

Département ODE
Laboratoire Environnement-Ressources des Pertuis Charentais

Patrick Soletchnik
Stéphane Robert
Olivier Le Moine

Année 2013 – R.INT ; ODE / LER / LERPC 2013

Suivi expérimental de la croissance de la moule, *Mytilus edulis*, sur les bouchots des Pertuis Charentais entre 2000 et 2010. Etude des performances de croissance en liens avec l'environnement des élevages.



Remerciements

Les travaux scientifiques présentés dans ce rapport ont été réalisés avec un soutien financier de la Région Poitou-Charentes et du Feder

Numéro d'identification du rapport : Diffusion : libre : <input checked="" type="checkbox"/> restreinte : <input type="checkbox"/> interdite : <input type="checkbox"/> Validé par : J. Mazurie : Joseph.Mazurie@ifremer.fr G. Thomas : Gerard.Thomas@ifremer.fr	date de publication : 2013 nombre de pages : 140 bibliographie : Oui illustration(s) : Oui langue du rapport : Français
Titre de l'article : Suivi expérimental de la croissance de la moule, <i>Mytilus edulis</i> , sur les bouchots des Pertuis Charentais, entre 2000 et 2010. Etude des performances de croissance en liens avec l'environnement des élevages.	
Contrat n° Rapport intermédiaire <input type="checkbox"/> Rapport définitif <input checked="" type="checkbox"/>	
Auteurs principaux : Patrick Soletchnik ; Stéphane Robert ; Olivier Le Moine.	Organisme / Direction / Service, laboratoire IFREMER / ODE / LERPC
Contributeurs : J.M. Chabirand, P. Guilpain, J. Grizon, S. Guesdon, S. Genauzeau, M. Ryckaert, A. Schmitt, J.L. Seugnet, G. Thomas.	
Cadre de la recherche : Contrat de Projet Etat-Région Poitou-Charentes 2007-2013. Convention n° 8/RPC-A-29 du 19 mai 2008	
Résumé : L'étude constitue une analyse du réseau de suivi de la croissance de la moule bleue (<i>Mytilus edulis</i>) dans les pertuis charentais (réseau REMOULA) en 2000-2010, sur 5 sites expérimentaux des principaux bouchots des pertuis. Elle comprend une analyse environnementale et une série d'analyses multivariées pour tenter d'expliquer les relations entre l'environnement et la croissance des moules. L'environnement est analysé à l'aide d'un large panel de variables météorologiques, hydrodynamiques et hydrobiologiques. Un des objectifs de l'étude est d'évaluer le poids de la variabilité inter annuelle de la croissance (effet année) au regard de la localisation géographique des élevages (effet site). Dans cette étude, quelques années : 2005, 2007 et 2010 apparaissent comme de très bonnes années de croissance ; elles correspondent aux 3 meilleurs années de blooms à <i>Skeletonema costatum</i> dans les pertuis charentais. Alors que la croissance en longueur et en poids sec ne sont pas corrélés, l'année 2007 est tout à la fois excellente en gain de coquille et en poids de chair. L'apport en eau douce en provenance des fleuves semble favorable à la croissance durant l'été, et plutôt défavorable à la croissance en coquille durant l'hiver et le printemps. Des hypothèses sont proposées. L'environnement météorologique et hydrobiologique explique, en partie seulement, les performances de croissance des moules selon les années. Si les sites de bouchots peuvent être caractérisés par leur environnement hydrobiologique, l'étude environnementale explique mal les différences de performances de croissance des moules sur les 5 sites d'élevages : Roulières, Aiguillon, Marsilly, Boyard et Yves. Toutefois, la particularité rencontrée sur Boyard, d'une croissance estivale proche de la croissance printanière (alors que pour les autres sites, c'est bien la croissance printanière qui est grandement prédominante,) pourrait être expliquée par le décalage de l'ordre de 2 mois entre l'apparition des premiers blooms phytoplanctoniques dans l'Ouest du pertuis Breton, et le pertuis d'Antioche. Le démarrage précoce des blooms de diatomées (essentiellement <i>Skeletonema costatum</i>) en mars dans le pertuis Breton est discuté. Plus au sud, l'influence du panache de	

Gironde, dont les débits de mai sont équivalents aux débits hivernaux, favorise le développement de micro-algues durant l'été (dinoflagellées en juillet et diatomées en août). D'autres paramètres, telle la compétition trophique inter et intra spécifique devraient améliorer la perception spatialisée de la productivité des sites, vue à travers le réseau de surveillance expérimental REMOULA. D'autres études devront être développées pour valider les résultats du réseau avec la production professionnelle. .

Mots-clés : Moule, *Mytilus edulis*, bouchot, pertuis charentais, Marennes-Oléron,

SOMMAIRE

Introduction	7
Historique et objectifs du réseau REMOULA.....	8
Contexte et objectifs de l'étude.....	9
Matériel et méthode.....	11
Sites et cycles d'élevage	11
Variables biologiques	11
Variables environnementales	13
Analyses statistiques	18
I – Performance de croissance des moules sur les sites de bouchot des pertuis charentais	19
Croissance en longueur, poids et indices de chair.....	19
Description de la croissance	19
Performances de croissance annuelles	21
Croissance saisonnière	22
Indice de qualité de Walne et Mann (WM),	28
Relation entre les différents descripteurs de croissance	35
II - L'environnement des élevages	39
Présentation des sites d'élevage.....	39
Les apports des fleuves dans les pertuis	40
Variabilité climatique.....	45
Régime climatique global	45
Régime climatique régional (température, pluviométrie, insolation et vents)	46
Variabilité inter annuelle	48
Caractérisation hydrobiologique.....	50
Par le modèle hydrodynamique Mars2D	50
Par les mesures hydrobiologiques (stations REPHY).....	57
III - Relation entre l'environnement et la croissance des moules de bouchots entre 2000 et 2010. Etude à pas de temps trimestriel sur 5 sites	70
Introduction	70
Matériel et méthodes	70
Résultats.....	71

IV – Relation entre l’environnement et la croissance des moules de bouchots entre 2000 et 2010. Etude à pas de temps trimestriel sur 3 sites, avec mesures trophiques.	77
Introduction	77
Matériel et Méthodes	77
Présentation des sites	77
Les variables de l’étude.....	78
Résultats.....	79
analyse de la variance de la croissance	79
analyse des corrélations annuelles	81
analyse par saison (4 saisons).....	84
Discussion générale	95
Conclusion.....	110
Références.....	115
Liste des figures.....	121
Liste des tableaux	125
Annexes	127

INTRODUCTION

Au sein des pertuis charentais, le Pertuis Breton est un haut lieu de culture de moules sur bouchots depuis le 13^{ème} siècle (Mason, 1976, d'après Boromthanasat, 1986). Traditionnellement, les moules étaient produites dans la partie Nord du pertuis Breton et les huîtres sur la cote Est de l'île de Ré et dans le bassin de Marennes – Oléron. Plus tard au début du 20^{ème} siècle, les autorisations d'élevage de la moules ont été accordées dans le pertuis d'Antioche, et en particulier dans le secteur d'Yves et de Boyard. Bien plus tard, à partir des années 1990, la culture des moules et des huîtres sur filières s'est développée aux Saumonard (Ouest du pertuis d'Antioche), dans le pertuis Breton et dans le pertuis d'Antioche (au large des Saumonard et de Chatellaillon), augmentant ainsi l'interpénétration des deux espèces, tant sur le plan géographique que vis-à-vis de la biologie : compétition inter espèces, extension des périodes de pontes, de production de naissains. Des compétiteurs tels les crépidules augmentent la pression sur la ressource alimentaire (Sauriau, 1987, Curti, 2009). Les zones d'élevage de moules dans les pertuis charentais s'étendent le long de la côte du Sud Vendée, sur une distance quasi continue de 20 km. Le long du littoral charentais, des zones d'élevage "discontinues" couvrent environ 18 km de côtes. Les cultures de moules ont peu fait l'objet d'étude jusqu'au début des années 70 (Boromthanasat, 1986). Dans les années 70, à la demande des professionnels, les scientifiques étudient les causes environnementales responsables de la mauvaise production de moules sur certains sites du Pertuis Breton (Dardignac-Corbeil, 1975). D'autres études « in situ » seront ensuite conduites dans le bassin de Marennes – Oléron (Boromthanasat, 1986) et sur les filières du pertuis Breton (Barillé, 1996). Dans les années qui suivront la mise en place du réseau régional de suivi de la croissance des moules dans les pertuis charentais (REMOULA), des études compareront les deux systèmes d'élevage : bouchots et filières (Garen et al., 2004 ; Robert et al., 2007).

Chez la moule, l'émission des gamètes peut être partielle ou sub-totale; elle peut se faire en une seule fois ou être fractionnée en petites émissions qui s'échelonnent sur plusieurs jours. Les animaux sont susceptibles de pondre plusieurs fois dans l'année (Lubet 1959). Les études histologiques montrent que le temps entre deux émissions successives est d'environ un mois lorsque la première émission a été très importante ; Il est de l'ordre de quinze jours à trois semaines si cette émission a été faible (Lubet 1959). Dans les pertuis charentais, la maturation sexuelle des moules sur bouchots s'étale sur deux saisons : hiver et printemps ; soit entre les mois de janvier-février et mai juin (Marteil, 1976 ; Robert et al, 2007). Un résumé des relations entre la reproduction et l'environnement des élevages est fait par Marteil en 1976 (Marteil, 1976) : La salinité et la position sur l'estran semblent avoir peu d'influence sur la gamétogénèse. Lubet dans son travail montre que le temps d'immersion influence le cycle de la gamétogénèse et le rallonge. Des captages tardifs moins importants que ceux du printemps sont régulièrement observés en début d'automne. La gamétogénèse s'interrompt si la température

passé en deçà de 5-7°C. Lorsque la gamétogénèse est déclenchée, plus vite la température s'élève, plus tôt le stade de maturité est atteint. Une température trop élevée, supérieure à environ 20° C, entraîne un arrêt de la gamétogénèse. La température paraît sans influence sur la durée du stade de repos sexuel. Les variations qualitatives et quantitatives du phytoplancton auraient une influence sur l'instauration et la durée du stade de repos sexuel. D'après l'expertise de (Mazurie 2010), Boromthanasart et al. (1987) ont montré que l'émission de gamètes de moules, dans le bassin de Marennes-Oléron, s'étalait entre février et avril, et que la vie larvaire semblait durer environ 30 jours : les fixations de naissain étaient observées entre avril et juin. Les pontes principales correspondaient à des températures de 10-12°C. La moule est une espèce qui se reproduit dans une gamme de température comprise entre 5-7°C et 18-20°C (Sprung, 1984).

Historique et objectifs du réseau REMOULA

En France, et dans les pertuis Charentais en particulier, plusieurs travaux de recherche ont été réalisés sur la moule (*Mytilus edulis*) dans les années 80 et 90 (Boromthanasart, 1986 ; Dardignac-Corbeil, 1996 ; Barillé, 1996). En 1999 et 2000, le programme européen Essence¹ a permis une comparaison entre l'élevage sur filières et l'élevage sur bouchots (Robert et al. 1999). Suite à ces résultats, la profession, représentée par les SRC de Ré centre Ouest, et la Section Régionale Conchylicole Marennes-Oléron a demandé à IFREMER de mettre en place un réseau de suivi "biologique" dans les pertuis Charentais afin d'apporter une aide à la mytiliculture régionale. Le réseau REMOULA a ainsi été initié par le Laboratoire Conchylicole des Pertuis Charentais (LCPC) de la Tremblade en 2000. Les résultats de ce réseau ont donné lieu à des rapports-2000, 2001 (Robert et al., 2001) et ont été utilisés par les services de l'Etat pour l'expertise sur les rendements mytilicoles (calamités agricoles) lors de la canicule estivale de 2003. La mise en ligne des résultats du réseau REMOULA sur Internet est régulière depuis 2006 (<http://www.ifremer.fr/lerpc/reseaux/remoula>). Ce travail a également fait l'objet de présentations régulières auprès de la profession.

L'objectif principal du réseau est de suivre la croissance, la reproduction et la survie de la moule bleue *Mytilus edulis* sur un ensemble de sites d'élevage traditionnels sur bouchots(5 sites) et d'élevage plus contemporains sur filières (3 sites) ; Du nord au sud, les sites sur bouchots sont les suivants : Roulières, Marsilly, Aiguillon (pertuis Breton), Yves et Boyard (pertuis d'Antioche); le point de Boyard est inclus dans le Bassin de Marennes Oléron (Figure 1).

¹ Effect of shellfish culture and option for sustainable exploitation : programme associant la Hollande, la France, le Danemark, l'Allemagne et la Suède.

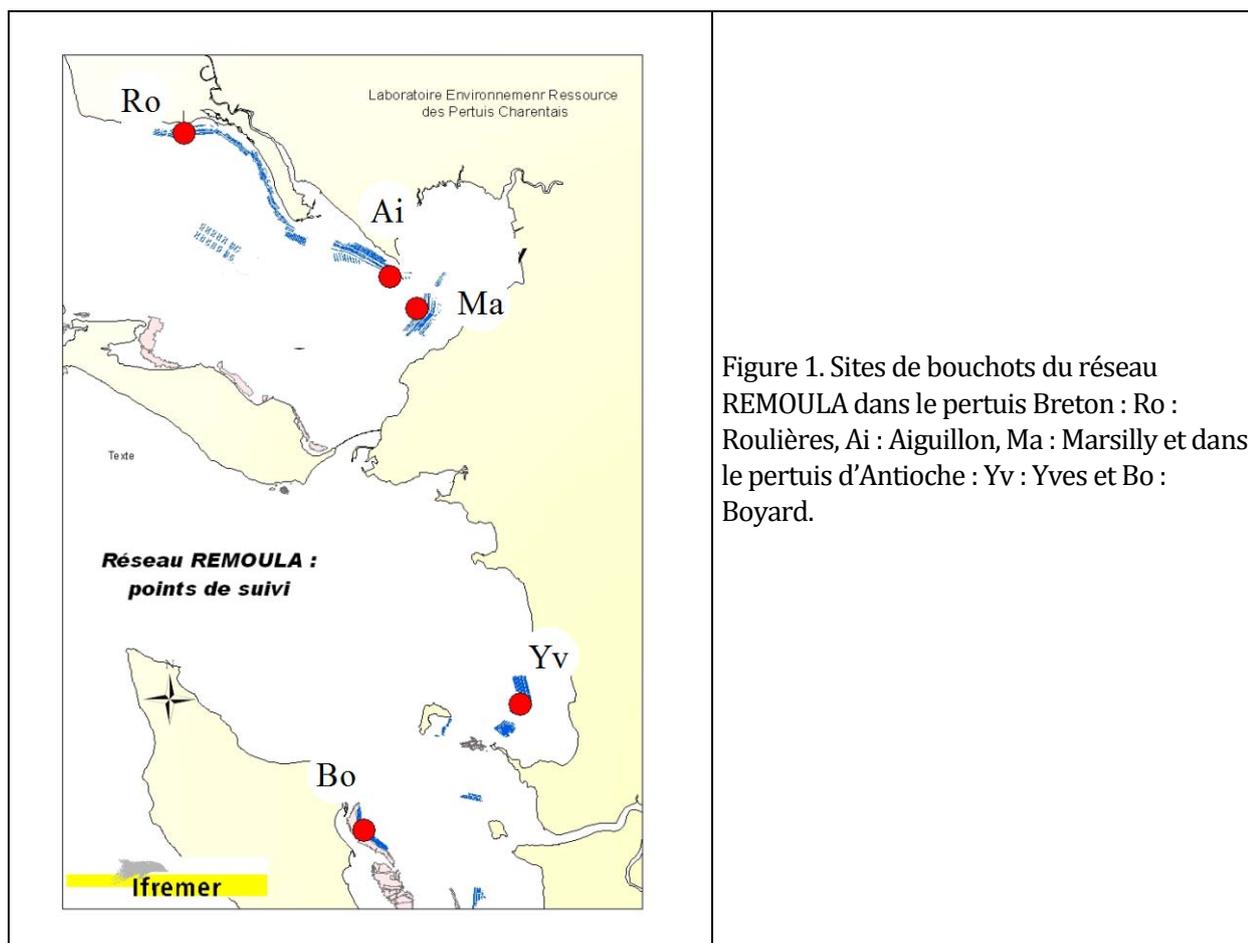


Figure 1. Sites de bouchots du réseau REMOULA dans le pertuis Breton : Ro : Roulières, Ai : Aiguillon, Ma : Marsilly et dans le pertuis d'Antioche : Yv : Yves et Bo : Boyard.

Contexte et objectifs de l'étude

Si la croissance des moules de bouchots a déjà été étudiée dans le Pertuis Breton (Dardignac-Corbeil, 1996) et à Marennes- Oléron (Boromthararat 1986), aucune étude ne compare sur une période aussi longue les performances de croissance dans les 2 pertuis charentais (Pertuis Breton et d'Antioche). En 2007, un premier travail de synthèse des résultats du réseau est produit sur ses 6 premières années (Robert et al., 2007). Cette étude montre une forte variabilité de croissance entre les sites, les saisons et les années. L'étude proposée aujourd'hui présente pour la première fois, les résultats de 11 années de fonctionnement du réseau, en lien avec l'environnement l'élevage des moules sur bouchots ; l'élevage sur filières n'est pas pris en compte dans cette étude ; Les principales questions sont les suivantes : est- on en mesure d'expliquer la croissance de la moule par la ressource trophique présente sur les différents sites de bouchots ? Quel est l'impact des fleuves sur les sites ? Quelle est la variabilité spatiale mise en évidence entre les 5 sites d'élevage dans les pertuis charentais ? Quelle est la variabilité inter annuelle de cette croissance ?

Ce rapport se présente donc en 3 parties :

- (1) Des résultats biologiques sur la croissance en coquille et un indice de qualité,
- (2) une description de l'environnement des élevages, globalement dans les pertuis, et au niveau des différentes stations,
- (3) une étude des relations entre l'environnement et les réponses biologiques des moules durant ces 11 années d'étude (2000 et 2010), à travers plusieurs analyses :
 - a. Une première analyse conduite sur 5 stations de bouchots avec des mesures à pas de temps trimestriel et des descripteurs environnementaux, régionaux et issus de la modélisation hydrodynamique.
 - b. Une deuxième analyse conduite sur 3 stations de bouchots, avec des mesures à pas de temps trimestriel, des descripteurs environnementaux, régionaux et issus de la modélisation hydrodynamique et des variables physico-chimiques et trophiques issues de stations hydrobiologiques.

MATERIEL ET METHODE

Le réseau REMOULA est présenté en 2007 (Robert , Soletchnik et al. 2007).

SITES ET CYCLES D'ELEVAGE

Cette étude présente les performances de croissance de la moule sur cinq sites d'élevage, dans le pertuis Breton : Les Roulières (RO), Aiguillon (AI), Marsilly (MA) et dans le pertuis d'Antioche : Yves (YV) et Boyard (BO) (Figure 1). Au cours des 11 années de l'étude, un changement méthodologique est survenu à partir de 2006 ; le cycle d'élevage a été rallongé avec une mise à l'eau plus précoce d'un trimestre (hiver de l'année n) (Tableau 1). En fait ce changement méthodologique s'avère avoir peu de conséquences sur les analyses qui seront effectuées au cours de cette étude entre les mois de mars de l'année n et n+1, définissant ainsi, sur une période de 11 années, 4 saisons complètes : printemps (bilan en juin), été (bilan en septembre), automne (bilan en décembre) et hiver (bilan en mars) (Tableau 1).

TABLEAU 1. CYCLES D'ELEVAGE ET ECHANTILLONNAGE AU COURS DES 11 ANNEES DE L'ETUDE

	n	année n												année n+1		
	déc	jan	fév	mars	avril	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc	jan	fév	mars
2000-2005				T0			P1			P2			P3			P4
2006-2010	T0			P1			P2			P3			P4			P5

Dans cette étude, le cycle d'élevage d'une année « n » (ou « campagne ») est composé des printemps, été, automne de l'année « n » et de l'hiver de l'année « n+1 ».

VARIABLES BIOLOGIQUES

Les moules mises en élevage proviennent des filières du Pertuis Breton. Issues du captage (année n-1), elles sont calibrées et mises en poche à 6-10 mois à raison de 120 moules par poche. Leur longueur moyenne est alors comprise entre 30 et 40 mm. L'unité d'échantillonnage est la poche. Elles sont alors placées sur la partie supérieure d'un bouchot à une hauteur correspondant approximativement à un coefficient de 75. Pour chaque site et chaque prélèvement, des mesures individuelles de longueur (pied à coulisse 1/10^{ème} de mm) et de poids sec sont réalisées sur un ensemble de 30 moules. Le poids sec de

coquille individuel s'obtient après séchage à l'étuve 24 h (50°C). Le poids sec de chair est obtenu après congélation et lyophilisation. Dans les 2 cas, la pesée a lieu au 1/100^{ème} de gramme. Les taux de croissance journaliers (TCJ) relatifs² en poids secs (P) et en longueur (L) sont calculés : $TCJ-P = (dP)/P \times dt$ et $TCJ-L = dL/L \times dt$, où dP, dL représentent les différences de poids (P) et de longueur (L) durant une période³ (dt) (en jours). Ainsi sont calculés des taux de croissance annuel (TCJ-L_{an} et TCJ-P_{an}) ou saisonniers (TCJ-L_S et TCJ-P_S) (hiver, printemps, été, automne) (TCJ_H; TCJ_P; TCJ_E; TVJ_A). A partir du poids sec de coquille et de chair, l'indice de qualité de Walne et Mann⁴ est calculé : $WM = \text{poids de chair sèche} / \text{poids de coquille sèche} \times 1000$.

Trois descripteurs biologiques seront utilisés dans les analyses : les Taux de Croissance Journaliers relatif en longueur (L) et en poids (P) : (TCJ-L, TCJ-P) et les indices de qualité de Walne et Mann (WM), à l'échelle de l'année (11 années), des saisons (H, P, E, A) et pour les 5 sites étudiés : RO, AI, MA, YV et BO).

TABLEAU 2. VARIABLES BIOLOGIQUES DE L'ETUDE

Descripteurs	Variables biologiques
TCJR-L _{an} (%/jour)	Taux de croissance journalier relatif en longueur, calculé pour l'année (_an), pour le trimestre (_tri), ou période inter-échantillonnage (_ie).
TCJR-P _{an} (%/jour)	Taux de croissance journalier relatif en poids, calculé pour l'année (_an), pour le trimestre (_tri), ou période inter-échantillonnage (_ie).
TCJ-L _{A, H, P, E} (%/ jour)	Taux de croissance saisonnier (automne, hiver, printemps, été) en longueur
TCJ-P _{A, H, P, E} (% / jour)	Taux de croissance saisonnier (automne, hiver, printemps, été) en poids sec
WM _{A, H, P, E}	Indice de qualité de Walne et Mann (automne, hiver, printemps, été)

Remarque : A l'inverse de l'indice de condition : WM, calculé individuellement pour 30 moules à chaque échantillonnage, les taux de croissance, en longueur et poids, sont calculés à partir d'une différence entre

² Cette formule permet de limiter les effets liés dus à la relation d'allométrie (relation de croissance non linéaire) .

³ La période étant une saison ou une année.

⁴ C'est un indicateur de qualité relatif qui permet de s'affranchir de certains écarts de poids initial des populations d'une année sur l'autre ; D'autre part, c'est un indicateur précis, car calculé à partir de 2 mesures précises.

deux moyennes à deux dates successives (30 moules pour chaque moyenne). On calcule ainsi un taux de croissance moyen par site, saison et année.

VARIABLES ENVIRONNEMENTALES

L'objectif principal de cette étude est de mettre en relation les performances biologiques des moules, avec les variables environnementales : climatiques « globales », de météorologie régionale, hydrodynamiques et hydrobiologiques.

Nature et origine des données

Un premier type de descripteurs correspond à la caractérisation « générale » des sites d'élevage (REMOULA) et des prélèvements hydrobiologiques (stations REPHY). Un deuxième type représente une caractérisation générale à l'échelle nationale sur les régimes météorologiques généraux (Cassous et al., 2005). Un troisième type de descripteurs représente une caractérisation générale à l'échelle régionale : (1) à partir des données de MétéoFrance (mesures directes – Bout Blanc La Rochelle et en provenance du modèle Arpège) : température, pluviométrie, insolation, rayonnement, intensité, direction des vents, etc, (2) à partir des données hydrologiques régionales de débit des fleuves internes et externes aux pertuis charentais (Hydro-eaufrance : <http://www.hydro.eaufrance.fr>), (3) à l'échelle régionale à partir du modèle hydrodynamique développé dans les pertuis charentais (Stanisière, Dumas et al. 2006). Les simulations ont été faites à partir du modèle MARS-2D, sur la période 2000-2010. Elles ont été faites en situations réalistes en tenant compte des débits des fleuves et des conditions météorologiques réelles. Les débits proviennent de la base Hydro-eaufrance et les données météo sont issues de la base Arpège (MétéoFrance).

Le modèle réévalue à chaque pas de temps (5 minutes) la salinité sur tout le domaine, ainsi que l'intensité et la direction des vecteurs courants Nord et Est. Afin d'évaluer la contribution de chaque fleuve à la dessalure (variables CoDe), un traceur spécifique a été diffusé dans le flux de chaque fleuve sur l'ensemble de la période de calcul. Les enregistrements de valeurs sont faits toutes les deux heures, de façon à limiter le volume de données (139 Giga octets à ce pas d'enregistrement). Les fichiers de sortie du modèle sont des bibliothèques NetCdf, dont l'emprise couvre tout le domaine de calcul, correspondant aux pertuis Charentais. Une extraction numérique est ensuite faite à chaque point de suivi, de manière à obtenir une série temporelle des variables estimées sur chaque point. A partir de la contribution en eau douce (CoDe) et de la salinité (Sal), l'apport en eau douce (ApED) (en cl/L) est calculé sur chacun des

site de bouchots (st) par chacun des fleuves (F) (Sèvre, Seudre, Charente, Lay - moyenne mensuelle): $ApED(F) = [1 - (SAL_{moy_{st}} / 35,5)] \times CoDe(F)_{st} \times 100$.

La flore phytoplanctonique (REPHY)

La flore phytoplanctonique est déterminée dans le réseau REPHY de l'IFREMER depuis le début des années 90 (Belin et Raffin, 1998) ; Au début des années 2000, une première analyse spatio temporelle des espèces phytoplanctoniques déterminées dans la base de donnée « Quadrige », est réalisée, à l'échelle de la façade atlantique (Gailhard and Gros 2003). Sur le plan régional, des plus récentes études se sont intéressées à la diversité phytoplanctonique à l'échelle des pertuis, et une classification basée sur la diversité fonctionnelle a été mise en place qui permet, entre autre, de rapporter les taxons à un volume moyen (Arnaudeau 2010), (David, Ryckaert et al. 2012). En plus des comptages de taxons (N-Alg), la mesure volumétrique (V-Alg) du phytoplancton est utilisée dans cette étude. Sur une période comprise entre 2000 et 2010 (soit 11 ans), 1 à 5 prélèvements de flore totale (3 en moyenne) ont été réalisés par mois et par station (4 stations dans cette étude), représentant quelques 1440 prélèvements de flore et près de 29.000 numérations⁵ phytoplanctoniques. Au cours de ces 11 années, 212 taxons (espèces) ont été identifiées dans les prélèvements.

⁵ Une numération étant ici un comptage réalisé pour une espèce.

Variables de l'étude

TABLEAU 3. LES DESCRIPTEURS DE L'ETUDE : QUALIFICATION DES SITES, DESCRIPTEURS GENERAUX AUX PERTUIS ET SPECIFIQUES AUX SITES D'ELEVAGE. MF = ORIGINE METEO-FRANCE ; MH = SIMULATION MODELE HYDRODYNAMIQUE DES PERTUIS CHARENTAIS ; HF :HYDRO-EAUFRANCE ET CASSOUS, 2004 POUR LES REGIMES METEO GENERAUX

Descripteurs	I – Qualification des sites dans les pertuis charentais
sites d'élevage de moules sur bouchots	les 5 sites de bouchots sont : Roulière (RO), Marsilly (MA), Aiguillon (AI), Yves (YV) et Boyard (BO)
stations hydrobiologiques du réseau REPHY	Les descripteurs physico-chimiques sont issus des stations REPHY : des filières Ouest (FW), de l'Eperon (EP), de Carrelère (CA), de Cornard (CO), de Boyard (BO) et d'Auger (AU).
fleuves	5 fleuves se déversent dans les pertuis charentais ; du nord au sud : le Lay (Lay) , la Sèvre Niortaise (Sev), la Charente (Cha), la Boutone (Bou) et la Seudre (Seu)
	II – Descripteurs environnementaux régionaux
Deb_moy_Fl (m3/s)	Débit moyens des fleuves (internes au pertuis : Charente, Sèvre, Lay et Seudre, et ceux dont le panache peut impacter les pertuis (Loire, Garonne, Dordogne) (HF)
Deb_moy_Fl_int (m3/s)	Débit moyens des fleuves internes au pertuis : Charente, Sèvre, Lay et Seudre (HF)
Deb_moy_Fl_ext (m3/s)	Débit moyens des fleuves externes au pertuis et dont le panache peut impacter les pertuis (Loire, Garonne, Dordogne) (HF)
Deb_Loire (m3/s)	Débit moyens de la Loire (HF)
Deb_Garonne (m3/s)	Débit moyens de la Garonne (HF)
TEMPmoy (°C)	Température de l'air mensuelle moyenne (sous abris) (MF)
PLUVsom (mm)	Somme des précipitations (pluie) par mois (MF)
INSmoy (heure/ mois)	Temps de présence du soleil par mois (MF)
RAYmoy (joules / cm ²)	Rayonnement moyen au cours du mois (MF)
ImoyVent (m/s)	Intensité moyenne du vent (MF)
ImaxVent (m/s)	Intensité maximale du vent (MF)
DmoyVent (°)	Direction moyenne du vent(MF)

Patm (pascals)	Pression Atmosphérique (MF)
Hmoy (%)	humidité moyenne (%) (MF)
Vent_N	Vent secteur Nord : pourcentage du temps pendant lequel la direction du vent est comprise entre 315° et 45° (MF)
Vent_E	Vent secteur Est : pourcentage du temps pendant lequel la direction du vent est comprise entre 45° et 135° (MF)
Vent_S	Vent secteur Sud : pourcentage du temps pendant lequel la direction du vent est comprise entre 135° et 225°
Vent_O	Vent secteur Ouest : pourcentage du temps pendant lequel la direction du vent est comprise entre 225° et 315° (MF)
Hodographe	Hodographe mensuel (sur 11 ans) (à partir des données MF)
rmNAO+_Hiv	Régime météo NAO+ de décembre à mars (hivernal) (MF et Ifremer)
rmBL_Hiv	Régime météo BL (blocage) de décembre à mars (hivernal) (MF et Ifremer)
rmNAO-_Hiv	Régime météo NAO- de décembre à mars (hivernal) (MF et Ifremer)
rmAR_Hiv	Régime météo AR (dorsale atlantique) de décembre à mars (hivernal) (MF et Ifremer)
	III - Descripteurs environnementaux spécifiques aux sites d'élevage : Résultats obtenus à partir de simulations hydrodynamiques à partir du modèle MarsD2
SALmoy	Salinité moyenne sur les sites (ppm)
SALstd	Variance associée à la salinité moyenne sur les sites
CoDe (%)	Contribution des fleuves à la dessalure sur un site donné (exemple : Conde-Cha/Boy = contribution à la dessalure du fleuve Charente sur le site de Boyard)
CoDeSEU (%)	Contribution relative moyenne de la Seudre à la dessalure d'une des 5 sites de l'étude (RO, MA, AI, YV et BO)
CoDeCH (%)	Contribution relative moyenne de la Charente à la dessalure d'une des 5 sites de l'étude (RO, MA, AI, YV et BO)
CoDeSEV (%)	Contribution relative moyenne de la Sèvre à la dessalure d'une des 5 sites de l'étude (RO, MA, AI, YV et BO)
CoDeLA (%)	Contribution relative moyenne du Lay à la dessalure d'une des 5 sites de l'étude (RO,

	MA, AI, YV et BO)
ApEDoSEU (cl/l)	Apport en eau douce de la Seudre (cl / Litre d'eau de mer) sur chacune des sites de l'étude (RO, MA, AI, YV et BO)
ApEDoCHA (cl/l)	Apport en eau douce de la Charente (cl / Litre d'eau de mer) sur chacune des sites de l'étude (RO, MA, AI, YV et BO)
ApEDoSEV (cl/l)	Apport en eau douce de la Sèvre (cl / Litre d'eau de mer) sur chacune des sites de l'étude (RO, MA, AI, YV et BO)
ApEDoLAY (cl/l)	Apport en eau douce du Lay (cl / Litre d'eau de mer) sur chacune des sites de l'étude (RO, MA, AI, YY et BO)
CoDeSEUstd	Variance de la contribution moyenne de la Seudre à la dessalure d'un des 5 sites de l'étude (RO, MA, AI, YV et BO)
CoDeCHstd	Variance de la contribution moyenne de la Charente à la dessalure d'une des 5 sites de l'étude (RO, MA, AI, YV et BO)
CoDeBOstd	Variance de la contribution moyenne de la Boutonne à la dessalure d'une des 5 sites de l'étude (RO, MA, AI, YV et BO)
CoDeSEVstd	Variance de la contribution moyenne de la Sèvre à la dessalure d'une des 5 sites de l'étude (RO, MA, AI, YV et BO)
CoDeLAsstd	Variance de la contribution moyenne du Lay à la dessalure d'un des 5 sites de l'étude (RO, MA, AI, YV et BO)
ImoyC	Intensité moyenne du courant (par mois) (m/s)
IvarC	Variance de l'intensité du courant (durant le mois)
ImaxC	Intensité maximale atteinte par le courant durant le mois
DmoyC	Direction moyenne du courant (par mois) (degrés)
DvarC	Variance de la direction du courant (durant le mois)
Tim (h/mois)	Temps d'immersion du site (heures) durant un mois donné
	IV - Descripteurs environnementaux spécifiques aux sites d'élevage : Résultats de mesures du réseau national REPHY
Temp-EP	Moyenne de température mensuelle, trimestrielle ou annuelle sur le site de l'Eperon (EP) ; <i>idem pour les sites d'Auger (AU), du Cornard (CO), de Boyard (BO) de Carrelère (CA) et des filières ouest (FW)</i>
Sal-EP	Moyenne de salinité mensuelle, trimestrielle ou annuelle sur le site de l'Eperon

	(EP) ; <i>idem pour les sites d'Auger (AU), du Cornard (CO), de Boyard (BO) de Carrelère (CA) et des filières ouest (FW)</i>
Turb-EP	Moyenne de turbidité mensuelle, trimestrielle ou annuelle sur le site de l'Eperon (EP) ; <i>idem pour les sites d'Auger (AU), du Cornard (CO), de Boyard (BO) de Carrelère (CA) et des filières ouest (FW)</i>
Chla-EP	Moyenne de chlorophylle a , mensuelle, trimestrielle ou annuelle sur le site de l'Eperon (EP) ; <i>idem pour les sites d'Auger (AU), du Cornard (CO), de Boyard (BO) de Carrelère (CA) et des filières ouest (FW)</i>
Phéo-CO	Moyenne de phéophytines , mensuelle, trimestrielle ou annuelle sur le site de l'Eperon (EP) ; <i>idem pour les sites d'Auger (AU), du Cornard (CO), de Boyard (BO) de Carrelère (CA) et des filières ouest (FW)</i>
N-Alg	Numération des algues unicellulaires par effort de prélèvement (EP) réalisé chaque mois ; moyenne trimestrielle et annuelle sur les sites d'Auger (AU), du Cornard (CO), de Boyard (BO) et de l'Eperon (EP)
V-Alg	Volume d'algues unicellulaires (***) par effort de prélèvement (EP) réalisé chaque mois ; moyenne trimestrielle et annuelle sur les sites d'Auger (AU), du Cornard (CO), de Boyard (BO) et de l'Eperon (EP)

(***) Le volume algale utilisé d'un échantillon est calculé par la prise en compte des volumes individuels approchés de chaque classe d'algue (Arnaudeau 2010; David, Ryckaert et al. 2012).

