importante de débris végétaux et minéraux (sables). Ils ne sont donc pas représentatifs de la variabilité du zooplancton dans la colonne d'eau, mais davantage de la charge particulaire liée aux conditions hydrodynamiques du milieu (courants, remous, faible profondeur d'eau...).

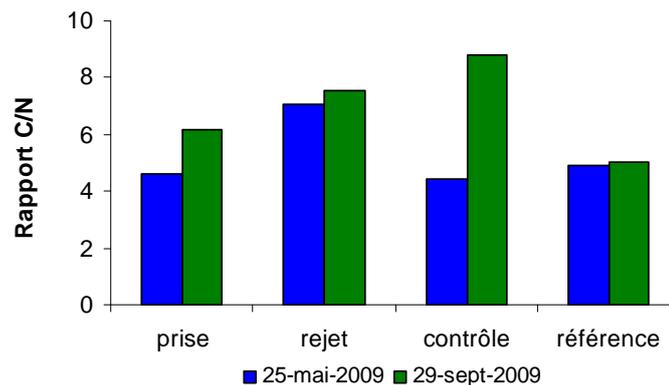


Figure 5.11 : Évolution du rapport C/N du seston au cours des deux missions de surveillance 2009

5.3.2. Abondance et composition du zooplancton

En mai 2009, l'abondance zooplanctonique maximale (figure 5.12) a été observée au point *référence* (1 437 ind. \cdot m⁻³) et la plus faible au point *contrôle* (442 ind. \cdot m⁻³). Les holoplanctontes, autres que les copépodes étaient plus abondants au point *référence* du fait de la présence de la présence d'une espèce de cladocère (crustacés), *Evadne* sp. (409 ind. \cdot m⁻³) qui n'était pas ou peu présente aux 3 autres points de prélèvement (< 5 ind. \cdot m⁻³).

En septembre, l'abondance zooplanctonique maximale était de 2 167 ind. \cdot m⁻³ au point *référence* et la plus faible de 50 ind. \cdot m⁻³ au point *contrôle*. Les faibles abondances observées au point *contrôle* sont surprenantes et non expliquées...

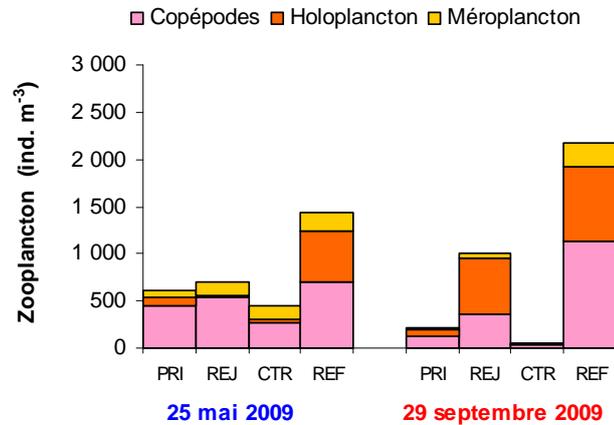


Figure 5.12 : Abondance des copépodes, de l'holoplancton et du méropplancton au cours des deux missions de surveillance 2009

5.3.2.1. L'holoplancton

Les copépodes

La proportion entre les copépodes adultes et les copépodites était assez similaire entre les points de prélèvement lors des deux missions de 2009 (figure 5.13).

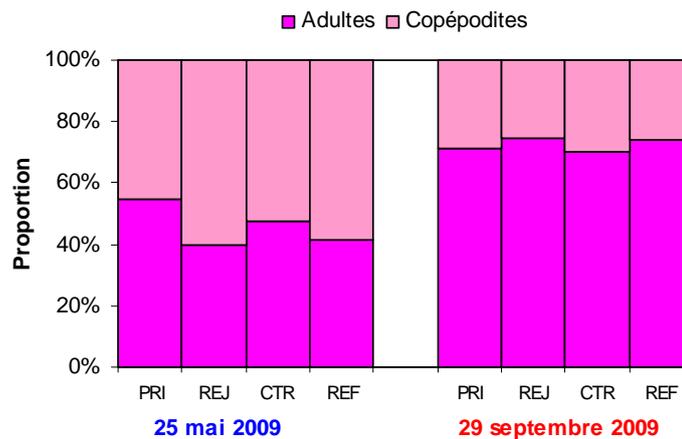


Figure 5.13 : Proportion entre copépodes adultes et copépodites au cours des deux missions de 2009

Les autres espèces holoplanctoniques

En septembre, l'abondance des appendiculaires était jusqu'à 100 fois plus abondante au point *référence* par rapport aux points *prise* et *contrôle*, et alors que ce groupe était absent du prélèvement au point *rejet*. De plus le point référence était caractérisé par la présence de deux espèces d'appendiculaire, *Oikopleura dioica* (72 %) et *Fritillaria borealis* (28 %). Cette dernière espèce bien que commune en Manche est en général trouvée sur des stations plus éloignées des côtes.

Les chaetognathes présents lors de la campagne de septembre étaient 4 à 10 fois plus abondant au point *rejet*, là encore leur absence au point *contrôle* reste inexplicé.

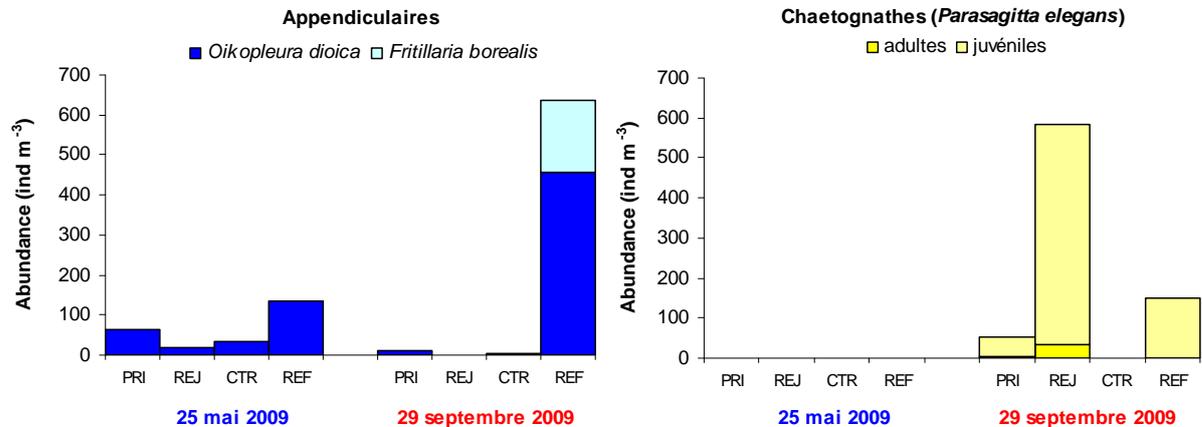


Figure 5.14 : Abondance des appendiculaires et des chaetognathes au cours des deux missions de 2009

Le Méroplancton

Le méroplancton étant présent surtout au début du printemps (mars-avril), les variations d'abondance lors des deux sorties en mer annuelles ne peuvent s'étudier que sur quelques groupes (figure 5.15).

Au mois de mai l'abondance des larves d'échinoderme (*Echinocardium* sp.) était croissante selon un gradient côte-large au mois de mai. A noter cependant qu'elles étaient absentes au point rejet, ce qui indiquerait une moindre résistance de ces organismes au passage dans la centrale. Comme l'an passé, les larves de décapodes étaient plus nombreuses au point rejet en mai, du fait de la présence à ce point de zoés d'*Atelecyclus rotundatus* (crabe de sable rond ; 39 ind.·m⁻³) qui n'ont pas été observées aux points prise et référence. En septembre des zoés de *Crangon crangon* et les zoés de Brachyoures étaient plus nombreuses et diversifiées au point référence.

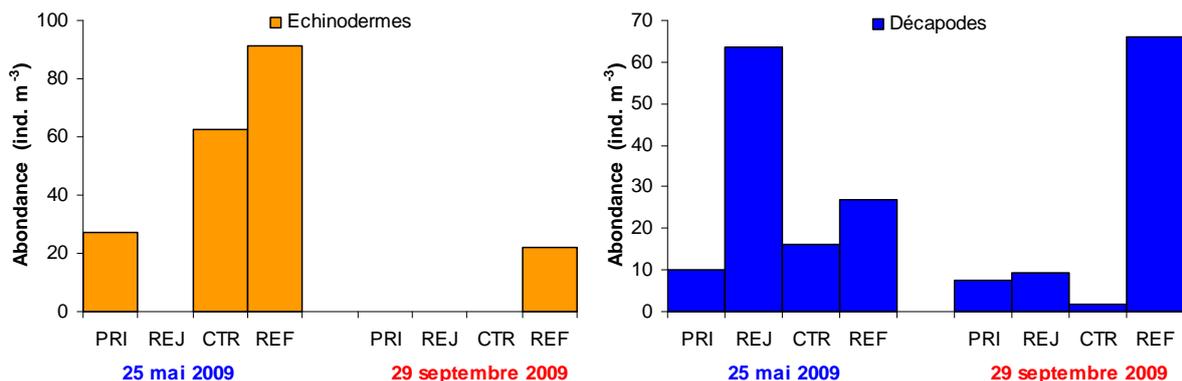


Figure 5.15 : Abondance des principaux groupes méroplanctoniques au cours des deux missions de 2009

5.4. Éléments de conclusion

En raison i) des rapports C/N souvent élevés (> 6) mesurés sur les échantillons filtrés de plancton, ii) du fait que la variance de l'abondance zooplanctonique explique moins de 20 % de la variance de la biomasse sestonique (poids sec), il est préférable de considérer cette biomasse comme une estimation de la charge particulaire > 100 µm de la colonne d'eau plutôt que comme une estimation

fiable de la biomasse zooplanctonique. En conséquence, les analyses et les paragraphes concernés ont été ré-intitulés 'biomasse sestonique' pour éviter toute confusion.

L'augmentation de la biomasse sestonique, ainsi que de l'abondance zooplanctonique depuis 2008 peut s'expliquer par le changement de filet à plancton utilisé pour les prélèvements réguliers au point *prise*. Le petit filet utilisé auparavant a été remplacé par un filet WP2 dont la forme cylindro-conique et les dimensions permettent d'éviter les phénomènes de colmatage et de reflux notamment en période de prolifération algale. Ce changement nous permet également de comparer les prélèvements à la côte avec ceux du large lors des deux missions annuelles en mer sans risque de biais lié à la méthode de collecte. En 2009 la biomasse sestonique mesurée sur l'année présentait des valeurs très importantes d'avril à mai, signe d'une production algale (*Phaeocystis globosa*) et zooplanctonique importante.

L'abondance zooplanctonique était caractérisée par les organismes holoplanctoniques (> 70 %) essentiellement des copépodes à l'exception de la période fin avril-début mai où le dinoflagellé hétérotrophe, *Noctiluca scintillans* et les appendiculaires *Oikopleura dioica*, représentait respectivement 28 et 14 % des holoplanctontes. Au cours de cette période de surveillance, les copépodes habituellement plus abondant en été comme *Centropage hamatus* et *Acatia clausi*, ont été plus abondants au printemps (en avril surtout). *Paracalanus parvus*, était également moins abondant à la fin de l'été par rapport aux deux années précédentes. L'abondance des stades larvaires (copépodites) au début du printemps semble indiquer que les adultes ont su mettre à profit la poussée phytoplanctonique printanière des diatomées, alors que la prolifération de *Pheocystis globosa* et des noctiluques semble plutôt néfaste aux copépodites comme aux adultes moins abondants au mois de mai.

La découverte cette année sur le site de Gravelines et dans les eaux environnantes d'une espèce invasive de cténaire, *Mnemiopsis leidyi*, réputée avoir des conséquences désastreuses sur la structure de l'écosystème pélagique dans les milieux qu'elle envahit, nous incite pour l'avenir à porter une vigilance toute particulière au suivi de cette espèce. Etant une espèce gélatineuse (les individus faisant entre 3 et 6 cm), des proliférations importantes pourrait avoir des conséquences sur les débits de pompage de la centrale en entraînant le colmatage des grilles à l'entrée du circuit de la centrale.

L'impact du fonctionnement de la centrale sur le compartiment zooplanctonique, s'il existe, reste difficile à estimer comme le montre le fait que certains groupes soient présents et plus abondants au point *rejet* et pas ou peu au point *prise* (chaetognathes, larves de décapodes). Pour certains groupes toutefois l'impact de la centrale semble réel, comme pour les larves d'échinodermes absentes au point *rejet* lors de la campagne de mai. Toutefois dans ce cas l'impact reste très localisé puisque les points *contrôle* et *référence* présentaient des abondances supérieures au point *prise*. Les différences d'abondance observées entre les points côtiers et plus au large montrent la difficulté d'évaluer si les différences observées sont dues à la variabilité naturelle du système ou à un effet direct de la centrale.

6. ZOOPLANCTON HALIEUTIQUE

Auteur : Caroline Warembourg (RH – BL)

Collaborateurs : Antajan E., Caboche J., Louis W., Le Roy D.

6.1. Introduction

Le volet écologie halieutique de l'étude du site de Gravelines est centré sur les principales espèces constituant les ressources vivantes du secteur et son rôle de biotope. En effet, compte tenu de ses caractéristiques, le site s'inscrit dans une famille d'aires côtières de nutrition, frayères et nourriceries, en particulier pour les espèces halieutiques et notamment les poissons plats.

Situées en bordure orientale de l'entonnoir formé par le bassin du sud de la mer du Nord, dans un secteur de convergence de hauts-fonds, les eaux côtières de Gravelines présentent les caractéristiques d'une mer épicontinentale enrichie de nombreux apports telluriques. À cet égard, le site est en continuité avec les côtes belges et hollandaises, à la frange méridionale de l'importante frayère de sole de mer du Nord, dont l'épicentre se situe à peine à quelques dizaines de kilomètres au nord-est.

L'étude est focalisée sur les stades planctoniques de trois espèces cibles retenues pour leur importance économique effective ou potentielle et la reproductibilité de leur présence dans le milieu : deux poissons, la sole et le sprat, à ponte côtière, et un crustacé, la crevette grise, tous caractéristiques du site. Le choix de deux poissons d'écologie différente en phase adulte (la première est benthique, le seconde pélagique), outre son intérêt direct, permet de mettre en évidence des processus généraux affectant la zone d'étude.

6.2. Matériels et méthodes

6.2.1. Localisation des points de prélèvement

Les prélèvements sont réalisés en trois points situés en mer le long d'une radiale (points 313 : *côte*, 324 : *contrôle* et 318 : *large*) et un point 325 : *prise*, situé à l'entrée du canal d'amenée au niveau du pont enjambant le canal de prise d'eau (cf. Figure 1.3 et tableau 1.1).

6.2.2. Méthode de prélèvement

Les prélèvements ont été effectués avec un filet Bongo muni de deux filets coniques (diamètre d'ouverture : 61 cm ; maille 500 μm) dont les pêches sont mélangées, à l'exception du point *prise* où l'on utilise un filet WP2 (filet cylindro-conique ; diamètre d'ouverture : 57 cm ; maille 500 μm).

Deux réplicats sont réalisés en chaque point (les filets sont mis à l'eau deux fois successives). Les volumes filtrés sont calculés à partir des indications de volucompteurs kc-denmark montés à l'entrée des filets.

Les mesures de température et salinité ont été réalisées au moyen d'une sonde WTW Multi 340i.

6.2.3. Chronologie

Il est prévu quatre campagnes par an, dont deux ayant lieu en mer alternant avec deux campagnes au canal d'amenée, dans un intervalle allant de fin mars à mai, afin de couvrir au mieux la période de reproduction de la sole et du sprat, sachant que la présence des zoés (larves) de crevette grise s'échelonne tout au long de l'année avec cependant une prédominance au printemps.

Comme lors des années précédentes, compte tenu de l'évolution des périodes de ponte, plus précoces depuis quelques années (décalage d'une quinzaine de jours à un mois environ), les dates des campagnes ont été avancées. En 2009, elles se sont ainsi échelonnées du 27 mars au 13 mai. Depuis 2002, et à fins de comparaison, les prélèvements en mer sont complétés de prélèvements

réalisés au point prise. La chronologie, ainsi que les principales caractéristiques des campagnes, figurent dans le tableau 6.1 ci-dessous.

Suite à la perte du filet Bongo lors de la mission du 13 mai et du fait des très mauvaises conditions météo, il ne nous a pas été possible de collecter des échantillons aux trois points en mer.

Tableau 6.1 Caractéristiques des campagnes 'Zooplankton halieutique' sur le site de Gravelines en 2009

N° de campagne	Date	Point	Température surface (°C)	Salinité Surface (P.S.U.)	Répliquats	Heure du prélèvement	Durée du trait (min)	Volume filtré (m ³)
241	27 mars	325	9,1	33,6	1	11:50	5	38,14
			9,1	33,6	2	12:05	10	91,18
242	14 avril	325	11,4	33,6	1	14:11	4	77,59
			11,4	33,6	2	14:26	4	53,74
		313	11,6	33,7	1	15:45	3	208,38
			11,6	33,7	2	15:55	3	151,19
		324	11,0	33,8	1	16:09	3	205,39
			11,0	33,8	2	16:19	3	155,48
		318	9,9	33,8	1	16:39	3	214,04
			9,9	33,8	2	16:50	3	187,25
243	28 avril	325	12,3	33,7	1	14:22	2	20,78
			12,3	33,7	2	14:35	2	12,27
244	13 mai	325	13,5	33,6	1	13:17	6	125,37
			13,5	33,6	2	13:30	6	107,31

Il faut noter que les volumes filtrés au point *prise* en mars et avril étaient assez faibles, en raison du colmatage des filets lié à la prolifération de l'algue phytoplanctonique *Phaeocystis globosa*. De ce fait, les résultats d'abondance des différentes espèces étudiées doivent être considérés avec nuance.

6.3. Résultats

6.3.1. La sole *Solea solea* (Linné, 1758)

La sole commune constitue l'une des grandes ressources halieutiques du secteur. Le site est inclus dans une famille d'aires de reproduction, à proximité du barycentre de la frayère de mer du Nord (De Clerck et Van de Velde, 1973). Les œufs et larves de sole forment ainsi un élément caractéristique du plancton de Gravelines et les cycles annuels d'abondance sont bien reproductibles.

¹ De Clerck R. et Van de Velde J., 1973.- A study of the spawning and nursery areas of sole along the belgian coasts.- Cons. Int. Explor. Mer, Comité des Poissons de fond (Nord), F : 34

6.3.1.1. Oeufs

Depuis 2002, et afin de mieux encadrer le pic de ponte, les prélèvements sont programmés pour avoir lieu dès la fin du mois de mars. En 2009, l'examen des effectifs lors des campagnes successives a indiqué un bon recouvrement du pic de ponte (tableau 6.2 et figure 6.1). Au point *prise*, les abondances totales d'œufs de sole étaient assez élevées pour les trois premiers prélèvements (proche de 10 œufs par 10 m³), avec une valeur maximale égale à 11 œufs le 14 avril. L'abondance la plus faible a été observée lors du dernier prélèvement à la mi-mai (< 2 œufs par 10 m³), comme les deux années précédentes.

Tableau 6.2 Abondances des œufs et des larves de sole à Gravelines en 2009
(en nombre par 10 m³)

Date	Point	Réplicats	Total œufs	Œufs stade 1	Œufs stade 2	Larves
27 mars	325	1	9,44	4,98	4,46	0,00
		2	8,55	4,94	3,62	0,00
		Moyenne	9,00	4,96	4,04	0,00
14 avril	325	1	8,38	1,80	6,57	0,26
		2	14,70	5,95	8,74	0,00
		Moyenne	11,54	3,88	7,66	0,13
	313	1	9,45	3,84	5,61	0,00
		2	13,63	6,88	6,75	0,00
		Moyenne	11,54	5,36	6,18	0,00
	324	1	10,95	5,70	5,26	0,05
		2	11,51	6,17	5,34	0,13
		Moyenne	11,23	5,94	5,30	0,09
	318	1	6,91	3,22	3,69	0,05
		2	4,38	2,62	1,76	0,00
		Moyenne	5,65	2,92	2,73	0,02
28 avril	325	1	11,07	6,26	4,81	0,00
		2	4,89	1,63	3,26	0,81
		Moyenne	7,98	3,94	4,04	0,41
13 mai	325	1	0,72	0,08	0,64	0,08
		2	1,68	0,09	1,58	0,56
		Moyenne	1,20	0,09	1,11	0,32

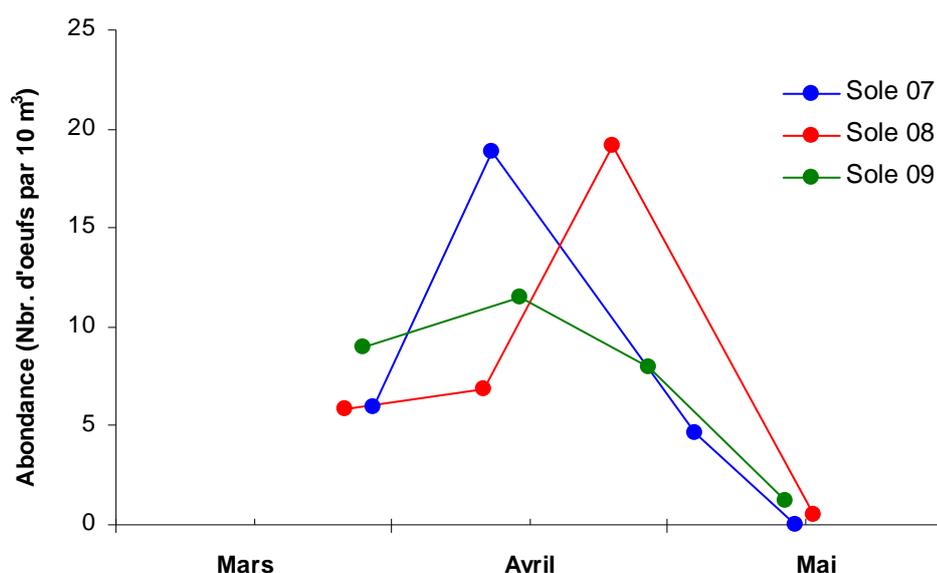


Figure 6.1 Abondance des œufs de sole au point prise de Gravelines depuis 2007

Pour les prélèvements du 14 avril, les abondances d'œufs de sole montraient des valeurs constantes du point *prise* vers le point *contrôle* (11 œufs par 10 m³) puis une abondance réduite de moitié au point *large* (Figure 6.2).

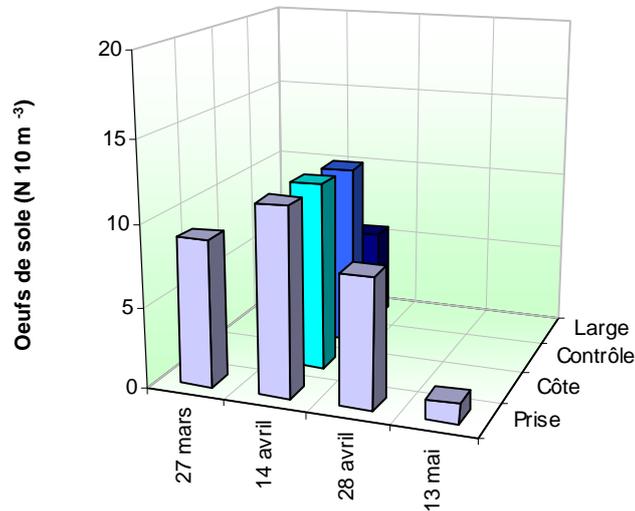


Figure 6.2 Abondance des œufs de sole à Gravelines en 2009 en fonction de la date et du point de prélèvement

La proportion des œufs de stade 2 (œufs à embryon développé) variait de 45 à 93 % pour l'ensemble des prélèvements de cette année, proportions identiques à ce qui avait été enregistré en 2008 (Figure 6.3). Mais contrairement à 2008, un gradient décroissant de la côte vers le large de la proportion d'œufs de stade 2 a été observé lors de la mission du 14 avril. La proportion d'œufs de stade 2 a augmenté au fur et à mesure des échantillons récoltés au point *prise* : de 45 % le 27 mars à 93 % le 13 mai.

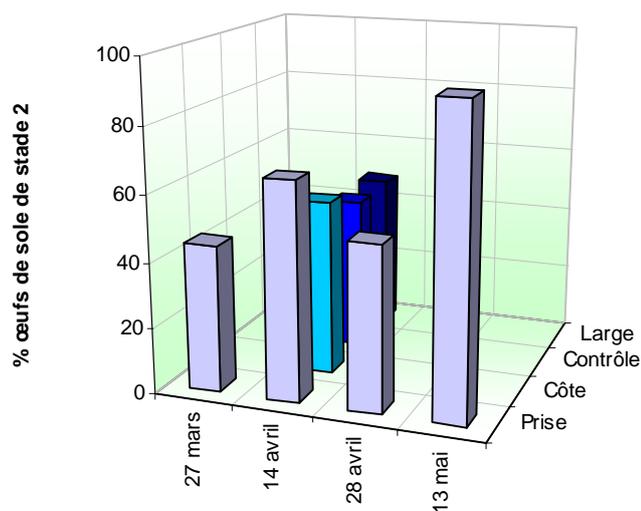


Figure 6.3 Proportion d'œufs de sole de stade 2 à Gravelines en 2009 en fonction de la date et du point de prélèvement

6.3.1.2. Larves

Depuis 2007 les valeurs d'abondance au point *prise* sont inférieures à 2 larves par 10 m³ (Figure 6.4).

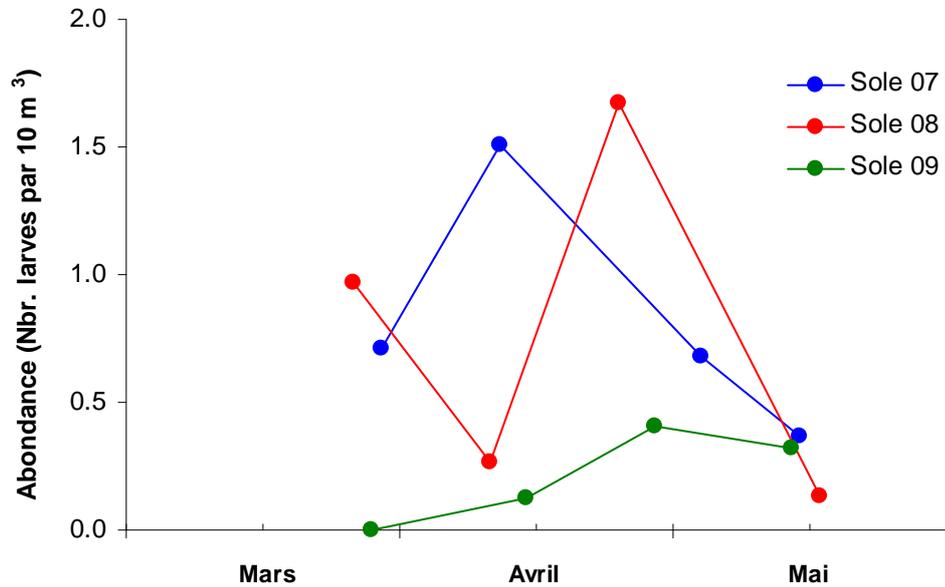


Figure 6.4 Abondance des larves de sole au point *Prise* de Gravelines depuis 2007

Lors de la mission en mer du 14 avril, aucune larve n'a été observée au point *côte* et les abondances enregistrées étaient très faibles pour les autres points : < 0,5 larves par 10 m³ (Figure 6.5)

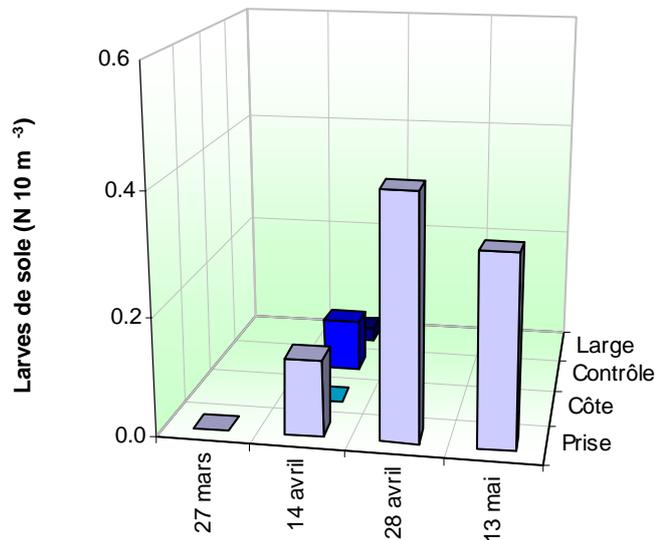


Figure 6.5 Abondance des larves de sole à Gravelines en 2009 en fonction de la date et du point de prélèvement

6.3.2. Le sprat *Sprattus sprattus* (Linné, 1758)

Cette espèce pélagique, bien que n'étant pas exploitée à Gravelines, est très représentative des peuplements du secteur et régulièrement présente dans le plancton. L'abondance de ses phases œufs et larves, jointe à la reproductibilité des cycles d'abondance en fait une espèce caractéristique du site lequel s'inscrit dans une famille de frayères locales pour l'espèce.

En effet, bien que pélagique et migrateur, le sprat forme des populations relativement inféodées à un secteur donné. Celles-ci s'égrènent le long des côtes du sud de la mer du Nord, essentiellement les côtes belges et hollandaises.

6.3.2.1. Oeufs

Contrairement à 2008, la production d'œufs semble avoir été moins précoce, si bien que le pic printanier de production a pu être couvert par la période d'échantillonnage au point *prise* (tableau 6.3 ; Figure 6.6). L'abondance maximale a été observée lors de la mission du 28 avril avec 69 œufs par 10 m³,

Tableau 6.3 Abondance des œufs et des larves de sprat à Gravelines en 2009 (en nombre par 10 m³)

Date	Point	Réplicats	Total œufs	Œufs stade 1	Œufs stade 2	Larves
27 mars	325	1	1,31	0,52	0,79	0,00
		2	2,74	1,43	1,32	0,00
		Moyenne	2,03	0,98	1,05	0,00
14 avril	325	1	21,01	16,88	4,12	0,00
		2	40,93	35,72	5,21	0,00
		Moyenne	30,97	26,30	4,67	0,00
	313	1	9,26	4,94	4,32	0,00
		2	9,66	6,81	2,84	0,00
		Moyenne	9,46	5,88	3,58	0,00
	324	1	5,45	2,29	3,16	0,00
		2	3,41	2,25	1,16	0,00
		Moyenne	4,43	2,27	2,16	0,00
	318	1	6,07	3,18	2,90	0,00
		2	7,10	3,74	3,36	0,00
		Moyenne	6,59	3,46	3,13	0,00
28 avril	325	1	68,34	44,28	24,06	0,00
		2	70,06	39,11	30,96	0,00
		Moyenne	69,20	41,70	27,51	0,00
13 mai	325	1	16,91	4,87	12,04	0,16
		2	34,94	10,34	24,60	0,75
		Moyenne	25,93	7,60	18,32	0,45

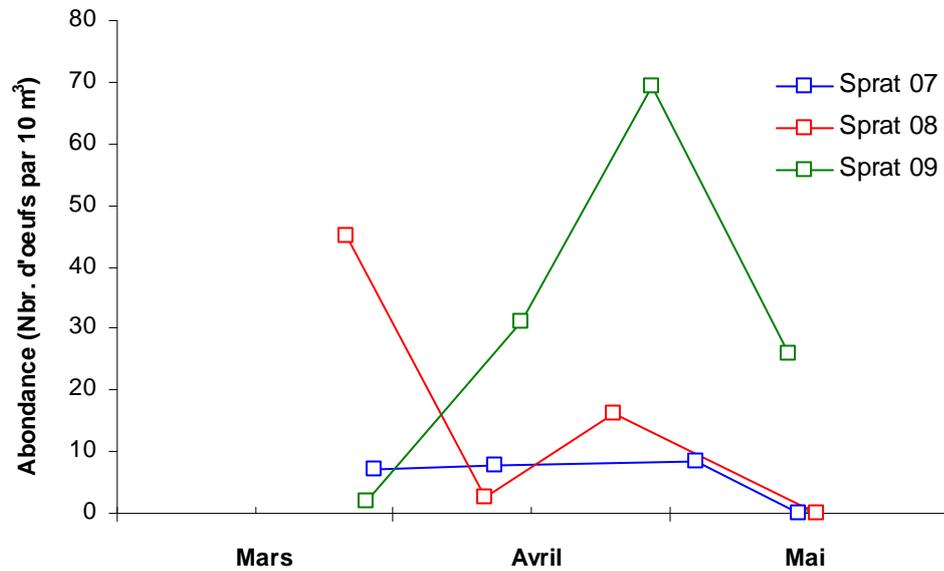


Figure 6.6 Abondance des œufs de sprat au point *prise* de Gravelines depuis 2007

Lors de la mission du 14 avril, l'abondance des œufs de sprat était plus importante au point *prise* (20 œufs par 10 m³), contrairement au comportement reproducteur de cette espèce pélagique qui fraie à quelque distance de la côte (Figure 6.7). La proportion d'œufs de stade 2 dans les échantillons était croissante de 15 à 70 % d'avril à mai, ce qui confirme bien qu'en mai nous étions déjà à la fin de la période de ponte (figure 6.8).

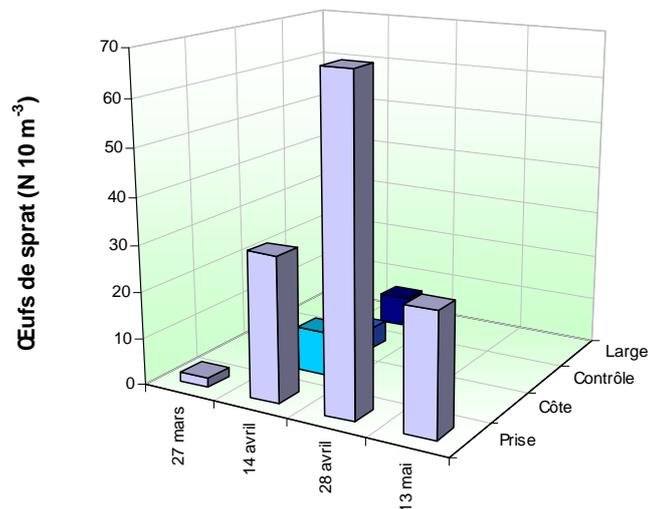


Figure 6.7 Abondance des œufs de sprat à Gravelines en 2009 en fonction de la date et du point de prélèvement

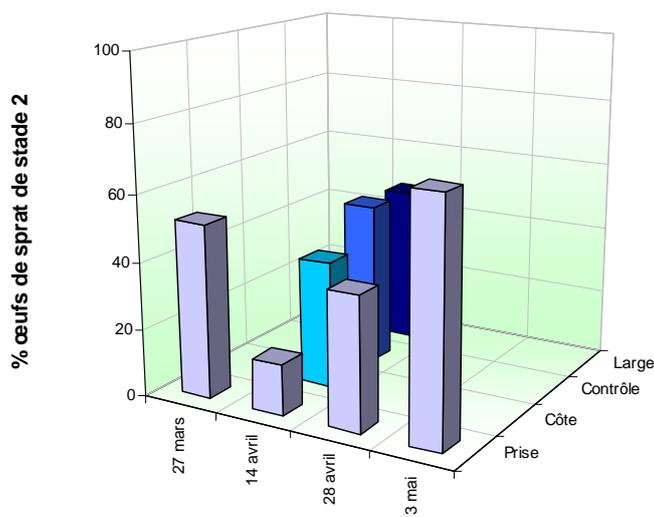


Figure 6.8 Proportion d'œufs de sprat de stade 2 à Gravelines en 2009 en fonction de la date et du point de prélèvement

6.3.2.2. Larves

Depuis 2007, les abondances des larves de sprat restent inférieures à 1 larve par 10 m^3 (Figure 6.9).

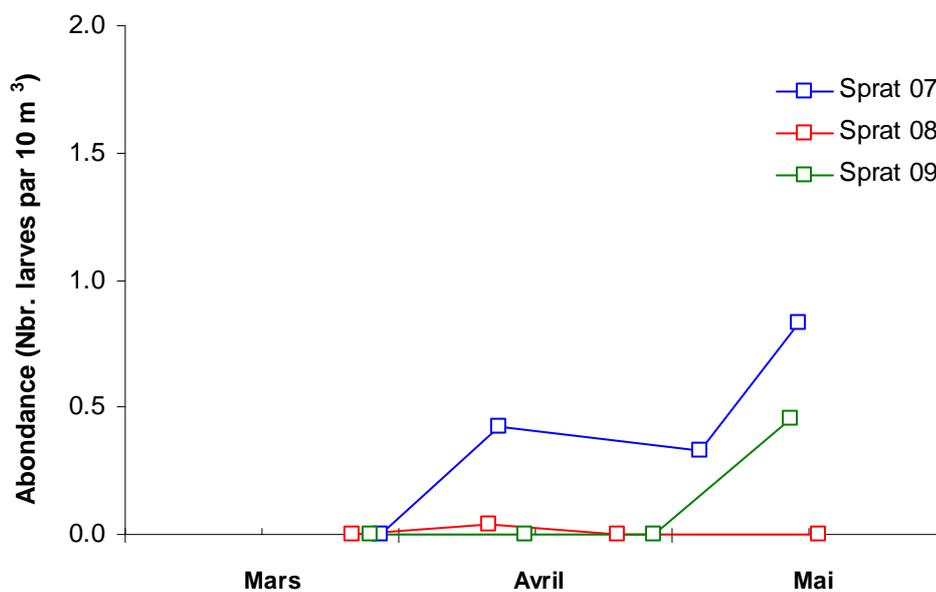


Figure 6.9 Abondance des larves de sprat au point *prise* de Gravelines depuis 2007

Cette année encore cette tendance se confirme : aucune larve de sprat n'a été récoltée lors des trois premiers prélèvements (Figure 6.10).

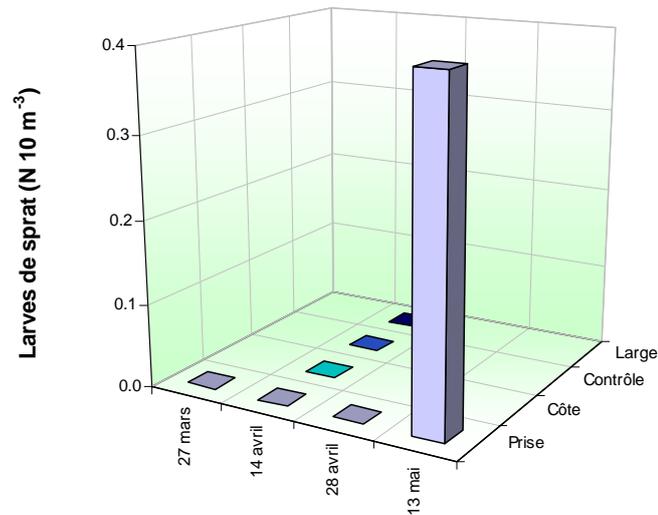


Figure 6.10 Abondance des larves de sprat à Gravelines en 2009 en fonction de la date et du point de prélèvement

6.3.3. La crevette grise *Crangon crangon* (Linné, 1758)

L'étude des zoés de la crevette grise avait cessé en 1989, au moment de la dernière réactualisation du programme de surveillance qui avait conduit à l'abandon des campagnes de suivi des phases benthiques de poissons plats sur le site, auxquelles la crevette était associée sur le plan méthodologique. Les présomptions de raréfaction de l'espèce font à nouveau croître depuis quelques années l'intérêt pour la crevette grise. L'échantillonnage a repris en 2001.

Le substrat sablo-vaseux du site de Gravelines lui est particulièrement favorable et les densités de zoés y étaient nettement supérieures à celles relevées sur d'autres sites de Manche, comme Penly, Paluel ou Flamanville.

La période de reproduction de la crevette grise est très étendue et ses zoés sont *a priori* présentes tout au long de l'année. Chaque femelle pond en fait plusieurs fois par an ; cependant, selon plusieurs auteurs, la reproduction s'effectue selon un rythme saisonnier qui conduit globalement à un maximum de zoés en été et un minimum en hiver (Meixner, 1968¹).