ANALYSES STATISTIQUES

Les analyses statistiques telles que la recherche de saisonnalité des descripteurs environnementaux, la décomposition chronologique saisonnière en tendance, résidus et saisonnalité, ainsi que les analyses de variables à un ou plusieurs facteurs, sont réalisées avec le logiciel STATGRAPHICS Centurion XV II. Les analyses en composantes principales (ACP) avec positionnement des variables biologiques comme « supplémentaires » sur les axes des ACP, sont réalisées avec le logiciel stat : XLSTAT (sous Excel).

Les séries chronologiques mensuelles sont analysées par la méthode statistique Sensus II (Statgraphic Centurion XV II) qui permet de décomposer chacune des séries en tendance, saisonnalité et résidus (partie aléatoire de la « variance » du descripteur).

I – PERFORMANCE DE CROISSANCE DES MOULES SUR LES SITES DE BOUCHOT DES PERTUIS CHARENTAIS

CROISSANCE EN LONGUEUR, POIDS ET INDICES DE CHAIR

DESCRIPTION DE LA CROISSANCE

La longueur des moules en début de cycle, est comprise entre 32 et 36 mm ; après une forte croissance printanière, la croissance s'infléchit nettement en automne – hiver pour atteindre entre 40 et 50 mm selon les années et les sites (Figure 2A). La croissance en poids sec est marquée par une nette croissance au printemps – été et une chute pendant l'automne – hiver ; cette dernière saison étant également une période de ponte et donc de perte de poids pour la moule de bouchot (Figure 2B). Les indices moyens de Walne et Mann (WM) varient entre les différentes saisons et années, entre des valeurs extrêmes de 60 à 380 (Figure 2C).

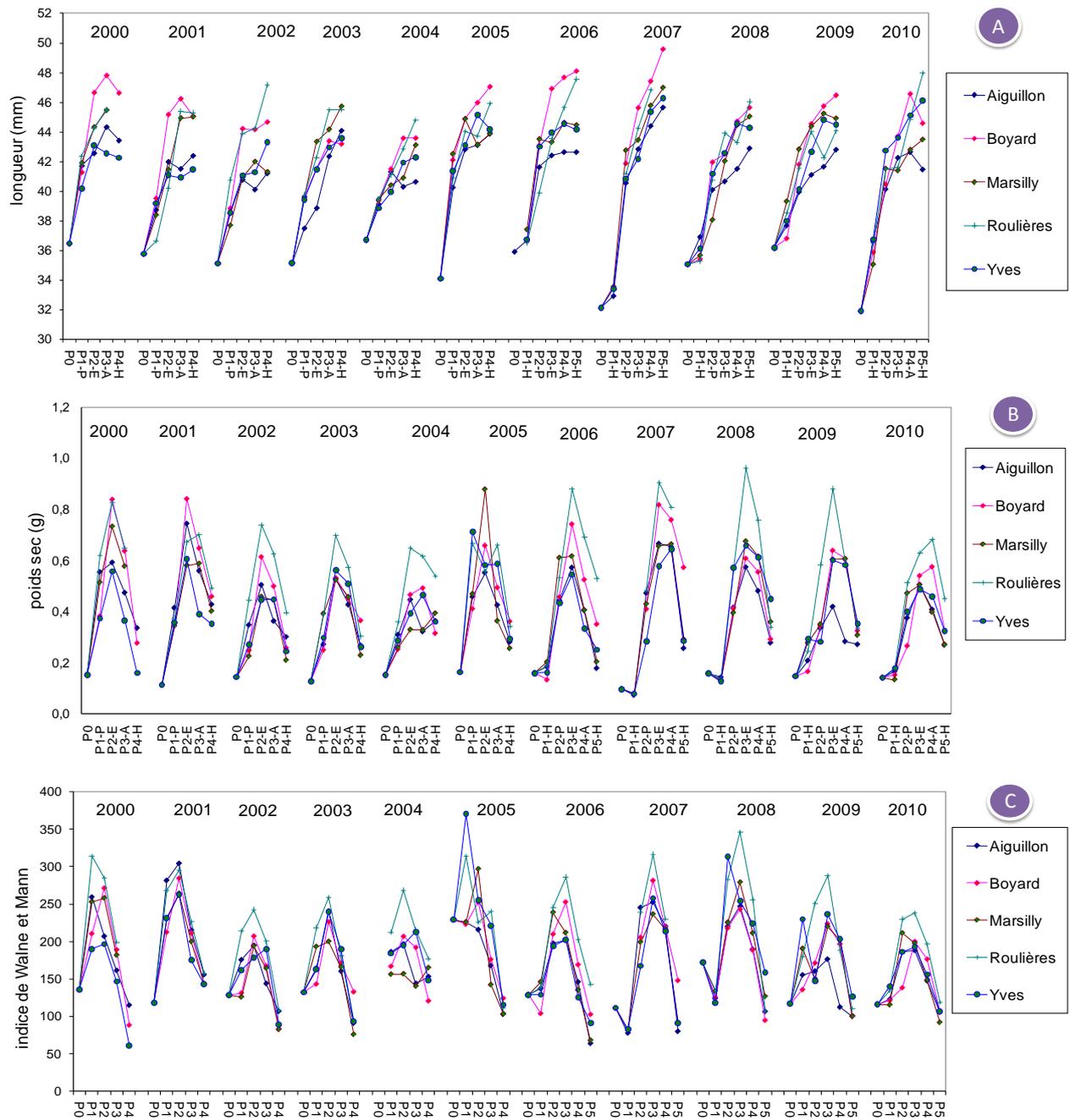


FIGURE 2. CROISSANCES EN LONGUEUR (A), EN POIDS SEC (B) ET INDICES DE QUALITE DE WALNE ET MANN (C) COMPARES ENTRE LES 5 SITES D'ELEVAGE SUR BOUCHOTS AU COURS DES CYCLES D'ELEVAGE 2000 A 2010.

PERFORMANCES DE CROISSANCE ANNUELLES

A l'échelle de l'année (11 années pour chaque site), les taux de croissance relatifs en longueurs et poids présentent des différences significatives selon les années ; les tests de Kruskal Wallis calculés pour TCJ-L_A et TCJ-P_A donnent des valeurs respectives de $t = 34,4$ et $36,8$ et probabilités associées : $p < 0,001$, attestant de différences significatives entre les années pour ces deux variables (Figure 3). Alors que 2007 apparaît comme une année exceptionnelle de croissance en longueur et poids sec, 2010 apparaît également comme une bonne année pour la croissance en coquille et 2004 comme une plus mauvaise année.

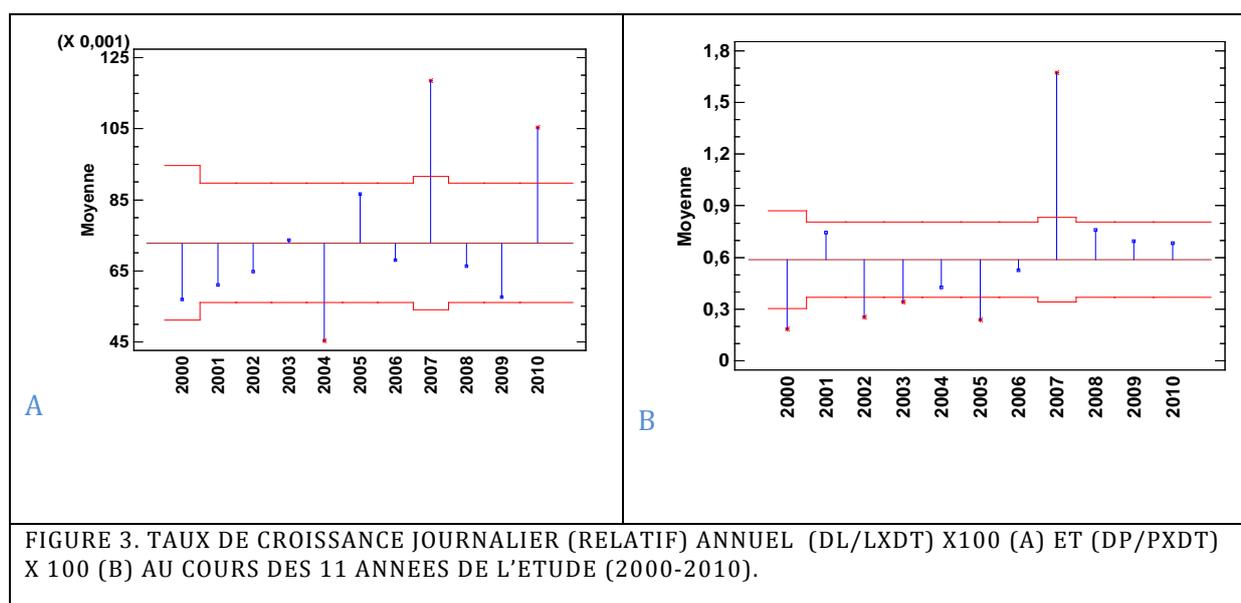


FIGURE 3. TAUX DE CROISSANCE JOURNALIER (RELATIF) ANNUEL (DL/LXDT) X100 (A) ET (DP/PXDT) X 100 (B) AU COURS DES 11 ANNEES DE L'ETUDE (2000-2010).

années	TCJ-L	TCJ-P
2000	2	1
2001	2	3
2002	2	1
2003	3	1
2004	1	2
2005	4	1
2006	2	2
2007	5	5
2008	2	3
2009	2	3
2010	5	3
Roulières	3	3
Aiguillon	1	1
Marsilly	3	2
Boyard	5	3
Yves	2	1

TABLEAU 4. COMPARAISON RELATIVE (ECHELLE 1-5) DES PERFORMANCES DE CROISSANCE A L'ECHELLE DE L'ANNEE ENTRE 2000 ET 2010 ET ENTRE LES STATIONS.

Il existe par ailleurs des années où les réponses de croissance sont contrastées sur les différents sites (eg 2000, 2002, 2006, 2010) et d'autres au contraire au cours desquelles les performances entre sites sont beaucoup plus homogènes (eg, 2003, 2005, 2007) (Figure 4).

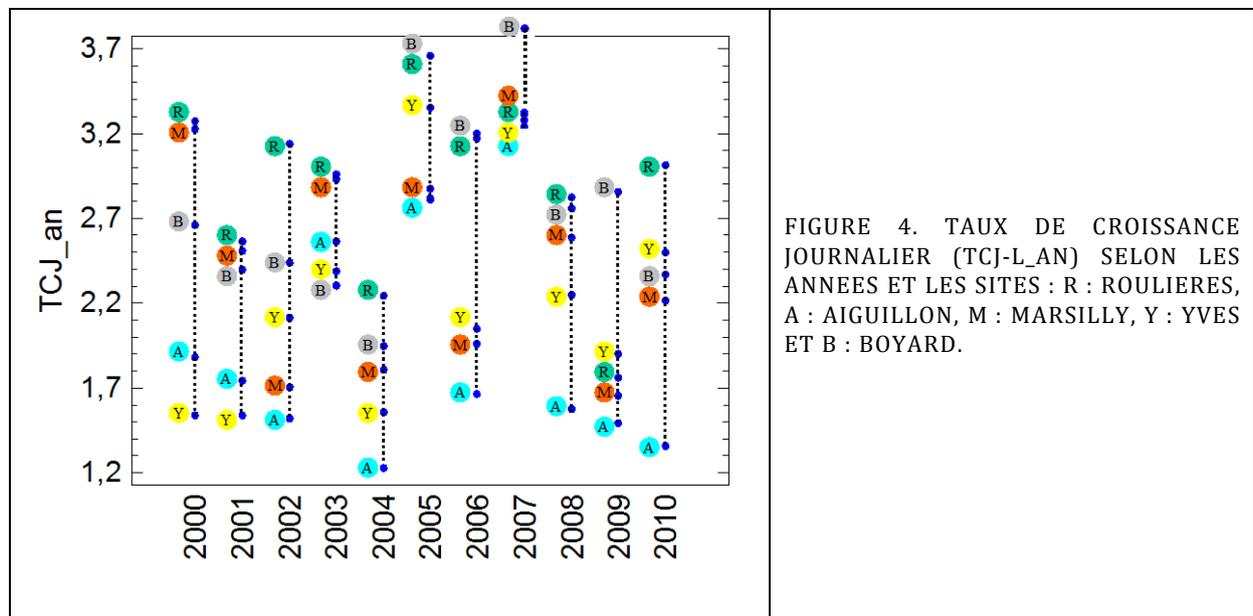


FIGURE 4. TAUX DE CROISSANCE JOURNALIER (TCJ-L_AN) SELON LES ANNEES ET LES SITES : R : ROULIERES, A : AIGUILLON, M : MARSILLY, Y : YVES ET B : BOYARD.

CROISSANCE SAISONNIERE

Les analyses statistiques non paramétriques (Kruskall - Wallis) sont réalisées sur les taux de croissance en longueur et en poids secs pour les 4 saisons, selon les sites et les années (Tableau 5). Des différences significatives existent au printemps entre les années et en été, entre les sites, tant pour la croissance en longueur que pour la croissance en poids sec. En automne, une différence existe sur la croissance en poids sec, selon les années. En hiver, une différence existe sur la croissance en longueur, selon les sites.

Variables	Saison	Variabilité	t. de Kruskal - Wallis	Probabilité
TCJ-L	Printemps	Sites	3,084	0,543
		Années	35,94	< 0,001 (***)
	Eté	Sites	12,21	0,016 (*)
		Années	9,72	0,465
	Automne	Sites	4,055	0,398
		Années	16,11	0,096
	Hiver	Sites	11,61	0,020 (*)
		Années	10,93	0,362
TCJ-P	Printemps	Sites	5,73	0,219
		Années	31,18	< 0,001 (***)
	Eté	Sites	15,23	0,0042 (**)
		Années	13,72	0,185
	Automne	Sites	5,068	0,280
		Années	18,91	0,041 (*)
	Hiver	Sites	1,864	0,760
		Années	17,63	0,061

TABLEAU 5. COMPARAISON DES TAUX DE CROISSANCE SAISONNIERS (LONGUEUR ET POIDS) SELON LES 5 STATIONS ET LES 11 ANNEES.

(*), (**), (***) : Probabilités significatives au seuil de 5%, 1% et 1%₀

Les différences les plus fortes apparaissent au printemps, selon les années, et pour les deux variables étudiées ; la variabilité inter annuelle mise en évidence à l'échelle de l'année est due à la croissance printanière. Les années 2005, 2007 sont les années de plus forte croissance en coquille, et 2001, 2004 et 2009, les années de plus faible croissance (Figure 5, Tableau 6).

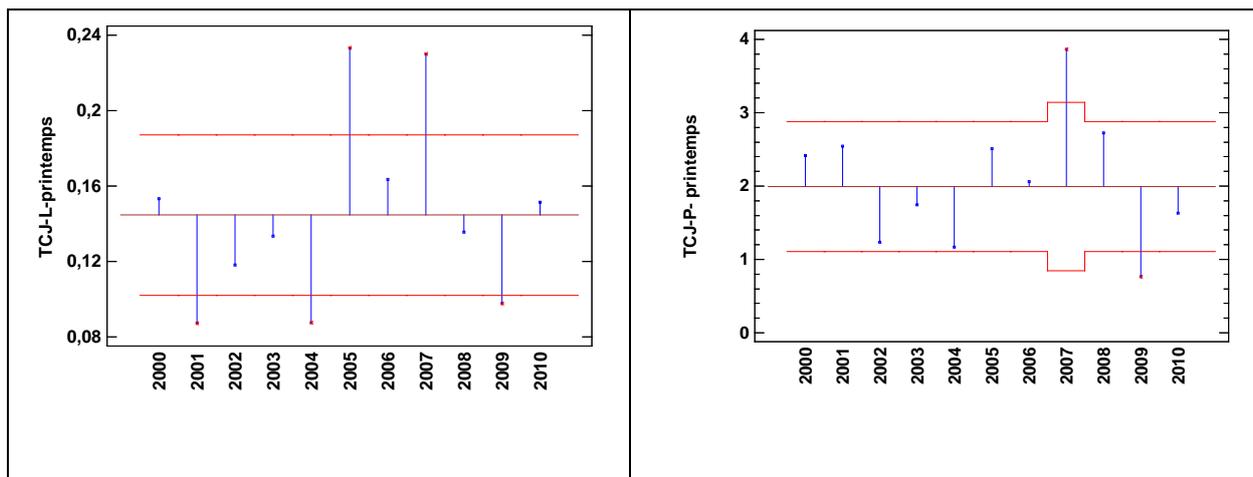


FIGURE 5. TAUX DE CROISSANCE JOURNALIERS PRINTANIERS, EN LONGUEUR (GAUCHE) ($P < 0,001$) ET EN POIDS (DROITE) ($P < 0,001$) AU COURS DES 11 ANNEES (2000-2010).

En été, la variabilité diminue et les différences inter annuelles ne sont pas significatives (Figure 6, Tableau 6).

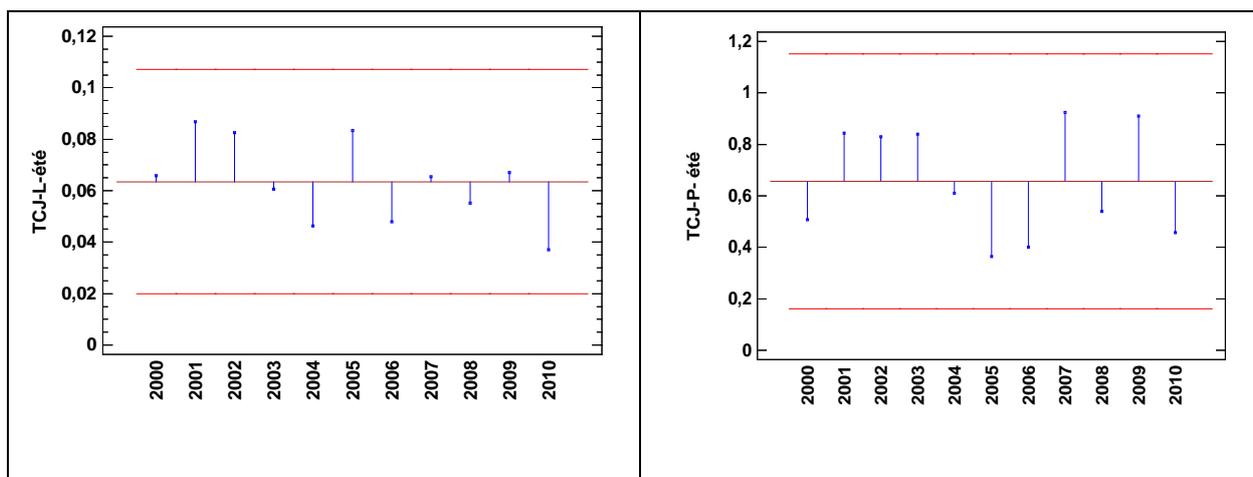


FIGURE 6. TAUX DE CROISSANCE JOURNALIERS ESTIVAUX, EN LONGUEUR (GAUCHE) ($P < 0,001$) ET EN POIDS (DROITE) ($P < 0,001$) AU COURS DES 11 ANNEES (2000-2010).

En automne, un contraste existe entre les années 2006 et 2004-2007 pour la croissance en poids sec (Figure 7, Tableau 6).

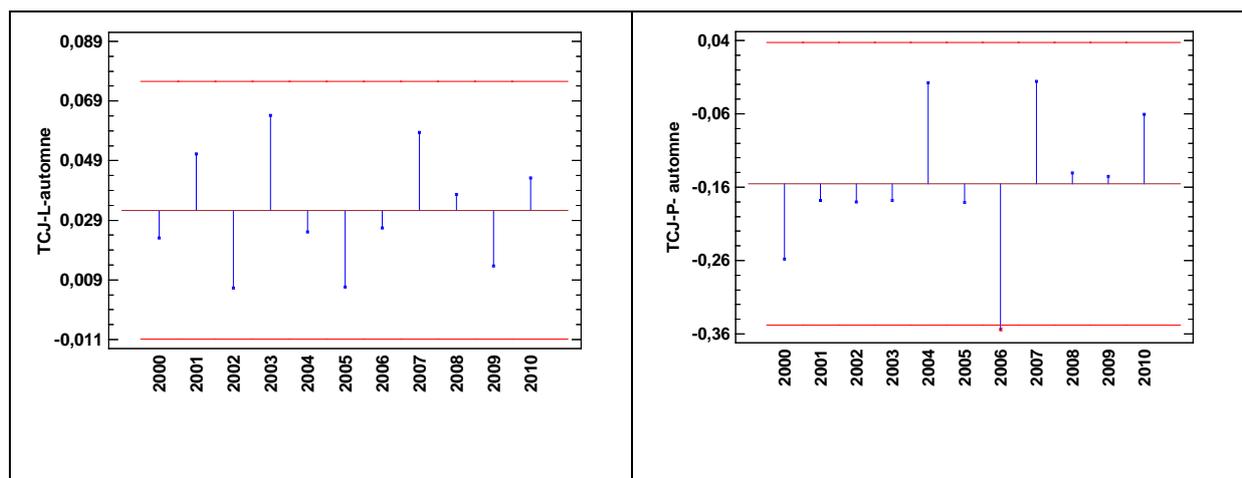


FIGURE 7. TAUX DE CROISSANCE JOURNALIERS AUTOMNAUX, EN LONGUEUR (GAUCHE) ($P < 0,001$) ET EN POIDS (DROITE) ($P < 0,001$) AU COURS DES 11 ANNEES (2000-2010).

L'hiver 2004 se caractérise par une perte minimale de poids sec (Figure 8, Tableau 6).

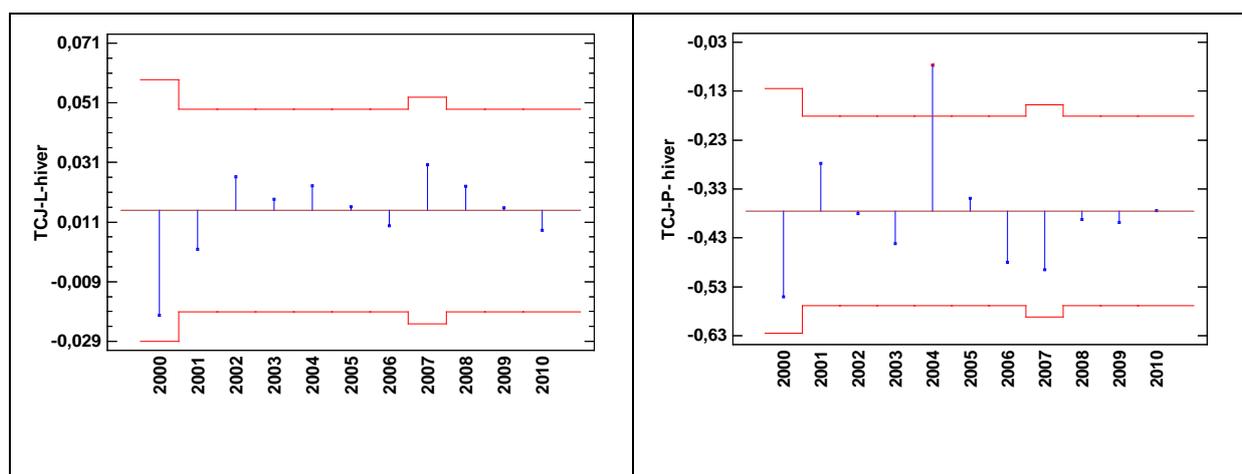


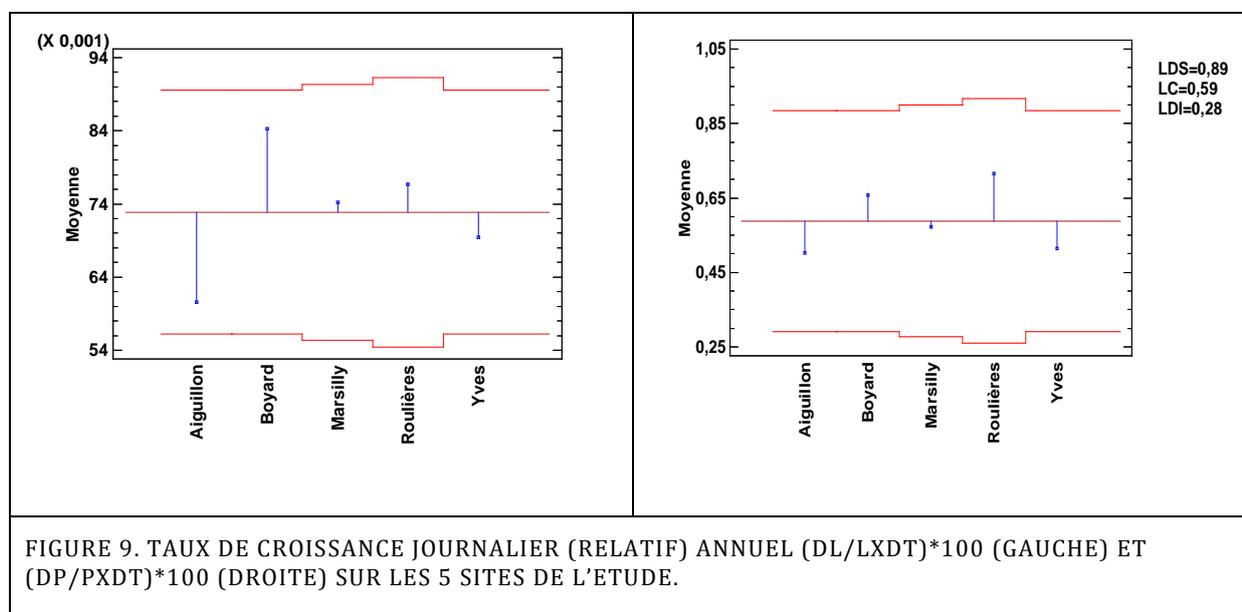
FIGURE 8. TAUX DE CROISSANCE JOURNALIERS HIVERNAUX EN LONGUEUR (GAUCHE) ($P < 0,001$) ET EN POIDS (DROITE) ($P < 0,001$) AU COURS DES 11 ANNEES (2000-2010).

TABLEAU 6. COMPARAISON RELATIVE (ECHELLE 1-5) DES PERFORMANCES DE CROISSANCE A L'ECHELLE DES SAISONS ENTRE 2000 ET 2010.

années	printemps		été		automne		hiver	
	TCJR-LP	TCJR-P	TCJR-L	TCJR-P	TCJR-L	TCJR-P	TCJR-L	TCJR-P
2000				2		2	1	2
2001	1		4	4	4		4	
2002		1	4	4	2			
2003				4	4			
2004	1	1	2			5	5	
2005	5		4	2	2			
2006			2	2		1		2
2007	5	5		4	4	5		2
2008								
2009	1	1		4	2			
2010			2	2		4		

Selon les sites

A l'échelle de l'année (11 années pour chaque site), les taux de croissance relatifs en longueurs et poids ne présentent pas de différences significatives selon les sites ; les tests de Kruskal Wallis calculés pour TCJ-L_A et TCJ-P_A donnent des valeurs respectives de $t = 6,322$ et $t = 5,381$, avec des probabilités de $p = 0,176$ et $p = 0,254$ (Figure 9).



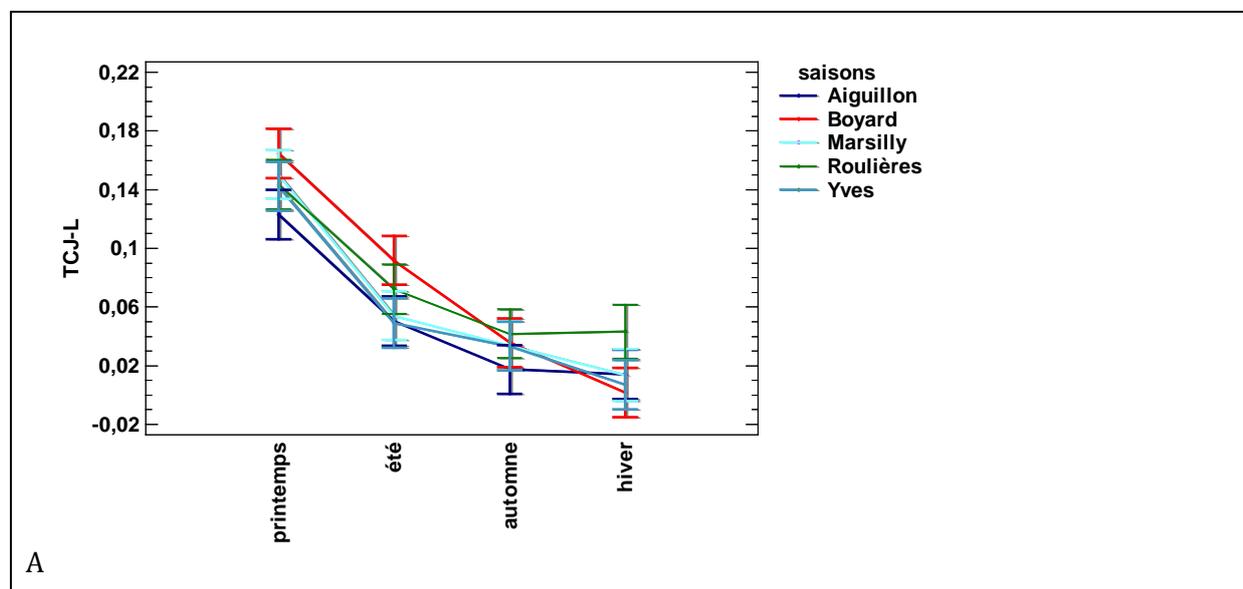
Parmi les sites, Boyard se distingue par des performances de croissance particulièrement fortes en été et faibles en hiver (Tableau 7). Cette spécificité au cours de l'hiver, distingue ce site « marin » dans le

pertuis d'Antioche, du site le plus performant : Les Roulières (pertuis Breton), sur lequel les performances en hiver sont les plus élevées (Figure 10).

TABEAU 7. COMPARAISON RELATIVE (ECHELLE 1-5) DES PERFORMANCES DE CROISSANCE A L'ECHELLE DES SAISONS DES DIFFERENTS SITES D'ELEVAGE.

sites	printemps		été		automne		hiver	
	TCJR-LP	TCJR-P	TCJR-L	TCJR-P	TCJR-L	TCJR-P	TCJR-L	TCJR-P
Roulière	4						5	
Aiguillon						2		
Marsilly								
Boyard		2	5	5			1	
Yves							2	

D'un point de vu descriptif, le printemps est bien la saison de plus forte croissance, tant en longueur, qu'en poids (Figure 10 A, B). Les performances saisonnières de croissance (TCJ_S), décroissent dans l'ordre des saisons ; elles représentent environ 52%, 26%, 15% et 7% de la croissance annuelle, respectivement pour le printemps, été, automne et hiver. Les moules en élevage sur Boyard, dont la croissance en longueur est très bonne au printemps et été présentent par contre une croissance en poids sec, faible au printemps et forte en été, à l'inverse des autres sites étudiés (Figure 10 B).



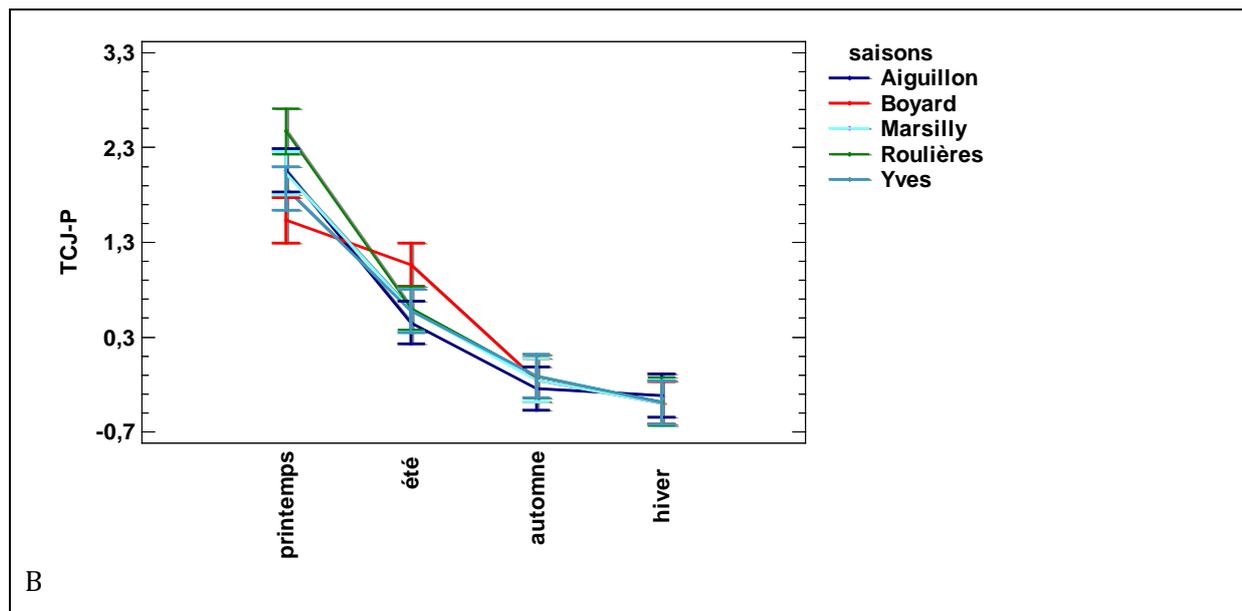


FIGURE 10. CROISSANCES EN LONGUEUR (TCJ-L) (A) ET EN POIDS SEC (TCJ-P) (B) COMPAREES ENTRE LES SITES ET LES SAISONS.