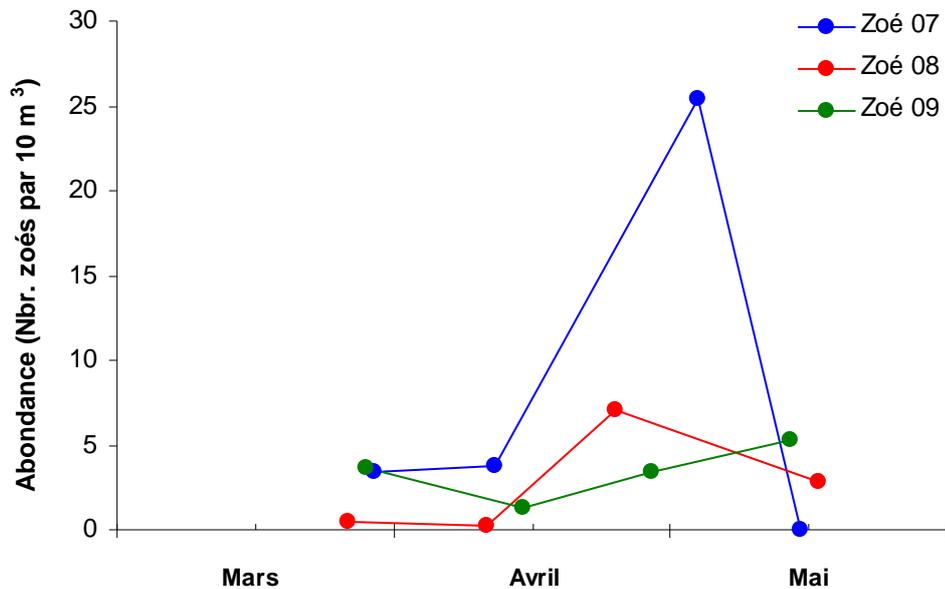
6.3.3.1. Zoés (larves)

À Gravelines, les zoés sont généralement présentes toute l'année, mais surtout de mars à septembre avec un pic d'avril à juin. Leurs abondances pouvaient atteindre plusieurs dizaines par 10 m³ avec des pics de 100 à 200 dans les années 1980. En comparaison, les abondances relevées depuis 2001, année de la reprise des comptages, sont très faibles (sauf en 2005). Comme ce qui a été observé les deux dernières années, les abondances des larves zoés de la crevette grise au point *prise* en 2009 étaient encore faibles pour le site : le maximum observé le 13 mai au point *prise* (5 larves par 10 m³ ; tableau 6.4 & figure 6.11).

¹ Meixner R., 1968.- Reproduction of the sand shrimp *Crangon crangon* (L.) - Fish. Rep. FAO, 57 (2) : 259-264

Tableau 6.4 Densités de zoés et mégalopes de crevette grise à Gravelines en 2009 (en nombre par 10 m³)

Date	Point	Repliquat	Zoés	Mégalo
27 mars	325	1	4,20	0,00
		2	3,07	0,00
		Moyenne	3,63	0,00
14 avril	325	1	2,32	0,00
		2	0,37	0,00
		Moyenne	1,35	0,00
	313	1	2,30	0,62
		2	5,69	0,53
		Moyenne	4,00	0,58
	324	1	2,68	0,34
		2	4,82	0,26
		Moyenne	3,75	0,30
	318	1	2,29	0,05
		2	6,84	0,21
		Moyenne	4,56	0,13
28 avril	325	1	5,29	0,00
		2	1,63	0,00
		Moyenne	3,46	0,00
13 mai	325	1	1,83	0,00
		2	8,76	0,37
		Moyenne	5,30	0,19

Figure 6.11 Abondance des zoés de crevette grise au point *prise* de Gravelines depuis 2007

La mission du 14 avril présentait des abondances de crevette grise plus faible au point *prise* par rapport aux trois autres points de prélèvement, mais ces abondances étaient toutefois du même ordre de grandeur (< 4 zoés par 10 m³ ; Figure 6.12).

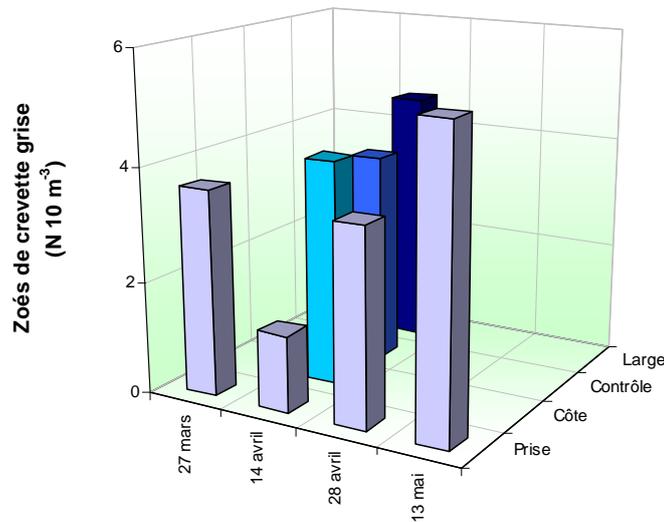


Figure 6.12 Abondance des zoés de la crevette grise *Crangon crangon* à Gravelines en 2009 en fonction de la date et du point de prélèvement

6.3.3.2. Mégalopes (post-larves)

Les mégalopes de crevette grises sont assez rare dans nos prélèvements depuis 2007, et en 2009 les abondances étaient encore inférieures à 1 mégalope par 10 m³ (Figure 6.13).

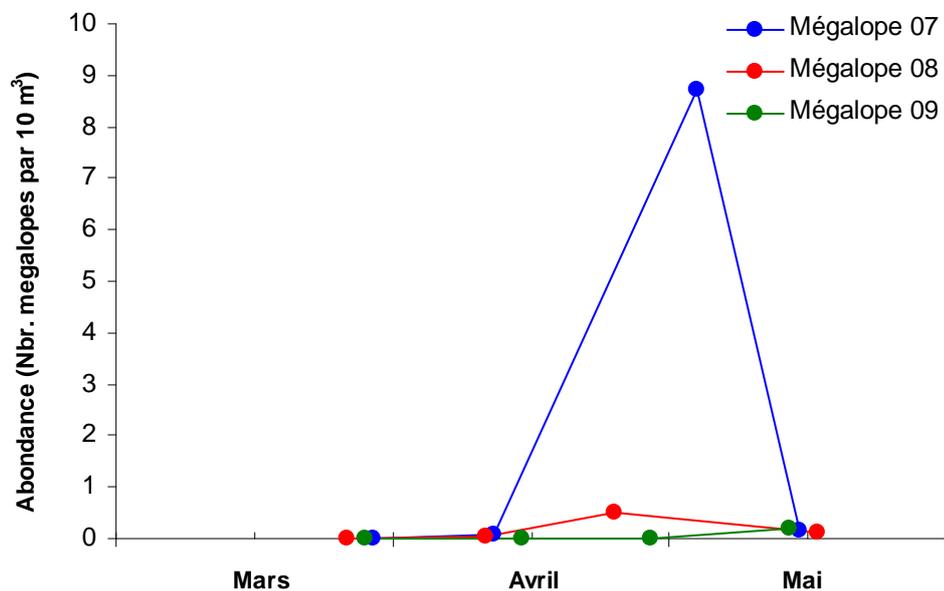


Figure 6.13 Abondance des mégalopes de crevette grise au point *prise* de Gravelines depuis 2007

Lors de la mission du 14 avril les abondances étaient du même ordre de grandeur aux trois points de prélèvement (Figure 6.14).

On peut remarquer que dans les prélèvements mensuels effectués au point *prise* pour le suivi du zooplancton (cf chapitre 5), les zoés de *Crangon crangon* ont été trouvées principalement au moins de juin et de juillet (respectivement, 30 et 90 zoés par 10 m³). La période d'échantillonnage choisit dans le cadre du suivi halieutique ne semble donc pas convenir pour cette espèce.

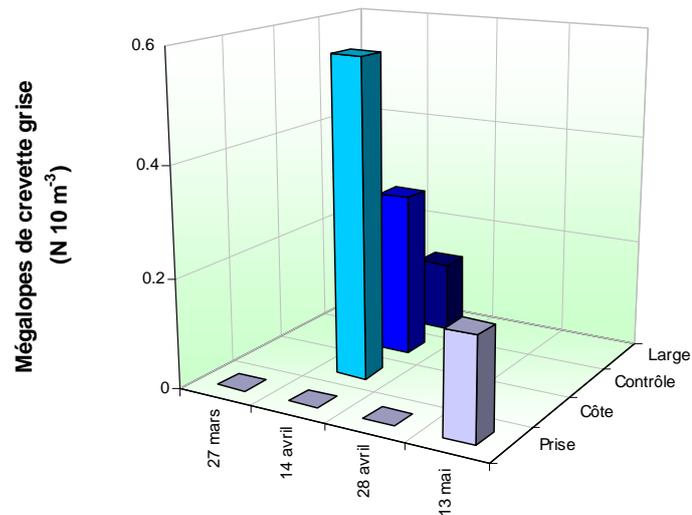


Figure 6.14 Abondance des mégaloopes de la crevette grise *Crangon crangon* à Gravelines en 2009 en fonction de la date et du point de prélèvement

6.4. Eléments de conclusion

Conformément à la tendance à la précocité qui s'est installée depuis quelques années, la période de ponte de la sole et du sprat est centrée sur le mois d'avril, et les effectifs maximums de larves sont observés en mai.

Avec une abondance maximale d'œufs de **sole** égale à 11,54 par 10 m³ mi-avril, les valeurs de 2009 diminuent encore légèrement par rapport à celles des années précédentes (16 œufs par 10 m³ en avril 2008 et 19 par 10 m³ en avril 2007) et se situent dans la moyenne basse des effectifs du site (10 à 30 œufs par 10 m³). Pour les larves, les abondances (< 0,5 par 10 m³) sont plutôt faibles pour le site.

Pour le **sprat**, la reproduction semble moins précoce et avoir une durée plus longue qu'en 2007 et 2008 puisque les deux plus fortes abondances sont observées au moment des deux missions d'avril (au point *prise*, 31 œufs par 10 m³ le 14 avril et 69 œufs par 10 m³ le 28 avril) et de la dernière sortie (au point *prise*, 26 œufs par 10 m³ le 13 mai).

Enfin, la **crevette grise**, présente toujours des effectifs très faibles depuis la reprise des comptages en 2001 et par rapport à l'ensemble des valeurs obtenues avant 1990. Toutefois les prélèvements zooplanctoniques (chapitre 5) montrent que cette espèce est davantage présente sur le site de Gravelines en période estivale (entre 30 et 90 zoés par 10 m³ de juin à juillet).

L'étude du compartiment ichtyoplanctonique ne permet pas de conclure à l'existence d'un déséquilibre du milieu lié à l'activité de la centrale de Penly.

7. LE DOMAINE BENTHIQUE INTERTIDAL

Auteur : Dewarumez J.-M.

Collaborateur : Menu D.

7.1. Introduction

Les études écologiques menées depuis 1973 sur l'estran de Petit Fort Philippe ont permis d'avoir une bonne connaissance des facteurs qui déterminent l'organisation, la répartition et l'évolution des peuplements benthiques intertidaux.

Ces peuplements sont sous l'influence directe de deux principaux facteurs de l'environnement : la salinité et la teneur en fines du sédiment. Il a été démontré également que l'impact thermique de la centrale pouvait jouer un rôle important dans la structuration bionomique de l'estran, et ce, notamment, au niveau de deux populations d'Annélides Polychètes de la famille des Spionidiens : *Spio martinensis* et *Pygospio elegans*. Ces deux populations se répartissent sur l'estran en fonction de leur préférence thermique, *P. elegans* étant plus thermophile que *S. martinensis*. Il faut néanmoins relativiser l'ampleur de cet impact dans la mesure où l'exclusion réciproque des deux populations n'est pas systématique et que la densité de population des deux espèces varie fortement.

Les modifications bionomiques mises en évidence sur l'estran de Gravelines peuvent être expliquées dans une large mesure par les évolutions respectives de ces trois facteurs. Ces altérations sont particulièrement évidentes au niveau des populations de la partie supérieure de l'estran et notamment de celles du peuplement des espèces vasicoles et d'eaux saumâtres. Les niveaux inférieurs de l'estran sont caractérisés depuis plusieurs années par une grande stabilité bionomique qui ne peut être remise en cause temporairement que par la résonance dans ces niveaux des phénomènes qui se déroulent dans le milieu subtidal proche. Ces phénomènes sont toujours indépendants du fonctionnement de la centrale.

7.2. Matériels et méthodes

La stratégie d'échantillonnage a été modifiée lors de l'étude 2000. En effet, étant donnée la stabilité bionomique des niveaux inférieurs depuis plusieurs années, ne révélant par ailleurs aucun impact de la centrale, il avait été décidé de porter davantage notre attention sur la continuité de l'impact mis en évidence dans les niveaux supérieurs de l'estran et de délaissier les niveaux inférieurs. Dans ce but, deux points en haut niveau (point M) et en moyen niveau supérieur (point N) sur une nouvelle radiale située entre les deux radiales précédemment étudiées ont été rajoutés en 2000. Cependant, lors des campagnes réalisées depuis 2000 nous avons conservé la grille d'échantillonnage des niveaux inférieurs du fait du recrutement de *Donax vittatus*, espèce qui n'avait pas été récoltée depuis de nombreuses années sur l'estran.

La campagne a eu lieu le 26 juin 2009. L'échantillonnage a encore cette année porté sur les 10 points, dans la mesure où il nous semble dommage d'interrompre une série qui dure maintenant depuis plus de 30 ans.

Depuis 1996, nous utilisons la méthode du poids sec libre de cendres (PSLC) pour la mesure de la biomasse.

7.3. Terminologie utilisée

Les termes utilisés en écologie benthique ont énormément évolué depuis 1973. Récemment, la multiplication des textes officiels gouvernementaux (notamment les textes de classifications en écologie) a montré un mésusage des termes écologiques ; alors qu'il est indispensable d'avoir une terminologie commune pour les notions les plus couramment employées par le plus grand nombre. Pour le présent chapitre (et le suivant) les définitions suivantes ont été adoptées :

- Population : ensemble des individus d'une même espèce sujets aux mêmes évènements démographiques.
- Peuplement : ensemble des populations d'un même niveau taxonomique qui vivent dans le même biotope et qui crée une entité relativement stable et homogène étendue sur une large aire (par exemple, le peuplement des bivalves des sables fins infralittoraux).
- Communauté : ensemble des différentes populations vivant dans des conditions écologiques moyennes dans un endroit donné.
- Assemblage : ensemble des espèces caractérisant un groupe de stations ayant une forte similitude faunistique.

7.4. Résultats

7.4.1. Composition bionomique

29 taxons ont été récoltés sur les trois radiales. Ils se répartissaient comme suit :

- 1 Némerte
- 1 Annélide Oligochète
- 12 Annélides Polychètes
 - 5 errantes
 - 7 sédentaires
- 3 Mollusques
 - 1 Gastéropode
 - 2 Bivalves
- 10 Crustacés
 - 2 Isopodes
 - 7 Amphipodes
 - 1 Décapode
- 1 Echinoderme Ophiuride
- 1 Insecte

Ces 29 taxons correspondent à 10 070 individus récoltés sur les trois radiales. Ce résultat était inférieur aux six années précédentes (tableau 7.1). Il reste néanmoins très largement supérieur à celui enregistré en 2002. L'année 2002 avait été caractérisée par un fort appauvrissement des populations benthiques de l'estran à la fois en richesse spécifique et en densité de population. Par contre l'année 2003 avait vu les peuplements revenir à un état normal de densité qui s'était maintenu par la suite. En 2006, les densités étaient restées au même niveau qu'en 2005, alors que le nombre d'espèces chutait fortement de 30 espèces récoltées en 2005 à 24 espèces en 2006. En 2008 il était remonté à 28 taxons. En 2009, il était de 29 taxons, on peut donc noter une stabilité de la richesse spécifique sur les 2 dernières années.

Tableau 7.1 Nombre d'individus (par 0,25 m²) des peuplements benthiques récoltés depuis 2002

Année	Radiale 1	Radiale 2	Radiale 3	Richesse spécifique	Abondance totale
2002	1 579	674	434	28	2 687
2003	10 772	1 335	3 441	28	15 548
2004	17 347	1 638	3 979	28	22 964
2005	13 679	725	1 966	30	16 370
2006	15 870	735	2 224	24	18 829
2007	16 430	530	2 259	23	19 219
2008	6 454	2 466	2 159	28	11 079
2009	3 305	1 224	5 541	29	10 070

En 2009 la population de *Hydrobia ulvae* était présente à 5 stations dans la partie ouest de l'estran. Elle est totalement absente de la radiale 2. L'espèce ne représentait plus que 6 % des effectifs. En 2008 elle représentait 23 % des effectifs alors que de 2003 à 2007 c'était plus de 75 % du total des individus récoltés (tableau 7.2). La situation pour cette espèce correspond aux résultats des années 2001 pour la faiblesse des effectifs. Mais ce n'est pas un phénomène rare. Comme l'espèce vit plusieurs années un accident sur la reproduction l'année N peut avoir des répercussions l'année N+2.

Tableau 7.2 Proportion d'*Hydrobia ulvae* dans les peuplements benthiques observés depuis 2000

Année	Proportion
2000	63,9 %
2001	6,3 %
2002	36,8 %
2003	75,8 %
2004	88,1 %
2005	91,7 %
2006	95,0 %
2007	80,0 %
2008	23,0 %
2009	6,2 %

La forte augmentation des populations de *Corophium arenarium* et de *Bathyporeia pilosa* observée en 2006, en 2007 et en 2008 s'est confirmée en 2009.

Les espèces à forte affinité pour les eaux saumâtres (*Enchytraeidae*, *Enoplus brevis* et *Ophelia ratkhei* et *Hediste diversicolor*) avaient fortement régressé en 2006 cette tendance avait été largement confirmée en 2007 et en 2008. On note en 2009, la même absence de ces espèces d'eaux saumâtres : 1 *Hediste diversicolor*, 2 *Enchytraeidae sp* ont été récoltés uniquement sur la radiale 1.

7.4.2. Radiale 1

7.4.2.1. Caractéristiques granulométriques du sédiment

Point E

Des placages de vase étaient toujours présents, ils étaient localisés au-dessus de ce niveau et surtout vers l'est, entre le point E et le point M. Les sédiments à proximité du chenal de l'Aa étaient peu envasés, très meubles et fluents. Lors de la campagne de 2000, nous avons noté un fort appauvrissement en pélites du sédiment qui s'était confirmé en 2001, la teneur en pélites n'était plus alors que de 0,43 %. En 2002, la teneur en pélites augmentait de nouveau pour atteindre 1,85 % du poids total du sédiment. En 2003, la teneur en pélites revenait à un niveau comparable à celui de

2001, puis en 2004 la teneur en pélites chutait de manière significative. En 2006, les sables moyens restaient dominants et la teneur en pélites remontait légèrement. En 2007 le sédiment s'affinait par augmentation de la teneur en pélites et en sables fins et par diminution de la teneur en sables moyens. En 2008 le phénomène s'était encore accentué. En 2009, le sédiment s'est fortement envasé en liaison avec la forte augmentation de la densité de la population de *Corophium arenarium* par effet de bioturbation (tableau 7.3 et figure 7.1).

Tableau 7.3 Caractéristiques granulométriques au point E de la radiale 1 depuis 1997

% pondéraux	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Pélites	0,04	4,58	3,03	0,62	0,43	1,85	0,23	0,09	0,23	1,70	3,22	0,52	4,05
Sables fins	31,61	38,28	42,63	35,26	43,38	23,91	33,74	28,41	25,73	24,72	29,13	39,83	38,07
Sables moyens	64,72	50,33	50,76	52,44	53,00	63,13	61,51	67,47	65,19	70,18	61,68	57,33	55,11

La fraction fine du sédiment (sables moyens et fins + pélites) représente toujours plus de 90 % du poids total du sédiment depuis la campagne de 2001, en 2009 c'était plus de 98 % comme en 2008.

Point F

Ce point présentait comme à l'accoutumée une composition granulométrique proche de celle du point E avec toute fois une teneur en pélites beaucoup plus faible.