INDICE DE QUALITE DE WALNE ET MANN (WM),

Analyse de la variance

L'indice de Walne et Mann est un indicateur de qualité, taux de remplissage calculé à partir du rapport entre le poids sec et le poids de coquille. L'intérêt d'analyser cette variable est double : (1) c'est une variable « rapport » qui la rend donc indépendante du poids et taille initiales des lots de moules, variables d'une année à l'autre, et (2) l'étude est menée sur 30 mesures par échantillon, permettant ainsi une analyse de variance à 3 facteurs (sites, années et saisons). Deux années incomplètes : 2000 et 2007 sont retirées de l'analyse⁶. L'analyse de variance à 3 facteurs montre que les facteurs : années, sites et saisons et leurs interactions 2 à 2 sont tous très significatifs ($p < 1 \%$). L'essentiel de la variance de l'indice de qualité (WM) provient de la saison (40%), puis des années (10%) ; le site (troisième facteur) ainsi que les interactions, comptent chacun pour environ 5% ou moins de la variance totale (Tableau 8).

⁶ Dommage pour 2007 qui est l'année exceptionnelle de croissance pour l'ensemble des sites

TABLEAU 8. ANALYSE DE VARIANCE DE L'INDICE DE WALNE ET MANN SELON 3 FACTEURS : ANNEES (11), SITES (5) ET SAISON (4).

	Somme des carrés	Pourcentage de variance expliquée	Carré moyen	F	Probabilité
EFFETS PRINCIPAUX					
A:années	2,47187E6	9,17 %	308984,	194,72	0,0000
B:sites	1,35026E6	5,01 %	337566,	212,74	0,0000
C:saisons	1,07478E7	39,89 %	3,5826E6	2257,78	0,0000
INTERACTIONS					
AB	805827,	2,99 %	25182,1	15,87	0,0000
AC	1,46066E6	5,42 %	60861,0	38,36	0,0000
BC	428198,	1,59 %	35683,2	22,49	0,0000
ABC	1,41953E6	5,27 %	14786,8	9,32	0,0000
RESIDU	8,27982E6	30,73 %	1586,78		
TOTAL (CORRIGE)	2,69438E7	100,00 %			

Saison par saison, la variance expliquée est comprise entre 40 et 60%, mieux expliquée au printemps et dans une moindre mesure, en hiver par rapport aux autres saisons (Tableau 9). La variance totale de l'indice de qualité diminue en automne et plus encore en hiver, ce qui montre que le contraste entre années et sites diminue durant ces saisons. Au printemps et plus encore en hiver, c'est le facteur année qui prévaut devant l'effet site. En été – automne, il y a un rééquilibrage des deux facteurs sites et années, mais avec une perte de variance expliquée, ce qui montre bien que l'année discrimine moins bien en été-automne qu'au printemps ou en hiver.

TABLEAU 9. ANALYSE DE LA VARIANCE DE L'INDICE DE QUALITE (WM) SELON LES FACTEURS SITES, ANNEE ET LEURS INTERACTIONS. RECAPITULATIF DES 4 ACP SAISONNIERES.

variance	printemps	été	automne	hiver
site	862	701	432	63
année	2082	1201	618	589
interaction (S x A)	1146	710	539	301
expliquée	4090	2612	1589	953
totale variance	6948	6036	4529	1897

% variance expliquée	printemps	été	automne	hiver
Site	12,4	11,6	9,5	3,3
Année	30,0	19,9	13,6	31,0
interaction (SxA)	16,5	11,8	11,9	15,9
expliquée	58,9	43,3	35,1	50,2

Effet saison: (~ 40 % de la variabilité) Alors que le printemps est la période de plus forte croissance en coquille, c'est en été que l'indice de qualité est le plus fort (Figure 11 A). La valeur moyenne de l'indice de Walne et Mann est de 210 au printemps, 238 en été, 185 en automne et 112 en hiver. Boyard se caractérise par un indice printanier égal à celui de l'automne, alors que tous les autres sites ont un indice bien supérieur au printemps par rapport à l'automne.

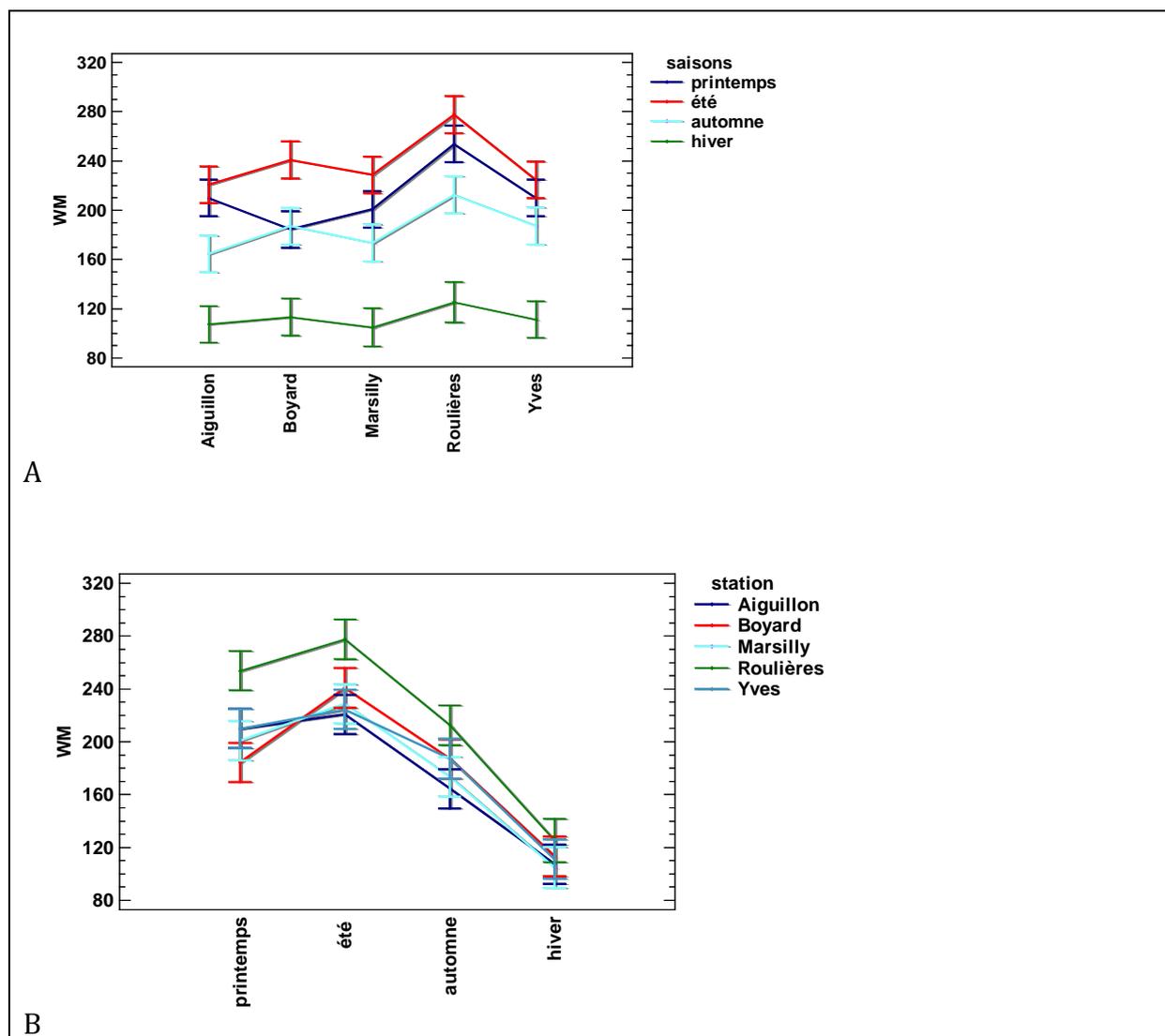
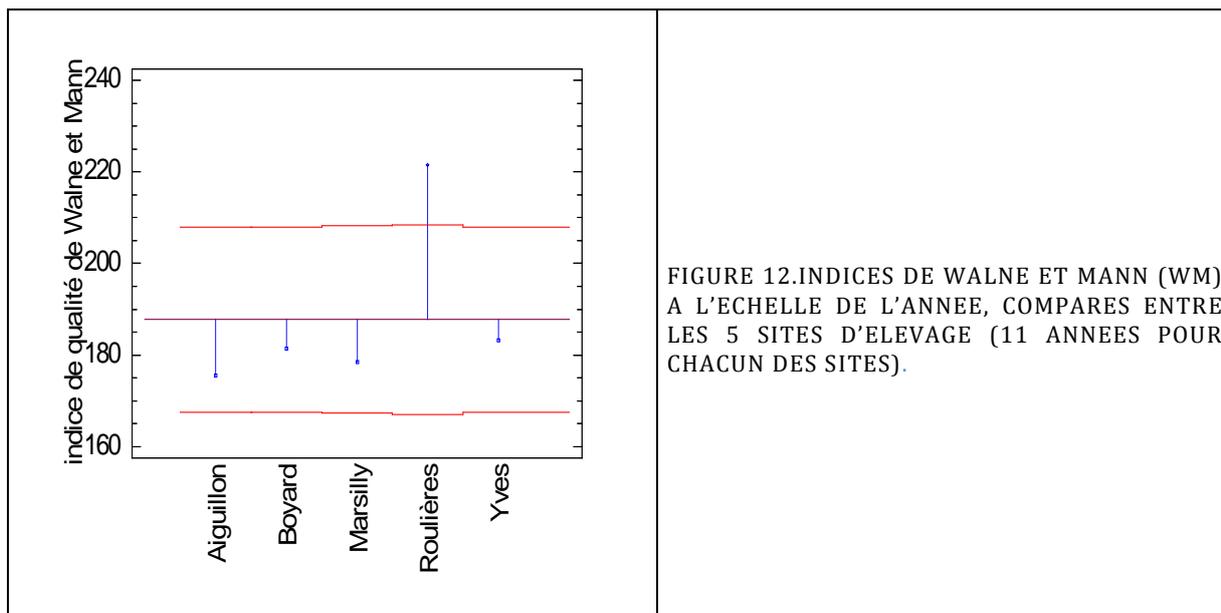


FIGURE 11. INDICE DE QUALITE DE WALNE ET MANN SELON LES SITES D'ELEVAGE (A) ET LES SAISONS (B).

Effet site (~ 5% de la variabilité) : Les Roulières se caractérisent par un indice de qualité bien supérieur aux autres sites. Boyard est un site « atypique » pour laquelle l'indice printanier est égal à celui de l'automne, et qui « rattrape » ensuite au cours de l'été (Figure 11 A). Les 3 autres sites (Yves, Marsilly et Aiguillon) présentent une évolution saisonnière en indice, assez semblable. En termes de classement, à l'année, Roulière est largement au premier rang, derrière Yves puis Boyard; Aiguillon et Marsilly forment ensuite un groupe au dernier rang de classement (Figure 12).



Effet année (~ 10 % de la variabilité)

L'analyse de variance de l'indice WM, à 3 facteurs (site, saison et année) fait bien apparaître un effet année très significatif ($p < 0,0001$). Certaines années comme 2001 et 2008 sortent vraiment du lot (Tableau 10) ; D'autres années présentent des cycles saisonniers atypiques (2003, 2004, 2005, 2009), etc ...

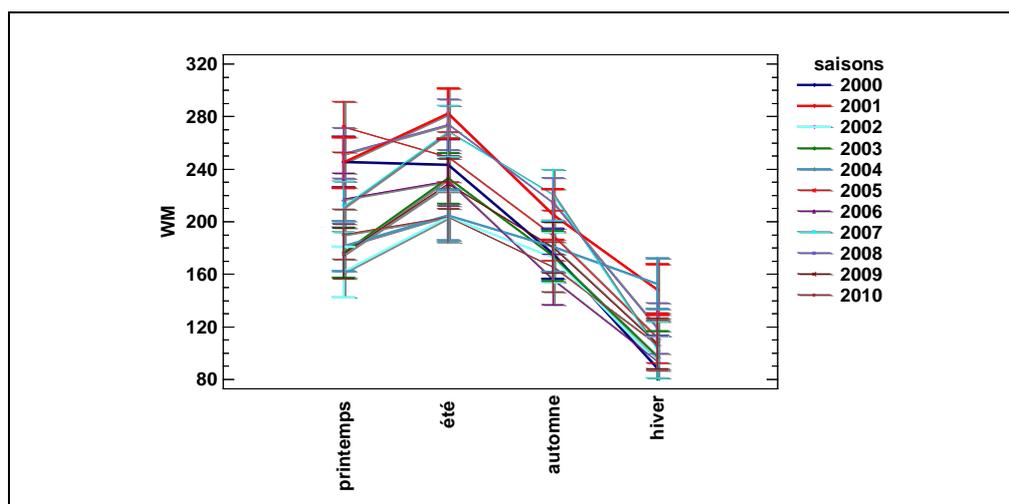
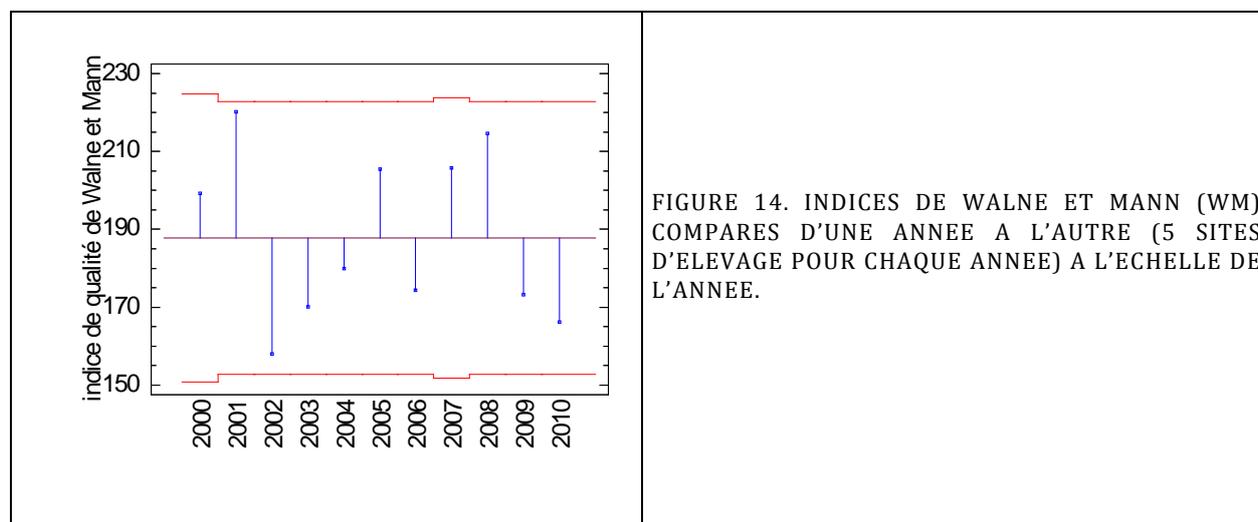


FIGURE 13. INDICE DE WALNE ET MANN AU COURS DES 4 SAISONS (2000 ET 2007 INCOMPLETES, NE SONT PAS REPRESENTEES)

année	moyenne	groupe homogène
2002	157,9	x
2010	166,2	x
2003	170,2	xx
2009	173,1	x
2006	174,4	x
2004	179,9	x
2005	205,5	x
2008	214,6	x
2001	220,3	x

TABLEAU 10 ; CLASSEMENT DE L'INDICE DE WALNE ET MANN SELON LES ANNEES (TESTS DES ETENDUES MULTIPLES PAR LA METHODE LSD - STATGRAPHICS).

2000 et 2007, années incomplètes sont retirées de l'analyse.



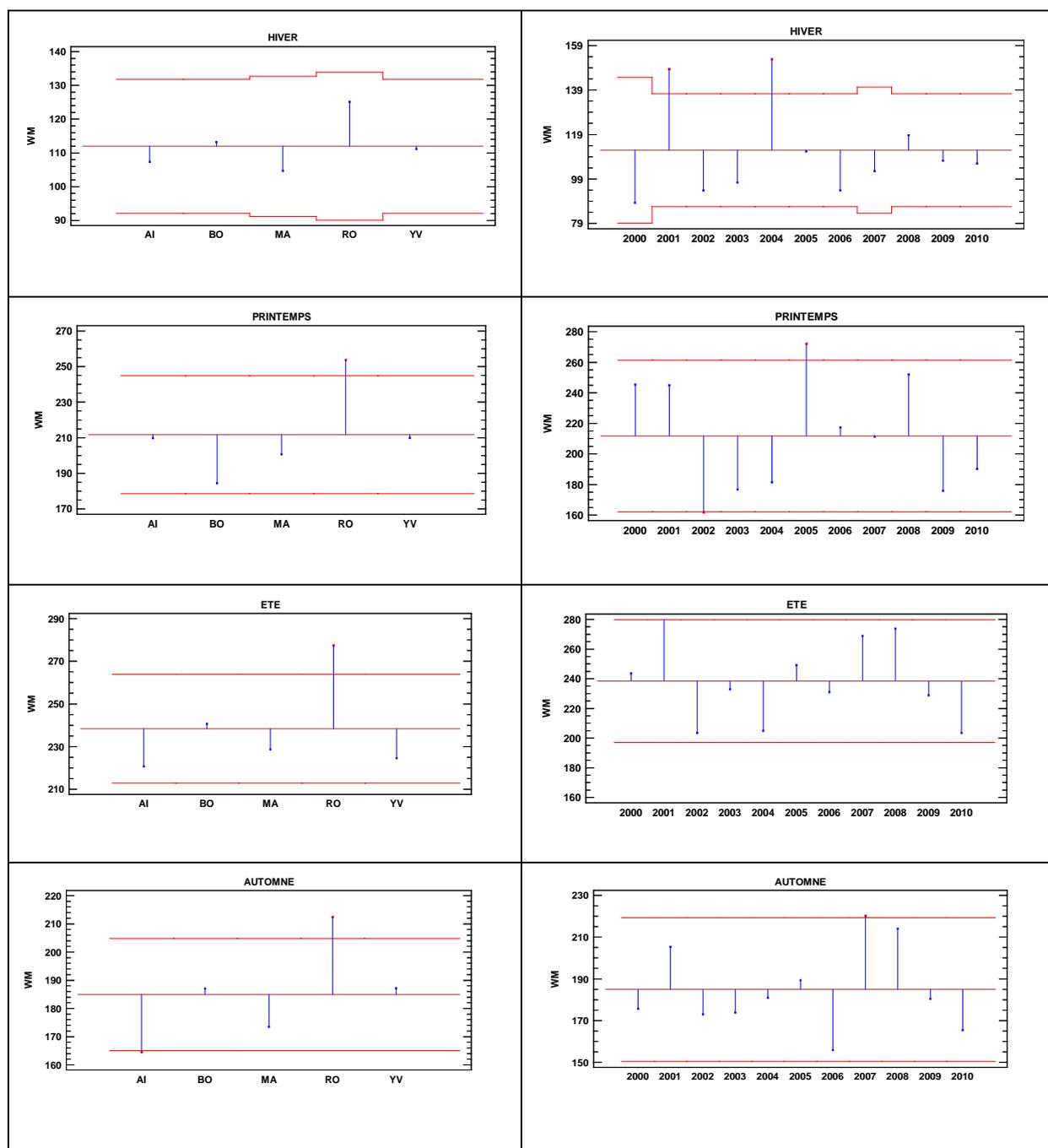


FIGURE 15; INDICES DE WALNE ET MANN (WM) COMPARES D'UN SITE A L'AUTRE (GAUCHE) ET D'UNE ANNEE A L'AUTRE (DROITE) - ECHELLE DE LA SAISON.

L'essentielle de la variance de l'indice de qualité provient de la saison (40%), puis des années (10%) ; le facteur « site » et les interactions entre les facteurs comptent chacun pour environ 5% ou moins de la variance totale. Au printemps et plus encore en hiver, c'est encore le facteur année qui prévaut devant l'effet site. Le facteur année discrimine moins bien en été-automne qu'au printemps ou en hiver

RELATION ENTRE LES DIFFERENTS DESCRIPTEURS DE CROISSANCE

Relation longueur - poids et indice de W-M à l'échelle de l'année

Pour constater que les années ne sont pas toutes équivalentes et que les performances de croissance en longueur et poids sont la plupart du temps indépendantes. Ainsi, les années 2007 et 2010 sont deux années pour lesquelles les taux de croissance en longueur sont assez voisins alors que les poids sont bien différents (Figure 16).

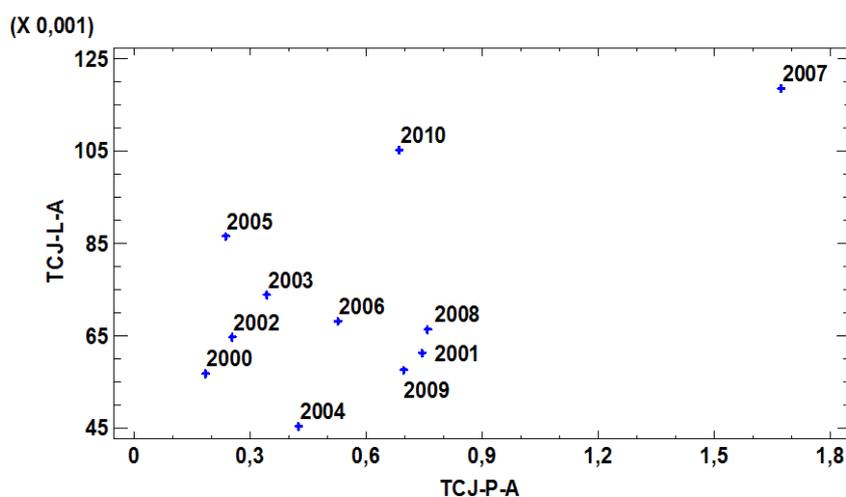


FIGURE 16. RELATION LONGUEUR - POIDS ; MOYENNES ANNUELLES DE L'ENSEMBLE DES SITES

Aucune relation significative n'apparaît entre le taux de croissance annuel et l'indice de qualité de Walne et Mann (Figure 17).

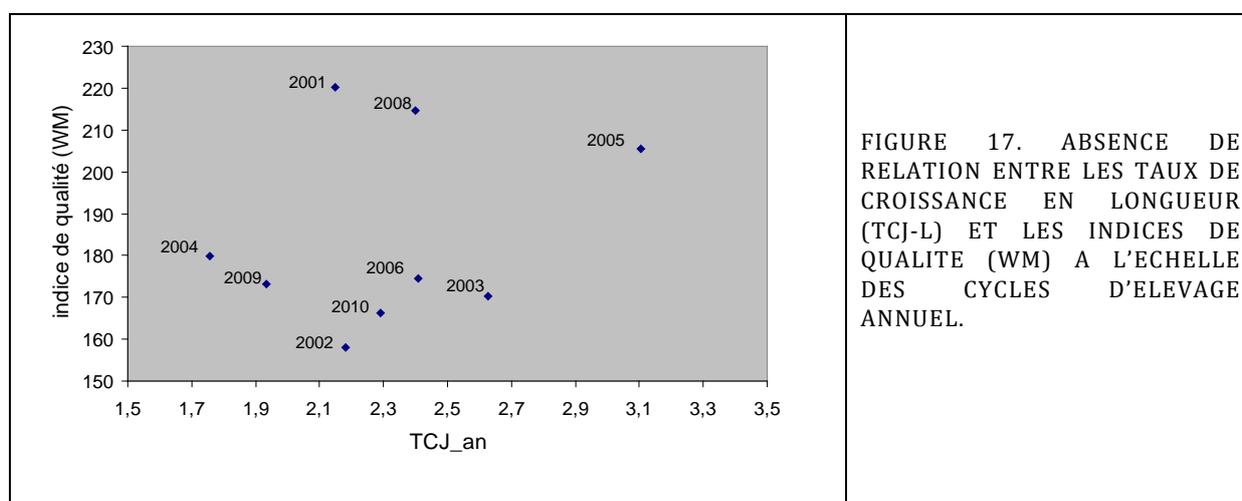


FIGURE 17. ABSENCE DE RELATION ENTRE LES TAUX DE CROISSANCE EN LONGUEUR (TCJ-L) ET LES INDICES DE QUALITE (WM) A L'ECHELLE DES CYCLES D'ELEVAGE ANNUEL.

Relation entre longueur, poids et indice de W-M à l'échelle de la saison

Par contre, à l'échelle de la saison (H, P, E, A), les résultats des corrélations significatives apparaissent (Figure 18, Tableau 11). La plus forte variabilité de croissance en longueur durant l'hiver et l'automne (par rapport au poids sec) montre que l'allocation d'énergie de croissance est d'avantage orientée vers la coquille (longueur) que vers le poids au cours de ces saisons. La corrélation faiblement significative du printemps, pourtant meilleure saison de croissance, reflète la variabilité inter annuelle des efforts de pontes qui impacte le gain de poids sec.

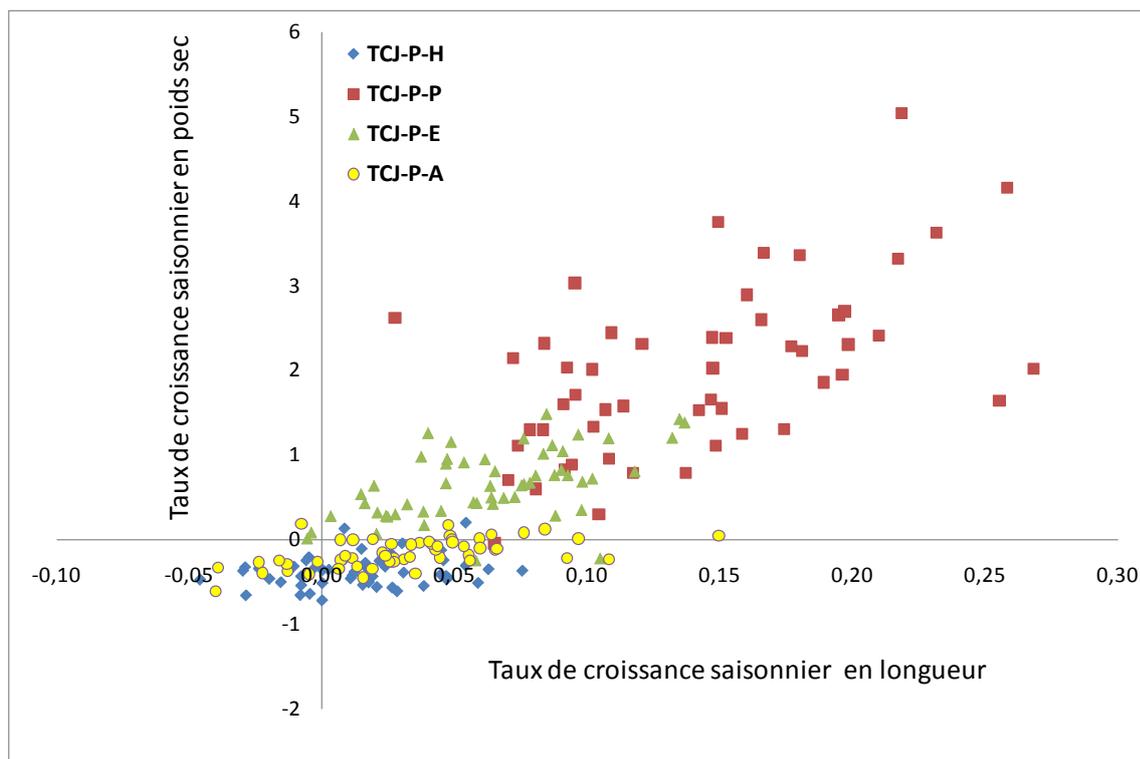


FIGURE 18. RELATION ENTRE LES TAUX DE CROISSANCE EN LONGUEUR ET LES EN POIDS DES MOULES, AU COURS DES 4 SAISONS : HIVER (H) ; PRINTEMPS (P) ; ETE € ET AUTOMNE (A).

Les corrélations les plus robustes sont obtenues entre le poids sec et l'indice de Walne et Mann en hiver et au printemps qui correspondent globalement à la saison de ponte des moules (Tableau 11).

Variables	TCJ-L-H	TCJ-P-H	WM-H
TCJ-L-H	1		
TCJ-P-H	0,225	1	
WM-H	0,122	0,740	1
Variables	TCJ-L-P	TCJ-P-P	WM-P
TCJ-L-P	1		
TCJ-P-P	0,287	1	
WM-P	0,105	0,605	1
Variables	TCJ-L-E	TCJ-P-E	WM-E
TCJ-L-E	1		
TCJ-P-E	0,536	1	
WM-E	0,374	0,324	1
Variables	TCJ-L-A	TCJ-P-A	WM-A
TCJ-L-A	1		
TCJ-P-A	0,534	1	
WM-A	0,322	0,572	1

TABLEAU 11. COEFICIENT DE CORRELATION ENTRE LES 3 VARIABLES DE LA CROISSANCE. DONNEES PAR SAISON (11 ANNEES).

Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification $\alpha=0,05$.

À l'échelle spatio - temporelle d'analyse de 11 années de suivi de la croissance de la moule bleue *Mytilus edulis*, sur 5 stations de bouchots réparties dans les pertuis charentais, la variabilité inter annuelle de croissance en longueur et poids sec est significative ; celle entre les stations ne l'est pas. En considérant une performance de croissance moyenne, l'année 2007 est l'année de référence en croissance de coquille et de chair. L'année 2010 est également une excellente année de croissance en coquille, alors que 2004 est la plus mauvaise année. Pour la croissance en poids sec, 2000, 2002, 2003 et 2005 sont les plus mauvaises parmi les 11 années de l'étude.

Les « mauvaises saisons » pour la croissance en coquille sont les printemps 2001, 2004 et 2009 et le printemps 2009 et l'automne 2006 pour la croissance en chair. Les « bonnes saisons » sont les printemps 2005 et 2007 pour la longueur et le printemps 2007 et l'hiver 2004 pour la croissance en poids de chair. Des différences inter annuelles de croissance en longueur et poids sec apparaissent durant les « saisons de transition » que sont le printemps et l'automne. Le printemps présente plus de variabilité inter annuelle que l'automne. Des différences inter-sites apparaissent uniquement durant les saisons de plus grande stabilité hydrobiologique que sont l'hiver et l'été. L'été présente plus de variabilité inter annuelle que l'hiver.

A l'échelle de l'année, pour la croissance en longueur, Boyard est le site le plus performant et Aiguillon, le moins ; les autres sites sont « intermédiaires ». Boyard et Roulière présentent les meilleurs gains de poids sec de chair ; Aiguillon et Yves sont les moins performants et Marsilly

présente des résultats intermédiaires. C'est surtout la croissance printanière qui est déterminante pour la croissance annuelle. Des contrastes entre sites se perçoivent surtout en été et en hiver (saisons « stables » de l'année) ; C'est surtout Boyard qui crée ce contraste, avec une forte croissance estivale à la fois en coquille et en chair sèche. Le site « les Roulières » est caractérisé par une croissance hivernale en longueur supérieure aux autres sites.

C'est d'abord la saison qui détermine la valeur de l'indice de qualité de Walne et Mann (WM), devant l'année et le site. Alors que le printemps est la période de plus forte croissance en coquille, c'est en été que l'indice de qualité est le plus fort. Boyard se caractérise par un indice printanier égal à celui de l'automne alors que tous les autres sites ont un indice bien supérieur au printemps par rapport à l'automne. L'été, principale saison de vente de moules, est la saison où la qualité de chair (WM) est la plus élevée alors que la croissance (TCJ) est meilleure au printemps. Le site des Roulières se caractérise par un indice de qualité bien supérieur aux autres sites. Le site de Boyard se caractérise par un indice printanier faible. Le site d'Yves qui se classe en 4^{ème} position en croissance de coquille passe en 2^d position dans le classement des indices de qualité. A l'échelle de l'année, des différences d'indice apparaissent entre les meilleurs années : 2001, 2008 et d'autres moins bonnes telles 2002 et 2010.

II - L'ENVIRONNEMENT DES ELEVAGES

Cette étude se rapporte à la période comprise entre 2000 et 2010

PRESENTATION DES SITES D'ELEVAGE

Les 5 sites d'élevage expérimentaux du réseau REMOULA, pris en compte dans cette étude, sont situés sur les bouchots des pertuis charentais aux Roulières, à l'Aiguillon, à Marsilly, à Yves et à Boyard (Figure 19).

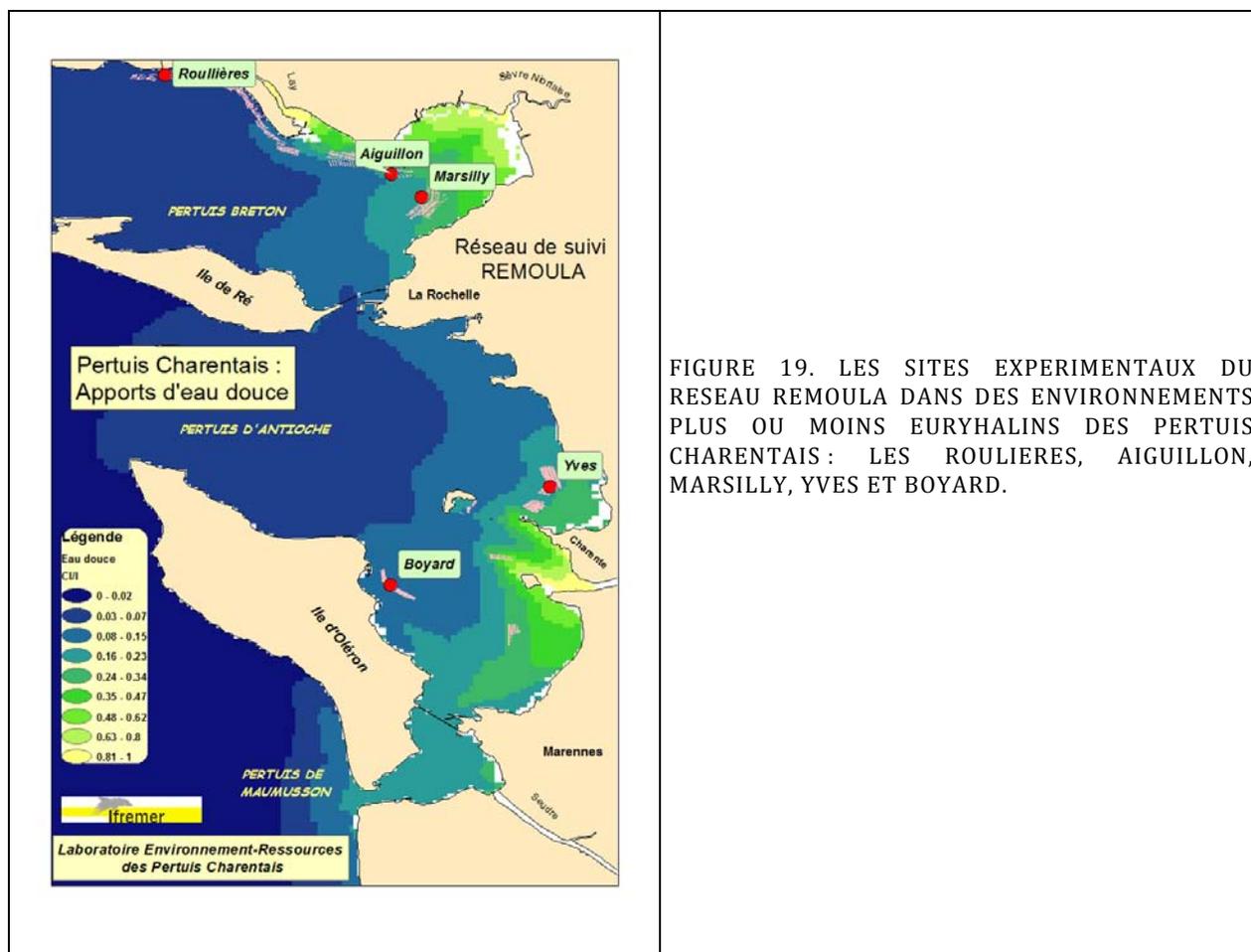


FIGURE 19. LES SITES EXPERIMENTAUX DU RESEAU REMOULA DANS DES ENVIRONNEMENTS PLUS OU MOINS EURYHALINS DES PERTUIS CHARENTAIS : LES ROULIERES, AIGUILLON, MARSILLY, YVES ET BOYARD.

Selon le site d'élevage, le pieu de bouchots portant les paniers d'élevages expérimentaux est situé soit en bordure de la zone de bouchot (Roulières, Marsilly) soit plus en profondeur dans les lignes de bouchots (Aiguillon, Boyard et Yves).

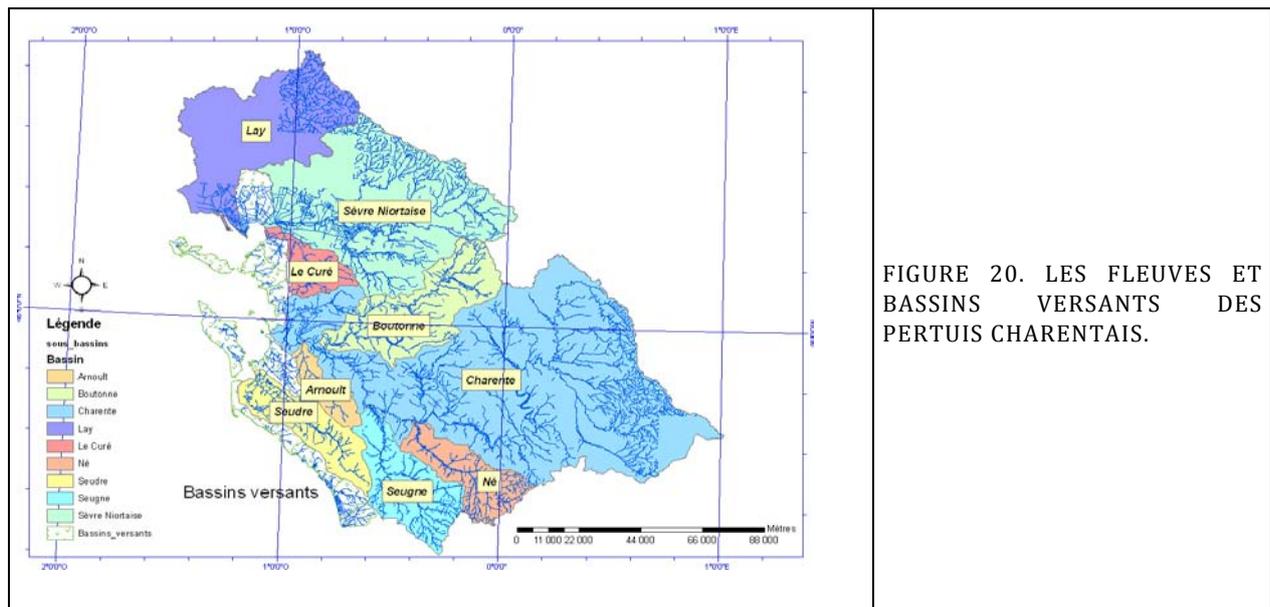
D'autres caractéristiques distinguent les sites entre eux (Tableau 12).

TABLEAU 12. ALTITUDES DES PIEUX ET DES POCHEs D'ELEVAGE EXPERIMENTAL SELON LES SITES. TOUTES LES ALTITUDES SONT DONNEES PAR RAPPORT AU « 0 » DES CARTES MARINES

site	altitude à la base du pieu de bouchot	hauteur du pieu de bouchot	altitude des lots suivis sur les pieux de bouchot
Boyard	1,03	185	2,38
Aiguillon	0,10	230	1,90
Marsilly	0,62	225	2,37
Roulières	0,66	190	2,06
Yves	0,03	211	1,64

LES APPORTS DES FLEUVES DANS LES PERTUIS

Les pertuis charentais constituent un écosystème estuarien dans lesquels se déversent les fleuves internes aux pertuis dont les principaux sont, du sud vers le nord : la Seudre, la Charente (dont la Boutonne), la Sèvre Niortaise et le Lay (Figure 20).



Des informations issues des satellites d'observation peuvent montrer l'évolution des concentrations en chlorophylle à partir de l'analyse des couleurs de l'eau mesurées à distance

par spectro-radiométrie (MODIS) (Nausicaa, d'après Bulldoser du 15 mai 2011). Ces images montrent l'évolution au mois de mai 2011, d'un bloom phytoplanctonique entre le panache externe de la Gironde (sud des cartes), la côte Ouest d'Oléron et l'intérieur des pertuis charentais, montrant par là l'influence que doivent avoir les panaches des grands fleuves dans les pertuis charentais (Figure 21).

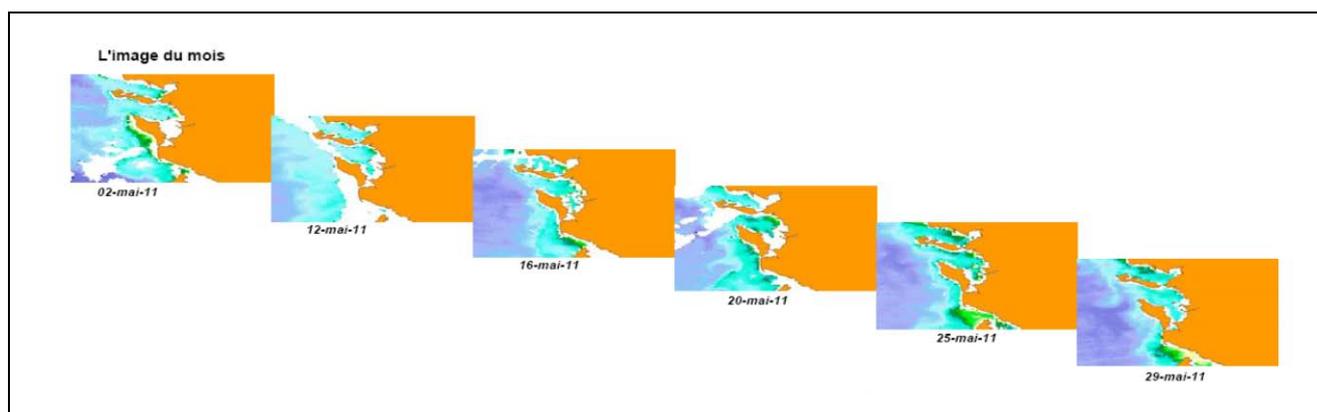


FIGURE 21. EXEMPLE D'ÉVOLUTION D'UN BLOOM PHYTOPLANCTONIQUE ENTRE LE PANACHE EXTERNE DE LA GIRONDE (SUD DES CARTES), LA CÔTE OUEST D'OLÉRON ET LES PERTUIS CHARENTAIS.

Débits des fleuves

Les débits des fleuves sont issus de la base Hydro (www.hydro.eaufrance.fr/) aux stations de mesure situées les plus en aval sur le fleuve ou reconstituées à ces mêmes stations à l'aide de petits modèles de régressions entre les bassins versants les plus proches (Le Moine, 2013). Les mesures sont réalisées à Corme pour la Seudre, Cabariot pour la Boutonne, Saint Savinien pour la Charente, la Tiffardière pour la Sèvre, la Bretonnière pour le Lay et Tonneins pour la Garonne.

Les débits moyens des fleuves (moyenne sur une année complète) sont : supérieurs à 800 m³/s pour la Loire, compris entre 300 et 500 m³/s pour la Garonne et la Dordogne (fleuves externes aux pertuis), et de l'ordre de 70 m³/s pour la Charente ; de 11 à 17 m³/s pour la Boutonne, la Sèvre et le Lay, et de l'ordre de 1,5 m³/s pour la Seudre (Figure 22). Les débits des fleuves internes aux pertuis charentais représentent environ 6% de l'ensemble des débits des fleuves (dont Loire, Dordogne et Garonne) susceptibles d'impacter les pertuis.

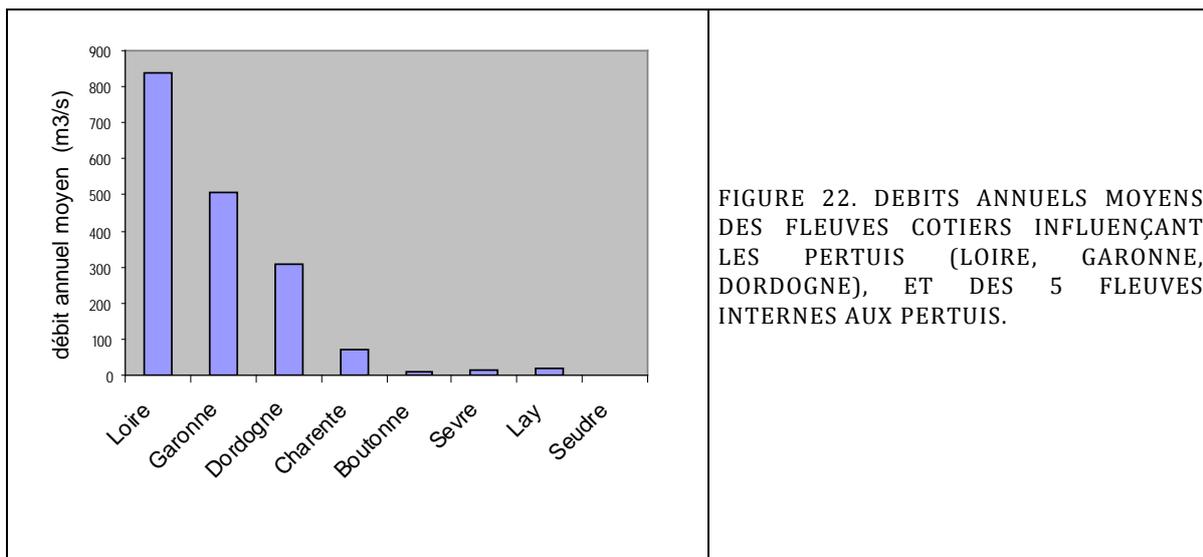


FIGURE 22. DEBITS ANNUELS MOYENS DES FLEUVES COTIERS INFLUENÇANT LES PERTUIS (LOIRE, GARONNE, DORDOGNE), ET DES 5 FLEUVES INTERNES AUX PERTUIS.

Parmi les fleuves internes aux pertuis, la Charente contribue à plus de 60% des apports, la Seudre 1 à 2% seulement, et les 3 autre fleuves entre 10 et 15% (Figure 23.)

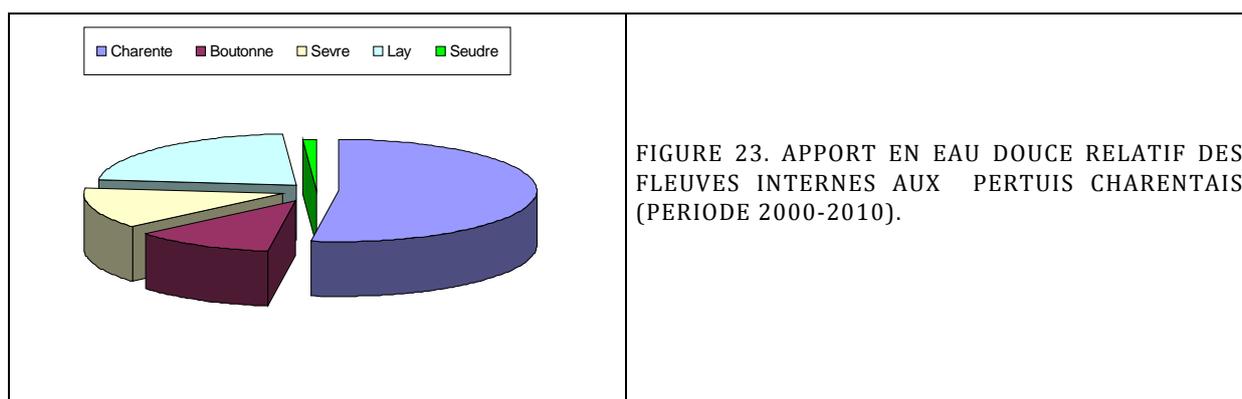
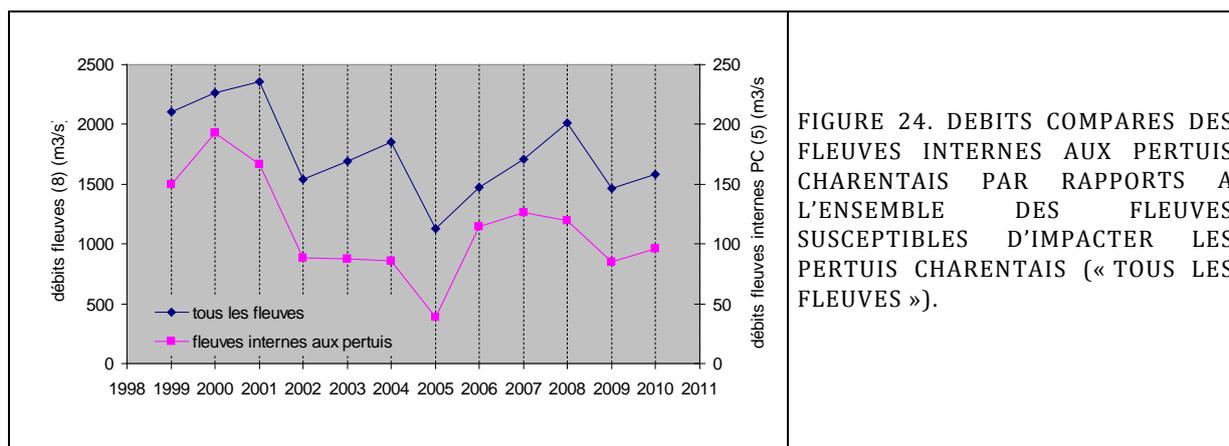


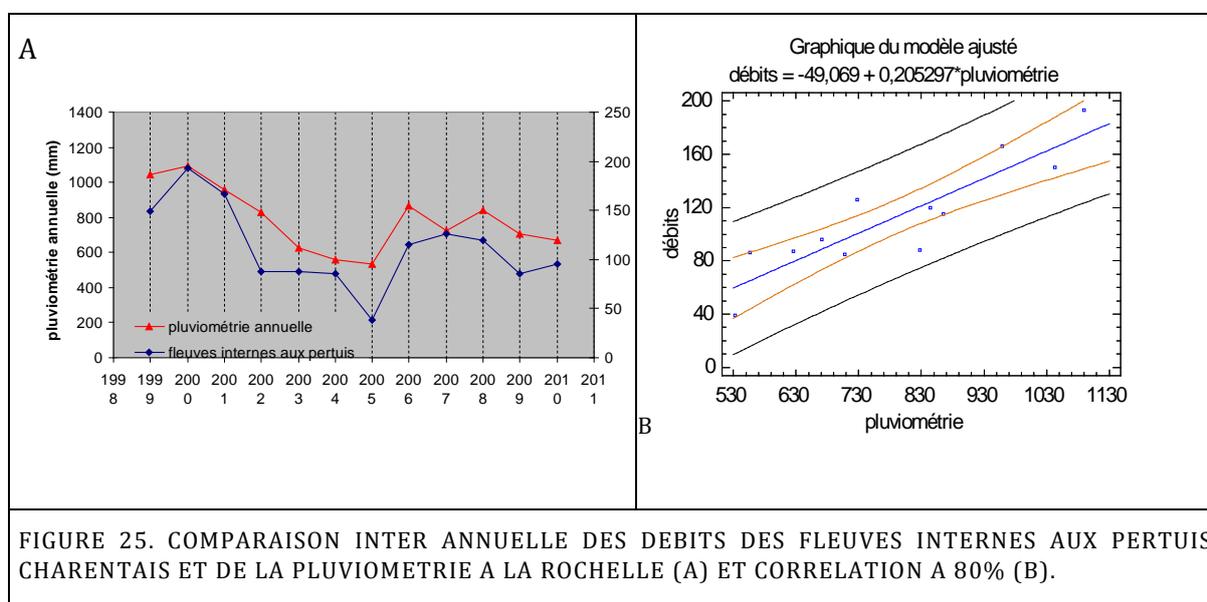
FIGURE 23. APPORT EN EAU DOUCE RELATIF DES FLEUVES INTERNES AUX PERTUIS CHARENTAIS (PERIODE 2000-2010).

Variabilité inter annuelle des apports des fleuves

Les débits des fleuves internes aux pertuis varient dans un rapport de 1 à 4 entre 2005, année de faible débit (étiage), et l'année 2000, année de fort débit (crue) (Figure 24).



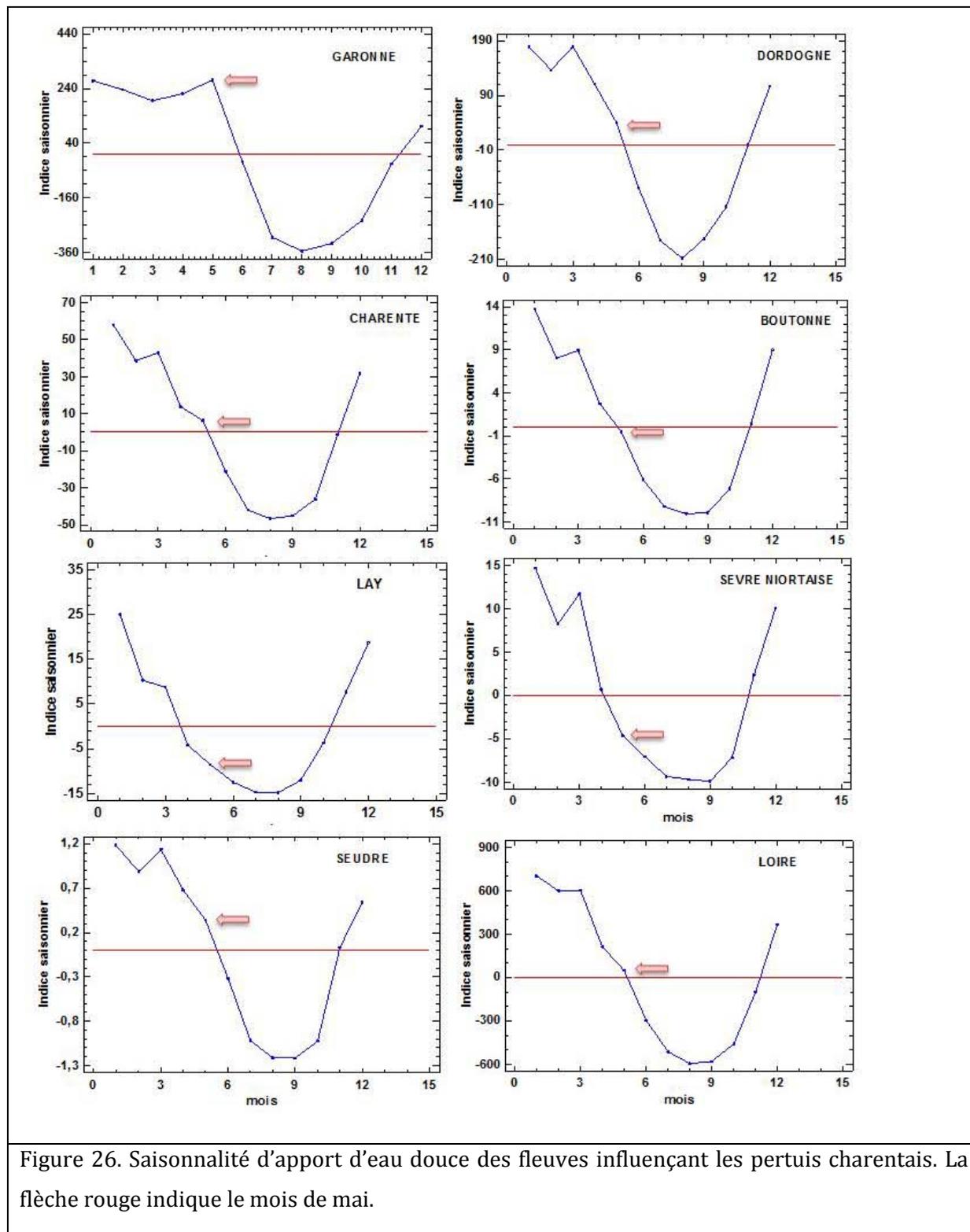
Au cours de ces 11 années, le débit moyen des fleuves internes aux pertuis charentais, et la pluviométrie mesurée à la Rochelle (MF) sont bien corrélés ($R^2 = 0,8$) (Figure 25 A, B).



Saisonnalité des apports en eau douce

La base de données des débits des fleuves est constituée de séries de débits mensuels sur 11 années. La méthode statistique Sensus II (Statgraphic Centurion XV II) permet de décomposer chacune des séries en tendance, saisonnalité et résidus. La saisonnalité est « centrée » sur une valeur 0 qui délimite débits faibles et débits forts (Figure 26). Si les 3 mois d'hiver (janvier à mars) sont bien les mois à saisonnalité positive pour l'ensemble des fleuves, par contre le printemps et en particulier le mois de mai, présentent des contrastes selon les fleuves ; Si 5 fleuves présentent une saisonnalité en mai proche de la moyenne (indice ~ 0), les débits des deux fleuves du Pertuis Breton (Sèvre et Lay) sont bien inférieurs à la moyenne au cours de ce

mois, traduisant sans doute un déficit précoce en eau douce dans cette région ; à l'inverse les apports de la Garonne sont aussi importants en mai, que les débits d'hiver, probablement du fait des fontes de neiges dans les Pyrénées.



VARIABILITE CLIMATIQUE

REGIME CLIMATIQUE GLOBAL

L'effet du climat peut être abordé au travers d'indices synthétiques, les régimes climatiques globaux. Un des plus connus pour l'Atlantique Nord est le régime NAO (North Atlantic Oscillation, oscillation nord atlantique qui se mesure par la différence de pression entre un point proche des Açores et un point proche de l'Islande (Cassou, 2004). En fait, 4 régimes hivernaux regroupant pour chaque année les mois de décembre, janvier, février et mars, sont pris en compte dans cette étude. Ces 4 régimes sont : (1) le régime météo NAO+ (rmNAO+_Hiv), (2) le régime BL dit de « blocage » (rmBL_Hiv), (3) le régime NAO- (rmNAO-_Hiv) et (4) le régime AR dorsale atlantique (rmAR_Hiv). Ces 4 régimes hivernaux sont caractérisés par des tendances spécifiques ; le régime NAO+ se traduit par la genèse de dépressions. Les températures y sont généralement douces en Hiver du fait de l'apport d'air océanique et les masses d'airs arctiques ou Sibériennes sont repoussées plus au Nord. Le régime NAO- au contraire force les masses d'air froides polaires à envahir le nord du continent Européen. Le régime de dorsale (AR_H) se traduit par une anomalie de hautes pressions sur l'Atlantique. L'anticyclone des Açores se propage en direction du Groenland. Le flux tourne alors au Nord ou au Nord-ouest. Le régime de blocage (BL_H) correspond à une circulation beaucoup plus lente où le jet d'altitude s'affaiblit nettement. Il forme des méandres jusqu'aux régions polaires et l'air sibérien peut facilement s'immiscer jusqu'en Europe occidentale. Entre 2000 et 2010, selon les années, c'est plus tel ou tel régime qui va dominer (Figure 27).

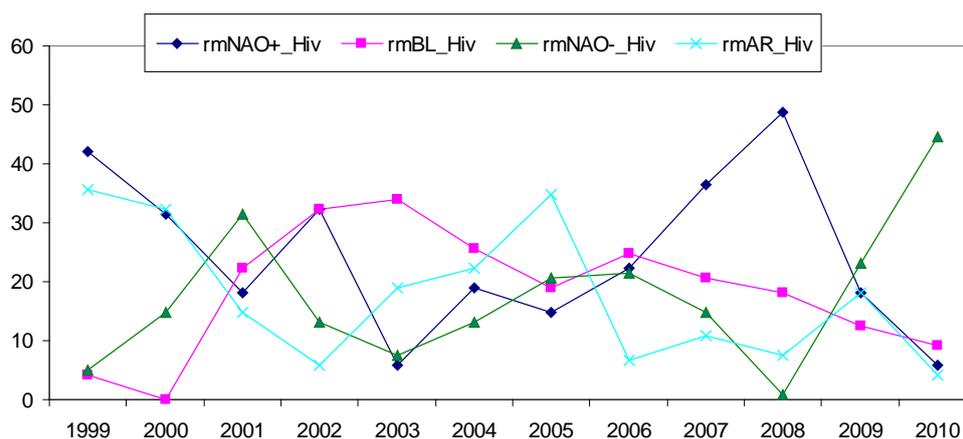


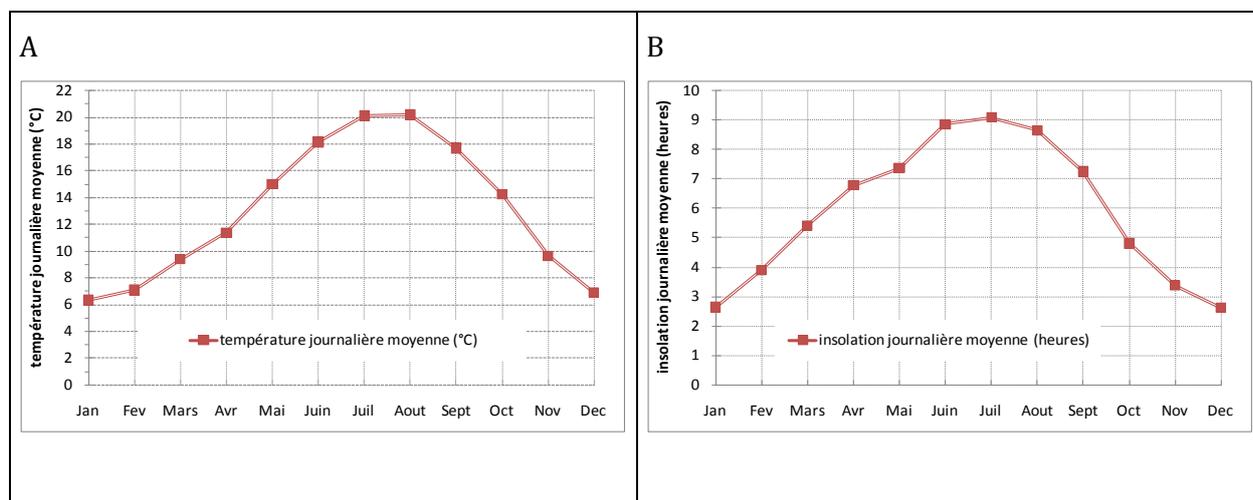
FIGURE 27. REPRESENTATION (%) DES 4 REGIMES HIVERNAUX PRINCIPAUX CHAQUE ANNEE ENTRE 1999 ET 2010 ; LE REGIME EST CONSIDERE COMME ETABLI (ET PRIS EN COMPTE DANS L'ANALYSE) SI IL PERSISTE PENDANT AU MOINS 5 JOURS DE SUITE

REGIME CLIMATIQUE REGIONAL (TEMPERATURE, PLUVIOMETRIE, INSOLATION ET VENTS)

L'analyse porte sur la période 2000-2010. La caractérisation annuelle de l'environnement des pertuis est réalisée : (1) à partir des données régionales de Météo_France, station de « bout blanc » à La Rochelle; (2) à partir d'un modèle Arpège de Météo-France qui permet d'extraire une base sur les vents au niveau des pertuis; (3) à partir de données sur les régimes globaux sur la façade atlantique (Cassou, Terray et al. 2005).

Les descripteurs météorologiques

Les paramètres climatiques (Météo-France) sont : la température de l'air sous abris (TEMPmoy), la pluviométrie (PLUVsom) (mm), l'insolation (INSmoy heure/ mois) et le rayonnement global RAYmoy (joules / cm²) (Tableau 3). Durant les 11 années de l'étude, la température de l'air oscille entre 6 °C en janvier et 20°C en Juillet - août (Figure 28). Le cycle de rayonnement suit le cycle de température entre des valeurs de 400 joules /cm² en janvier et 5 fois supérieures en juillet - août. Le cycle saisonnier d'insolation (nombre d'heures de soleil par jour), marque une sorte de « pallier » en avril et mai. On retrouve un « décrochage » encore plus marqué sur le cycle de la pluviométrie, avec un plateau sur les trois mois de mars, avril et mai (Figure 28).



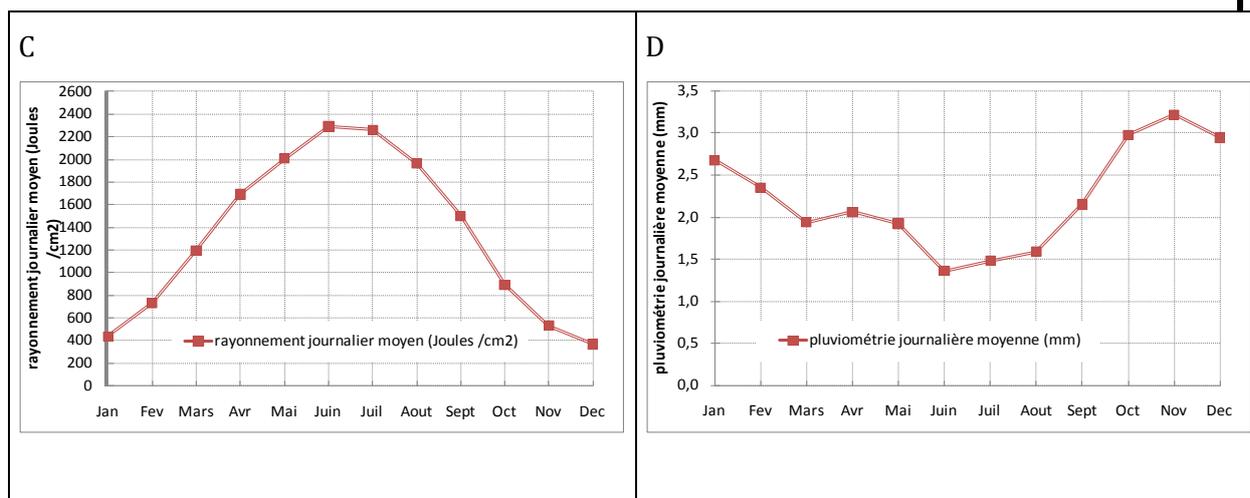


FIGURE 28. MOYENNES JOURNALIERES SAISONNIERES DE LA TEMPERATURE (A), INSOLATION (B), RAYONNEMENT (C) ET PLUVIOMETRIE (D) DURANT LA PERIODE 2000-2010 A LA STATION METEOROLOGIQUE REGIONALE DE LA ROCHELLE (DONNEES METEO-FRANCE).

Direction et intensité des vents

La base ARPEGE Météo-France permet d'extraire un ensemble de descripteurs météorologiques au niveau des pertuis charentais (Tableau 3). L'intensité moyenne du vent (I_{moyVent} - m/s), la direction moyenne du vent durant le mois (D_{moyVent} - degrés), l'intensité maximale au cours du mois (I_{maxVent} - m/s), la pression atmosphérique (P_{atm} - pascals), le taux d'humidité moyen de l'air (H_{moy} - %), le pourcentage de temps pendant lequel les vents soufflent dans un des 4 secteurs de la rose des vents ($V_{\text{ent_N}}$, $V_{\text{ent_E}}$, $V_{\text{ent_S}}$, $V_{\text{ent_O}}$).

L'hodographe est une représentation cumulée de vecteurs-vent (intensité et direction) définie par la ligne qui joint la tête de ces vecteurs (Annexe 1). Les hodographes, annuels ou saisonniers, permettent de bien percevoir les « cisaillements » correspondant à des changements brutaux dans la direction du vent.

A l'échelle de l'année une typologie apparaît avec des années au cours duquel l'hodographe est orienté au sud-est (2002, 2005, 2006, 2009 et 2010) (= vents de Nord-Ouest), à l'est (2003) (vents d'Ouest) et au nord-est (2004, 2008) (vents de Sud-Ouest) et d'autres années où la direction est changeante (2000, 2001, 2007) (Tableau 13).

année	orientation globale du vent
2000	non défini
2001	non défini
2002	sud-est
2003	est
2004	nord-est
2005	sud-est
2006	sud-est
2007	non défini
2008	nord-est
2009	sud-est
2010	sud-est

TABLEAU 13. ORIENTATION PRINCIPALE ANNUELLE DES VENTS ENTRE 2000 ET 2011 DANS LES PERTUIS CHARENTAIS (D'APRES LES HODOGRAPHES). L'ORIENTATION DU VENT EST DEFINIE PAR SON ORIGINE.

VARIABILITE INTER ANNUELLE

A l'échelle de l'année, les descripteurs météorologique régionaux : température, insolation, pluviométrie, intensité et direction des vents, débits des fleuves et le régime climatique général, ne permettent pas d'expliquer parfaitement la variabilité interannuelle de croissance en longueur (Tableau 14, Figure 29). Néanmoins, on retrouve une classification partiellement en correspondance pour certaines bonnes années, telles 2005, 2010 et pour des années à croissance plus modestes : 2000, 2001, 2008 et 2002.

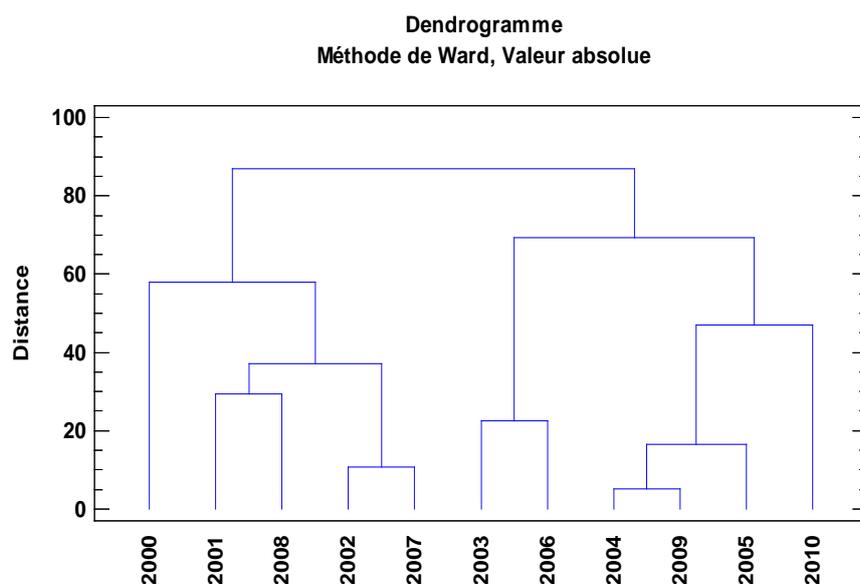


FIGURE 29. CLASSIFICATION HIERARCHIQUE DES ANNEES ENTRE ELLES, SELON LES CARACTERISTIQUES REGIONALES ANNUELLES DES PERTUIS CHARENTAIS (METHODE DE WARD).