Points G et H

Ces points, situés plus bas sur l'estran, présentaient des proportions en sables moyens et fins différentes de celles des deux points précédents. Au point G, les sables moyens représentaient un peu plus de 56 % des sédiments et les sables fins seulement 36 %, alors qu'au point H ces deux fractions sédimentaires étaient en proportion plus équivalente (45 et 51 %).

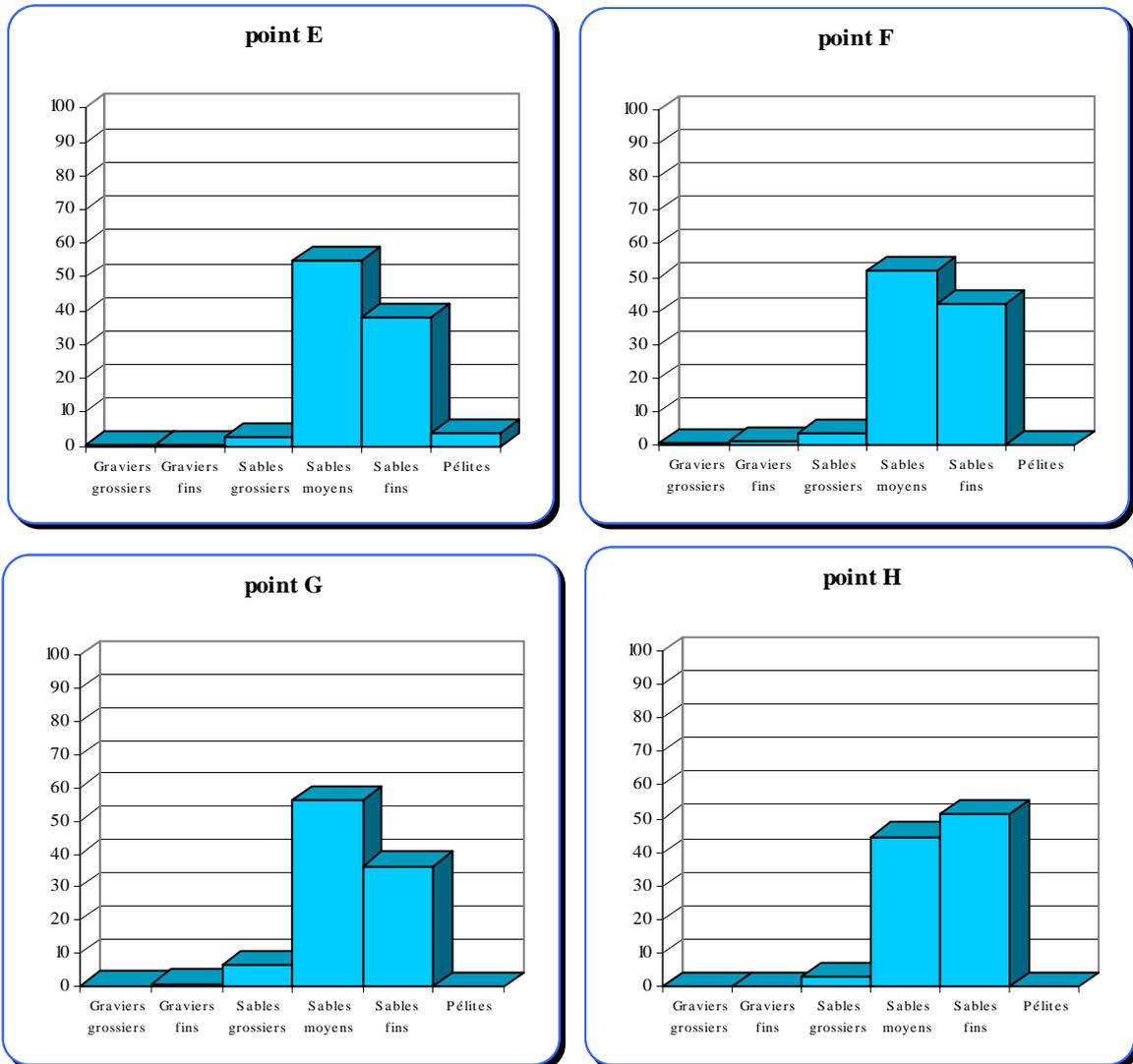


Figure 7.1 Radiale 1, caractéristiques granulométriques du sédiment (% pondéraux)

7.4.2.2. Densité et biomasse des peuplements benthiques

Point E

En 2008, la population de *Hydrobia ulvae* au point E avait chuté considérablement. Ce phénomène se confirme en 2009. La population ne représentait plus, en 2009, que 19 % des effectifs (tableau 7.4 et annexe 7.2). De 2003 à 2007, les densités observées pour cette espèce étaient exceptionnelles ($> 27\,000 \text{ ind.}\cdot\text{m}^{-2}$) avec un maximum de $57\,828 \text{ ind.}\cdot\text{m}^{-2}$ observé en 2006. Un niveau de densité équivalent à celui de 2003 avait été trouvé en 1989 ($25\,740 \text{ ind.}\cdot\text{m}^{-2}$). L'augmentation de la densité observée en 2004 était due au recrutement (poids moyen individuel est de 0,22 mg). En 2005 on était en présence de la même cohorte, les individus étaient de plus grande taille (poids moyen individuel de 0,52 mg).

Tableau 7.4 Densité (ind. \cdot m⁻²) des espèces dominantes au point E de la radiale 1 depuis 1998

Densité (ind. \cdot m ⁻²)	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
<i>Hydrobia ulvae</i>	17 584	2 028	72	8	120	27 416	53 312	43 420	57 828	54 612	4 792	2268
<i>Spio martinensis</i>	8	0	0	40	20	0	0	0	0	0	588	0
<i>Pygospio elegans</i>	0	0	0	0	0	8	0	0	0	92	0	192
<i>Eurydice affinis</i>	48	364	4	0	20	12	16	420	468	88	0	20
<i>Bathyporeia pilosa</i>	16	3 688	0	8	0	0	0	12	1 132	896	0	0
<i>Corophium arenarium</i>	40	184	20	120	40	100	4	156	368	1428	528	9376

La densité globale d'individus au point E atteignait 5 912 ind. \cdot m⁻² en 2008; contre 57 140 ind. \cdot m⁻² en 2007, et 59 888 ind. \cdot m⁻² en 2006. Elle remontait à 11 872 ind. \cdot m⁻² en 2009. La diminution des densités de population de presque toutes les espèces a été compensée par l'augmentation de la population de *Corophium arenarium*. Pour cette espèce il s'agit de la plus forte densité mesurée à ce point.

La biomasse globale enregistrée en 2008 avait fortement régressé (2,5 g \cdot m⁻²). En 2009 elle était deux fois plus importante (5,6 g \cdot m⁻², annexe 7.3). Pour mémoire, la biomasse n'était que de 0,17 g \cdot m⁻² en 2002, de 0,11 g \cdot m⁻² en 2001 et de 0,05 g \cdot m⁻² en 2000. Les évolutions de la biomasse sont souvent liées à la densité de *Hydrobia ulvae* et à la structure démographique de sa population.

Point F

C'est à ce point que les plus fortes variations tant en biomasse qu'en densité ont pu être mises en évidence depuis le début des études. Ces variations concernent également la composition faunistique du peuplement. Ces évolutions sont surtout liées aux populations de mollusques bivalves (*Cerastoderma edule* et *Macoma balthica*) mais aussi à l'influence plus ou moins grande de la dessalure causée par l'Aa et à son impact sur la densité des espèces euryhalines. *Cerastoderma edule* et *Macoma balthica* représentaient plus de 93 % de la biomasse totale à ce point en 2006 et 49 % en 2007. En 2008, la contribution à la biomasse de ces deux mollusques était de 79 %. En 2009 *Macoma balthica* était absente mais *Cerastoderma edule* représentait plus de 96 % de la biomasse.

En 2008, la population de *Cerastoderma edule* avait progressé par rapport à 2007 avec la présence de jeunes individus, elle est restée au même niveau en 2009 (tableau 7.5 et annexe 7.2). En 2006, on avait noté un recrutement plus important. Deux cohortes étaient présentes : la cohorte 2005 et la cohorte 2006. En 2007 la densité de population avait fortement diminué ; depuis la population semble se rétablir. Il faut noter que cette population est exploitée par des pêcheurs à pied.

Tableau 7.5 Densité (ind. \cdot m⁻²) des espèces dominantes au point F de la radiale 1 depuis 1998

Densité (ind. \cdot m ⁻²)	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
<i>Hediste diversicolor</i>	56	116	72	116	48	100	264	20	4	0	0	4
<i>Spio martinensis</i>	36	0	0	88	8	4	0	0	0	0	208	0
<i>Pygospio elegans</i>	0	0	0	8	0	0	4	40	0	4	0	0
<i>Ophelia rathkei</i>	588	24	0	64	92	8	8	24	0	0	0	0
<i>Hydrobia ulvae</i>	9 176	26 140	8 448	12	3 404	11 448	12 120	9 336	448	4 064	4	8
<i>Cerastoderma edule</i>	800	144	32	236	248	32	36	108	228	12	52	60
<i>Macoma balthica</i>	168	748	696	316	1 040	404	356	220	32	4	20	0
<i>Corophium arenarium</i>	0	0	0	0	4	12	80	176	8	8	4 824	0

Macoma balthica avait été très abondante à la fin des années 1990 et au début des années 2000. Depuis 2006 elle était en régression et en 2009, elle n'a pas été récoltée (tableau 7.5).

Comme au point E la régression de la population de *Hydrobia ulvae* observée en 2008 s'est confirmée en 2009. En 1998, nous avons noté que la population de *H. ulvae* gagnait les moyens niveaux supérieurs. En 1999, ce phénomène se confirmait et s'amplifiait, néanmoins comme la densité globale de *H. ulvae* restait équivalente dans les niveaux supérieurs de la partie ouest de l'estran (13 380 ind. \cdot m⁻², en 1998 contre 14 084 ind. \cdot m⁻² en 1999), nous avons conclu que cette espèce se redistribuait sur l'estran. Les résultats obtenus en 2000 semblaient infirmer cette hypothèse car la population de *H. ulvae* régressait sur la totalité des niveaux supérieurs tout en restant cependant la plus importante au point F. En 2001, la population de *H. ulvae* disparaissait complètement au point F (12 ind. \cdot m⁻² pour une biomasse de 2,2 mg \cdot m⁻²). L'espèce réapparaissait en 2002 à un niveau de densité, certes inférieur à celui des années 1998 et 1999, mais suffisant pour permettre la régénération de la population. Cette implantation s'est confirmée en 2003, la densité étant du même ordre que dans la période 1998-2000 (11 448 ind. \cdot m⁻²). En 2004 la situation restait analogue au niveau de la densité et régressait légèrement en 2005. En 2006, comme signalé plus haut, la population s'était réinstallée dans les niveaux supérieurs, la densité n'était plus que de 448 ind. \cdot m⁻² au point F. Les résultats de 2007 confirmaient cette tendance même si la densité était en augmentation. Depuis 2008, la population est quasi absente du point F.

De 2006 à 2008, *Hediste diversicolor* n'a plus été récoltée à ce point, tout comme les autres espèces à affinité « eaux saumâtres » (les *Enchytraeidae* et *Enoplus brevis*). En 2009, un individu a été récolté au point F.

Points G et H

Ces deux points devaient dans la nouvelle stratégie d'échantillonnage être remplacés par un point intermédiaire. La présence de *Donax vittatus* dans les bas niveaux nous avait conduits depuis l'étude de 2000 à maintenir l'échantillonnage de ces deux points. Nous avons décidé finalement de poursuivre l'échantillonnage pour ne pas interrompre la série d'observation. Ces points sont caractérisés depuis plusieurs années par une très grande stabilité, une faible diversité spécifique, une faible densité et une faible biomasse.

Depuis 2004, le peuplement en place est beaucoup moins diversifié qu'auparavant, très faible densité et faible richesse spécifique, avec comme corollaire une faible biomasse. En 2008 la récolte de quelques juvéniles de *Lanice conchilega* au point H fait légèrement augmenter la densité globale. Rien de tel ne s'est passé en 2009. Par contre, *Donax vittatus* a été récolté pour la première fois depuis 2003 au point H.

7.4.3. Radiale 2

7.4.3.1. Caractéristiques granulométriques du sédiment

Les caractéristiques granulométriques du sédiment aux quatre points la radiale 2 sont représentés sur la figure 7.2 (voir aussi annexe 7.1). Le sédiment montre un affinement régulier des hauts vers les bas niveaux tout à fait classique

Point I

Les résultats de ce point sont le reflet des actions combinées du rejet de la centrale situé à proximité et de l'influence des eaux douces de ruissellement.

Point J

Situé à proximité immédiate du complexe de dunes et de bâches situé à mi-estran. Il a été pendant plusieurs années, le siège d'un lent phénomène d'érosion qui a éliminé du sédiment les particules fines avec pour conséquence de faire évoluer le peuplement installé à ce point vers des aspects caractéristiques de moyens niveaux inférieurs.

Point K et L

Ces points sont situés de l'autre côté du complexe de dunes et de bâches et subissent les remaniements liés à la houle et aux vagues. Le sédiment est en général plus fin que dans les niveaux supérieurs

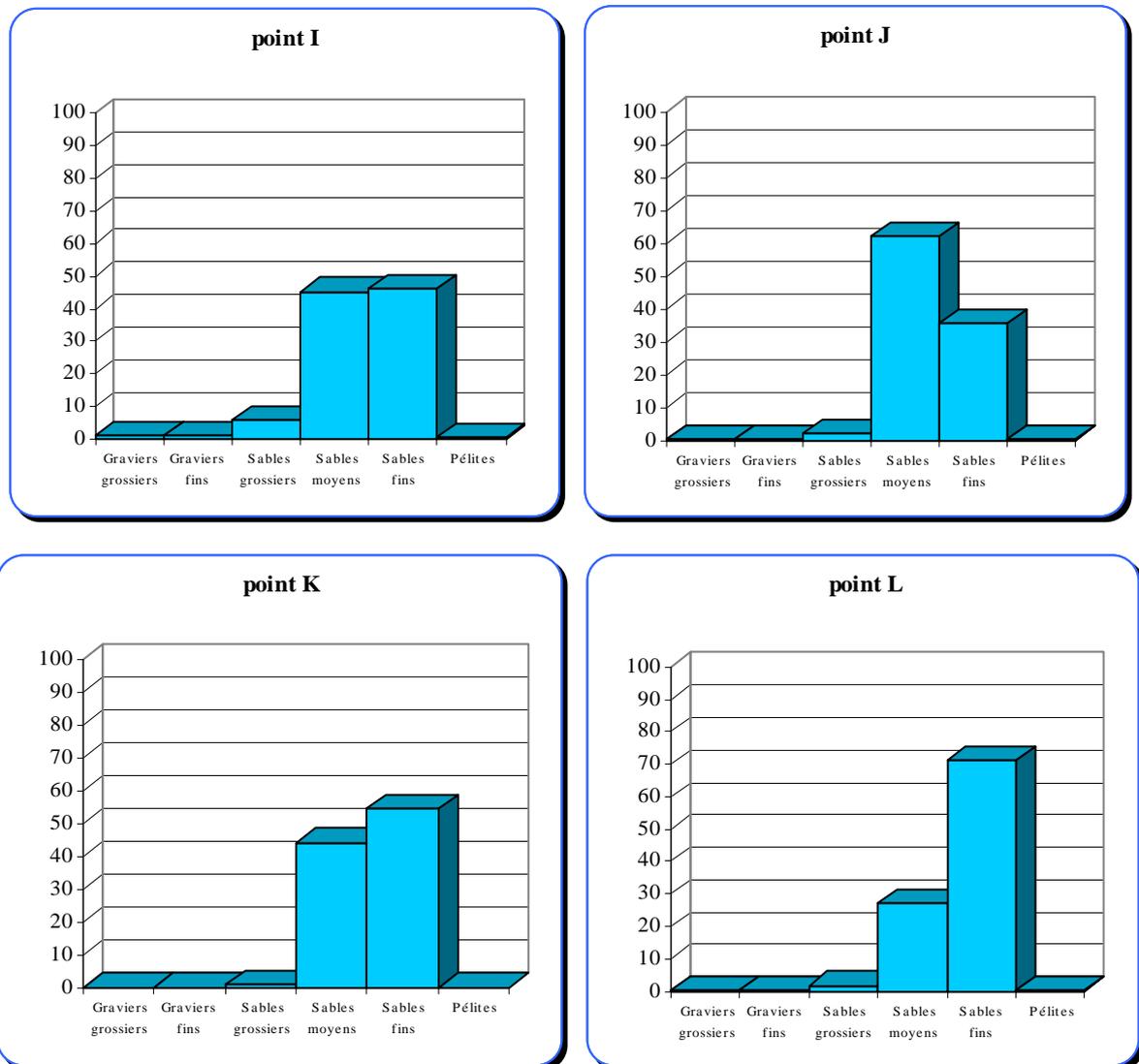


Figure 7.2 Radiale 2, Caractéristiques granulométriques du sédiment (% pondéraux)

7.4.3.2. Densité et biomasse des peuplements benthiques

Point I

La population d' *Hydrobia ulvae* a complètement disparu du point I en 2009 (tableau 7.6 et annexe 7.4). En 2008, la densité de la population de *Hydrobia ulvae* atteignait $388 \text{ ind.}\cdot\text{m}^{-2}$. Après de forte augmentations en 1998 ($1\,468 \text{ ind.}\cdot\text{m}^{-2}$) et 1999 ($2\,620 \text{ ind.}\cdot\text{m}^{-2}$), la densité la population de *H. ulvae* avait fortement diminué en 2000 ($680 \text{ ind.}\cdot\text{m}^{-2}$). La population était alors constituée d'individus de grande taille (poids moyen par individu de $0,8 \text{ mg}$ en 2000). La densité de population était remontée en 2001 à $900 \text{ ind.}\cdot\text{m}^{-2}$ et nous avons conclu à un vieillissement de la population sans nouveau recrutement. En 2002, la population avait quasiment disparu de ce point ($72 \text{ ind.}\cdot\text{m}^{-2}$). En 2003 et 2004, la population semblait s'être reconstituée au même niveau que

pendant les années 2000-2001 à ceci près que la population était constituée de très jeunes individus (0,25 mg de poids moyen individuel en 2003). Entre 2005 et 2007, la population de cette espèce était en forte régression, la plus faible densité de ces 12 dernières années. La tendance à la disparition de la population de *Hydrobia ulvae* se confirme donc bien au point I.

Tableau 7.6 Densité (ind. \cdot m⁻²) des espèces dominantes au point I de la radiale 2 depuis 1997

Densité (ind. \cdot m ⁻²)	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
<i>Enchytraeidae</i>	212	104	0	4	816	0	2 396	12	32	4	0	0	0
<i>Pygospio elegans</i>	1 144	0	60	4	3 440	332	168	936	96	0	40	3 032	52
<i>Spio martinensis</i>	0	186	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Hydrobia ulvae</i>	204	1 468	2 620	680	900	72	832	876	40	52	8	388	0
<i>Corophium arenarium</i>	1 508	7 004	1 792	3 348	3 916	140	220	3 772	280	380	836	2 100	1492
<i>Bathyporeia pilosa</i>	4	40	4	4	4	0	36	4	4	8	308	72	1416
<i>Eurydice affinis</i>	36	0	8	48	4	0	268	0	12	56	44	44	368

La population de *Corophium arenarium* avait elle aussi régressé d'une manière considérable entre 2002 et 2007 (à l'exception de 2004). La densité avait beaucoup augmenté en 2008 (2 100 ind. \cdot m⁻²). Elle est restée à un niveau relativement proche en 2009 (tableau 7.6).

Bathyporeia pilosa qui était peu présente à ce point, lors des études précédentes, a bénéficié en 2009 d'un excellent recrutement (1 416 ind. \cdot m⁻²).

La population des *Enchytraeidae*, qui avait complètement disparu en 2002, s'était rétablie à un niveau de densité très important, le plus fort enregistré à ce point, en 2003 (2 396 ind. \cdot m⁻²). Depuis 2004 la population avait fortement diminué pour disparaître totalement en 2007 ; elle n'est pas réapparue depuis.

La population de *Pygospio elegans* était réapparue en faible densité en 2007 et atteignait quasiment la densité maximale enregistrée pour ce point en 2008, est revenu en 2009 à un niveau équivalent à celui de 2007 ind. \cdot m⁻²).