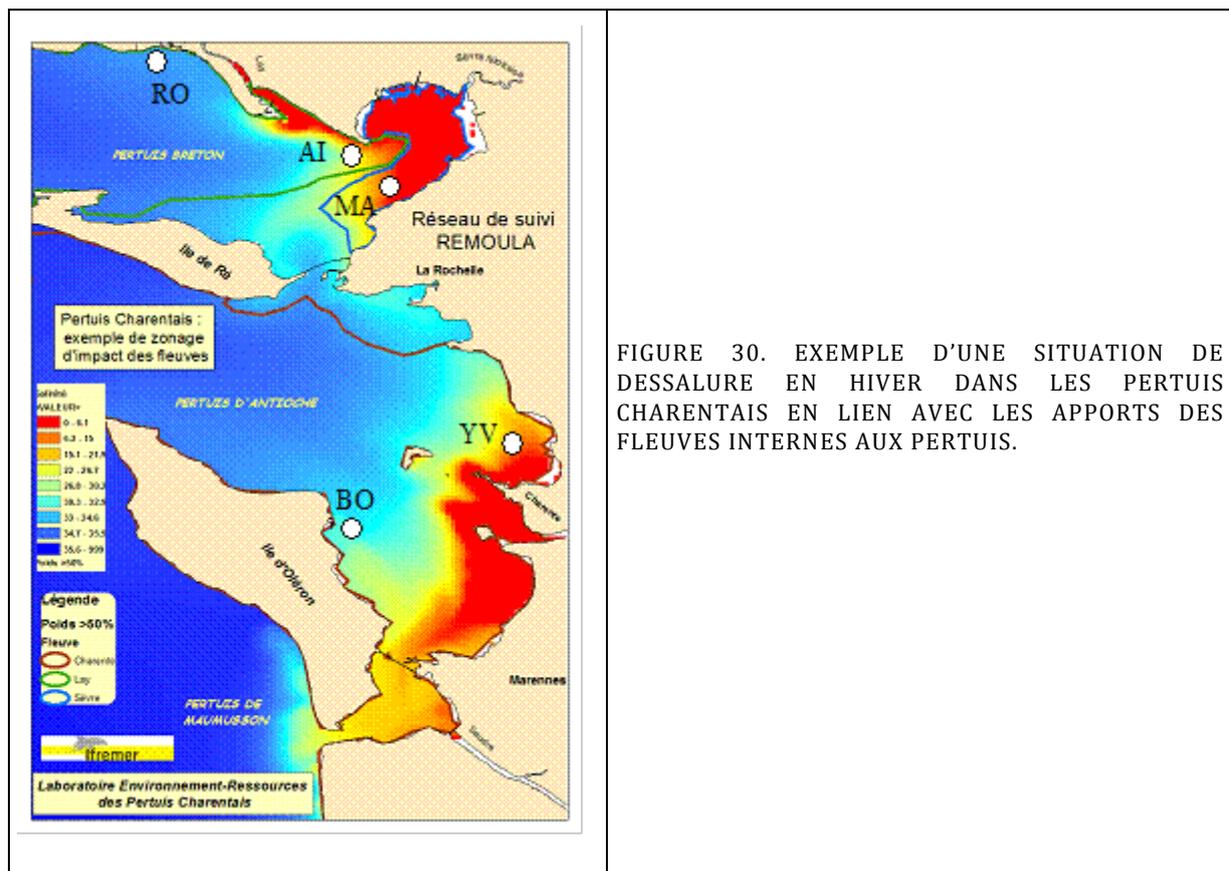
TABLEAU 14. CARACTERISATION METEOROLOGIQUE DES ANNEES D'ETUDE

2000, 2008	beaucoup de pluie, hiver doux et faible rayonnement
2005, 2010	situation inverse : peu de pluie, peu d'apport en eau (2005 ; 2010) et température froides et vents de Nord (2010)
2003	températures élevées
2004, 2005	vent de nord et AR_H positifs (flux de Nord)
2002, 2006	vent de sud et vent d'Est dominant durant l'année et vents forts (2002)
2001, 2007, 2009	Pas de caractéristiques particulières

CARACTERISATION HYDROBIOLOGIQUE

PAR LE MODELE HYDRODYNAMIQUE MARS2D

Elle a été réalisée par modélisation grâce au modèle Mars2-3D développé par l'Ifremer (voir matériel et méthodes). Le modèle réévalue à chaque pas de temps (5 minutes) la salinité sur tout le domaine (Figure 30), ainsi que l'intensité et la direction des vecteurs courants Nord et Est. Afin d'évaluer la contribution de chaque fleuve à la dessalure, un traceur spécifique a été diffusé dans le flux de chaque fleuve sur l'ensemble de la période de calcul. Sur cette figure où apparaissent les contours d'influence de chaque fleuve, on voit que la station de l'Aiguillon (AI) est sous influence du Lay alors que celle de Marsilly, très proche, est sous influence de la Sèvre Niortaise. Yves est sous influence nette de la Charente alors que Boyard est plus isolé. Roulière est une station franchement « océanique » (Figure 30).

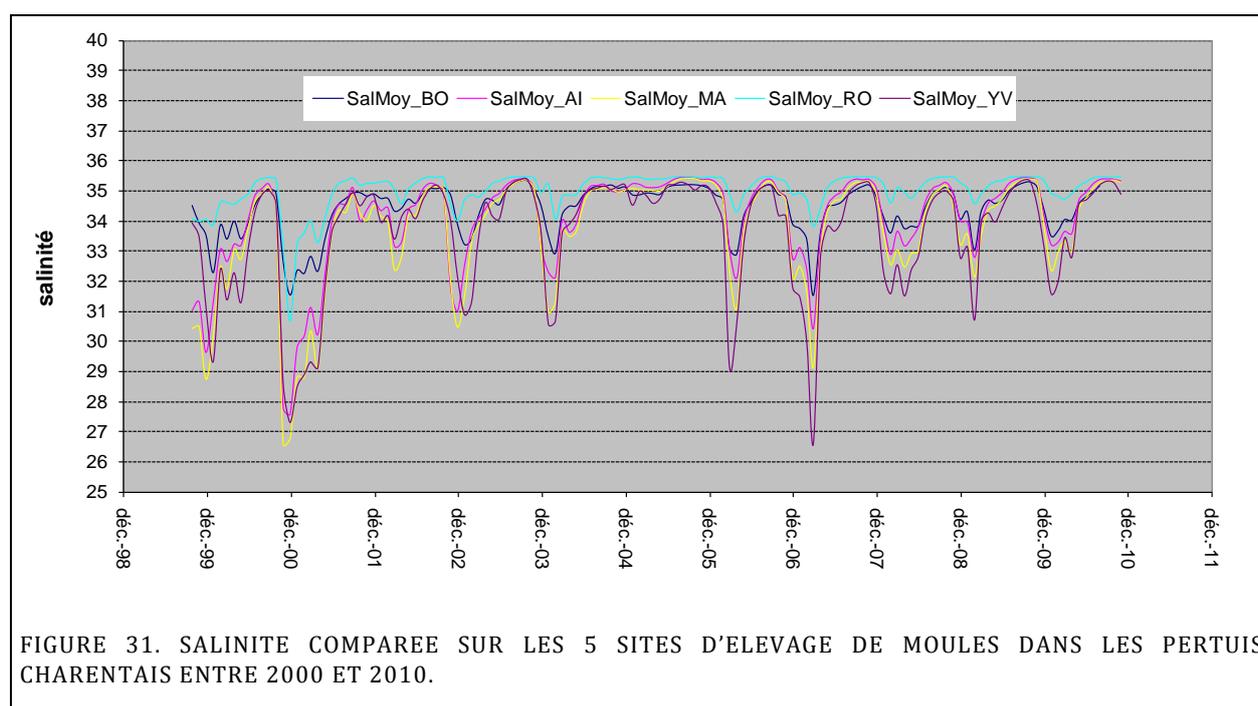


Les descripteurs d'impact des fleuves, résultants de ces simulations, sont présentés en 3^{ème} partie du Tableau 3. Ce sont, sur chacun des sites d'élevage : la salinité (SALmoy), les contributions à la dessalure (CoDe) et les apports en eau douce (ApEDo) de chacun des fleuves, l'intensité du courant (ImoyC), la variance de cette intensité (IvarC) ainsi que l'intensité maximale du courant (ImaxC) observée au cours

d'un mois (pas de temps de mesure toutes les 6 heures), la direction moyenne du courant (DmoyC) et la variance de cette direction de courant (DvarC) (Tableau 3).

Salinité sur chacune des stations

La salinité au cours des 11 années d'étude montre bien le site de Roulière d'abord, puis celui de Boyard sont des sites « marins » pour lesquels la salinité moyenne mensuelle ne descend pas en dessous de 31 psu, alors que les trois autres sites (AI, MA et YV) peuvent descendre à 26 psu (Figure 31).



Contribution à la dessalure des fleuves sur chacun des sites

Dans le pertuis Breton, le Lay et la Sèvre impactent très faiblement les sites des Roulières (Figure 32). Par contre, l'influence de la Sèvre et dans une moindre mesure le Lay, et dans une moindre mesure encore, la Charente, se font beaucoup plus sentir au niveau des sites de Marsilly et de l'Aiguillon, très à l'Est dans le pertuis Breton. Enfin les sites situés dans le pertuis d'Antioche : Yves et dans une moindre mesure, Boyard, sont impactés par les panaches de la Charente. L'échelle de mesure de cet impact, identique pour chacune des figures, permet de bien caractériser les sites ; d'influence terrigène faible pour les Roulières, le centre du Pertuis Breton et Boyard (échelle d'influence de 0 à 100) (site à l'Ouest des pertuis) ; et d'influence terrigène forte pour les 3 autres sites (Marsilly, Aiguillon et Yves), à l'Est des pertuis (Figure 32). La Seudre, qui a un débit 10 à 20 fois inférieur à celui de la Sèvre ou du Lay (Figure 22), a une contribution insignifiante, non visible sur la Figure 32.

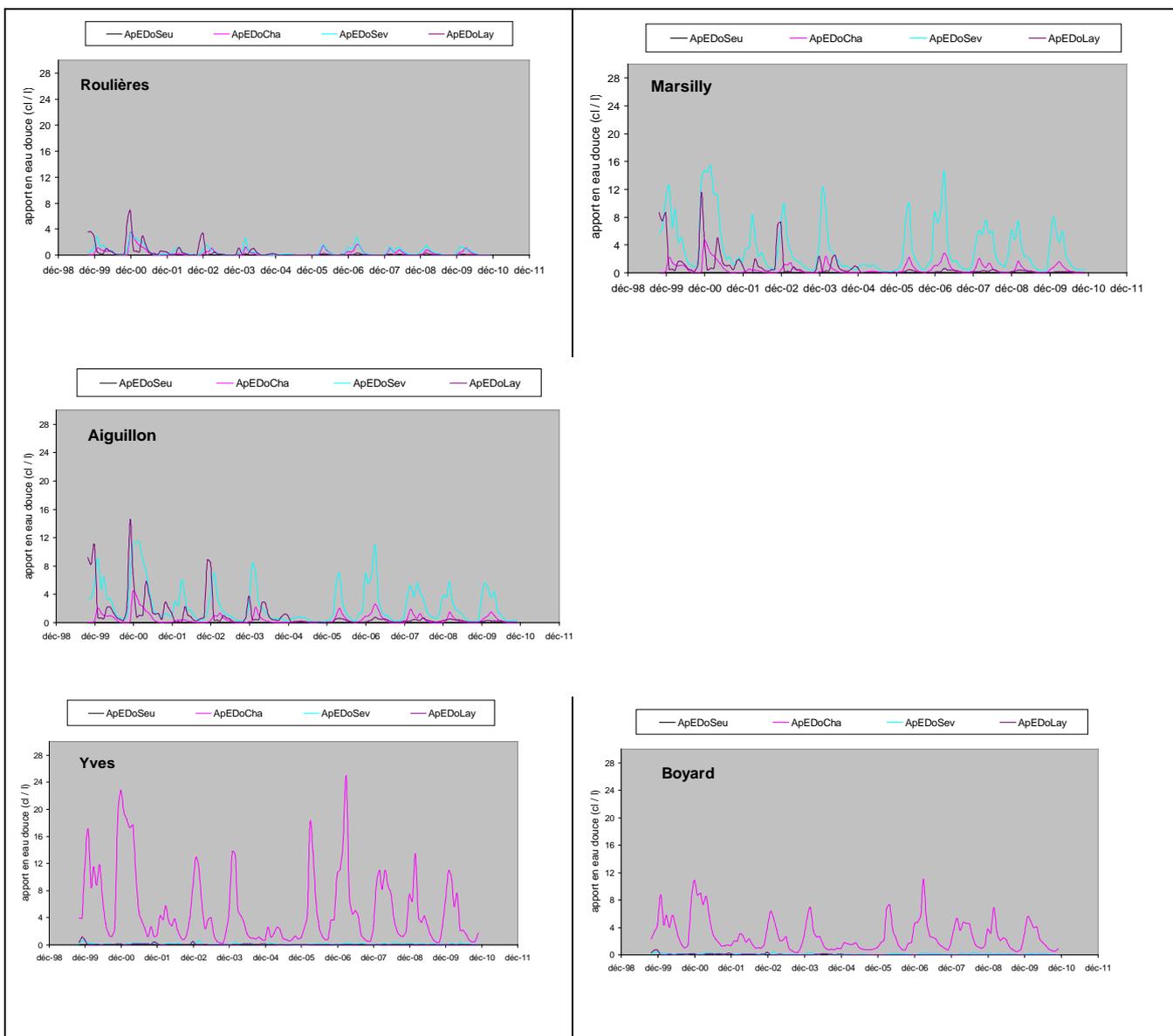
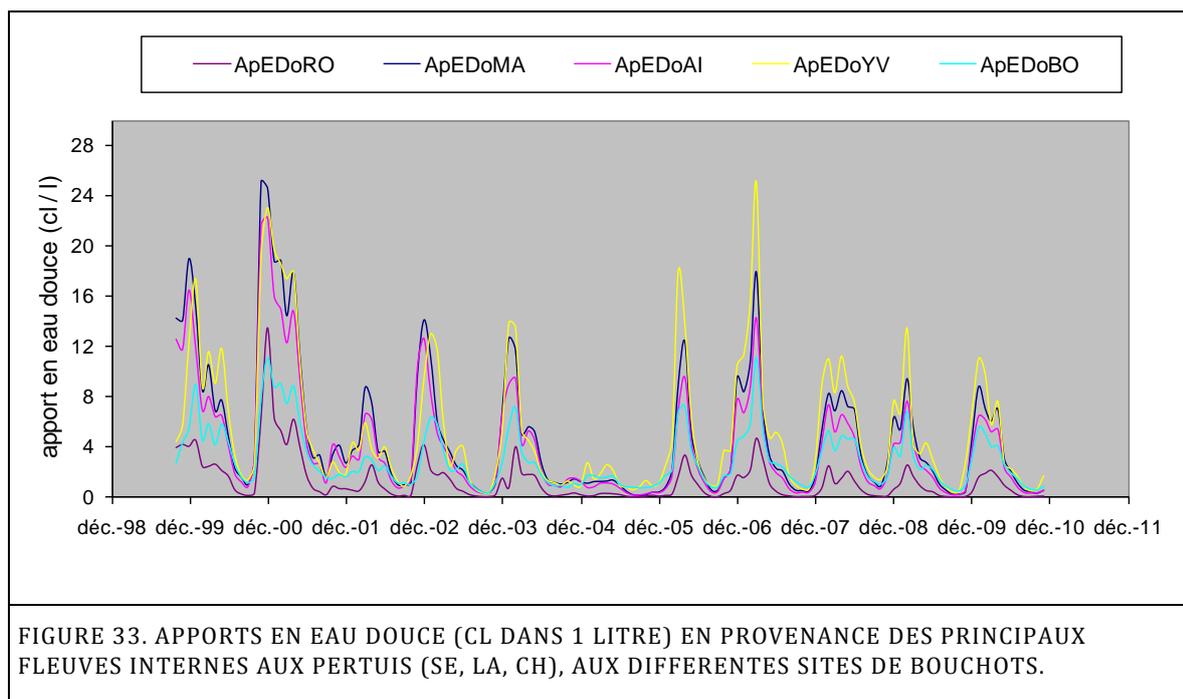


FIGURE 32. APPORT EN EAU DOUCE (CL / L) pourquoi cette unité? DES 4 FLEUVES DES PERTUIS, SUR LES 5 SITES DE BOUCHOTS DE L'ETUDE.

Sur la somme de contributions des fleuves sur les sites mytilicoles, entre 2000 et 2011, l'ordre du site le plus marin à celui le plus euryhalin est le suivant : Roulières, Boyard (salinité de 31-35), Aiguillon, Marsilly et Yves (salinité de 26-35) (Figure 33).

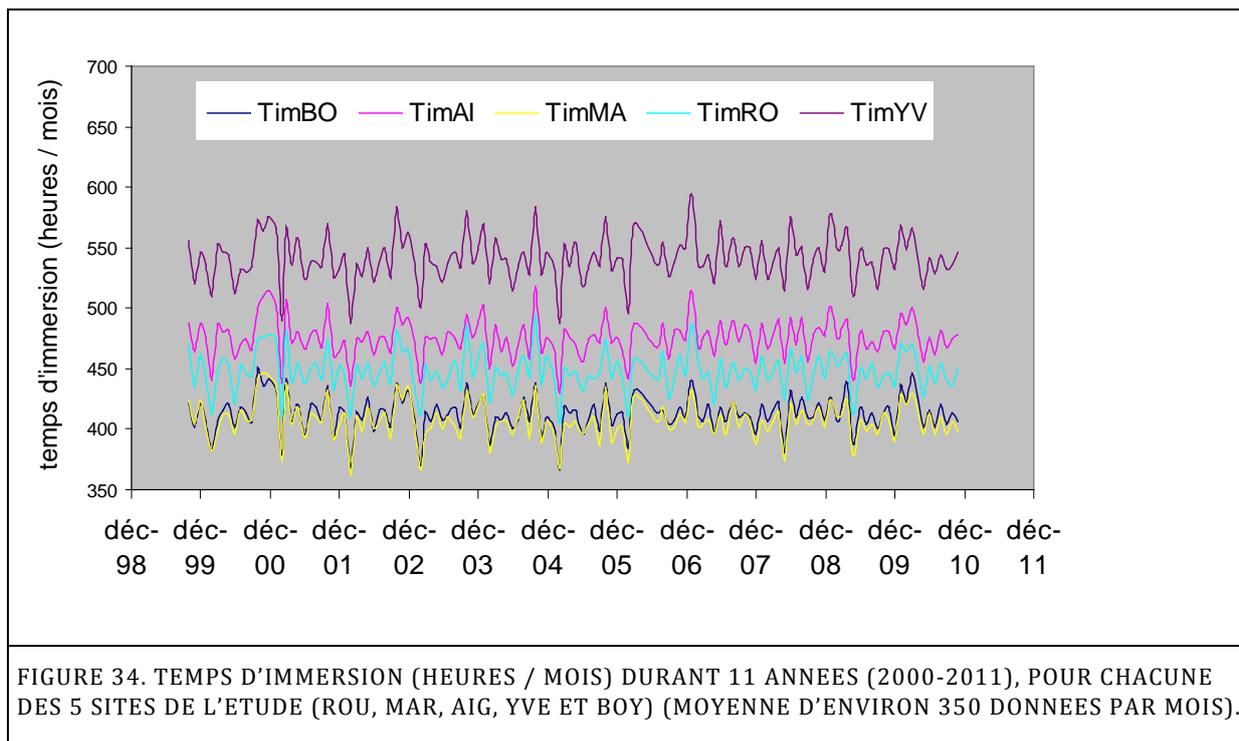


Temps d'immersion (Tim) (heures / mois)

Les temps d'immersion moyens (heures / mois) fluctuent peu au cours de l'année et entre les années. Les taux d'immersion moyens des sites sont compris entre un peu plus de 400 heures (Marsilly) et environ 540 heures (Yves), représentant une immersion comprise entre 57% et 75% selon les sites (Tableau 15, Figure 34).

TABLEAU 15. TEMPS ET POURCENTAGE D'IMMERSION SELON LES SITES D'ELEVAGE

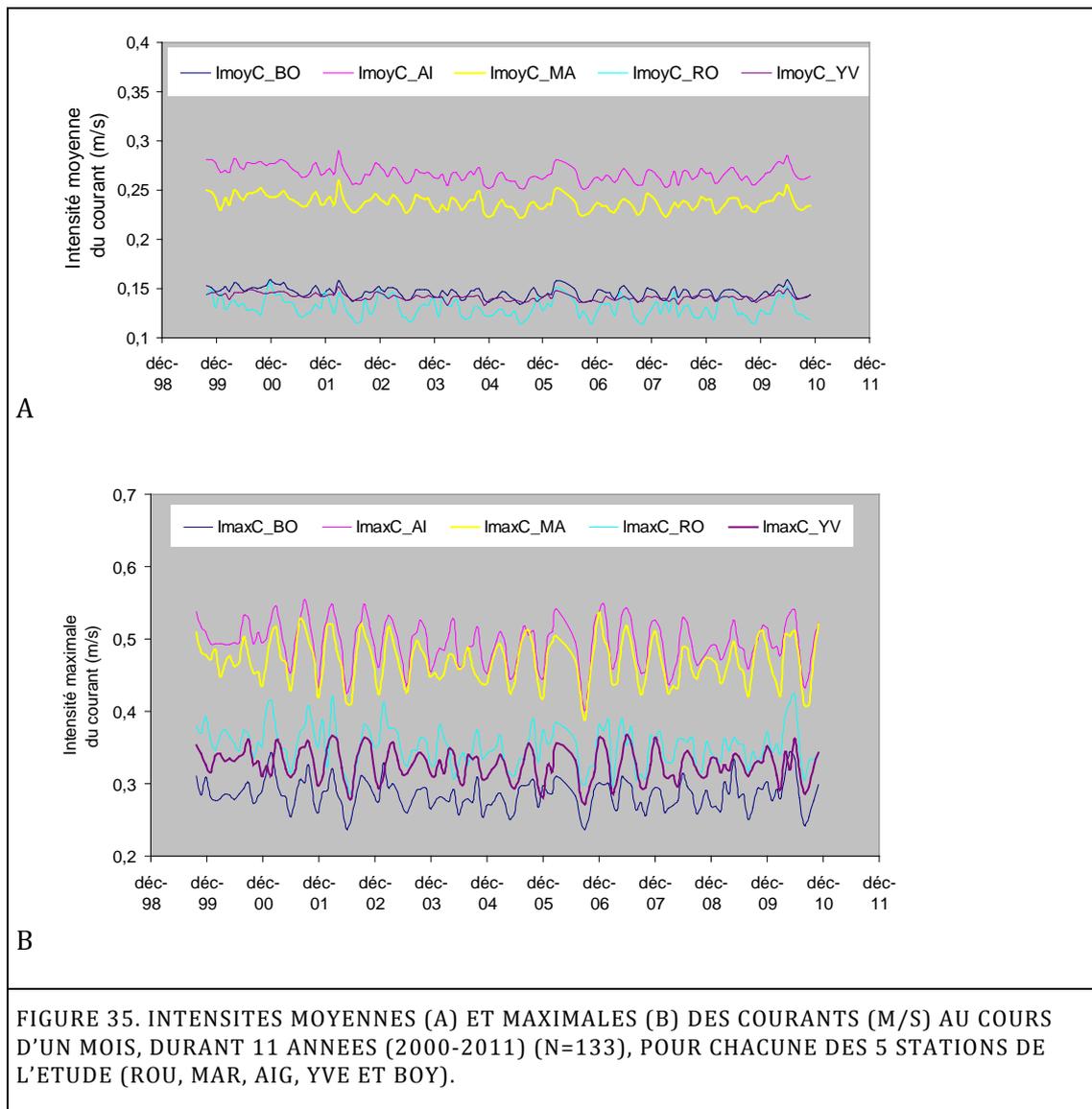
stations	Immersion (heures / mois)	(%)
Yves	541	75
Aiguillon	476	66
Roulières	448	62
Boyard	413	57
Marsilly	407	57



Intensité des courants sur les sites d'élevage

Les déplacements des masses d'eau sont également calculés à partir de simulation du modèle hydrodynamique 2D des pertuis charentais. Les variables sont calculées sur un pas de temps mensuel, soit comme une moyenne (I_{moyC} , D_{moyC}), soit comme une valeur maximale extraite du mois (I_{maxC}), soit comme un calcul de variance des valeurs (D_{varC}), soit encore comme un cumul de l'immersion durant le mois (Tim) (Tableau 3).

L'intensité moyenne du courant est la plus faible au niveau des Roulières (0,13 m/s), Yves (0,14 m/s), Boyard (0,15m/s), et plus forte sur les sites à l'Est du pertuis Breton, de Marsilly et l'Aiguillon (0,24 et 0,27 m/s) (Figure 35 A). Les intensités maximales de courants enregistrées au cours d'un mois, peuvent atteindre 0,55 m/s sur les sites de Marsilly et de l'Aiguillon dans le pertuis Breton ; ces valeurs ne dépassent pas 0,35 m/s dans le pertuis d'Antioche (Figure 35 B). Aiguillon et Marsilly sont dans les zones les plus chargé en bouchot dans le pertuis breton.



Direction des courants sur les sites d'élevage

La direction moyenne des courants reste très stable au cours des années (Figure 37). Elle est de 260° sur Marsilly (W-SW), 230° sur Yves (S-W), ~150° sur les sites des Roulières et de l'Aiguillon (S-E), et 90° (E) sur Boyard.

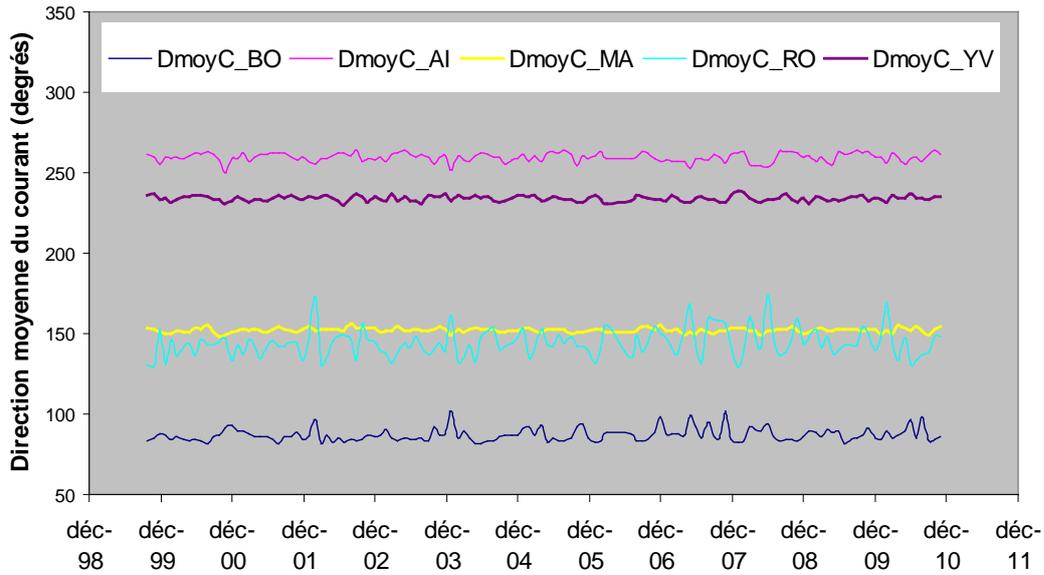


FIGURE 36. DIRECTION MOYENNE DU COURANT (M/S) DURANT 11 ANNEES (2000 - 2011) (N=133), POUR CHACUN DES 5 SITES DE L'ETUDE (ROU, MAR, AIG, YVE ET BOY) (MOYENNE D'ENVIRON 350 DONNEES PAR MOIS).

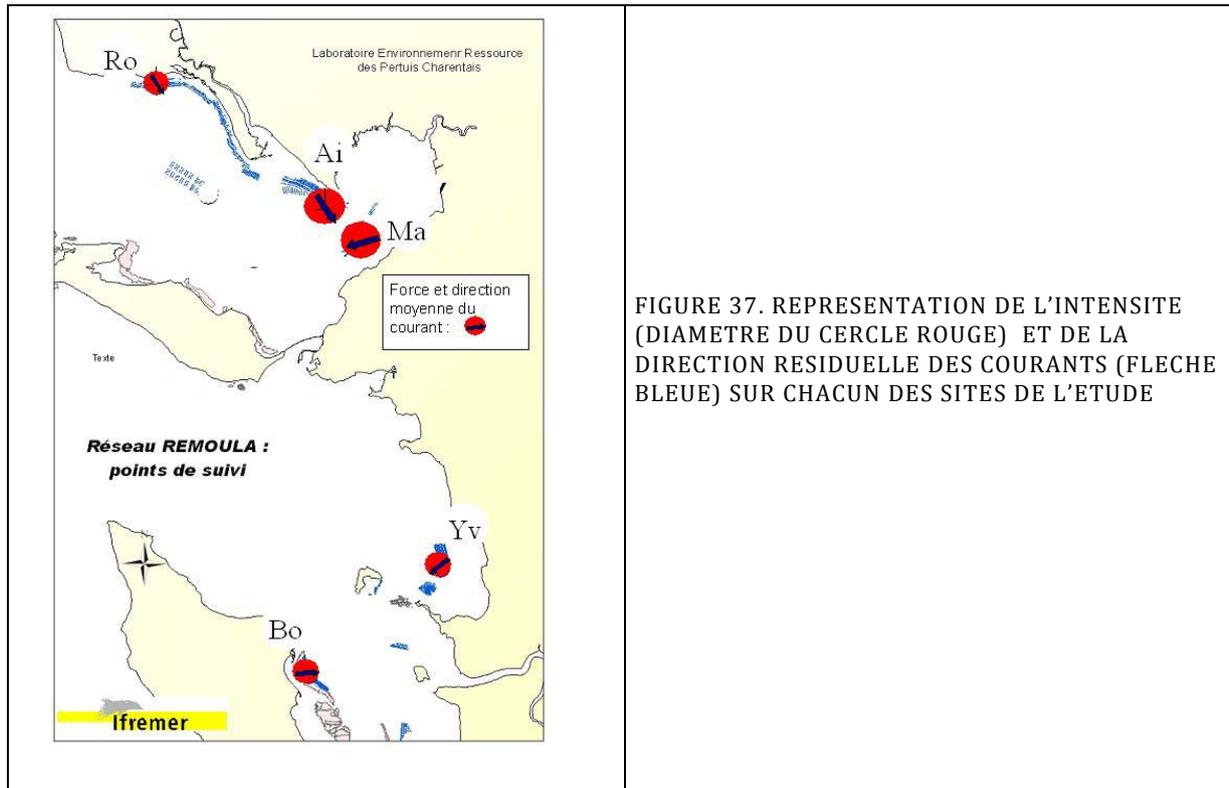


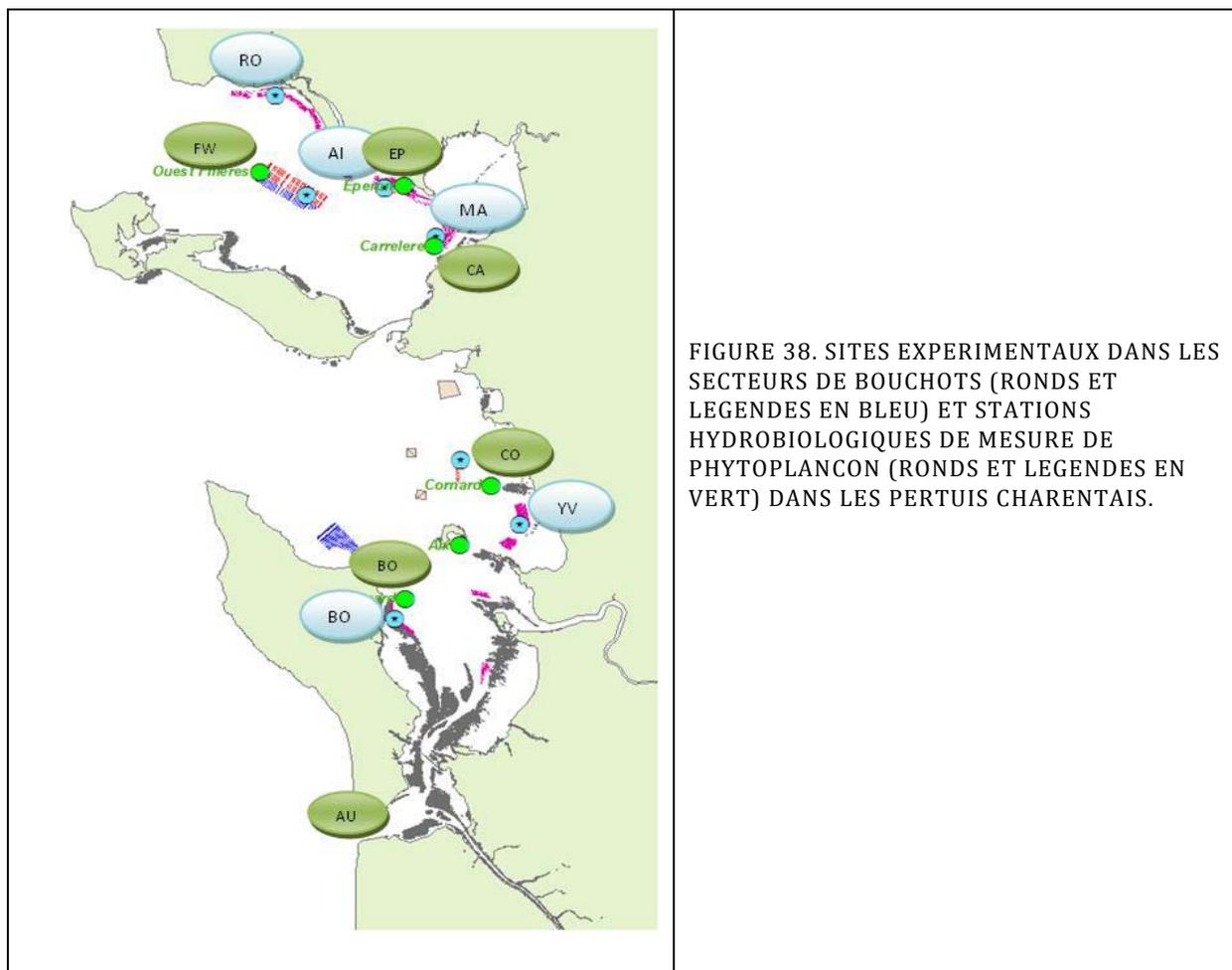
FIGURE 37. REPRESENTATION DE L'INTENSITE (DIAMETRE DU CERCLE ROUGE) ET DE LA DIRECTION RESIDUELLE DES COURANTS (FLECHE BLEUE) SUR CHACUN DES SITES DE L'ETUDE

Présentation des stations de mesures hydrobiologiques

Six stations hydrobiologiques du réseau de surveillance REPHY sont concernées par l'étude : filières Ouest (FW), l'Eperon (EP), Carrelère (CA), Cornard (CO), Boyard (BO) et Auger (AU) (Figure 38).

Elles permettent l'étude des paramètres hydrobiologiques principaux : température, salinité, turbidité, chlorophylle *a* et phéophytine. Sur trois de ces stations : Eperon (EP), Boyard (BO) et Cornard (CO) sont identifiés et comptés les taxons de microalgues présents, suivant une méthodologie d'étude de « flore totale » développée par le réseau REPHY depuis les années 1980 et les stations de filière Ouest et Carrelère, sont des stations dites : « de flore partielle » (Belin et Raffin, 1998). Les mesures hydrobiologiques du réseau REPHY servent d'abord à l'analyse environnementale des pertuis charentais ; une partie d'entre elles sera également utilisée dans les analyses explicatives cherchant à mettre en relation la croissance des moules de bouchots et leur environnement. Les 3 stations de flore totale : Eperon (EP), Boyard (BO) et Cornard (CO) sont situées à proximité des 3 stations d'Aiguillon (AI), Boyard (BO) et Yves (YV).

*Les saisonnalités des températures, salinités et turbidités sont calculées à partir des séries homogènes : 2000-2007 sur l'ensemble des sites, entre 2005 et 2011 pour la chlorophylle *a* et phéophytine, et sur l'ensemble de la période 2000-2010 pour les autres descripteurs de l'étude environnementale.*



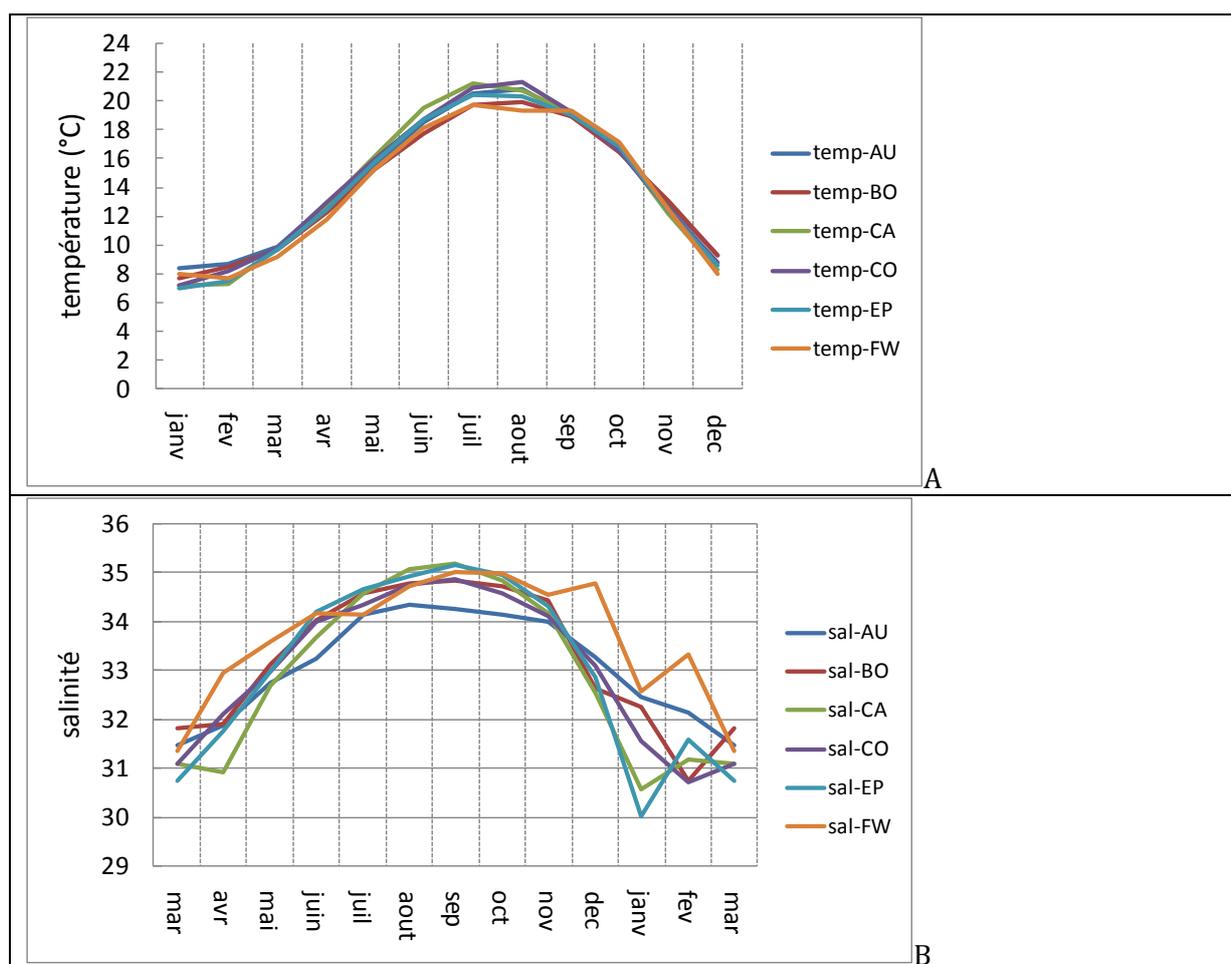
Saisonnalité des principaux descripteurs environnementaux

Les descripteurs de l'étude sont : la température, la salinité, la turbidité, la chlorophylle, les phéopigments, le nombre et le volume de flore totale ; ils sont analysés à l'échelle du mois. La méthode de décomposition saisonnière (Sensus II utilisé sous Statgraphics Centurion XVI) permet de fractionner le descripteur en 3 éléments « additifs » : la tendance (unité du paramètre), la saisonnalité (relative par rapport à la valeur « 0 ») et la composante aléatoire (non présentée dans l'étude).

La température estivale moyenne atteint 21°C pour les sites de Carrelère (CA) et du Cornard (CO) à l'Est des pertuis ; Elle ne dépasse pas les 20°C sur les sites « océaniques » des filières ouest (FW) et de Boyar (BO) (Figure 39 A). Le transfert d'énergie des réserves, du manteau de la moule vers les gamètes ne s'effectue que si la température est inférieure à 18-20 °C (et supérieure à 7-8°C) ; dans le cas des pertuis Charentais, ce « créneau thermique » exclut bien les mois d'été. Dans les pertuis Breton (EP) et d'Antioche (CO), plus profonds, la température est plus froide en hiver d'environ 1°C par rapport au bassin de Marennes (AU, BO).

La chute de salinité de 35 à 31 s'effectue surtout entre décembre et mars, c'est-à-dire à la fin de l'automne et durant l'hiver (Figure 39 B). Cette baisse de salinité est d'autant plus marquée que les sites sont sous influence terrigène. Dans le cas de cette étude, les sites les plus euryhalins sont d'abord l'Eperon et Carrelère (partie Est du pertuis Breton), puis les sites de Boyard et du Cornard (S-E du pertuis d'Antioche), puis le site d'Auger au sud des pertuis et enfin le site des filières-ouest sur la partie Ouest du pertuis Breton.

La turbidité augmente sur les principaux sites de l'étude, durant la fin de l'automne, sous l'effet conjugué des apports terrigènes, des vents et courants, pour atteindre les valeurs les plus fortes en début d'hiver. Le site de La Carrelère présente un pic de turbidité « atypique » entre mai et juillet alors que les valeurs sont au plus bas sur les autres sites (Figure 39 C). Le site des filières ouest est très peu turbide (2-9 NTU) alors que le site d'Auger, situé au niveau de la passe de Maumusson, connaît de forts courants, et présente les plus fortes turbidités en hiver (22 NTU) (Figure 39 C).



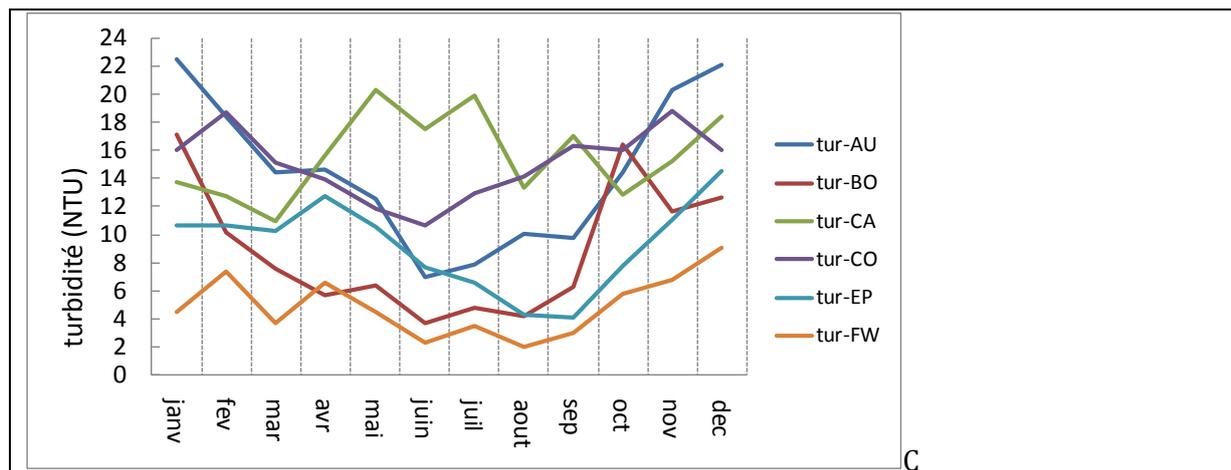


FIGURE 39. COMPARAISON ENTRE LES STATIONS HYDROBIOLOGIQUES; MOYENNES MENSUELLES DE TEMPERATURE (A), SALINITE (B), TURBIDITE (C),

Dans cette étude, la ressource trophique est estimée par la chlorophylle a (indicateur d'algues vivantes), les phéophytines (indicateur de végétaux sénescents), le nombre de cellules et le volume algal mesuré par le réseau Rephy⁷, ainsi que la représentation des deux principales classes d'algues que sont les Diatomophyceae (diatomées) et les Dinophyceae (dinoflagellées).

Sur les filières W, la concentration en chlorophylle a varie entre 4 $\mu\text{g/L}$ au printemps et 1 $\mu\text{g/L}$ en hiver (Figure 40 A). C'est sur le site de Carrelère que les concentrations moyennes atteintes sont les plus fortes (8-9 $\mu\text{g/L}$) dès le mois d'avril.

Les cycles saisonniers des phéopigments sont assez proches de ceux de la chlorophylle a , exception faite du site de La Carrelère sur lequel les pics sont décalés d'un mois (avril à mai) et du site de Boyard sur lequel apparaît un pic de phéopigment en automne non précédé d'un pic de chlorophylle a , signature d'un apport d'origine différente (Charente ...) (Figure 40 B). Le rapport des phéopigments sur la somme : chl a +phéo, semble bien constituer un indicateur en relation avec le temps de résidence (ou l'âge) de la masse d'eau sur le site (Figure 40 C). Les rapports de 0,4 – 0,6 en automne – hiver reflètent le peu de chlorophylle a durant cette saison. Le Cornard, avec des valeurs $\sim 0,4$ au cours du printemps-été, et l'Eperon également, sont bien des sites où le temps de résidence des masses d'eau est plus fort (voir également). A l'opposé, le site de Boyard est un site où les temps de résidence sont beaucoup plus courts (valeurs $\sim 0,1$) (Annexe 2).

⁷ Les huit classes retenues sont : les Chlorophyceae, les Ciliophora, les Diatomophyceae, les Dictyochophyceae, les Dinophyceae, les Euglenophyceae, les Flagellés et les Prasinophyceae.

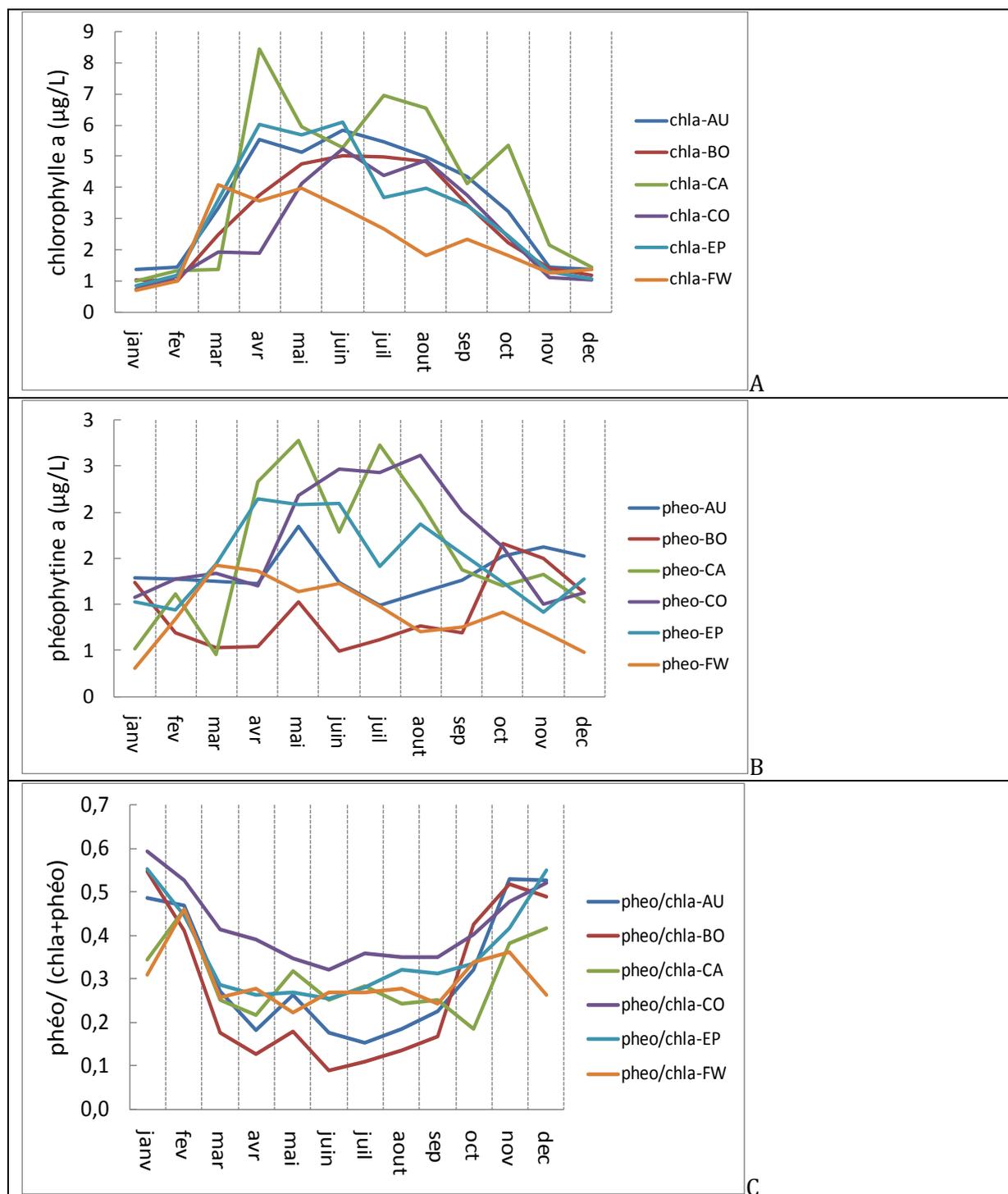


FIGURE 40. COMPARAISON ENTRE LES STATIONS HYDROBIOLOGIQUES; MOYENNES MENSUELLES DE CHLOROPHYLLE A (A), PHEOPIGMENTS (B) ET RAPPORT DE PHEO / (CHLA + PHEO) (C).

Les profils saisonniers du nombre d'algues sont différents de ceux concernant le volume d'algues (Figure 41 A, B). Les algues sont plus nombreuses à la station de l'Eperon et moins nombreuses à Boyard. le Cornard connaît deux pics d'abondance en mars et en juillet. Les profils saisonniers en volumes (Figure 41 B) sont les plus proches des profils de chlorophylle *a* vus précédemment. Ainsi la

ressource en algues est-elle constituée de très nombreuses petites cellules algales en mars-avril, représentant une biomasse assez modeste ; la tendance s'inverse ensuite entre mai et août où beaucoup moins d'algues représentent une biomasse plus conséquente (Figure 41 C).

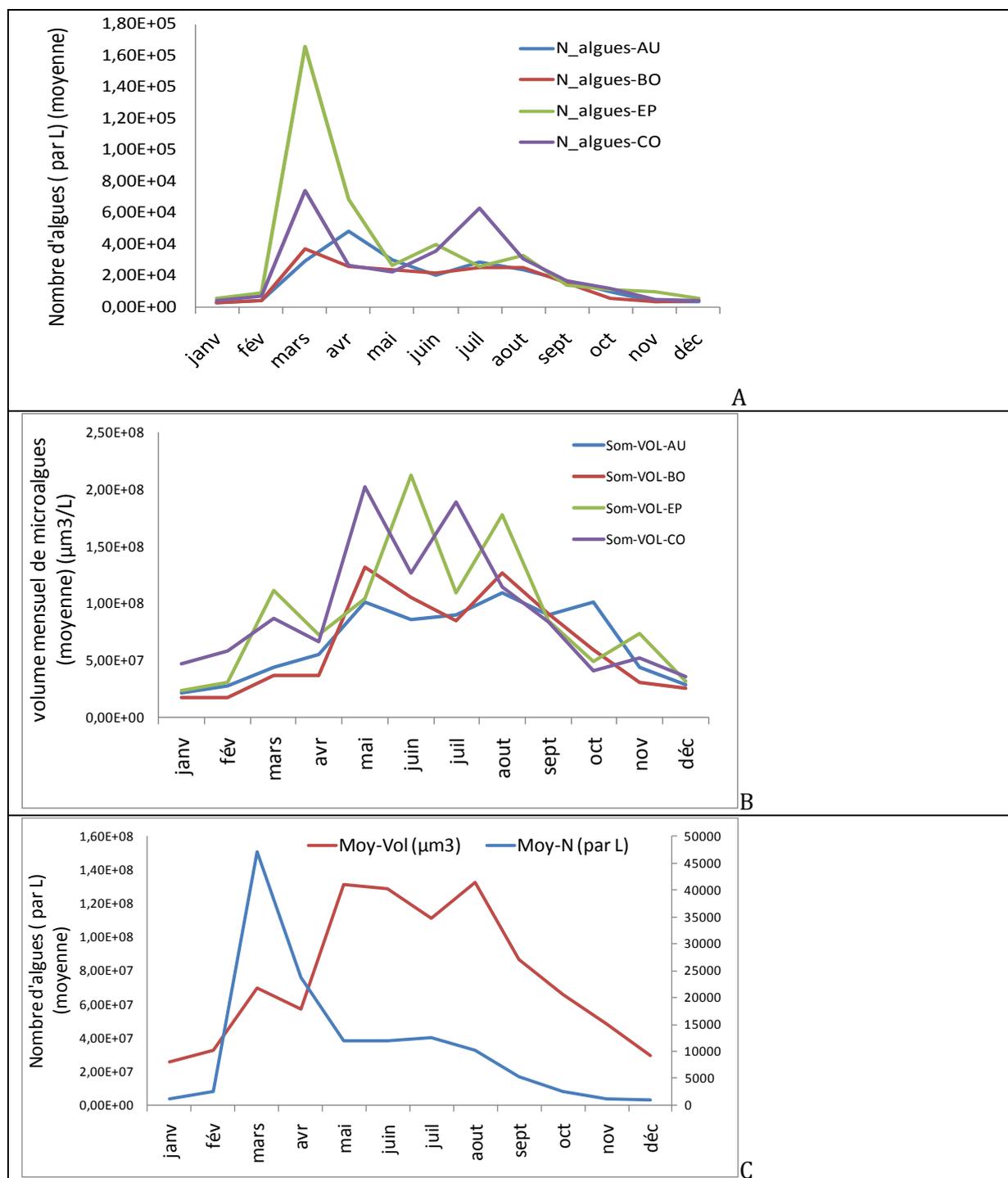
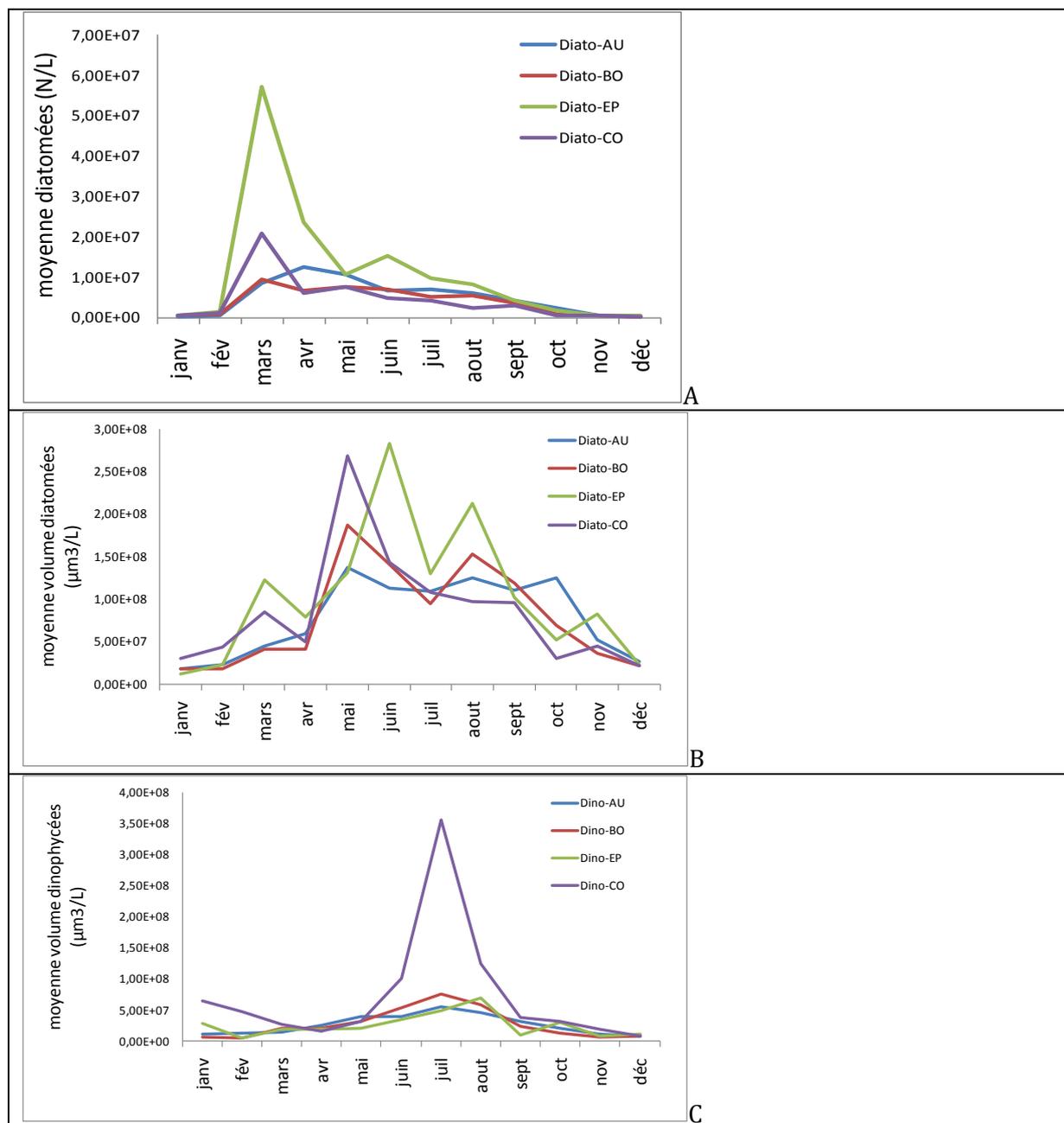


FIGURE 41. SAISONNALITE DE PRESENCE DES MICROALGUES EN NOMBRE (A) ET EN VOLUME (B) SUR LES DIFFERENTES STATIONS ET SUR L'ENSEMBLE DES SITES (C).

En fait, la principale explication provient de la succession des taxons et en particuliers des diatomées, nombreuses, mais petites au début du printemps, puis moins nombreuses, mais plus grosses au cours

du printemps et de l'été (Figure 42 A, B). Les dinophycées prolifèrent en juillet (Figure 42 C) et la succession des deux principales classes d'algues des pertuis (92 % des effectifs) est clairement illustrée sur la Figure 42 D. Les petites diatomées très nombreuses de début de printemps sont en fait essentiellement constituées de *Skeletonema costatum*, très fortement concentrée sur le site de l'Eperon (Figure 42, E).



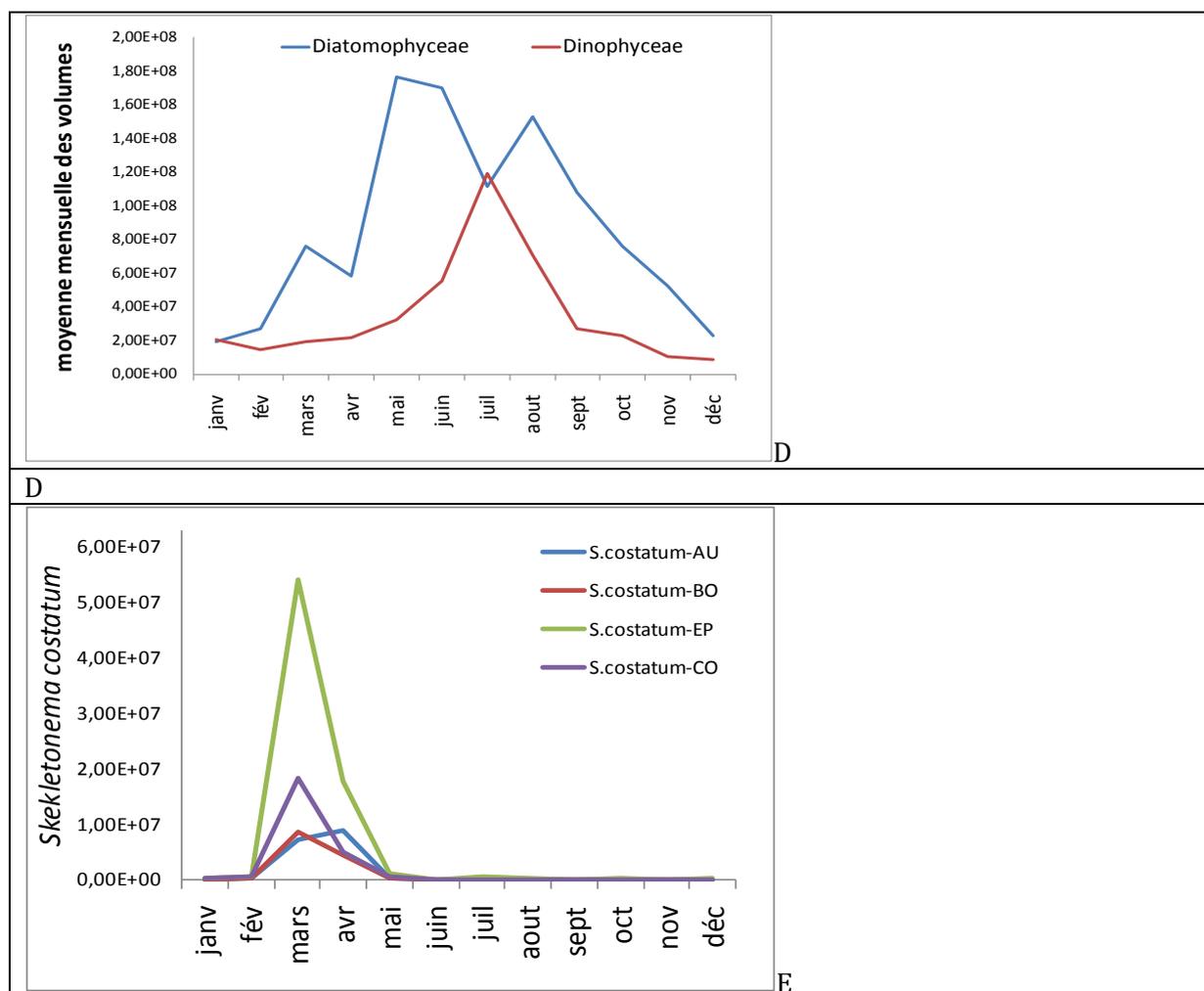


FIGURE 42. SAISONNALITE DE PRESENCE : DES DIATOMÉES EN NOMBRE (A), EN VOLUME (B), DES DINOPHYCEES EN VOLUME (C), DES DIATOMÉES ET DES DINOPHYCEES (TOUS SITES CONFONDUS) (D), DE *SKELETONEMA COSTATUM* EN NOMBRE (E).

Représentation des principales classes d'algues

Globalement, sur 11 années de mesures, et pour 4 stations étudiées (AU, BO, CO et EP), 2 classes : les Diatomées et les Dinoflagellés représentent 92,3 % des effectifs (Figure 43), et 5 classes (Diatomées + Dinoflagellés + Ciliés + Flagellés + Dictyochophycées) représentent 98% des numérations. Trois classes : Diatomées, Dinoflagellés et Ciliés représentent 99,6% du volume algal (Figure 43).

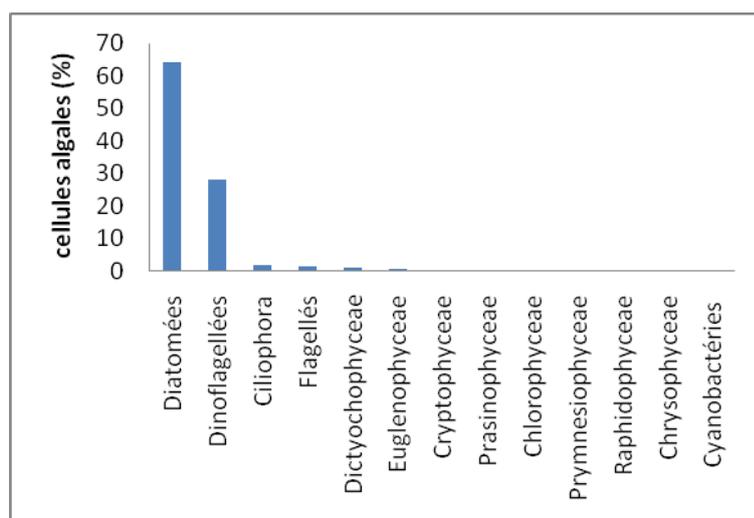


FIGURE 43. REPRESENTATION EN POURCENTAGE DES EFFECTIFS DES CLASSES DE MICROPHYTES DANS LES PERTUIS CHARENTAIS ENTRE 2000 ET 2010.

Blooms⁸ phytoplanctoniques et variabilité inter annuelle

Le nombre de blooms varie entre 19 (année 2001) et 53 (année 2007) (Figure 44). Deux années : 2005 et 2007 se distinguent avec un nombre plus important de blooms, respectivement 46 et 53. Le site de l'Eperon dans le pertuis Breton enregistre environ 50% de blooms de plus que les 3 autres sites. 387 blooms phytoplanctoniques sont comptés entre 2000 et 2010 dans le cadre du réseau REPHY.

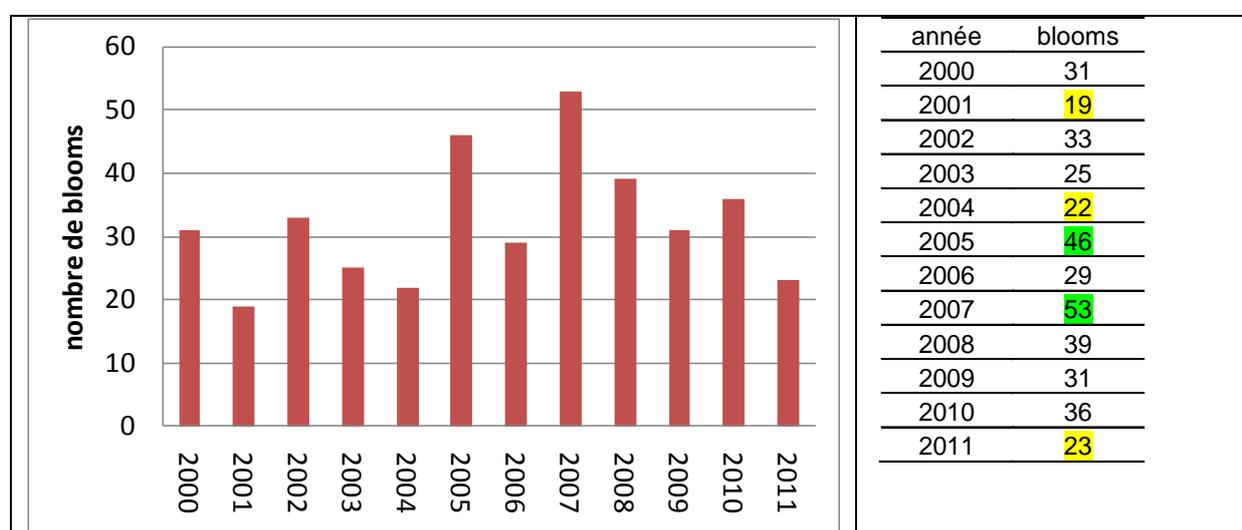


FIGURE 44. NOMBRE DE BLOOMS PHYTPLANCTONIQUES ANNUELS RELEVÉS SUR LES STATIONS REPHY DES PERTUIS CHARENTAIS (EPERON, CORNARD, BOYARD ET AUGER).

⁸ Un bloom est identifié comme tel si la numération dépasse 100000 cellules / L (REPHY).

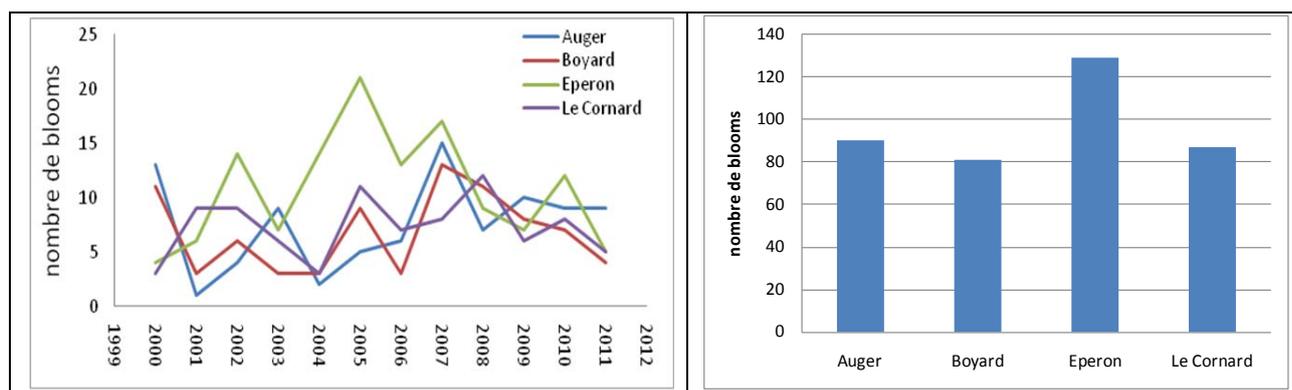


FIGURE 45. BLOOMS PHYTOPLANKTONIQUES ENREGISTREES DANS LE CADRE DU RESEAU REPHY SUR 4 STATIONS DES PERTUIS CHARENTAIS (AUGER, BOYARD, EPERON ET LE CORNARD) ENTRE 2000 ET 2011 (GAUCHE) ; RESULTATS SUR L'ENSEMBLE DE LA PERIODE (DROITE).