Point J

Depuis 1997, le cortège spécifique du peuplement installé à ce point était constitué à la fois d'espèces caractéristiques des niveaux supérieurs et d'espèces inféodées aux moyens niveaux inférieurs. En 2001, le peuplement de ce point était constitué majoritairement d'espèces inféodées aux niveaux supérieurs de l'estran. Ce schéma a peu évolué entre 2001 et 2006, *Corophium arenarium* et *Eurydice affinis* (espèces de haut niveau) étaient dominantes ou présentes tandis que *Bathyporeia sarsi* et *Eurydice pulchra* (espèces de moyen niveau) étaient absentes. La densité de *Scolecopsis squamata* (espèces de moyen niveau) restait moyenne. En 2007, un retour vers la structure d'avant 2001 semblait s'amorcer avec de fortes densités de *E. pulchra* et de *Bathyporeia pilosa* ; la différence principale étant l'absence de *S. squamata*. En 2008 le schéma observé était celui de la situation de 2001 et de 2002. En 2009, la situation a peu évolué, à ceci près que la population de *Bathyporeia pilosa* a fortement régressé et semble s'être décalée vers les hauts niveaux (tableau 7.7 et annexe 7.4), cette situation est peut être transitoire.

Tableau 7.7 Densité (ind. \cdot m⁻²) des espèces dominantes au point J de la radiale 2 depuis 1997

Densité (ind. \cdot m ⁻²)	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
<i>Scolecipis squamata</i>	4	0	28	48	28	56	36	24	84	56	0	52	112
<i>Eurydice affinis</i>	188	36	376	0	252	44	160	140	452	220	4	288	144
<i>Eurydice pulchra</i>	20	32	0	368	4	12	0	0	24	0	488	12	36
<i>Corophium arenarium</i>	80	132	8	4	248	352	4	180	376	112	0	592	304
<i>Bathyporeia pilosa</i>	988	0	0	364	3 316	1056	128	4	226	1 184	256	1 832	32

La biomasse reste faible depuis plusieurs années : 0,5 g \cdot m⁻² (annexe 7.5).

Points K et L

Pendant plusieurs années, les peuplements établis dans les niveaux inférieurs de la radiale 2 ont été caractérisés par une très grande stabilité. Oligospécifiques, ils sont dominés par des espèces classiquement rencontrées à ces niveaux : *Nephtys cirrosa* et *Haustorius arenarius*.

Un résultat tout à fait surprenant a été enregistré au point K en 2005, la présence fugace de *Scolecipis squamata* : en très forte densité (964 ind. \cdot m⁻²) en juillet et son absence totale en août 2005 lors d'un prélèvement de contrôle. L'espèce était présente en faible densité à ce point en 2007 (16 ind. \cdot m⁻²), elle était absente en 2008 tout comme en 2009 (annexe 7.4).

La situation enregistrée en 2009 était tout à fait conforme au schéma général.

Haustorius arenarius, caractéristique des milieux dunaires de mi-estran, a été récolté comme tous les ans au point K : 24 ind. \cdot m⁻².

Le cortège spécifique du point L était dominé par *Nephtys cirrosa* dont la densité de population est resté très stable en 2009 (80 ind. \cdot m⁻²; annexe 7.4).

La densité à ces deux points était voisine de 100 ind. \cdot m⁻² (respectivement 108 et 112 aux points K et L). La biomasse à ces deux points était habituellement inférieure à 1 g \cdot m⁻². C'est toujours le cas pour le point K, mais pas pour le point L où la récolte de *Donax vittatus* a entraîné une augmentation considérable de la biomasse : 13,8 g \cdot m⁻²; *Donax vittatus* représentant à lui seul 13,1 g \cdot m⁻².

7.4.4. Radiale 3

Cette radiale a été échantillonnée pour la première fois en 2000. Seuls les niveaux supérieurs sont étudiés afin de visualiser la continuité des effets respectifs de la dessalure de l'Aa et de l'impact thermique de la centrale.

7.4.4.1. Caractéristiques granulométriques du sédiment

Les caractéristiques granulométriques du sédiment aux deux points de la radiale 3 sont représentés sur la figure 7.3 (voir aussi annexe 7.1).

Le sédiment du point M était à la fois plus grossier et plus envasé que celui du point N, ce qui correspond à ce qui a été noté pour les points E et F. Les hauts niveaux de la radiale 3 étaient donc très semblables au niveau de la granulométrie à ceux de la radiale 1.

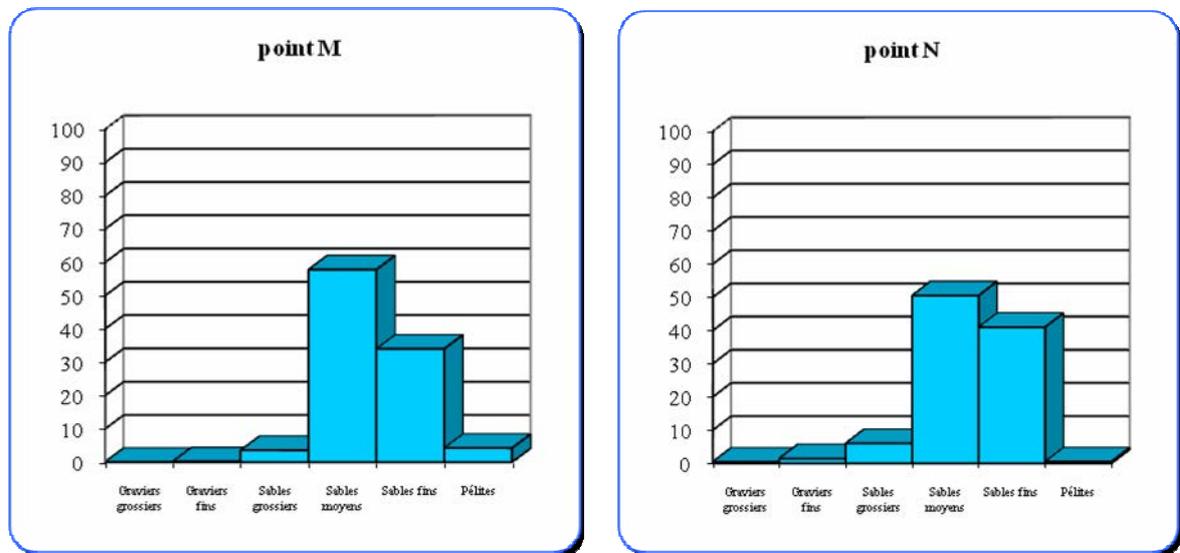


Figure 7.3 Radiale 3, Caractéristiques granulométriques du sédiment (% pondéraux)

7.4.4.2. Densité et biomasse des peuplements benthiques

Les résultats obtenus en 2003 et 2005 montraient que pour les espèces typiquement estuariennes *Hydrobia ulvae*, *Hediste diversicolor*, *Macoma balthica*, *Cerastoderma edule* et *Ophelia ratkhei* les gradients de répartition étaient décroissants d'ouest en est et que pour *Corophium arenarium* et *Bathyporeia pilosa* les gradients étaient inverses. En 2006 et 2007 les choses semblaient moins nettes. En 2008 la population de *Hydrobia ulvae* était très dense aux deux points bien que les densités n'atteignaient pas les maximums observés au point E de la radiale 1. En 2009, les résultats obtenus aux points M et N ont confirmé ceux obtenus aux points E et F : disparition presque complète de *Hydrobia ulvae* et augmentation des densités de *Corophium arenarium*. Une augmentation de la densité de *Corophium arenarium* avait déjà été remarquée au point N en 2008.

Il en est résulté une augmentation considérable de la densité globale ($15320 \text{ ind.}\cdot\text{m}^{-2}$).

Au niveau de la répartition des espèces appartenant aux niveaux supérieurs de l'estran et notamment pour ce qui est des espèces les plus importantes (*Hydrobia ulvae*, *Corophium arenarium* et *Bathyporeia pilosa*) tout se passe comme si il y avait une restriction de leur aire de répartition sur la radiale 3.

Les résultats enregistrés sur la radiale 3 permettent de confirmer le gradient de densité décroissant d'ouest en est pour *Corophium arenarium* et *Bathyporeia pilosa* et croissant pour *Hydrobia ulvae*.

7.5. Conclusion sur l'évolution de l'estran

7.5.1. Cas de la partie ouest

Les peuplements typiquement estuariens ont disparu de la partie ouest de l'estran dès la mise en service de la centrale. La disparition de la dune hydraulique a entraîné le lessivage des fines, mais l'influence de la dessalure causée par l'Aa reste importante. Néanmoins les populations d'espèces euryhalines présentent une très grande variabilité dans le temps (tableau 7.8).

Tableau 7.8 Densité moyenne (ind. \cdot m⁻²) des espèces euryhalines depuis 1997

Densité (ind. \cdot m ⁻²)	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
<i>Ophelia rathkei</i>	115	148	9	20	16	23	461	2	6	1	0	0	0
<i>Enchytraeidae</i> sp.	4	0	9	1	20	184	103	8	12	27	0	2	2
<i>Hediste diversicolor</i>	17	14	29	18	29	12	25	66	5	1	0	0	1

Depuis maintenant plusieurs années, l'influence de la dessalure de l'Aa semble rester faible. Les trois espèces typiquement estuariennes sont en régression depuis 2003, en 2007 elles semblaient avoir disparu de la partie ouest de l'estran. En 2008 seuls deux *Enchytraeidae* sp. avaient été récoltés. En 2009, l'influence de la dessalure liée à l'Aa était également quasi inexistante.

7.5.2. Cas des Spionidés

Le principe de la séparation spatiale des populations de *Spio martinensis* et de *Pygospio elegans*, très marquée jusqu'en 1995, a été remis en cause en 1996 du fait de la complète disparition de *S. martinensis* (tableau 7.9). En 1997, la situation semblait être redevenue normale avec séparation parfaite des deux populations, bien que les densités de *S. martinensis* aient été encore faibles et que cette espèce ait été récoltée au bas niveau de la radiale 2. En 1998, la disparition complète de *P. elegans* et la colonisation de la totalité de l'estran par *S. martinensis* remettaient en cause la séparation des deux populations. En 1999, la situation évoluait encore, *S. martinensis* disparaissait des niveaux supérieurs de l'estran tandis que *P. elegans* réapparaissait au point I de la radiale 2. En 2001 et en 2002, les populations de spionidés retrouvaient des répartitions diamétralement opposées et conformes à ce que l'on observait au début des années 1990. En 2003, le schéma de répartition de *P. elegans* et de *S. martinensis* a été confirmé. En 2004, *S. martinensis* était absent des niveaux supérieurs de l'estran. Cette espèce n'avait été récoltée qu'au point H. En 2005, *P. elegans* a été récolté sur pratiquement tout l'estran, mais la population était située plutôt dans les niveaux supérieurs de l'estran, sauf au point E de la radiale 1. En 2005 et 2006 *S. martinensis* était complètement absent de l'estran. En 2006, *P. elegans* n'avait été récolté que sur la radiale 2. En 2007, *S. martinensis* n'avait été récolté qu'au point H, tandis que *P. elegans* réapparaissait sur l'estran en cinq points, tous situés en haut niveau ou moyen niveau supérieur, et en fortes densités au point N (488 ind. \cdot m⁻²). En 2008, on avait observé de nouveau une claire séparation des deux populations *S. martinensis* le long de l'Aa et *P. elegans* à partir du point M. Les densités de *P. elegans* au point I faisaient partie des plus importantes observées depuis le début des études.

En 2009, *Spio martinensis* n'était plus présent qu'en deux points : N et K. La population de *Pygospio elegans* a régressé fortement, elle était localisée dans les hauts niveaux de l'estran et au point N avec un gradient décroissant d'ouest en est.

Tableau 7.9 Densité (ind. \cdot m⁻²) des spionidés depuis 1996

Densité (ind. \cdot m ⁻²)		1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
<i>Spio martinensis</i>	E	0	76	8	0	0	40	20	0	0	0	0	0	588	0
	F	0	196	36	0	0	0	8	84	0	0	0	0	108	0
	M	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	N	-	-	-	-	36	0	0	0	0	0	0	0	0	24
	I	0	0	186	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	J	0	60	4	0	0	24	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Pygospio elegans</i>	E	32	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	92	0	192
	F	672	0	0	0	0	8	0	0	4	40	40	4	0	0
	M	-	-	-	-	52	124	456	264	0	108	40	72	2	156
	N	-	-	-	-	0	40	68	408	616	208	8	488	0	52
	I	64	1 144	0	60	4	3 440	332	168	936	96	0	40	3 032	52
	J	4	0	0	0	16	24	156	0	80	8	0	0	20	0

7.5.3. Cas de la biomasse

Toute altération de la structure bionomique d'un peuplement provoque une altération de la biomasse qui peut être positive ou négative. L'arrivée d'une espèce pionnière provoquera une forte augmentation de la biomasse. L'évolution de la structure démographique (proportion des différentes cohortes) influe aussi fortement sur la biomasse.

La biomasse moyenne de l'estran calculée en 2007 était très inférieure à celle de 2006 (7,20 g \cdot m⁻²) et celle des années 2002 à 2005 (tableau 7.10). En 2008, la biomasse moyenne était la plus faible jamais enregistrée sur l'estran. Cette biomasse était principalement établie sur les niveaux supérieurs et moyens supérieurs de la partie ouest de l'estran (points E, F, M, et N). La forte régression des populations d'*Hydrobia ulvae* a provoqué une forte chute de la densité qui n'a pas été compensée par les autres espèces.

En 2009, la biomasse semblait revenir à un niveau un peu supérieur, mais ceci était dû comme cela a été signalé plus haut à une seule espèce qui contribue pour 1,5 g dans une moyenne globale de 4,3 g soit le tiers.

Tableau 7.10 Biomasse (g \cdot m⁻²) des peuplements benthiques sur l'estran depuis 2006

Biomasse (g \cdot m ⁻²)	1996	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
E	8,68	11,82	8,79	19,34	2,36	0,05	0,11	0,17	16,24	11,90	22,85	32,1	24,51	2,55	5,60
F	25,94	31,16	52,64	39,59	48,47	24,91	23,61	67,05	32,74	38,09	18,37	22,5	5,99	14,14	10,96
G	0,44	0,47	0,27	0,40	1,76	0,28	0,23	0,09	2,16	0,48	0,77	0,48	1,09	0,58	0,31
H	0,29	0,31	0,48	0,68	0,83	6,56	0,56	0,68	1,30	0,44	0,49	0,26	0,81	1,06	5,53
I	1,49	2,34	1,72	4,29	2,23	7,19	5,83	0,13	0,87	3,68	0,19	0,54	0,52	2,03	1,02
J	0,48	0,48	0,49	0,35	0,40	0,50	0,76	0,59	0,23	1,34	0,58	0,57	0,25	0,83	0,45
K	1,03	1,06	0,29	0,69	0,52	1,28	0,95	0,44	1,57	0,34	5,41	0,89	0,28	0,91	0,29
L	1,84	1,91	0,28	0,32	1,34	0,64	12,91	0,74	4,44	0,55	0,19	1,00	0,64	0,29	13,81
M	-	-	-	-	-	1,34	0,82	0,53	2,84	9,83	3,30	5,79	2,64	2,89	3,20
N	-	-	-	-	-	0,31	1,43	0,33	4,01	8,37	1,99	7,85	4,11	2,24	1,78
Moyenne estran	5,02	6,19	8,12	8,21	7,25	4,31	4,72	7,08	6,64	7,50	5,41	7,20	4,08	2,75	4,30

NB : depuis 1996 les mesures de biomasse sont effectuées à l'aide de la méthode du poids sec libre de cendres.

Cette étude confirme que la forte capacité de charge de la plage de Gravelines peut être soumise à des évolutions fortes d'une année sur l'autre en fonction du maintien de population à forte biomasse, comme en l'occurrence *Hydrobia ulvae* ou des espèces surdispersées à densité faible mais à forte biomasse comme *Donax vittatus*. Depuis 2004, la biomasse est répartie comme dans les systèmes classiques des estrans à énergie modérée dans lesquels la biomasse est plus forte dans les niveaux supérieurs grâce aux espèces euryhalines que l'on y rencontre.

7.6. Éléments de conclusion

On ne note pas, en 2009, d'évolution de la morphologie de l'estran. Les résultats des analyses granulométriques ne font pas apparaître d'évolution majeure des sédiments intertidaux.

En 2009, la richesse spécifique est restée stable par rapport à 2008 (29 espèces contre 28 en 2008). La densité globale était en forte diminution du fait de la forte régression de la population de *Hydrobia ulvae* et la biomasse globale a progressé un peu du fait de la récolte de *Donax vittatus* en bas niveaux. Cette espèce qui a bénéficié d'un excellent recrutement généralisé sur toutes les côtes de la Manche orientale et du sud de la mer du Nord, se maintient depuis d'année en année.

L'étude 2009 a montré que les gradients de répartition de certaines espèces pouvaient être remis en cause :

- Répartition décroissante ouest-est pour *Hydrobia ulvae* en 2008 et 2009, mais avec un maximum sur la radiale 3 en 2008 et sur la radiale 1 en 2009. (NB : les densités de cette espèce étaient très faibles en 2009 par rapport aux années précédentes)
- Répartition décroissante ouest-est pour *Corophium arenarium* en 2008 et 2009, mais avec un minimum sur la radiale 3 en 2008 et sur la radiale 2 en 2009.
- Population de *Bathyporeia pilosa* fortement développée sur la partie ouest de l'estran, notamment au point N et dans un degré moindre au point F.

L'estran de Gravelines conserve l'intégralité de ses capacités productives à moyen terme et une certaine stabilité même si des oscillations autour d'une situation moyenne sont perceptibles et récurrentes. Les régressions d'espèces sont souvent compensées par le développement d'autres espèces qui n'ont pas toujours le même rôle écologique. C'est le cas sur tous les estrans de la région qui sont en général soumis à des contraintes fortes. Les perturbations (thermique, débit du rejet, etc.) liées au fonctionnement de la centrale ne viennent donc pas forcer un système apparemment en équilibre dynamique.