Les diatomées

Exception faite de l'année 2001 au cours de laquelle il y eu plus de dinophycées comptées que de diatomées, l'abondance de diatomées est toujours supérieure à celle des dinophycées, jusqu'à 50-70 fois plus, comme au cours des trois excellentes années de croissance de moules que sont 2005 et 2007 et 2010 (Figure 46).

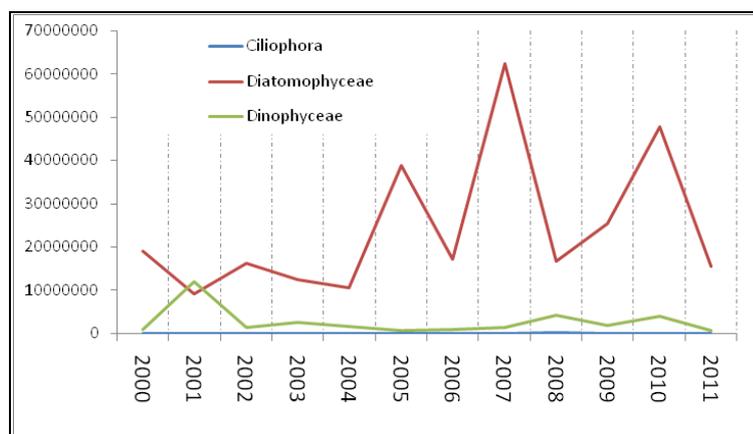


FIGURE 46. ABONDANCE CUMULEE DES 3 PRINCIPALES CLASSES DE PHYTOPLANKTON DANS LES NUMERATIONS ALGALES ENTRE 2000 ET 2010 DANS LES PERTUIS CHARENTAIS (CUMUL DES 4 SITES : AUGER, YVES, BOYARD ET AIGUILLON).

En fait, 137 taxons de diatomées sont identifiés entre 2000 et 2010 dont 50 taxons représentent 98,8% de la numération, et 20 taxons, 92,8% (Annexe 3). Cette figure montre la très forte variabilité inter annuelle de représentation des principaux taxons de diatomées. De toutes ces espèces, *Skeletonema costatum*, algue fourrage de référence représente plus de 44% des diatomées et marque 3 pics en 2005, 2007 et 2010 (à l'identique de ceux de la Figure 46) qui sont bien les 3 années de bonne croissance en longueur, déjà évoquées.

Les chlorophycées

Les chlorophycées, espèces d'eaux douces, caractérisent bien l'origine terrigène des masses d'eau et le caractère euryhalin de l'environnement. Malgré leurs très faibles représentativités dans la flore totale identifiée (< 1 ‰) elles se retrouvent en plus forte concentration durant les mois de forte pluviométrie (décembre à mai) (Figure 47 B), et en plus forte abondance également en 2000 et 2001 (Figure 47 A), années de fortes précipitations. Les chlorophycées sont plus présentes (abondance et fréquence) sur le site de l'Eperon (*test statistique de Kruskal Wallis = 16,57 et P = 0,00086*), confirmant ainsi le caractère plus euryhalin de ce site par rapport aux autres sites de l'étude (Figure 47 C).

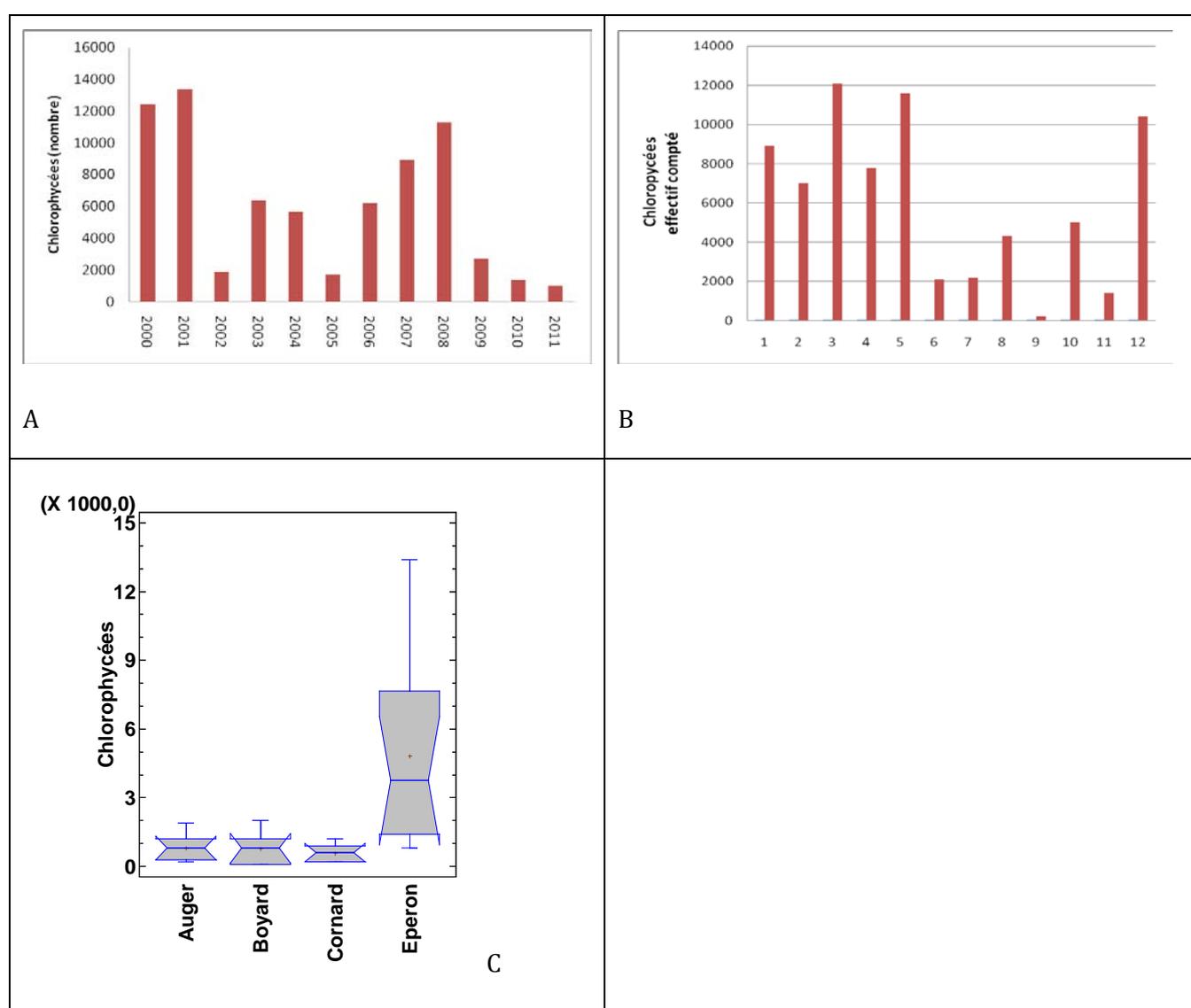


FIGURE 47. ABONDANCE DE LA CLASSE DES CHLOROPHYCÉES AU COURS DES ANNÉES (A), DES SAISONS (B) ET SUR LES QUATRE SITES DU RESEAU REPHY (C).

Sites d'élevage : Les sites expérimentaux où sont fixés les paniers de culture de moules sont compris entre 1,64 m et 2,38 m d'altitude sur les pieux de bouchots.

Météorologie : L'été - automne 2000 et l'hiver 2001 sont marqués par de fortes pluies ; En température, les épisodes les plus marquants sont les très fortes chaleurs du printemps - été 2003, de l'automne 2006, et à l'inverse, les faibles températures de l'été - automne 2008. Selon les années les vents sont plutôt de Nord-Ouest (2002, 2005, 2006, 2009 et 2010), d'Ouest (2003), de Sud-ouest (2004, 2008) ou changeants (2000,2001 et 2007).

Hydrologie : Les débits des fleuves externes au pertuis charentais : Loire et Gironde (Dordogne et Garonne) dont les panaches impactent les pertuis charentais, représentent des apports 15 à 20 fois supérieurs à ceux des fleuves internes aux pertuis (Charente, Lay, Sèvre et Seudre). La Seudre a une contribution quantitative insignifiante en termes d'apport d'eau douce. Selon les années, les débits moyens peuvent varier dans un rapport de 1 à 2 pour les fleuves côtiers et dans un rapport de 1 à 4 pour les fleuves internes aux pertuis. Des années de très faibles débits (2005) s'opposent à des années de forts débits (1999, 2000 et 2001). A l'échelle de l'année, les débits des fleuves internes aux pertuis sont bien corrélés à la pluviométrie dans les pertuis ($R^2 = 0,8$). Les mois d'hiver (décembre à mars) représentent les plus forts apports en eau. Alors que les débits du mois de mai sont pour tous les fleuves des débits moyens, celui de la Garonne est équivalent, en mai, aux débits hivernaux. La Sèvre niortaise et le Lay présentent une saisonnalité décalée d'un mois ; leurs débits sont plus faibles en avril et mai que pour les autres fleuves.

Hydrodynamisme : Les taux d'immersion moyens, variables d'un site d'élevage à l'autre, sont compris entre un peu plus de 400 heures d'immersion à Marsilly et 540 heures à Yves, et représentent une immersion de 57% et 75% selon les sites. Les deux sites du Pertuis Breton : Marsilly et Aiguillon ont les courants moyens et les courants maximaux les plus forts parmi les 5 sites d'élevage. Sur les Roulières, le courant moyen est de faible intensité (0,10 -0,15 m/s), mais le courant maximal peut atteindre 0,45 m/s (site « ouvert »). Les directions des courants résiduels sont variables selon les sites.

Hydrobiologie : De « marins » à euryhalins sont les sites d'élevage des Roulières, Boyard, Aiguillon, Marsilly et Yves. Yves est sous l'influence quasi exclusive de la Charente. Boyard reçoit près de 3 fois moins d'eau douce en provenance de cette même Charente. Les Roulières est le site le plus marin; il reçoit près de 2 fois moins d'eau douce que Boyard et est influencé par 3 fleuves : le Lay, la Sèvre et la Charente. Les 2 autres sites du pertuis breton : Marsilly et Aiguillon, plus euryhalins, sont sous influence la Sèvre, du Lay et, dans une moindre mesure, de la Charente. Si la Charente impacte les sites de bouchot du pertuis Breton, à l'inverse, la Sèvre et le Lay ne semblent pas influencer les sites de bouchot du pertuis d'Antioche. La Seudre a un débit tellement faible que son influence est quasi nulle sur toutes les sites de bouchots. Les sites de

mesure du réseau REPHY, les plus euryhalins, sont d'abord l'Eperon et Carrelère (partie Est du pertuis Breton), puis les sites de Boyard et du Cornard (S-E du pertuis d'Antioche), puis le site d'Auger au sud des pertuis et enfin le site des filières-ouest sur la partie Ouest du pertuis Breton. Malgré des apports en eau douce plus faibles, le temps de résidence plus long des masses d'eau confère à la partie Est du Pertuis Breton (Carrelère et Eperon) un caractère plus euryhalin que le pertuis d'Antioche. Auger et la station « filière ouest » sont les deux sites les plus océaniques pour lesquels la dessalure hivernale n'est que de 3 unités (3 g/L).

Les indices saisonniers de chlorophylle a , comme les mesures réalisées sur la flore totale montrent que la production primaire (développement de micro flore) concerne d'abord les filières ouest, l'Eperon et Auger au mois de mars, puis Carrelère en avril et enfin le pertuis d'Antioche : Cornard et Boyard, en mai. En été, par contre, la teneur en chlorophylle a est plus faible sur l'Eperon et sur les filières W, et plus élevée sur le site de La Carrelère. Durant le printemps et l'été, les phéopigments (chlorophylle a en cours de dégradation) plus importants sur le site du Cornard (et dans une moindre mesure sur le site de l'Eperon) semblent indiquer des temps de résidence des masses d'eau, supérieurs sur ces sites par rapport à Auger et Boyard. Parmi les 13 classes de phytoplancton identifiées dans le réseau REPHY, deux classes : les Diatomées et les Dinoflagellés représentent 92,3 % des effectifs et 3 classes : Diatomées, Dinoflagellés et Ciliés représentent 99,6% du volume algal. 92 % des blooms ont lieu entre mars et août, c'est à dire au printemps et en été. Il y a près de 2 fois plus de blooms en mars dans le nord des pertuis (CO et EP) que dans le sud (BO et AU). Le site de l'Eperon, à caractère plus euryhalin, présente une plus forte abondance de Chlorophycées par rapport aux trois autres sites de l'étude. Sur 137 diatomées, 20 taxons représentent 93% du dénombrement ; La représentation de ces taxons, dans la flore totale est très variable d'une année sur l'autre. De toutes ces espèces, *Skeletonema costatum*, algue fourrage de référence représente plus de 44% des diatomées et à elle seule près de 35% du volume d'algues identifiées et comptées dans les pertuis charentais entre 2000 et 2010. Cette espèce est particulièrement abondante au cours des trois années 2005, 2007 et 2010, trois années de très bonne croissance en longueur pour la moule de bouchot..

III - RELATION ENTRE L'ENVIRONNEMENT ET LA CROISSANCE DES MOULES DE BOUCHOTS ENTRE 2000 ET 2010. ETUDE A PAS DE TEMPS TRIMESTRIEL SUR 5 SITES

INTRODUCTION

Le rapprochement des résultats obtenus dans les deux premiers chapitres de l'étude, sur la croissance d'une part, et sur l'environnement d'autre part, conduit à un certain nombre d'hypothèses sur les relations pouvant exister entre croissance et environnement ; ainsi, les performances de croissance en longueur de la moule, à l'échelle de l'année, peuvent être comprises grâce à la ressource trophique, en volume d'algues, et notamment en volume de diatomées et parmi ces dernières, par l'abondance de *Skeletonema costatum*, fortement représenté au mois de mars dans les pertuis charentais. Le signal de croissance en poids sec de la moule semble effacé (masqué ?) par la période de pontes de l'espèce qui s'étend à la fois sur une période de pleine croissance (le printemps), et sur une période pauvre en ressource trophique (l'hiver). Seule une étude précise sur la reproduction et l'utilisation des modèles bioénergétiques pourraient permettre de déceler des différences entre les sites ou d'étudier la variabilité interannuelle. Ainsi, cette première analyse multivariée, présentée dans ce chapitre, prend en compte exclusivement les mesures de longueur des moules, sur 5 sites de bouchots, 11 années d'étude, et à pas de temps trimestriel. L'absence de données sur la ressource trophique conduit à faire abstraction de ce compartiment dans l'étude.

MATERIEL ET METHODES

L'étude porte sur 5 sites de bouchots situés dans les deux principaux pertuis charentais (Antioche et Breton) et pendant une période de 11 ans. Les descripteurs environnementaux sont de plusieurs natures : météorologiques (régimes climatiques généraux, vents, précipitation, température, insolation, ...) et hydrologiques. Ils sont issus de mesures directes (débits des fleuves internes et externes aux pertuis) ou de simulations hydrodynamiques du modèle Mars2D des pertuis charentais (contributions de chaque fleuve à la dessalure sur chacune des stations de bouchots, courant, immersion,...). Les analyses multivariées sont essentiellement des corrélations et des ACP (logiciel Statgraphics V Centurion).

RESULTATS

A l'échelle de l'année

Une analyse en composantes principales (ACP) est réalisée à partir de l'ensemble des descripteurs environnementaux régionaux (Tableau 3). Les variables supplémentaires «à expliquer» (taux de croissance et indice de Walne et Mann annuels - TCJ_an et WM_an) sont ensuite rapportées en projection sur les axes (Figure 48). Le TCJ_an n'est pas représenté significativement sur les axes de l'ACP ; les 3 autres le sont faiblement (corrélation de l'ordre de 50% avec les axes 1 ou 3 de l'ACP). L'écart type des TCJ_an représentant la dispersion des sites au cours des différentes années est donc corrélé positivement à la pluviométrie, aux débits des fleuves et inversement au rayonnement et à l'insolation sur l'axe F1 de l'ACP. L'indice de Walne et Mann (WM) quand à lui est corrélé négativement à l'intensité maximale des vents. Indice de WM et ET_WM (écart-type) sont tous les deux associés à l'axe 3 de l'ACP structuré grâce au régime météo AR_Hiv. Ce résultat se confirme par une corrélation positive entre la dispersion de ces indices entre les sites et la pression atmosphérique.

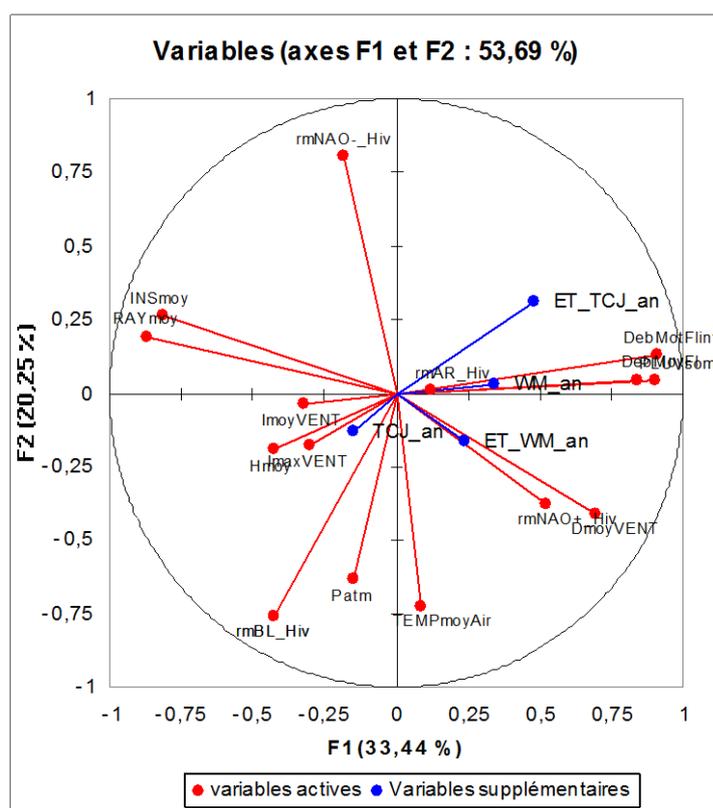


FIGURE 48. REPRESENTATION GRAPHIQUE D'UNE ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES REALISEE A PARTIR DES DESCRIPTEURS ENVIRONNEMENTAUX REGIONAUX.

A l'échelle des saisons (4 ACP)

Quatre ACP sont réalisés pour décrire les 4 saisons (H, P, E, A) à partir de l'ensemble des descripteurs environnementaux régionaux (Tableau 3). Deux variables biologiques sont ensuite rapportées comme variables supplémentaires sur les axes des ACP saisonnières : le taux de croissance et indices de Walne et Mann par saison (TCJ_S et WM_S). A l'échelle des pertuis, les descripteurs de l'environnement expliquent mieux les indices de qualité (WM) (relation pour 4 saisons) que les taux de croissance (TCJ) (relation seulement en hiver et au printemps) (Tableau 16). En hiver, la croissance est améliorée par des vents forts. Les vents de Nord ont tendance à homogénéiser les taux de croissance entre les sites. Au printemps, la croissance est améliorée avec les vents de sud et les vents forts ont tendance à homogénéiser les réponses des sites entre eux. En hiver et en été (saisons « établies », ce sont les apports liés à l'eau douce qui améliorent l'indice de WM. Au printemps et en automne, on retrouve l'influence des vents de Nord qui ont tendance à faire grimper l'indice en automne, et à homogénéiser les sites entre eux au printemps.

TABLEAU 16. PRINCIPAUX RESULTATS ISSUS DES ACP DECRIVANT LES 4 SAISONS (H, P, E ET A) POUR LES TAUX DE CROISSANCE SAISONNIER (TCJ_S) ET L'INDICE DE WALNE ET MANN SAISONNIER (WM_S) ET PREMIERE INTERPRETATION.

TCJ_S	H	Corrélation positive entre la croissance et la force du vent ($p = 0,720$). Remise en suspension de matière organique d'origine terrigène. Les vents de Nord ont tendance à homogénéiser les taux de croissance entre les sites.
	P	TCJ : Corrélation négative ($p = -0,651$) avec les vents de Nord et positive avec les vents de Sud. La force du vent a tendance à homogénéiser les taux de croissance entre les sites ($p = -0,625$). Le vent homogénéiserait les masses d'eau...
	E	Pas de représentation significative sur les axes ni de corrélations significatives avec les variables de l'environnement.
	A	Pas de représentation significative sur les axes ni de corrélations significatives avec les variables de l'environnement.
WM_S	H	L'indice de qualité augmente avec la pluviométrie et le débit des fleuves internes aux pertuis.
	P	La corrélation est positive avec le débit de la Loire ($p = 0,673$) et les vents de secteur Nord ont tendance à homogénéiser la dispersion des indices de qualité entre les sites ($p = -0,666$).

E	L'indice de qualité augmente avec le débit moyen des fleuves internes aux pertuis, avec les apports d'eau douce d'une manière plus générale, et un temps plutôt frais La ponte a eu lieu au printemps et les moules sont alors bien amaigries; En été, les blooms planctoniques estivaux sont très dépendant des apports d'eau douce du fait de l'épuisement des sels nutritifs dans les pertuis (avant le recyclage ?).
A	L'indice augmente avec les vents de nord ($p = 0,625$) et diminue avec les vents de sud ($p = -0,770$) et avec des vents forts.

A l'échelle des saisons et des sites (20 ACP)

L'objectif est d'étudier les relations entre environnement et croissance des moules pour chacune des saisons (4) et pour chacun des sites (5). Vingt analyses en composantes principales (ACP) sont effectuées afin de résumer dans chaque cas l'environnement des élevages (Tableau 3). Les variables de croissance (longueur et indices de Walne et Mann) sont ensuite projetées comme variable supplémentaires (non constitutives des axes des ACP). Les relations entre les variables biologiques et l'environnement sont ensuite étudiées grâce aux matrices de corrélation et leurs projections sur les axes principaux des ACP (Annexe 4).

En hiver pour l'indice de Walne et Mann, au niveau du pertuis Breton, apparaissent des corrélations positives sur les sites RO, MA et AI avec les apports d'eau douce, les fleuves internes et externes (mais plus le débit de la Loire que de la Garonne). Dans le pertuis d'Antioche (PA), sur Boyard, c'est la même chose, sauf que Sèvre et Lay disparaissent de la contribution. WM_{YV} ne se projette pas de façon significative sur l'axe principal de l'ACP. Sur BO et RO, la force du courant a une contribution positive qui n'existe pas sur les autres sites.

En hiver et pour le TCJ : Pour les deux sites ouverts (RO et BO), le TCJ est relié à une salinité forte, avec une opposition (sur l'axe 1 des ACP) entre les performances du TCJ et du WM. La situation est moins simple pour les 3 autres sites plus euryhalins ; AI et YV semblent présenter plus de similitude dans leur fonctionnement, en particulier avec les régimes de vents d'Ouest plus propices à la croissance sur YV et AI alors que MA semble « marcher à l'envers ».

Au printemps pour l'indice WM : Sur les deux sites ouverts de RO et BO, l'indice de WM est favorisé par des vents de sud plutôt faibles, par des courants faibles également sur Yves, des apports en eau douce sur AI (résultat bien marqué), et rien de visible sur MA.

Au printemps pour le TCJ : Vents de sud, vents faibles et température plutôt élevé au printemps semblent bien être les caractéristiques principales favorisant la croissance printanière pour 4 sites sur

5 ; une nouvelle fois, c'est MA qui se distingue avec un effet prépondérant, de la température, des courants forts et peu d'apport du Lay.

En été pour l'indice WM : L'indice de WM est amélioré en été par l'apport d'eau douce pour les deux sites ouverts et pour celui de la pointe de l'aiguillon. Pour les deux sites de MA et YV, respectivement en entrée de baie de l'aiguillon et d'Yves : pas de perception d'effet de l'environnement sur l'indice.

En été pour le TCJ : La représentation est plutôt faible (limite non représentatif pour les sites ouverts : RO et BO)

En automne pour l'indice de WM : L'indice WM augmente avec le vent du Nord pour tous les sites sauf celui d'Yves pour lequel WM augmente avec le vent d'Est. Des nuances existent ensuite selon les sites ; l'indice est plus élevé sur BO et YV si la salinité augmente.

En automne pour le TCJ : Le TCJ est non représenté sur les axes de l'ACP pour les sites de MA et d'AI. Pour les autres sites, l'influence des variables environnementales est exactement la même que celui de l'indice WM.

TABLEAU 17. RELATIONS ENTRE LES VARIABLES BIOLOGIQUES (TAUX DE CROISSANCE JOURNALIER – TCJ- ET INDICE DE WALNE ET MANN –WM-) ET LES DESCRIPTEURS DE L'ENVIRONNEMENT (TABLEAU 3) A TRAVERS ACP ET MATRICES DE CORRELATIONS (STATGRAPHICS CENTURION XV II).

variable	site	Relation variables environnementales et variables biologique supplémentaires	poids de la relation (dans la saison)	poids de la relation (dans l'année)
facteurs qui sont corrélés positivement à la variable TCJ ou WM au PRINTEMPS				
TCJ	RO	eau marine (salée), peu d'apport d'eau douce des fleuves internes et externes et vents de sud faibles	0,23	0,12
TCJ	MA	températures fortes, I _{max} fort et apport du Lay faibles	0,10	0,05
TCJ	AI	vents de sud	-0,07	-0,04
TCJ	YV	vents de sud	-0,09	-0,05
TCJ	BO	vents du sud, vents faibles et températures élevées	-0,09	-0,04
WM	RO	vents du sud et vents faibles	0,12	0,03
WM	MA	<i>non représenté de façon significative</i>	<i>p.r.</i>	<i>p.r.</i>
WM	AI	apports en eau douce des fleuves	-0,23	-0,06
WM	YV	courants sont faibles	-0,08	-0,02
WM	BO	vents du sud et vents faibles	-0,09	-0,03
facteurs qui sont corrélés positivement à la variable TCJ ou WM en ETE				
TCJ	RO	vents de sud	0,05	0,01
TCJ	MA	pas d'eau douce de la Charente et de la Sèvre, mais de la Garonne et courants forts	0,11	0,03
TCJ	AI	vent de Nord et vent forts avec courants faibles	0,09	0,02
TCJ	YV	courants plutôt forts, pas d'apports de Charente (?)	-0,09	-0,02
TCJ	BO	courants plutôt forts, pas d'apports de Charente (?)	0,08	0,02
WM	RO	apports en eau douce et débits forts des fleuves	0,30	0,10
WM	MA	<i>non représenté de façon significative</i>	<i>p.r.</i>	<i>p.r.</i>
WM	AI	apports en eau douce et débits forts des fleuves	0,18	0,06
WM	YV	<i>non représenté de façon significative</i>	<i>p.r.</i>	<i>p.r.</i>
WM	BO	débit forts des fleuves internes et externes	0,20	0,06
facteurs qui sont corrélés positivement à la variable TCJ ou WM en AUTOMNE				
TCJ	RO	forts courants et les vents de Nord	0,04	0,01
TCJ	MA	<i>non représenté de façon significative</i>	<i>p.r.</i>	<i>p.r.</i>
TCJ	AI	<i>non représenté de façon significative</i>	<i>p.r.</i>	<i>p.r.</i>
TCJ	YV	salinité, pas d'eau douce et vent d'Est	-0,35	-0,05
TCJ	BO	faible vent de Nord et faible courant	0,10	0,01
WM	RO	salinité et vent de Nord	-0,24	-0,06
WM	MA	vent de Nord	-0,06	-0,02
WM	AI	vent de Nord	-0,09	-0,02
WM	YV	salinité, pas d'eau douce et le vent d'Est	-0,23	-0,06
WM	BO	faible vent de Nord et faible courant	0,10	0,02
facteurs qui sont corrélés positivement à la variable TCJ ou WM en HIVER				
TCJ	RO	salinité forte ; WM et TCJ s'opposent sur axe 1	-0,38	-0,03
TCJ	MA	Débits de Garonne et vent de N et E	-0,10	-0,01
TCJ	AI	forts vents d'Ouest	0,07	0,00
TCJ	YV	vents forts d'Ouest et de Sud (avec pluie)	-0,10	-0,01
TCJ	BO	salinités fortes	-0,13	-0,01
WM	RO	apport d'eau douce , apports des fleuves	0,25	0,04
WM	MA	eau douce (et Loire, mais pas Garonne ?)	0,21	0,03
WM	AI	eau douce (et Loire, mais pas Garonne ?)	0,27	0,04
WM	YV	<i>non représenté de façon significative</i>	<i>p.r.</i>	<i>p.r.</i>
WM	BO	débits forts et courants forts	0,20	0,03

A l'échelle de l'année, les performances de croissances en coquille de la moule sont plus contrastées sur les différents sites de bouchots quand l'apport d'eau douce et le débit des fleuves augmentent. Le taux de croissance annuel n'est pas expliqué par les descripteurs environnementaux. Les fortes intensités de vent conduisent à diminuer la valeur d'indice Walne et Mann (WM). Dans une certaine mesure, les flux de Nord en hiver (régime AR_hiv) favoriseraient cet indice de qualité.

A l'échelle des pertuis charentais, la croissance en longueur est reliée aux descripteurs de l'environnement seulement en hiver et au printemps. Ce sont les vents, selon leur orientation Nord ou Sud qui semblent bien influencer en partie cette croissance. L'indice de qualité (WM) est sensible aux variables environnementales des pertuis durant les 4 saisons. C'est d'abord l'apport en eau douce (hiver, été et printemps) qui favorise un bon indice de qualité, puis également le vent, et en particulier le vent de nord qui permet l'élévation de l'indice en automne. En hiver, la qualité des moules (WM) est d'abord corrélée positivement aux apports d'eau douce pour 4 sites sur 5 (sauf Yves), puis à la force du courant pour les deux sites ouverts des Roulières et Boyard, sites sur lesquels les courants sont les plus faibles. En hiver, sur ces deux sites ouverts, le taux de croissance journalier est clairement en opposition avec l'indice de WM et semble favorisé par des salinités fortes. Pour les sites euryhalins, les vents d'Ouest semblent contraster les performances de croissance entre les stations d'Yves et d'Aiguillon d'une part et Marsilly d'autre part. Au printemps, sur les sites ouverts, l'indice de qualité de Walne et Mann est favorisé par de faibles vents de sud. En été, l'indice de Walne et Mann augmente avec l'apport en eau douce pour 3 sites sur 5.

IV – RELATION ENTRE L'ENVIRONNEMENT ET LA CROISSANCE DES MOULES DE BOUCHOTS ENTRE 2000 ET 2010. ETUDE A PAS DE TEMPS TRIMESTRIEL SUR 3 SITES, AVEC MESURES TROPHIQUES.

INTRODUCTION

Cette deuxième analyse prend en compte le compartiment trophique. Les modèles biologiques expliquent la croissance par la température et la ressource trophique. Chez la moule, le modèle biologique (DEB) s'ajuste mieux en prenant en compte la numération cellulaire d'algues microscopiques plutôt que la chlorophylle *a* (Alunno et al., 2011). Cette deuxième partie de l'étude a donc pour objectif de comparer les performances de croissance et la qualité des moules, toujours en relation avec l'environnement spécifique des élevages, mais en rajoutant le compartiment trophique dans l'analyse. La proximité des stations de mesure du réseau National REPHY et des sites du réseau REMOULA sur les bouchots des professionnels, permet de coupler les données de croissance zootechnique avec les mesures in situ réalisées dans ce réseau de surveillance (Soletchnik et al, 2007).

Au-delà de l'analyse des relations entre croissance et environnement, ce chapitre développe une description spatiale de l'environnement hydrobiologique sur les trois sites d'élevage.

MATERIEL ET METHODES

PRESENTATION DES SITES

Trois stations régionales du Réseau REPHY de l'IFREMER : l'Épéron (EP), le Cornard (CO) et Boyard (BO) sont des stations de flores totales à partir desquelles sont effectués les comptages de taxons (Figure 49). Les filières Ouest (FW) et Carrelère (CA) sont des stations de flore partielle (Belin et Raffin, 1998 1,2). Dans les analyses multivariées, les données de croissance des sites de bouchots de Boyard, Yves et Aiguillon seront associés, respectivement, aux stations REPHY de Boyard, Le Cornard et l'Épéron, distantes de 2 à 4 km.

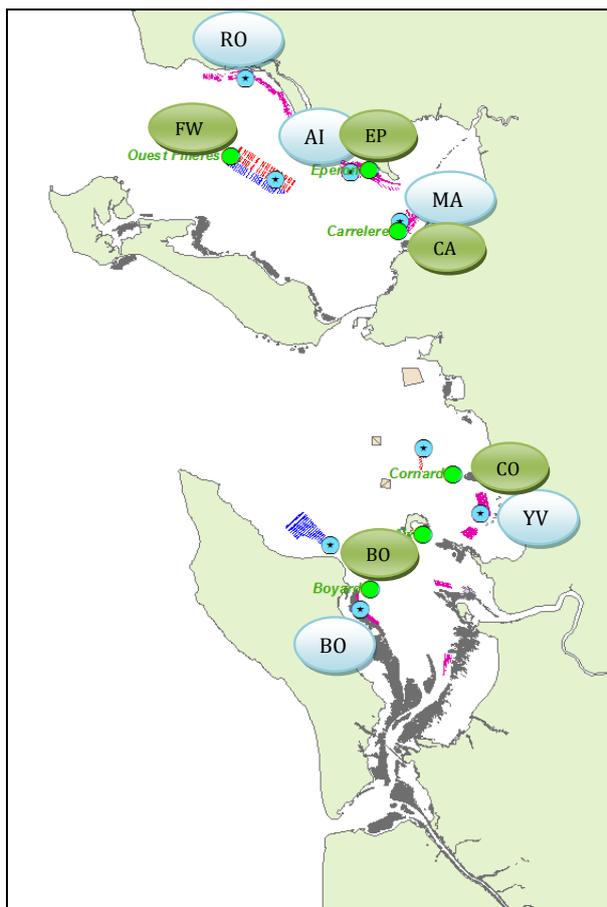


FIGURE 49. SITES DE PRELEVEMENTS HYDROBIOLOGIQUES DE FLORE TOTALE : EPERON (EP), CORNARD (CO) ET BOYARD (BO), DE FLORE PARTIELLE : FILIERES-OUEST (FW), CARRELERE (CA) ET STATIONS REMOULA (ROULIERES, AIGUILLON, MARSILLY, YVES ET BOYARD).

LES VARIABLES DE L'ETUDE

Environnement

En plus des descripteurs environnementaux déjà vu dans l'étude précédentes (globaux, régionaux et spatiaux –issus de la modélisation), cette étude utilise une base de données hydrobiologiques permettant de rajouter les facteurs suivants : la flore phytoplanctonique totale (en nombre et en volume), la chlorophylle a, les phéopigments, la turbidité, la salinité et la température. La ressource trophique est évaluée à partir de la chlorophylle a, des phéopigments et d'une numération cellulaire de flore totale mesurée dans le réseau REPHY.