**Annexe 7.1 Caractéristiques granulométriques du sédiment aux 10 points intertidaux
(% pondéraux)**

Radiale 1	point E	point F	point G	point H
Graviers grossiers	0,03	0,76	0,14	0,04
Graviers fins	0,22	1,09	0,76	0,41
Sables grossiers	2,53	3,58	6,52	3,25
Sables moyens	55,11	52,26	56,11	44,79
Sables fins	38,07	42,21	36,43	51,46
Pélites	4,05	0,11	0,03	0,05

Radiale 2	point I	point J	point K	point L
Graviers grossiers	1,01	0,06	0,00	0,05
Graviers fins	1,27	0,12	0,10	0,22
Sables grossiers	5,91	2,10	1,10	1,75
Sables moyens	45,24	62,16	44,27	26,96
Sables fins	46,20	35,53	54,49	70,99
Pélites	0,38	0,02	0,03	0,04

Radiale 3	point M	point N
Graviers grossiers	0,07	0,45
Graviers fins	0,22	1,44
Sables grossiers	3,58	6,02
Sables moyens	57,84	50,53
Sables fins	34,04	41,02
Pélites	4,25	0,53

Tableau 7.2 Radiale 1, résultats bruts (nombre d'individus par 0,25 m²)

Radiale 1	Point E	Point F	Point G	Point H	Total
Némertes					
Némertes sp.		6			6
Annélides Oligochètes					
<i>Enchytraeidae</i> sp.	2				2
Annélides Polychètes					
<i>Pygospio elegans</i>	48				48
<i>Scolelepis squamata</i>	1	14	1	1	17
<i>Spio martinensis</i>				2	2
<i>Magelona johnstoni</i>				2	2
<i>Capitella capitata</i>				1	1
<i>Eteone longa</i>		1			1
<i>Hediste diversicolor</i>		1			1
<i>Nephtys cirrosa</i>			5	33	38
<i>Lumbrineris tetraura</i>				1	1
Mollusques					
<i>Hydrobia ulvae</i>	567	2	2		571
<i>Donax vittatus</i>				3	3
<i>Cerastoderma edule</i>		15			15
Crustacés					
<i>Eurydice affinis</i>	5				5
<i>Eurydice pulchra</i>		19			19
<i>Leucothoe incisa</i>			1		1
<i>Bathyporeia pilosa</i>	1	194			195
<i>Bathyporeia sarsi</i>			3		3
<i>Haustorius arenarius</i>			8		8
<i>Corophium arenarium</i>	2344		2		2346
<i>Crangon crangon</i>			5	4	9
Echinodermes					
<i>Ophiura albida</i>			2		2
Richesse spécifique	7	8	9	8	32
TOTAL 0,25 m ⁻²	2968	252	38	47	3305
TOTAL m ⁻²	11872	1008	152	188	13220

Tableau 7.3 Radiale 1, résultats bruts (biomasse en mg par 0,25 m²)

Radiale 1	Point E	Point F	Point G	Point H
Némertes				
Némertes sp.		5,4		
Annélides Oligochètes				
<i>Enchytraeidae</i> sp.	0,2			
Annélides Polychètes				
<i>Pygospio elegans</i>	2,9			
<i>Scolelepis squamata</i>	2,3	35,3	3,3	0,6
<i>Spio martinensis</i>				0,2
<i>Magelona johnstoni</i>				4,9
<i>Capitella capitata</i>				1,0
<i>Eteone longa</i>		2,4		
<i>Hediste diversicolor</i>		19,9		
<i>Nephtys cirrosa</i>			23,8	224,1
<i>Lumbrineris tetraura</i>				110,4
Mollusques				
<i>Hydrobia ulvae</i>	283,3	1,8	2,1	
<i>Donax vittatus</i>				927,1
<i>Cerastoderma edule</i>		2607,7		
Crustacés				
<i>Eurydice affinis</i>	1,8			
<i>Eurydice pulchra</i>		12,5		
<i>Leucothoe incisa</i>			0,1	
<i>Bathyporeia pilosa</i>	0,5	55,8		
<i>Bathyporeia sarsi</i>			0,9	
<i>Haustorius arenarius</i>			41,9	
<i>Corophium arenarium</i>	1108,6		1,4	
<i>Crangon crangon</i>			3,7	2,7
Echinodermes				
<i>Ophiura albida</i>			0,1	
Richesse spécifique	7	8	9	8
TOTAL 0,25 m ⁻²	1399,6	2740,8	77,3	1381,4
TOTAL m ⁻²	5598,4	10963,2	309,2	5525,6

Annexe 7.4 Radiale 2, résultats bruts (nombre d'individus par 0,25 m²)

Radiale 2	Point I	Point J	Point K	Point L	Total
Némertes					
Némertes sp.		1			1
Annélides Polychètes					
<i>Scolelepis squamata</i>	4	28			32
<i>Pygospio elegans</i>	13				13
<i>Spio martinensis</i>			1		1
<i>Nephtys cirrosa</i>			4	20	24
<i>Glycera tridactyla</i>			1		1
<i>Lumbrineris tetraura</i>				1	1
<i>Lanice conchilega</i>		2		1	3
Mollusques					
<i>Donax vittatus</i>				5	5
Crustacés					
<i>Eurydice affinis</i>	92	36			128
<i>Eurydice pulchra</i>	6	9			15
<i>Urothoe poseidonis</i>				1	1
<i>Haustorius arenarius</i>			6		6
<i>Bathyporeia pelagica</i>			11		11
<i>Bathyporeia pilosa</i>	354	76			430
<i>Bathyporeia sarsi</i>			4		4
<i>Corophium arenarium</i>	373	8			381
<i>Crangon crangon</i>		1			1
Insectes					
Larves de diptères	1				1
Richesse spécifique	7	8	6	5	26
TOTAL .0,25 m ⁻²	843	161	27	28	1059
TOTAL .m ⁻²	3372	644	108	112	4236

Annexe 7.5 Radiale 2, résultats bruts (biomasse en mg par 0,25 m²)

Radiale 2	Point I	Point J	Point K	Point L
Némertes				
Némertes sp.		1,8		
Annélides Polychètes				
<i>Scolelepis squamata</i>	19,3	63,2		
<i>Pygospio elegans</i>	0,8			
<i>Spio martinensis</i>			0,2	
<i>Nephtys cirrosa</i>			25,2	115,1
<i>Glycera tridactyla</i>			9,8	
<i>Lumbrineris tetraura</i>				52,7
<i>Lanice conchilega</i>		1,6		0,8
Mollusques				
<i>Donax vittatus</i>				3282,8
Crustacés				
<i>Eurydice affinis</i>	24,6	17,0		
<i>Eurydice pulchra</i>	4,7	9,1		
<i>Urothoe poseidonis</i>				0,9
<i>Haustorius arenarius</i>			33,6	
<i>Bathyporeia pelagica</i>			2,6	
<i>Bathyporeia pilosa</i>	85,3	15,3		
<i>Bathyporeia sarsi</i>			1,3	
<i>Corophium arenarium</i>	115,5	4,3		
<i>Crangon crangon</i>		0,5		
Insectes				
Larves de diptères	4,0			
Richesse spécifique	7	8	6	5
TOTAL .0,25 m ⁻²	254,2	112,8	72,7	3452,3
TOTAL .m ⁻²	1016,8	451,2	290,8	13809,2

Annexe 7.6 Radiale 3, résultats bruts (nombre d'individus par 0,25 m²)

Radiale 3	Point M	Point N	Total
Annélides Polychètes			
<i>Pygospio elegans</i>	39	13	52
<i>Spio martinensis</i>		6	6
<i>Scolelepis squamata</i>		4	4
<i>Eteone longa</i>		5	5
<i>Phyllodoce mucosa</i>		1	1
Mollusques			
<i>Hydrobia ulvae</i>	51	1	52
Crustacés			
<i>Eurydice affinis</i>	10	126	136
<i>Eurydice pulchra</i>	9	5	14
<i>Bathyporeia pilosa</i>	1	890	891
<i>Corophium arenarium</i>	3720	658	4378
Insectes			
Larves de diptères		2	2
Richesse spécifique	6	11	17
TOTAL .0,25 m ⁻²	3830	1711	5541
TOTAL .m ⁻²	15320	6844	22164

Annexe 7.8 Radiale 3, résultats bruts (biomasse en mg par 0,25 g·m⁻²)

Radiale 3	Point M	Point N
Annélides Polychètes		
<i>Pygospio elegans</i>	1,4	0,6
<i>Spio martinensis</i>		0,7
<i>Scolelepis squamata</i>		26,8
<i>Eteone longa</i>		0,9
<i>Phyllodoce mucosa</i>		0,3
Mollusques		
<i>Hydrobia ulvae</i>	29,2	1,4
Crustacés		
<i>Eurydice affinis</i>	2,6	32,2
<i>Eurydice pulchra</i>	6,1	1,7
<i>Bathyporeia pilosa</i>	0,3	188,4
<i>Corophium arenarium</i>	759,6	185,6
Insectes		
Larves de diptères		5,9
Richesse spécifique	6	11
TOTAL .0,25 m ⁻²	799,2	444,5
TOTAL .m ⁻²	3196,8	1778,0

8. LE DOMAINE BENTHIQUE SUBTIDAL

Auteurs : Dewarumez J.-M. & Luczak C.

Collaborateur : Menu D.

8.1. Introduction

Les études écologiques du benthos subtidale du site de Gravelines sont menées depuis 1973. Aux études descriptives des premières années ont succédé des études quantitatives du peuplement à *Abra alba* qui s'effectuent depuis 1976 à partir du point C (peuplement potentiellement perturbé par le fonctionnement de la centrale) et du point B (peuplement non perturbé). La comparaison de l'évolution des peuplements installés à ces deux points permet de mettre en évidence l'impact de la centrale sur les communautés benthiques du champ proche du rejet. Le fonctionnement de la centrale y induit un lessivage des fines en raison du fort courant engendré par le rejet des eaux de refroidissement. Ce lessivage a entraîné la disparition des espèces vasicoles qui y étaient établies.

Néanmoins, le point C est soumis aux mêmes recrutements que le point B. Plusieurs études l'ont montré et notamment celle de 1991 à l'occasion du recrutement de *Ensis directus*. Mais si le recrutement avait bien eu lieu avec la même intensité aux deux points, la population de *E. directus* ne s'est pas maintenue au point C du fait d'un sédiment inapproprié, tandis qu'au point B les conditions ont été favorables au maintien des recrues.

Le peuplement à *Abra alba* est particulièrement productif. La biomasse a déjà été proche de $700 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ (poids sec libre de cendres).

8.2. Matériels et méthodes

Deux points, l'un impacté (point C) et l'autre non impacté (point B) sont échantillonnés à chaque saison. L'échantillonnage consiste à effectuer 10 prélèvements à la benne Van Veen ($0,1 \text{ m}^2$) correspondant à 1 m^2 de surface échantillonnée pour les études faunistiques. Un 11^e échantillon est prélevé aux fins d'analyses granulométriques. Le sédiment est tamisé sur une maille circulaire de 1 mm. La faune est identifiée autant que possible au niveau spécifique.

Nous employons depuis 1996 la méthode du poids sec libre de cendres pour la mesure de la biomasse.

Les quatre campagnes ont été effectuées les 24 février, 13 mai, 23 juin et 13 octobre 2009

8.3. Résultats

8.3.1. Analyses granulométriques

8.3.1.1. Point B

Une altération sédimentologique a été mise en évidence au point B au printemps 1991. Le sédiment comportait une importante fraction d'éléments grossiers. Cette altération s'est progressivement résorbée par envasement et ensablement. En 1998, le sédiment était redevenu tout à fait normal, présentant des taux de pélites variant de 1,1 à 9,7 %. La teneur en sable grossier restait comprise entre 1 et 3 %.

En 2005, le cycle sédimentaire semblait se mettre en place jusqu'au printemps, puis la teneur en pélites chutait en été pour revenir à des valeurs caractéristiques de la période hivernale. Nous avons relié cette diminution avec l'absence complète de recrutement de *Lanice conchilega* (phénomène général sur les côtes de la baie sud de la mer du Nord en 2005), l'action bioturbatrice de cette espèce permettait le maintien en place des pélites.

Depuis 2006 le cycle de la teneur en pélites était à nouveau conforme au schéma habituel : augmentation printanière, maximum estival et décroissance à l'automne, avec toutefois des saisons plus ou moins marquées selon les années. Le sédiment était dominé par les sables moyens et fins. Les sables fins étaient dominants en période hivernale et les sables moyens en période estivale et printanière. La fraction grossière restant presque inexistante

En 2009, les teneurs en pélites étaient faibles en hiver (1,46 %) moyennes jusqu'au début de l'été (~5 %) et fortes en automne (12,79 %). Le sédiment reste dominé par les sables fins et moyens (toujours plus de 85 % au total). La fraction grossière (graviers) est toujours très faible, 0,7 % au maximum (tableau 8.1 et figure 8.1).

Tableau 8.1 Caractéristiques granulométriques du sédiment (% pondéraux)

Station B	24 fév 2009	13 mai 2009	23 juin 2009	13 oct 2009
Graviers grossiers	0,31	0,28	0,29	0,18
Graviers fins	0,23	0,18	0,43	0,37
Sables grossiers	0,68	1,06	1,51	0,42
Sables moyens	18,45	53,28	39,45	23,93
Sables fins	78,88	40,10	53,01	62,31
Pélites	1,46	5,11	5,30	12,79

8.3.1.2. Point C

Le sédiment du point C est en général dominé par les sables moyens et fins. Ces deux classes représentent toujours plus de 95 % du poids total du sédiment, les sables moyens représentant 82 à 89 % du sédiment et les sables fins de 9 à 17 %. Le sédiment est totalement dépourvu de pélites (de 0,00 à 0,01 %).

En 2009 à peu de chose près cette description est restée toujours valable. Toutefois au printemps le sédiment semblait être passé par une phase transitoire d'affinement avec prépondérance des sables fins (58 %) et très léger envasement (0,1 %). Mais, pour les trois autres campagnes, les sables moyens dominaient (60 à 87 %). Les sables fins variaient entre 8 et 38 % (tableau 8.2 et figure 8.2).

Tableau 8.2 Caractéristiques granulométriques du sédiment (% pondéraux)

Station C	24 fév 2009	13 mai 2009	23 juin 2009	13 oct 2009
Graviers grossiers	0,02	0,20	0,48	0,00
Graviers fins	0,23	0,20	0,57	0,21
Sables grossiers	1,02	1,21	4,90	0,54
Sables moyens	87,72	40,19	85,63	60,77
Sables fins	11,00	58,09	8,43	38,44
Pélites	0,02	0,10	0,00	0,04

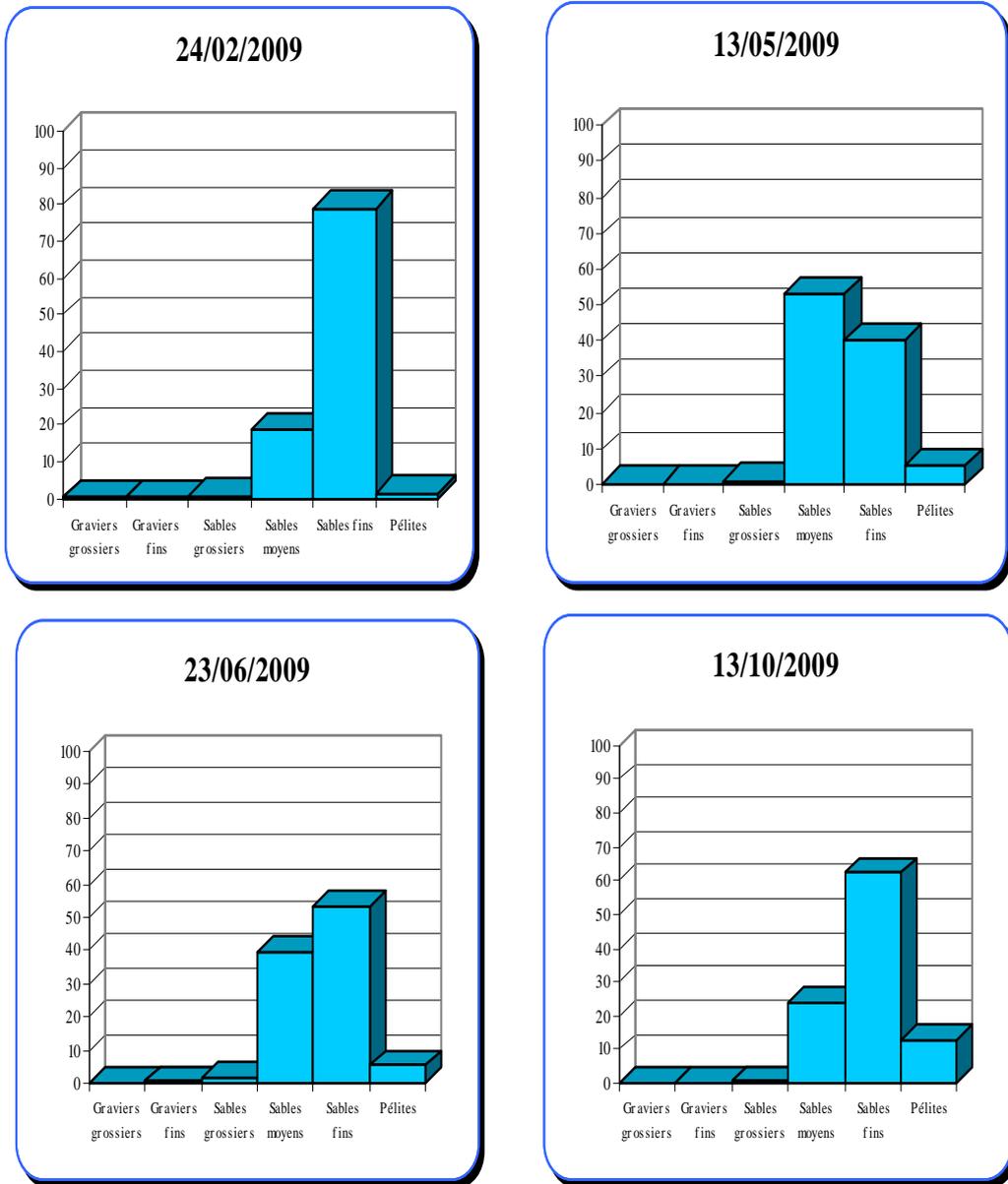


Figure 8.1 Point B, caractéristiques granulométriques du sédiment (% pondéraux)

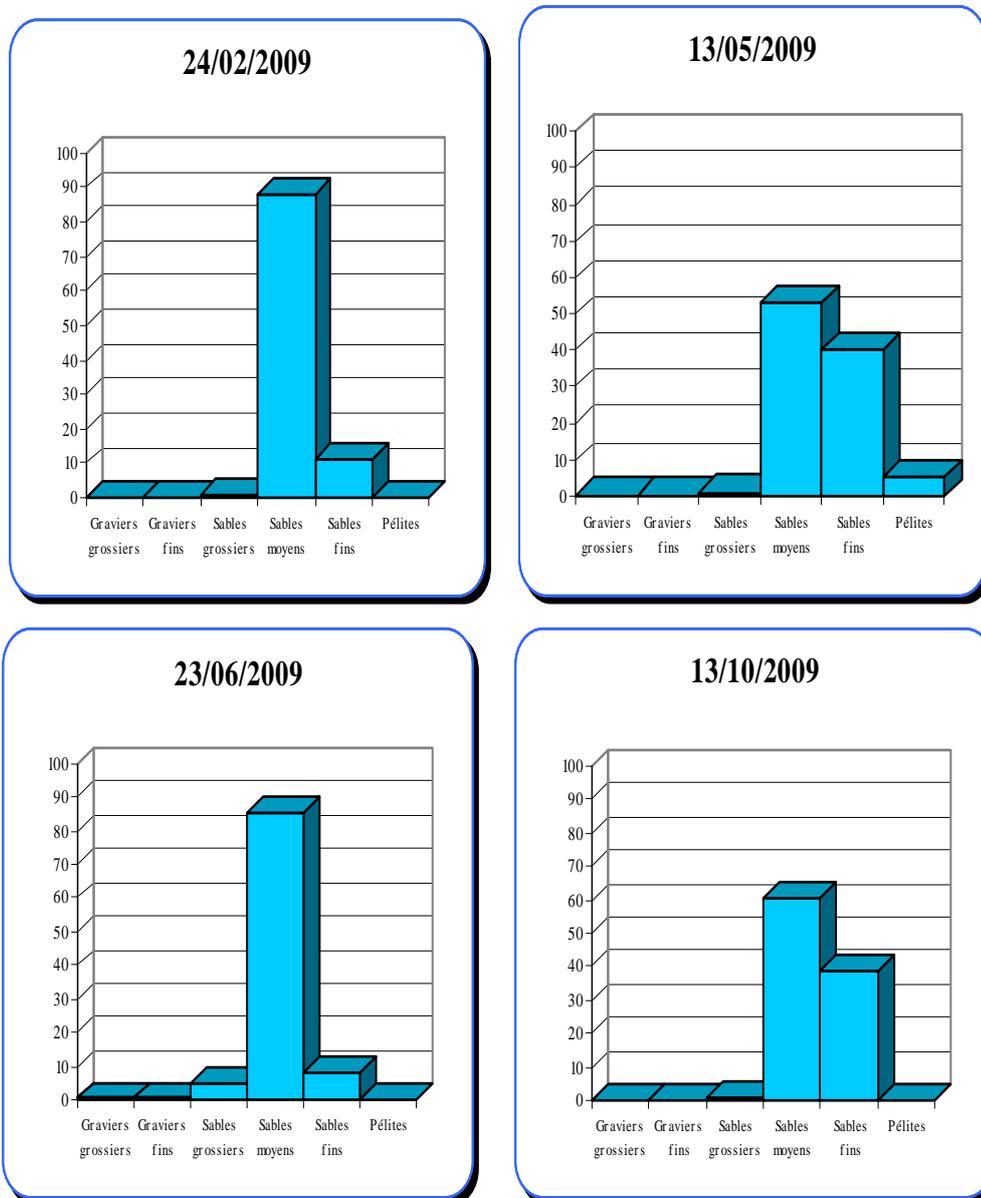


Figure 8.2. Point C, caractéristiques granulométriques du sédiment (% pondéraux)

8.3.2. Composition bionomique

8.3.2.1. Point B

En 2009, l'analyse faunistique a permis de recenser 65 taxons différents au point B, cette richesse spécifique reste stable depuis 2005 (tableau 8.3).

Tableau 8.3 Nombre des taxons des prélèvements benthiques récoltés depuis 2005 au point B

	2005	2006	2007	2008	2009
Nombre de taxons	63	60	62	65	65

Ils se répartissaient comme suit (annexes 8.1 et 8.2) :

- 1 Cnidaire
- 2 Némertes
- 1 Annélide Oligochète (sp.)
- 26 Annélides Polychètes
- 12 Mollusques
 - 3 Gastéropodes
 - 9 Bivalves
- 19 Crustacés
- 4 Echinodermes Ophiurides

Ces 65 taxons représentaient 19 141 individus récoltés. L'abondance totale était de 28 792 en 2008 et 96 317 au point B en 2007. Ce chiffre revient donc à une valeur inférieure à 2006 et 2008 après une valeur importante en 2007 qui était due au recrutement très important de *Lanice conchilega* en avril 2007 (près de 89 000 individus).

8.3.2.2. Point C

L'analyse faunistique a permis de recenser 26 taxons différents. La richesse spécifique globale est du même ordre qu'en 2008 (tableau 8.4).

Tableau 8.4 Nombre des taxons des prélèvements benthiques récoltés depuis 2005 au point C

	2005	2006	2007	2008	2009
Nombre de taxons	33	30	18	28	26

Ils se répartissaient comme suit (annexes 8.3 et 8.4)

- 1 Oligochète
- 10 Annélides Polychètes
 - 6 sédentaires
 - 4 errantes
- 2 Mollusques
 - 1 Gastéropode
 - 1 Bivalve
- 13 Crustacés
 - 1 Isopode

- 1 Cumacé
- 2 Mysidacé
- 5 Amphipodes
- 4 Décapodes

Ces 26 taxons représentaient 400 individus récoltés, ce résultat est très proche de celui des 10 dernières années d'étude si l'on excepte les années 2004 et 2005.

Nephtys cirrosa était l'espèce dominante du peuplement avec 75 % des individus récoltés.

La faible richesse spécifique et la faible densité du peuplement sur une période annuelle viennent confirmer les résultats obtenus au niveau de l'estran dont cette station n'est pas très éloignée.

8.3.3. Résultats

8.3.3.1. Point B

Ce point est représentatif du peuplement à *Abra alba* (cf. § 8.4). Il est situé en dehors de l'impact courantologique de la centrale. C'est en ce point qu'ont été mis en évidence les basculements bionomiques caractéristiques de ce peuplement. Ces basculements pour importants qu'ils soient ne remettent jamais en cause la structuration du peuplement, organisé autour d'une dizaine d'espèces.

Le recrutement pléthorique de *Ensis directus* en 1991 avait modifié l'organisation du peuplement. Mais, depuis quelques années, il semble apparaître un lent retour à des conditions similaires à ce qu'elles étaient avant 1991. Le processus de retour à la normale a débuté en 1997 ; on peut estimer qu'en 1999, les densités étaient redevenues normales pour certaines espèces.

Phénomène relativement rare dans le cas d'espèces invasives, *Ensis directus* a été intégré au cortège spécifique du peuplement alors que l'on assiste en général plutôt à une prédominance qui tend à limiter les populations des autres espèces. Il est à noter la disparition du couteau *Ensis arcuatus* depuis 1991 dans les prélèvements de la zone. Cette espèce n'a toujours pas été observée en 2009 à la station B.

En février 2009, le peuplement était normalement à l'étiage hivernal. La richesse spécifique était du même ordre de grandeur que les années antérieures avec 38 espèces (tableau 8.5).

Tableau 8.5 Nombre d'espèces (N), densité (nb. ind./m²) et biomasse (g/m²) des prélèvements benthiques récoltés en février- début mars depuis 2005

	Février 2005	Février 2006	Février 2007	Février 2008	Février 2009
N	45	37	41	39	38
densité	2186	620	817	3 311	2 691
biomasse	37,12	16,58	14,13	50,47	38,41

La densité globale, avec 2 691 ind. \cdot m⁻², restait assez proche de celle de 2008. Le peuplement était dominé par *Abra alba* (795 ind. \cdot m⁻²), de jeunes *Owenia fusiformis* (635 ind. \cdot m⁻²), *Mysella bidentata* (498 ind. \cdot m⁻²), *Ophiura albida* (237 ind. \cdot m⁻²) et *Nephtys hombergii* (133 ind. \cdot m⁻²). Enfin, comme les années antérieures, la présence en densité assez importante du nécrophage *Nassarius reticulatus* (65 ind. \cdot m⁻²) est à souligner. La biomasse globale de 38,41g \cdot m⁻² était largement supérieure à celle de février 2006 et 2007 mais inférieure à celles de 2005 et 2008 (tableau 8.1). Cette biomasse était due principalement à quatre espèces : *O. fusiformis* (12,62 g \cdot m⁻²), *Abra alba* (6,34 g \cdot m⁻²),

Nassarius reticulatus (5,70 g·m⁻²) et *Ophiura albida* (4,97 g·m⁻²). Ces quatre espèces représentaient 77 % de la biomasse totale.

En mai 2009, la richesse spécifique avait peu augmenté, avec 41 espèces, contrairement à la densité globale qui passait à 6 226 ind.m⁻² (même si les résultats sont basés sur 9 réplicats, soit 0,9 m² ; tableau 8.6).

Tableau 8.6 : Nombre d'espèces (N), densité (nb. ind./m²) et biomasse (g/m²) des prélèvements benthiques récoltés en mars (fin) avril-mai depuis 2005

	mars 2005	mai 2006	avril 2007	avril 2008	mai 2009*
N	37	39	31	41	41
densité	1389	937	89 503	14 143	6 226
biomasse	56,20	21,65	53,99	32,41	29,21

* calculs sur 0,9 m².

Cette densité était due au recrutement en abondance de l'annélide *Lanice conchilega* avec 3 970 individus, soit 63,8 % de l'abondance totale. Les autres densités étaient plus faibles : *Mysella bidentata* (553 ind.0,9 m⁻²), *Owenia fusiformis* (428 ind.0,9 m⁻²), *Spiophanes bombyx* (279 ind.0,9 m⁻²) et *Abra alba* (238 ind.0,9 m⁻²). La biomasse globale était cependant plus faible qu'en février avec 29,21 g·m⁻² et elle était essentiellement constituée de *O. fusiformis* (6,97 g·m⁻²), suivi de *Nassarius reticulatus* (6,46 g·m⁻²), *Abra alba* (3,54 g·m⁻²) et *nephtys hombergii* (3,48 g·m⁻²). Ces quatre espèces représentaient 70 % de la biomasse totale. Le peuplement était en début de recrutement à cette date, d'où la biomasse faible qui ne bénéficiait pas de l'augmentation importante des densités de certaines espèces fraîchement recrutées, donc de petite taille. Les premiers individus de *Ensis directus* de très petite taille sont apparus à cette date, dénotant l'existence d'un recrutement très récent.

Au mois de juin 2009, la richesse spécifique a diminué, avec 35 espèces récoltées. La densité avait diminué par rapport au mois de mai avec un total de 5 325 ind.·m⁻² (tableau 8.7).

Tableau 8.7 Nombre d'espèces (N), densité (nb. ind./m²) et biomasse (g/m²) des prélèvements benthiques récoltés en juin depuis 2005

	juin 2005	juin 2006	juin 2007	juin 2008	juin 2009
N	40	40	48	45	35
densité	1 166	13 959	3 331	6 909	5 325
biomasse	32,16	87,35	22,01	65,87	22,98

Cette diminution était due à la mortalité importante des jeunes *Lanice conchilega* recrutés en avril-mai (742 ind.·m⁻²). Le fait marquant de cette date est le recrutement massif d'*Ensis directus* avec 2 887 ind./m². La diminution du nombre d'espèces peut être relié à cet évènement. Quelques espèces présentaient cependant un recrutement détectable : *Eumida sanguinea* (429 ind.·m⁻²), *Phyllodoce mucosa* (408 ind.·m⁻²), et d'autres maintenaient des densités relativement importantes comme *L. conchilega* (742 ind.·m⁻²) et *Abra alba* (202 ind.·m⁻²). La biomasse globale

diminuait encore avec $22,97 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$. L'espèce qui y contribuait le plus était *E. directus* ($10,09 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$), suivie par *L. conchilega* ($4,04 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$), *Abra alba* ($3,38 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$) et *Nassarius reticulatus* ($1,48 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$). Ces quatre espèces représentaient 82,6 % de la biomasse totale.

En octobre 2009, la richesse spécifique augmentait à nouveau pour atteindre 47 espèces. Par contre, la densité globale restait relativement stable par rapport à juin avec $4\,899 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$ (tableau 8.8).

Tableau 8.8 Nombre d'espèces (N), densité (nb. ind./m²) et biomasse (g/m²) des prélèvements benthiques récoltés en septembre-décembre depuis 2005

	septembre 2005	septembre 2006	décembre 2007	octobre 2008	octobre 2009
N	46	47	42	51	47
densité	825	6 123	2 666	4 429	4 899
biomasse	19,29	64,22	158,97	44,66	61,19

Après *Ensis directus* ($2\,394 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$) dont le recrutement en mai s'est maintenu, les espèces les plus abondantes étaient celles issues du recrutement printanier: *Phyllodoce mucosa* ($616 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$), *Lanice conchilega* ($411 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$), *Spiophanes bombyx* ($280 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$) et *Owenia fusiformis* ($224 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$). S'y ajoutait *Abra alba* qui maintenait toujours une densité importante avec $207 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$. La biomasse globale augmentait significativement par rapport à celle de juin avec $61,19 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$. Les principales espèces constituant cette biomasse étaient, pour plus de 56 % *E. directus* ($34,5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$), *Nassarius reticulatus* ($7,11 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$), *L. conchilega* ($5,24 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$) et *O. fusiformis* ($4,85 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$). Ces quatre espèces représentaient 84,5 % de la biomasse totale.

8.3.3.2. Point C

Le point C permet de visualiser l'impact de la centrale sur le peuplement à *Abra alba* dans le champ proche du rejet. Le lessivage des fines du sédiment par les eaux rejetées par la centrale, parfaitement matérialisé par les analyses granulométriques, provoque la disparition des espèces vasicoles. Cependant certains recrutements observés au point B peuvent être observés, en résonance, de manière atténuée au point C. Ce phénomène a déjà été observé plusieurs fois, par exemple en 1991 avec *Ensis directus* et en 2000 avec *Lanice conchilega*.

Les résultats enregistrés en 2009 au point C ont confirmé à la fois l'impact de la centrale sur les peuplements benthiques du champ proche de la centrale mais aussi la stabilité de cet impact au cours du temps. Le maintien du peuplement en place confirme la constance de la perturbation. *Nephtys cirrosa* demeure l'espèce la plus importante du peuplement établi à ce point.

La campagne de février 2009 a donné des résultats similaires à ce que l'on peut rencontrer habituellement dans les conditions hivernales. La densité était moyenne par rapport aux cinq dernières années d'étude ($92 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$), en hausse par rapport à 2007 et 2008 (tableau 8.9). *Nephtys cirrosa* représente 79 % des individus récoltés. La richesse spécifique était en forte diminution en 2008, elle est revenue à un niveau équivalent à celui de 2006 : 12 espèces. Le peuplement était dominé par *N. cirrosa* ($73 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$). La biomasse était moyenne par rapport aux 5 dernières années ($0,6 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$). Les espèces les plus contributives à l'élaboration de la biomasse étaient *N. cirrosa* ($0,57 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$) et *Portumnus latipes* ($0,05 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$).

Tableau 8.9 Nombre d'espèces (N), densité (nb. ind./m²) et biomasse (g/m²) des prélèvements benthiques récoltés en hiver depuis 2005

	2005	2006	2007	2008	2009
N	8	13	8	5	12
densité	81	134	60	63	92
biomasse	0,6	1,3	0,4	0,8	0,6

En mai 2009 le peuplement s'est appauvri et la richesse spécifique a diminué (12 espèces), bien que la densité globale ait augmenté (94 ind. \cdot m⁻²). Le peuplement était dominé par : *Nephtys cirrosa* (59 ind. \cdot m⁻²; tableau 8.10). D'autres espèces étaient également récoltées mais en densité faible et les individus récoltés étaient des juvéniles de *Lanice conchilega* (10 ind. \cdot m⁻²) et *Portumnus latipes*, *Bathyporeia elegans* et *B. pelagica* (tous trois à 3 ind. \cdot m⁻²). La présence d'une autre espèce, *Ensis directus*, venait confirmer la possibilité de résonance des recrutements qui ont lieu au point B. La biomasse était du même ordre que lors des 5 dernières années. Les espèces qui contribuaient le plus à l'élaboration de la biomasse étaient *N. cirrosa* : 0,47 g \cdot m⁻² et *P. latipes* (0,23 g \cdot m⁻²).

Tableau 8.10 Nombre d'espèces (N), densité (nb. ind./m²) et biomasse (g/m²) des prélèvements benthiques récoltés au printemps depuis 2005

	2005	2006	2007	avril 2008	2009
N	17	14	13	14	12
densité	312	115	68	61	94
biomasse	0,7	0,5	0,5	0,5	0,7

En juin 2009, la richesse spécifique était en diminution sensible (9 espèces), tout comme la densité globale (128 ind. \cdot m⁻²), résultat proche de celui enregistré en 2006 (tableau 8.11). Les espèces dominantes étaient *Nephtys cirrosa* (105 ind. \cdot m⁻²) et *Gammarus zaddachi* (9 ind. \cdot m⁻²), il s'agissait de la première récolte de cette espèce à ce point. La biomasse était supérieure à celle du mois de mai (1,0 g \cdot m⁻²). *N. cirrosa* (0,78 g \cdot m⁻²) et *Portumnus latipes* (0,22 g \cdot m⁻²) représentaient 98 % de la biomasse totale.

Tableau 8.11 Nombre d'espèces (N), densité (nb. ind./m²) et biomasse (g/m²) des prélèvements benthiques récoltés en été depuis 2005

	2005	2006	2007	2008	2009
N	15	12	8	14	9
densité	558	143	85	206	128
biomasse	3,9	4,0	0,5	2,6	1,0

En octobre 2009 la densité de la communauté évoluait peu (8 espèces), la densité de population chutait à (86 ind. \cdot m⁻²; tableau 8.12). La densité de la population de *Nephtys cirrosa* restait supérieure à celle du printemps (61 ind. \cdot m⁻²). Les espèces les plus contributives à l'élaboration de la biomasse étaient *N. cirrosa* (0,34 g \cdot m⁻²; 37 %), *Diogenes pugilator* (0,32 g \cdot m⁻²; 35 %), *Portumnus latipes* (0,13 g \cdot m⁻²; 14 %) et *Ensis directus* (0,12 g \cdot m⁻², 13 %).

Tableau 8.12 Nombre d'espèces (N), densité (nb. ind./m²) et biomasse (g/m²) des prélèvements benthiques récoltés en automne depuis 2005

	2005	2006	2007	2008	2009
N	14	8	9	12	8
densité	214	85	39	99	86
biomasse	3,8	0,7	0,7	1,2	0,9

Le déficit en densité au point C par rapport au point témoin B était encore très important, il atteignait 98 % (tableau 8.13). Ce déficit reste très élevé depuis 2006. L'impact en terme de biomasse restait aussi très important (97,9 %).

Tableau 8.13 Déficit de densité (ind. \cdot m⁻²) entre les points B et C

densités	Février 2009	Mai 2009	Juin 2009	Octobre 2009	2009
Station B	2691	6226	5325	4899	19141
Station C	92	94	128	86	400
Déficit (%)	96,7	98,5	97,7	98,3	98,0
Biomasses (g)					
Station B	38,409	29,210	22,975	61,191	151,785
Station C	0,642	0,740	1,011	0,916	3,309
Déficit (%)	98,4	97,5	95,8	98,5	97,9

L'impact de la centrale sur les peuplements benthiques reste donc très fort dans le champ proche de la centrale. Il provoque un déficit de 98,0 % de la densité (densité moyenne de 100 ind. \cdot m⁻² au point C contre 4 785 ind. \cdot m⁻² au point B) et de 97,9 % de la biomasse, moyenne annuelle de 0,83 g \cdot m⁻² au point C contre 37,75 g \cdot m⁻² au point B.

8.4. Étude des populations d'*Abra alba* et de *Tellina fabula* du point B

Ces deux espèces de bivalves sont typiques des sables fins envasés. Disparues du point C du fait du lessivage des sédiments, leurs populations font toujours l'objet d'un suivi particulier au point B dans le cadre du suivi écologique de la Centrale.

8.4.1. Étude de la population de *Abra alba*

La population d'*Abra alba* est connue pour ses fluctuations brutales, liées à son caractère pionnier. Ces fluctuations peuvent être attribuées au recrutement ou à des migrations passives. La dynamique de la population de cette espèce est basée sur un cycle de 7 à 8 ans. Cette espèce a présenté en 1998 et 1999 de bons recrutements (1 249 ind. \cdot m⁻² et 1 068 ind. \cdot m⁻²) alors que depuis 1991 seuls deux recrutements importants avaient été mis en évidence sans maintien de la population. En 2000, la

population s'était maintenue à un niveau de densité de 700 à 800 ind. \cdot m⁻² puis après une forte régression jusqu'à l'automne 2001, la densité, grâce aux nouvelles recrues, avait atteint 762 ind. \cdot m⁻² pour diminuer à nouveau durant l'hiver 2002 et atteindre 611 ind. \cdot m⁻² à l'automne de la même année. En 2003, la population diminuait de nouveau durant la période hivernale pour atteindre seulement 139 ind. \cdot m⁻² en juillet. Un important recrutement était cependant noté au début de l'automne et les densités atteignaient 1 116 ind. \cdot m⁻² en octobre. Une telle abondance n'avait pas été atteinte depuis septembre 1999. De 2004 à 2006, on a observé le cycle habituel, soit une diminution des densités à la fin de l'hiver début du printemps puis un recrutement en juin avec un maintien en automne. En 2007, un scénario différent était observé, avec une diminution classique en fin d'hiver-début de printemps (68 et 45 ind. \cdot m⁻² respectivement en février et avril), puis les densités étaient restées faibles en juin (55 ind. \cdot m⁻²), et le recrutement a eu lieu plus tardivement en automne comme le soulignaient les 562 ind. \cdot m⁻² observés en décembre. En 2008, le cycle observé de 2004 à 2006 était apparu de nouveau mais avec des densités plus élevées : minimum de 249 ind. \cdot m⁻² en avril et maximum de 1 173 ind. \cdot m⁻² en juin. Les effectifs importants de 2008 ont perduré en 2009, avec une population de plus de 200 individus toute l'année après la classique diminution de fin d'hiver (795 ind. m⁻² ; figure 8.3).

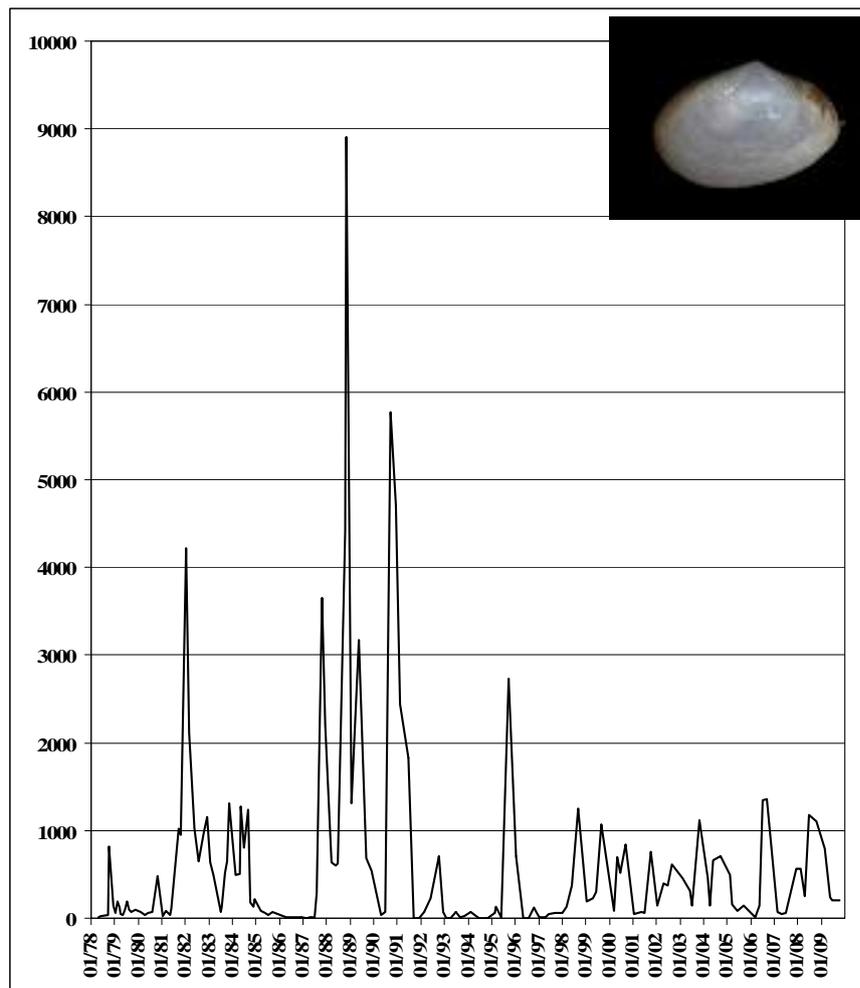


Figure 8.3 *Abra alba*, évolution de la densité (par m²) de la population au point B entre 1978 et 2009

8.4.2. Étude de la population de *Tellina fabula*

Cette espèce n'est pas une espèce pionnière et sa densité habituelle n'atteint jamais celle d'*Abra alba*. La diminution drastique de ses densités coïncide avec l'arrivée du couteau américain *Ensis directus* en 1991. La densité de cette espèce était restée à un niveau très faible en 1997 et avait bénéficié en 1998 et 1999 de recrutements légèrement meilleurs (66 ind. \cdot m⁻² en 1998 et 83 ind. \cdot m⁻² en 1999). Le recrutement ne s'était pas maintenu au cours des deux années suivantes. En 2000, la population était restée à un niveau faible toute l'année, et inférieure à 50 ind. \cdot m⁻². En 2001, les densités étaient encore inférieures à celles de 2000 et la population était constituée de très petits individus. En 2002, le scénario était assez proche de celui de 2001, avec un maximum de 43 ind. \cdot m⁻² en juin. En 2005, comme en 2004, la quasi-totalité des individus était de petite taille. Une fois de plus, tout se passe donc comme si les recrues (en nombre limité d'ailleurs) ne trouvaient pas localement les conditions nécessaires à leur survie au delà de quelques semaines à quelques mois. En effet, avec 97 ind. \cdot m⁻² en octobre 2003, densité la plus élevée depuis 1991, la question se posait de la possibilité d'une réimplantation de l'espèce de façon plus importante sur le site. Les chiffres de 2005 confirmaient l'interprétation de 2004 et montraient qu'il n'en était rien. En 2006, la densité d'octobre 2003 était presque atteinte en septembre avec 96 individus par m². Cette densité résultait d'un recrutement peu important au printemps mais qui s'était maintenu durant l'été. En 2007, les effectifs revenaient à des valeurs faibles mais stables durant toute l'année avec 14 à 24 ind. \cdot m⁻². Peu de changements majeurs en 2008, la population s'était cependant maintenue à un niveau plus élevé avec 48 à 82 ind. \cdot m⁻². Pour 2009, les densités les plus importantes depuis 1991 ont été observées en février (106 individus m⁻²) puis stabilité des effectifs autour d'une trentaine d'individus (figure 8.4).

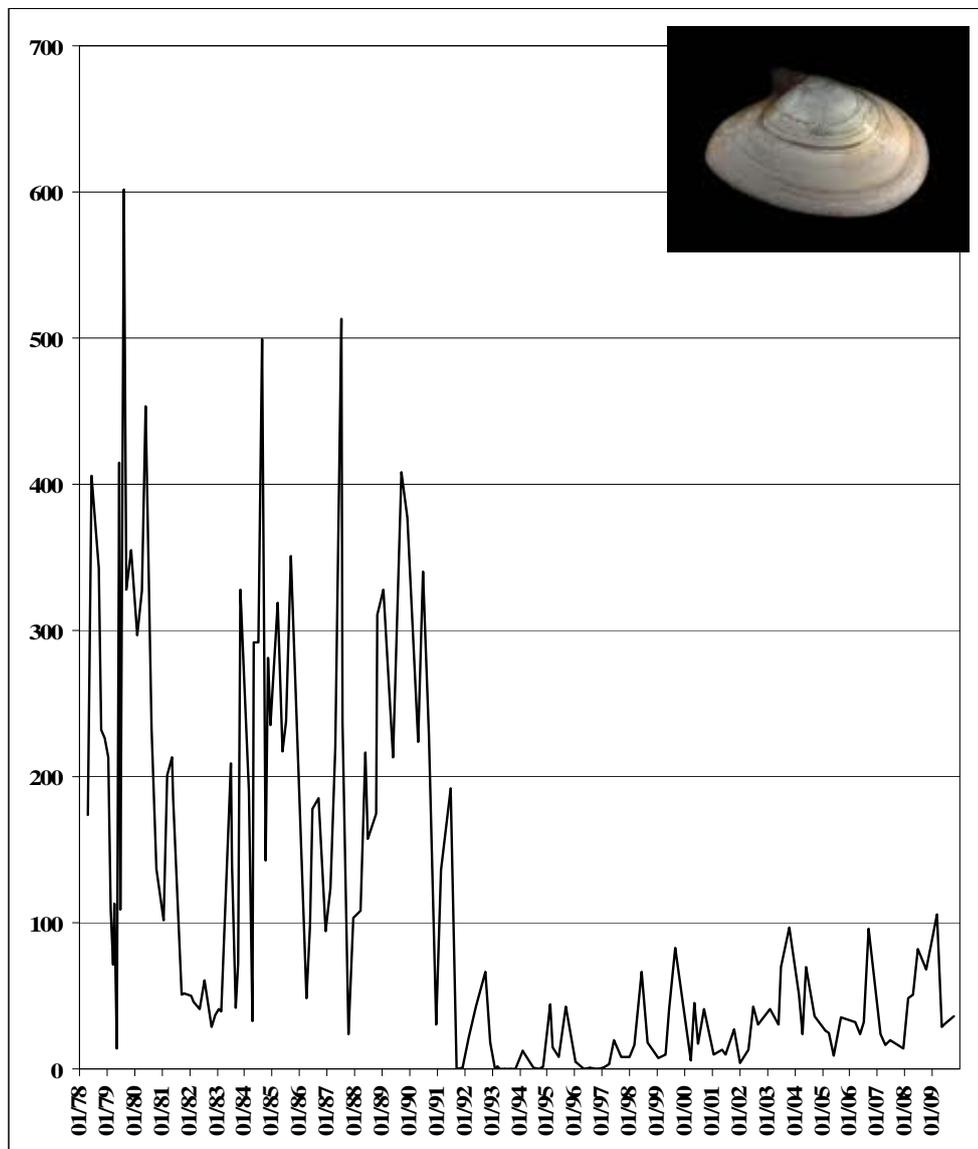


Figure 8.4 *Tellina fabula*, évolution de la densité (par m²) de la population au point B entre 1978 et 2009

8.5. Éléments de conclusion

Le **point B** a été caractérisé en 2009 par les recrutements en début et fin de printemps des espèces habituelles : *Lanice conchilega*, *Eumida sanguinea*, *Spiophanes bombyx*, *Phyllodoce mucosa*, *Ophiura albida* et surtout par le recrutement massif du couteau américain *Ensis directus* en mai, et juin et qui dominait le peuplement tant en abondance qu'en biomasse en octobre. Cette année, la population de *L. conchilega* s'est maintenue au cours de l'été. A noter le maintien à des densités intéressantes des bivalves *Abra alba* et *Tellina fabula*.

Sur le plan global, la densité moyenne de 4 785 ind. \cdot m⁻² était dans la norme des années antérieures sans recrutements pléthoriques notamment de *L. conchilega*. La biomasse moyenne était en baisse par rapport aux années antérieures avec 37,95 g \cdot m⁻² sans doute en relation avec le recrutement important de *E. directus* ayant limité l'apparition en masse d'autres espèces, et dont les individus

étaient encore de petite taille. La richesse spécifique avec 65 espèces correspondait au niveau des années antérieures (60 à 67 espèces depuis 2003 à part 2004 avec 73 espèces).

Les résultats enregistrés au **point C** révèlent une année 2009 caractérisée par des résultats un peu plus faibles qu'en 2007 au niveau de la richesse spécifique, des densités et de la biomasse, mais ils restaient dans la moyenne de ceux des études antérieures. Les peuplements qui s'établissent à ce point étaient toujours du type sabulicole et le déficit en densité et biomasse était toujours considérable par rapport au point B (respectivement, 98% et 97,9 %). Ce déficit était du même ordre que celui des études précédentes.

Les espèces récoltées en zone non impactée peuvent être trouvées au point C mais en densité beaucoup plus faible, comme par exemple cette année *E. directus*. Cependant, il faut aussi rappeler que le peuplement installé au point C est tout à fait semblable, tant du point de vue de la composition faunistique que de la densité et de la biomasse globales, à ceux établis sur les sédiments similaires dans la région. De plus, la zone de déficit est localisée au débouché du canal de rejet et ne s'étend pas au-delà de quelques centaines de mètres. Enfin, ce déficit est uniquement dû à l'action de la courantologie et que rien ne permet de penser que l'on puisse être en présence d'un autre impact du rejet.

Du fait de l'apparition en 1991 de *Ensis directus* la densité des populations d'*Abra alba* et de *Tellina fabula* au point B n'atteignaient toujours pas le niveau qu'elles avaient au cours des années 80 et 90.

Annexe 8.1 : Point B, nombre d'individus par m² (1^{ère} partie)

	24-févr.-09	13-mai-09	23-juin-09	13-oct.-09
	1 m ²	0,9m ²	1 m ²	1 m ²
Cnidaires				
<i>Sagartia troglodytes</i>	1	0	0	2
Annélides Polychètes				
<i>Capitella capitata</i>	1	0	0	0
<i>Heteromastus filiformis</i>	2	1	0	3
<i>Notomastus latericeus</i>	3	11	35	26
<i>Scoloplos armiger</i>	0	0	0	1
<i>Glycera alba</i>	3	0	0	2
<i>Glycera tridactyla</i>	0	0	1	0
<i>Goniadella bobretzkii</i>	1	0	0	1
<i>Psamathe fusca</i>	0	0	0	1
<i>Nephtys cirrosa</i>	4	8	0	2
<i>Nephtys hombergii</i>	133	160	32	87
<i>Nephtys longosetosa</i>	1	2	0	0
<i>Eunereis longissima</i>	4	2	4	12
<i>Pholoë baltica</i>	4	25	1	8
<i>Eumida sanguinea</i>	0	29	429	130
<i>Phyllodoce groenlandica</i>	0	0	1	0
<i>Phyllodoce mucosa</i>	2	21	408	616
<i>Malmgrenia arenicolae</i>	0	4	0	1
<i>Malmgrenia glabra</i>	0	12	3	1
<i>Sthenelais boa</i>	4	1	0	0
<i>Owenia fusiformis</i>	635	428	47	224
<i>Magelona johnstoni</i>	0	2	5	4
<i>Spio martinensis</i>	0	4	1	0
<i>Spiophanes bombyx</i>	110	279	191	280
<i>Chaetozone setosa</i>	34	51	7	71
<i>Pectinaria koreni</i>	8	10	85	67
<i>Lanice conchilega</i>	0	3970	742	411
Annélides Oligochètes				
<i>Oligochaete sp</i>	3	3	0	0
Mollusques Gastéropodes				
<i>Crepidula fornicata</i>	1	0	0	1
<i>Nassarius reticulatus</i>	65	53	14	57
<i>Euspira pulchella</i>	0	0	1	0

Annexe 8.1 (suite) : Point B, nombre d'individus par m²

	24-févr.-09	13-mai-09	23-juin-09	13-oct.-09
Mollusques Bivalves				
<i>Donax vittatus</i>	1	2	0	0
<i>Spisula subtruncata</i>	0	1	0	1
<i>Mysella bidentata</i>	498	553	108	72
<i>Ensis directus</i>	8	63	2887	2394
<i>Abra alba</i>	795	238	202	207
<i>Macoma balthica</i>	5	3	0	2
<i>Tellina fabula</i>	106	29	31	36
<i>Venerupis pullastra</i>	2	0	0	0
<i>Mya truncata</i>	1	0	0	0
Némertes				
<i>Cerebratulus sp</i>	2	5	1	0
<i>Lineus bilineatus</i>	0	0	0	1
Crustacés				
<i>Crangon crangon</i>	2	0	1	8
<i>Pagurus bernhardus</i>	3	0	1	1
<i>Corystes cassivelaunus</i>	0	0	0	1
<i>Polybius arcuatus</i>	0	0	0	2
<i>Polybius holsatus</i>	2	0	11	2
<i>Gastrosaccus spinifer</i>	0	0	1	0
<i>Pariambus typicus</i>	0	14	4	41
<i>Ampelisca brevicornis</i>	0	0	0	4
<i>Atylus falcatus</i>	0	4	0	2
<i>Atylus swammerdami</i>	0	90	8	19
<i>Microtopopus maculatus</i>	0	0	0	2
<i>Erichtonius punctatus</i>	0	0	0	3
<i>Leucothé incisa</i>	1	12	35	32
<i>Melita palmata</i>	0	1	0	0
<i>Urothoë poseidonis</i>	2	7	2	0
<i>Bodotria scorpioides</i>	0	3	0	0
<i>Diastylis bradyi</i>	2	46	1	1
<i>Apseudes talpa</i>	0	1	0	0
<i>Idotea linearis</i>	2	0	0	0
Echinodermes				
<i>Asterias rubens</i>	0	0	0	1
<i>Amphiura brachiata</i>	3	7	6	1
<i>Ophiura albida</i>	237	70	17	56
<i>Ophiura ophiura</i>	0	1	2	2
TOTAL	2691	6226	5325	4899
Richesse spécifique	38	41	35	47

Annexe 8.2 : Point B, biomasse en g.m²

	24-févr.-09	13-mai-09	23-juin-09	13-oct.-09
	10 réplcats	9 réplcats	10 réplcats	10 réplcats
Cnidaires				
<i>Sagartia troglodytes</i>	1,049			0,188
Annélides Polychètes				
<i>Notomastus latericeus</i>	0,066	0,131	0,241	0,062
<i>Glycera alba</i>	0,085			
<i>Glycera tridactyla</i>			0,018	
<i>Nephtys hombergii</i>	2,798	3,479	0,721	0,968
<i>Nephtys longosetosa</i>				
<i>Eunereis longissima</i>	0,147	0,061		0,244
<i>Eumida sanguinea</i>			0,070	0,040
<i>Phyllodoce groenlandica</i>			0,010	
<i>Phyllodoce mucosa</i>			0,144	0,245
<i>Sthenelais boa</i>	0,043	0,028		
<i>Owenia fusiformis</i>	12,620	6,975	0,802	4,847
<i>Spiophanes bombyx</i>	0,031	0,057	0,040	0,069
<i>Chaetozone setosa</i>				0,004
<i>Pectinaria koreni</i>	0,196	0,046	0,362	0,787
<i>Lanice conchilega</i>		1,670	4,036	5,238
Mollusques Gastéropodes				
<i>Crepidula fornicata</i>	0,001			0,001
<i>Nassarius reticulatus</i>	5,704	6,465	1,480	7,107
<i>Euspira pulchella</i>			0,030	
Mollusques Bivalves				
<i>Donax vittatus</i>		0,301		
<i>Spisula subtruncata</i>		1,128		0,003
<i>Mysella bidentata</i>	0,313	0,392	0,046	0,032
<i>Ensis directus</i>		0,005	8,025	27,224
<i>Ensis directus (cassés)</i>	2,254	2,542	2,062	7,279
<i>Abra alba</i>	6,338	3,541	3,380	2,152
<i>Macoma balthica</i>	0,033	0,664		0,001
<i>Tellina fabula</i>	0,908	0,204	0,308	0,249
<i>Venerupis pullastra</i>	0,012			
<i>Mya truncata</i>	0,551			
Némertes				
<i>Cerebratulus sp</i>	0,029	0,071	0,062	
Crustacés				
<i>Crangon crangon</i>	0,048			0,555
<i>Pagurus bernhardus</i>	0,085		0,108	
<i>Corystes cassivelaunus</i>				0,010
<i>Polybius arcuatus</i>				0,085
<i>Polybius holsatus</i>	0,003		0,186	0,678
<i>Atylus swammerdami</i>		0,025	0,006	
<i>Idotea linearis</i>	0,017			
Echinodermes				
<i>Asterias rubens</i>				1,306
<i>Amphiura brachiata</i>	0,087	0,190	0,359	
<i>Ophiura albida</i>	4,975	1,070	0,298	1,537
<i>Ophiura ophiura</i>		0,116	0,177	0,261
Divers	0,017	0,049	0,003	0,019
Richesse spécifique	38	41	35	47
TOTAL	38,409	29,210	22,975	61,191

Annexe 8.3 : Point C, nombre d'individus par m²

	24/02/2009	13/05/2009	23/06/2009	13/10/2009
Nemertes				
<i>Oligochaeta</i> sp		1		
Annélides Polychètes				
<i>Scolelepis squamata</i>	1			
<i>Spiophanes bombyx</i>				2
<i>Spio martinensis</i>	3	9	4	2
<i>Cirratulus cirratus</i>	1			
<i>Ophelia borealis</i>	1			
<i>Phyllodoce mucosa</i>	4			1
<i>Eteone longa</i>			1	
<i>Nephtys cirrosa</i>	73	59	105	61
<i>Lumbrineris tetraura</i>				1
<i>Lanice conchilega</i>		10		
Mollusques				
<i>Nassarius reticulatus</i>		1		
<i>Ensis directus</i>		1		10
Crustacés				
<i>Eurydice pulchra</i>			1	
<i>Vaunthompsonia cristata</i>	1			
<i>Gammarus zaddachi</i>			9	
<i>Atylus swammerdami</i>		2		
<i>Corophium sextonae</i>			3	
<i>Bathyporeia elegans</i>	1	3	1	
<i>Bathyporeia pelagica</i>	2	3		
<i>Schistomysis spiritus</i>		1		
<i>Gastrosaccus spinifer</i>	2			
<i>Crangon crangon</i>		2	2	
<i>Diogenes pugilator</i>				4
<i>Pisidia longicornis</i>	1			
<i>Portumnus latipes</i>	2	3	2	5
Richesse spécifique	12	12	9	8
Total ·m⁻²	92	94	128	86

Annexe 8.4 : Point C, biomasse en mg·m⁻²

	24/02/2009	13/05/2009	23/06/2009	13/10/2009
Nemertes				
<i>Oligochaeta</i> sp		0,2		
Annélides Polychètes				
<i>Scolelepis squamata</i>	3,6			
<i>Spiophanes bombyx</i>				0,1
<i>Spio martinensis</i>	1,1	1,2	0,1	0,7
<i>Cirratulus cirratus</i>	4,5			
<i>Ophelia borealis</i>	0,4			
<i>Phyllodoce mucosa</i>	12,2			0,1
<i>Eteone longa</i>			0,4	
<i>Nephtys cirrosa</i>	573,1	467,2	776,2	342,3
<i>Lumbrineris tetraura</i>				5,1
<i>Lanice conchilega</i>		3,0		
Mollusques				
<i>Nassarius reticulatus</i>		32,1		
<i>Ensis directus</i>		0,1		118,5
Crustacés				
<i>Eurydice pulchra</i>			0,4	
<i>Vaunthompsonia cristata</i>	0,1			
<i>Gammarus zaddachi</i>			8,6	
<i>Atylus swammerdami</i>		0,4		
<i>Corophium sextonae</i>			1,0	
<i>Bathyporeia elegans</i>	0,5	1,0	0,2	
<i>Bathyporeia pelagica</i>	0,9	1,1		
<i>Schistomysis spiritus</i>		0,7	0,7	
<i>Gastrosaccus spinifer</i>	6,3			
<i>Crangon crangon</i>		1,4	6,6	
<i>Diogenes pugilator</i>				319,1
<i>Pisidia longicornis</i>	1,4			
<i>Portumnus latipes</i>	45,7	231,7	217,1	130,4
Richesse spécifique	12	12	9	8
Total ·m⁻²	641,8	740,1	1011,3	916,3