RESULTATS

ANALYSE DE LA VARIANCE DE LA CROISSANCE

Selon les années, des différences existent dans un rapport de 1 à 10 pour le poids sec, et de 1 à 4 pour la croissance en longueur (Figure 50).

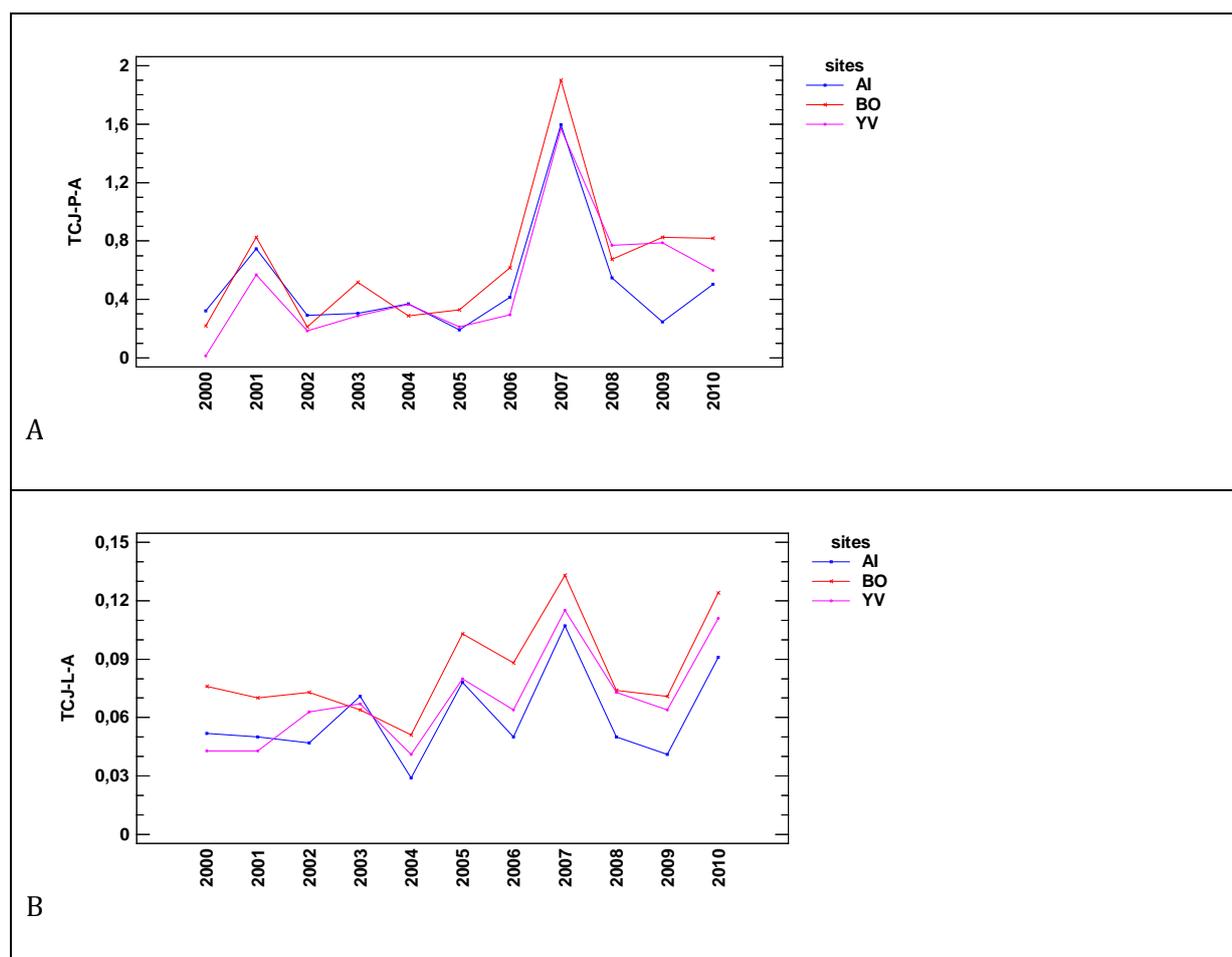


FIGURE 50. TAUX DE CROISSANCE JOURNALIER MOYEN EN POIDS SEC (A) ET LONGUEUR (B), A L'ECHELLE DE L'ANNEE, POUR LES 3 SITES D'ETUDE : AIGUILLON (AI), BOYARD (BO) ET YVES (YV).

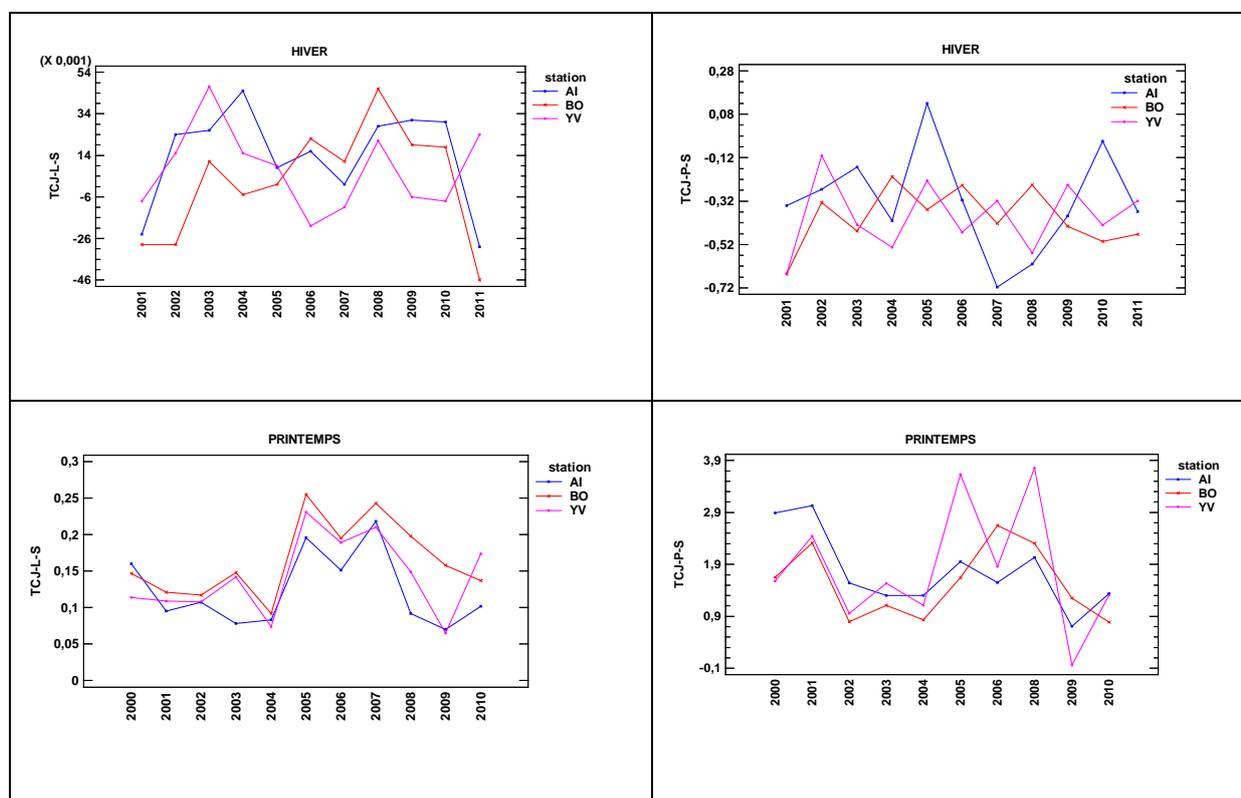
En hiver, la faible croissance ne permet pas de faire apparaître de contraste selon la station ou l'année ; au printemps, les contrastes apparaissent plus marqués avec la croissance en longueur (peut-être du fait des pontes), et l'effet entre années est plus fort que les différences entre sites. En été, au contraire un plus grand contraste apparaît entre les sites plutôt qu'entre les années. En automne, les effets sont peu marqués.

TABLEAU 18. ANALYSE DE VARIANCE DES TAUX DE CROISSANCE EN LONGUEUR ET EN POIDS SEC AUX DIFFERENTES SAISONS (HIVER, PRINTEMPS, ETE, AUTOMNE) SELON LES STATIONS (BOYARD, YVES ET AIGUILLON) ET LES ANNEES DE MESURE (2000-2010).

Saison	TCJ-L		TCJ-P	
	Effet station(3)	Effet année (11)	Effet station(3)	Effet année (11)
H	NS	NS	NS	NS
P	**BO>YV>AI	***2005+, 2007+	NS	**
E	**BO>(YV-AI)	NS	*** BO>(YV-AI)	**
A	NS	*	*	*2006-

Effet significatif au seuil de 5% (*), 1% (**), 1‰ (***) et effet non significatif (NS).

Ainsi les printemps 2005 et 2007 apparaissent comme excellents pour la croissance en longueur et l'automne 2006 est une mauvaise saison pour la croissance en poids sec (Figure 51). Au niveau des sites, les gains de longueurs printaniers sont supérieurs sur Boyard, puis sur Yves et enfin sur Aiguillon. En été, c'est Boyard qui présente les meilleures performances de croissance (longueur et poids).



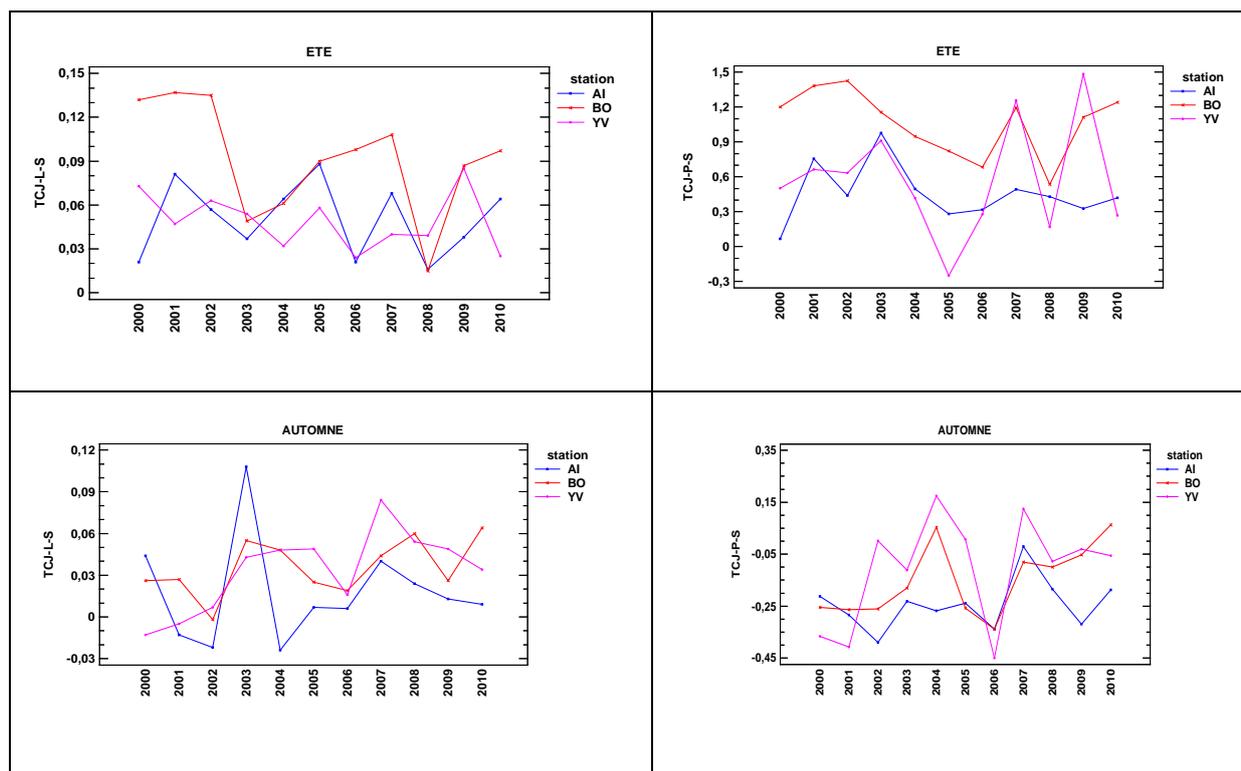


FIGURE 51. CROISSANCE EN LONGUEUR ET POIDS DE MOULES DES SITES D'AIGUILLON, BOYARD ET YVES ENTRE 2000 ET 2011.

ANALYSE DES CORRELATIONS ANNUELLES

Sur cette période de 11 années, et pour 3 sites de mesures, à l'échelle de l'année, deux corrélations négatives relient la salinité et la température d'une part, et la salinité et la chlorophylle d'autre part (Tableau 19). Au cours de ces 11 années de mesures, l'augmentation de la salinité dans l'écosystème estuarien des pertuis charentais, s'accompagnerait d'une baisse sensible de ressource trophique, estimée par la chlorophylle a (Figure 52).

TABEAU 19. MATRICE DE CORRELATION ENTRE LES VARIABLES HYDROBIOLOGIQUES (REPHY) ET LES VARIABLE DE CROISSANCE - ECHELLE ANNUELLE (LES CORRELATION SIGNIFICATIVES SONT EN GRAS).

Variables	Chla_R	Phéo_R	Sal_R	Temp_R	V-Alg-EP	N-Alg-EP	TCJ-L-A	TCJ-P-A
Chla_R	1	0,386	-0,573	0,253	0,493	0,380	-0,066	0,145
Phéo_R	0,386	1	-0,211	0,083	0,289	0,328	-0,081	0,047
Sal_R	-0,573	-0,211	1	-0,407	-0,348	0,136	0,365	-0,007
Temp_R	0,253	0,083	-0,407	1	0,146	-0,140	-0,541	-0,080
V-Alg-EP	0,493	0,289	-0,348	0,146	1	0,723	0,229	0,623
N-Alg-EP	0,380	0,328	0,136	-0,140	0,723	1	0,299	0,444
TCJ-L-A	-0,066	-0,081	0,365	-0,541	0,229	0,299	1	0,624
TCJ-P-A	0,145	0,047	-0,007	-0,080	0,623	0,444	0,624	1

Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification $\alpha=0,05$

D'autres corrélations significatives existent entre les taux de croissance en poids (TCJ-P-A) et longueur (TCJ-L-A), et la ressource trophique en algues (V-Alg-EP et N-Alg-EP) d'une part et la température d'autre part (Tableau 19). La première corrélation résulte de l'année 2007, très atypique. La seconde corrélation, négative, entre la température et la croissance en longueur, résulte essentiellement de la station de Boyard qui « tire » la relation vers le haut (Figure 53). Cette dernière relation montre que les taux de croissance annuels en coquille deviennent plus faibles quand la température augmente.

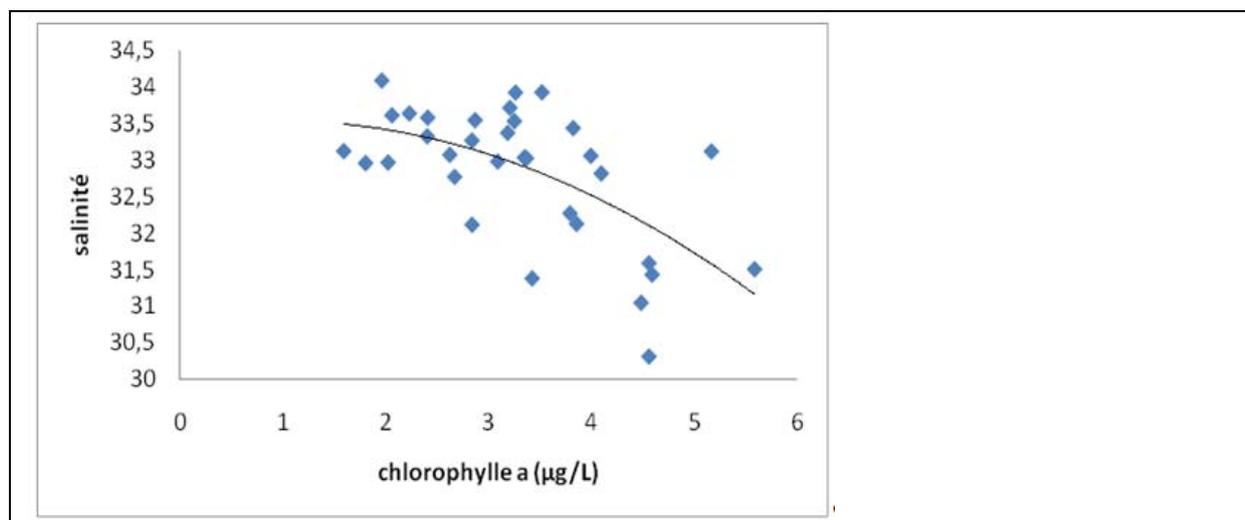


FIGURE 52. RELATION ENTRE SALINITE ET CHLOROPHYLLE A (ECHELLE DE L'ANNEE POUR CHACUN DES SITES) ($R^2 = -0,573$).

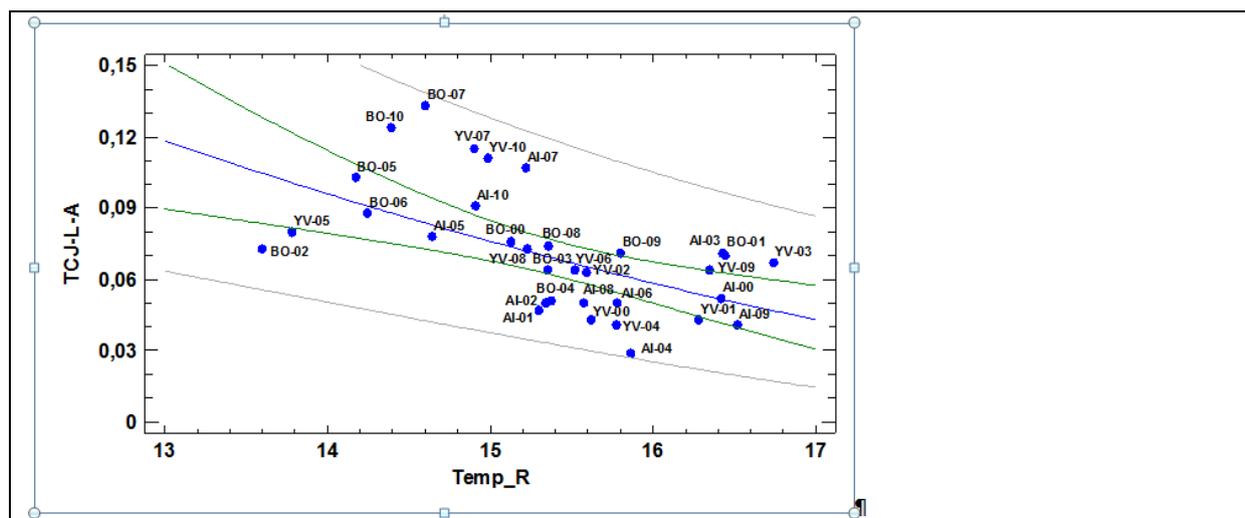


FIGURE 53. RELATION ENTRE TEMPERATURE ET TAUX DE CROISSANCE EN LONGUEUR (ECHELLE DE L'ANNEE POUR CHACUN DES SITES) ($R^2 = -0,541$).

Une première analyse en composante principale (ACP) est réalisée à l'échelle de l'année avec les seules mesures hydrobiologiques (Figure 54). Elle montre : (1) une dispersion des sites (BO, YV, AI) le long du premier axe trophique de l'ACP (43% de variabilité), à l'inverse de performance de croissance en poids des moules sur chacun de ses sites ; (2) la projection de la variable supplémentaire : TCJ-P le long de l'axe trophique a un sens, uniquement grâce à l'année 2007, exceptionnelle en croissance. Le deuxième axe de l'ACP (25% de variabilité) représente un axe « physique-chimique » de l'environnement (température et salinité). Plus l'eau est salée, plus la température est fraîche. Le taux de croissance en longueur se projette bien sur cet axe physique, dans le sens d'une meilleure croissance en longueur en lien avec la température plus fraîche et l'eau plus salée.

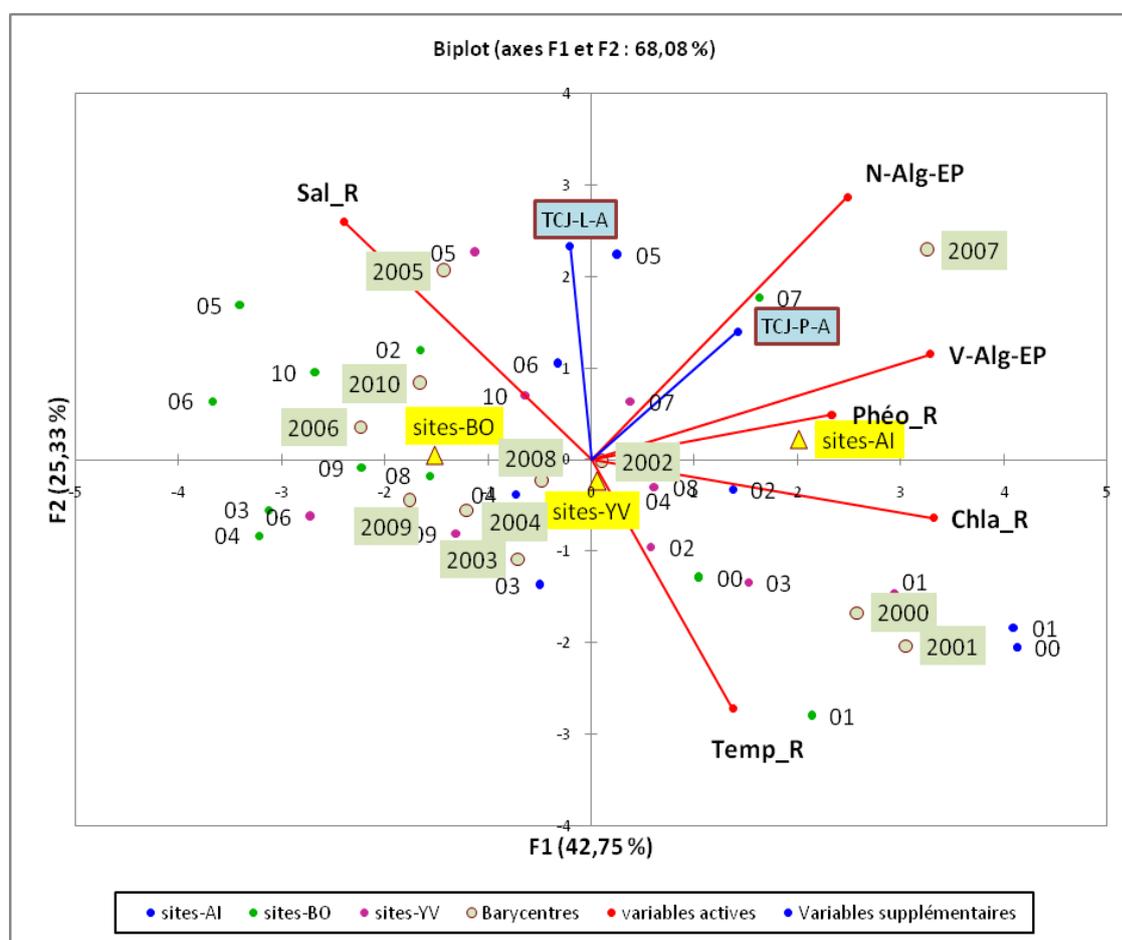


FIGURE 54. ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES A L'ECHELLE DE L'ANNEE.

Une deuxième ACP prend en compte tout à la fois les résultats hydrobiologiques de mesures sur les 3 sites d'élevage, mais également des paramètres environnementaux régionaux, météorologiques (vents, précipitations, ...) et hydrologiques (débits des fleuves, ...) (Figure 55). A l'inverse de la première ACP, dans celle-ci, les 3 stations ne se discriminent plus aussi facilement. Si le positionnement des différentes années sur les deux axes principaux de l'ACP ne bouge pas trop par rapport à la précédente ACP, par contre la projection des variables biologiques se fait bien dans le sens d'une ressource trophique

abondante mieux évaluée par la le volume d'algues des comptages de flore totale (REPHY) que par l'indicateur de chlorophylle a. et également dans le sens d'une NAO hivernale forte (Figure 55).

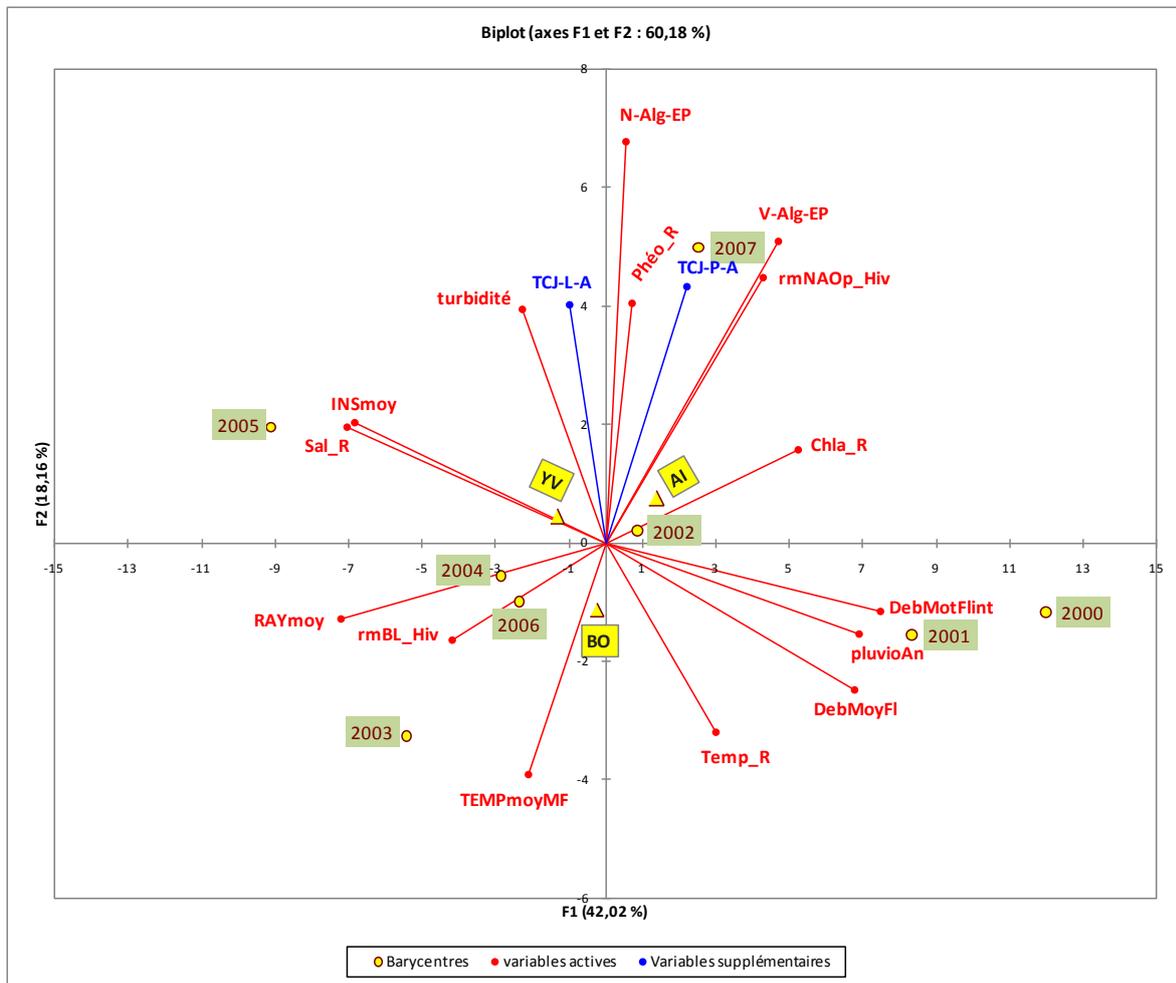


FIGURE 55. ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES; REPRESENTATION DES AXES 1-2 ET PROJECTION DES VARIABLES ENVIRONNEMENTALES CONSTITUTIVES ; LES DEUX VARIABLES DE CROISSANCES SONT SUPPLEMENTAIRES ; BARYCENTRES POUR LES SITES ET LES ANNEES.

ANALYSE PAR SAISON (4 SAISONS)

A l'échelle de la saison, des ACP et matrices de corrélation sont réalisées cette fois ci pour tenter de mettre en relation et d'expliquer la croissance en poids sec et longueur avec 3 types de descripteurs de l'environnement que sont (1) les variables hydrodynamiques (simulations du modèle Mars2D), (2) les paramètres météorologiques régionaux et (3) les descripteurs hydrobiologiques mesurés (REPHY) (Tableau 20).

TABLEAU 20. CORRELATIONS SIGNIFICATIVES ENTRE LES PERFORMANCES DE CROISSANCE ET LES DESCRIPTEURS DE L'ENVIRONNEMENT. ANALYSE PAR SAISON (3 SITES D'ELEVAGE).

	Variables	TCJ-L-S				TCJ-P-S			
		Print	Été	Autom	Hiver	Print	Été	Autom	Hiver
simulations modèle hydrodynamique	SALmoy							0,394	
	ApEDoCha								
	ApEDoSev								
	ApEDoTOT							-0,394	
	ImaxC		-0,435				-0,435	-0,376	
	ImoyC							-0,414	
	DmoyC		-0,557				-0,587		
	Tim		-0,540				-0,464		
base météorologique régionale	Deb_Loire					0,441			
	Deb_Garonne								
	S_DebFI_Ext								
	S_DebFI_Int								
	TEMPmoyMF			-0,425				-0,458	
	RAYmoy								
	PLUVsom								
	ImoyVENT			-0,390				-0,416	
	Vent_N	-0,508						0,562	
	Vent_E								
	vent_S								
	vent_O								
mesures hydrobiologique (REPHY)	Chla		0,388			0,523			
	phéo					0,557			
	Sal		-0,520						0,403
	Temp							-0,428	
	N-Alg-EP	0,488		-0,435		0,664		-0,441	
	V-Alg-EP			-0,395		0,484			

Les corrélations saisonnières et significatives entre les paramètres de l'environnement et les deux variables de croissance sont au nombre de 37. Près de la moitié sont en lien avec les 6 descripteurs du REPHY alors que le tableau compte au total 26 descripteurs environnementaux.

Au printemps, la croissance en longueur serait inversement associée au vent de Nord (*déjà vu dans la première étude*) et positivement au nombre de cellules algales ; En été, la chlorophylle *a* serait corrélée à la croissance en longueur, avec l'eau douce. En automne, on trouve un effet positif des vents faibles, température fraîche et d'une faible quantité d'algues (?) sur la croissance en longueur. Enfin, en hiver, on retrouve un effet des vents faibles (hypothèse de remise en suspension d'un matériel détritique ou de microalgues benthiques et une relation positive très forte entre l'abondance d'algues, de chlorophylle et de phéopigments (*cette dernière confirmant l'hypothèse évoquée ci-dessus*) et la croissance en longueur.

Hiver

En hiver apparait une corrélation négative entre la température et la salinité (Tableau 21, Figure 56). Tout ce passe comme si l'eau douce entrant est plus chaude que l'eau océanique ; sans doute en lien avec les régimes dépressionnaires (et donc pluvieux) qui correspondent en fait à des « redoux » de température

TABLEAU 21. MATRICE DE CORRELATION ENTRE LES VARIABLES DE L'ETUDE AU COURS DE L'HIVER

Variables	Chla	phéo	N-Alg-EP	Sal	Temp	V-Alg-EP	TCJ-L-S	TCJ-P-S
Chla	1	0,476	0,532	0,044	0,092	0,493	-0,042	0,154
phéo	0,476	1	0,135	0,113	-0,109	0,480	0,213	0,316
N-Alg-EP	0,532	0,135	1	0,133	-0,273	0,545	0,067	0,261
Sal	0,044	0,113	0,133	1	-0,724	-0,022	0,234	0,403
Temp	0,092	-0,109	-0,273	-0,724	1	-0,152	-0,230	-0,355
V-Alg-EP	0,493	0,480	0,545	-0,022	-0,152	1	0,024	0,262
TCJ-L-S	-0,042	0,213	0,067	0,234	-0,230	0,024	1	0,220
TCJ-P-S	0,154	0,316	0,261	0,403	-0,355	0,262	0,220	1

Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification $\alpha=0,05$

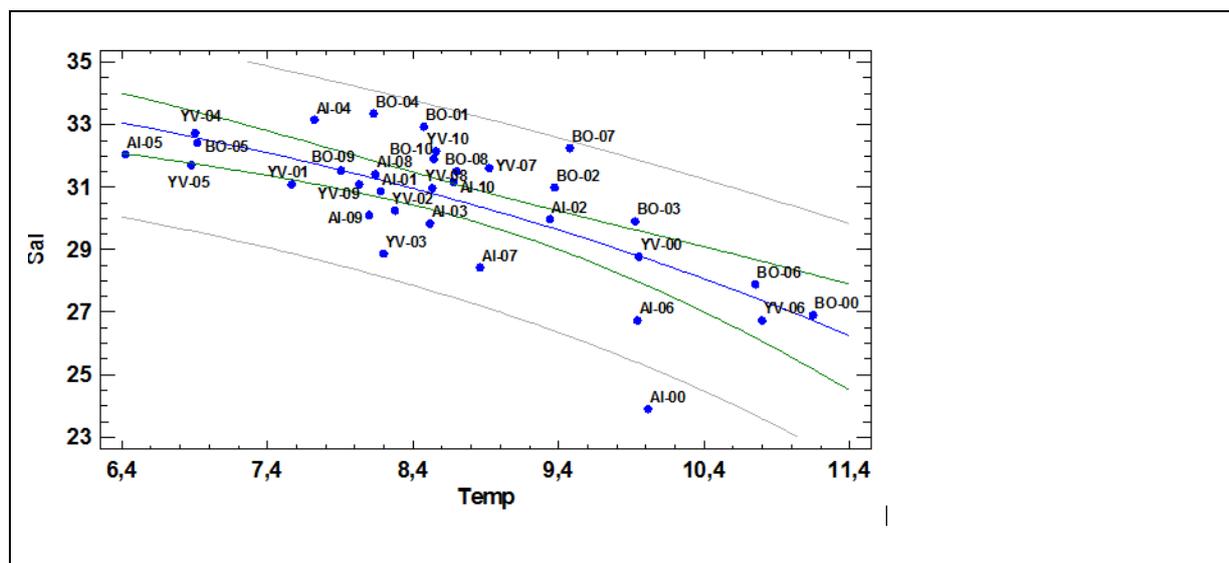


FIGURE 56. RELATION ENTRE TEMPERATURE ET SALINITE - HIVER ($R = -0,729$; $P=0,0000$).

En hiver, la croissance des moules est à la fois associée à la richesse trophique et au régime de vent de Nord, assez fort, bien représenté par l'hiver 2000 (Figure 57). Les 3 stations de bouchots étudiés sont peu différentes.

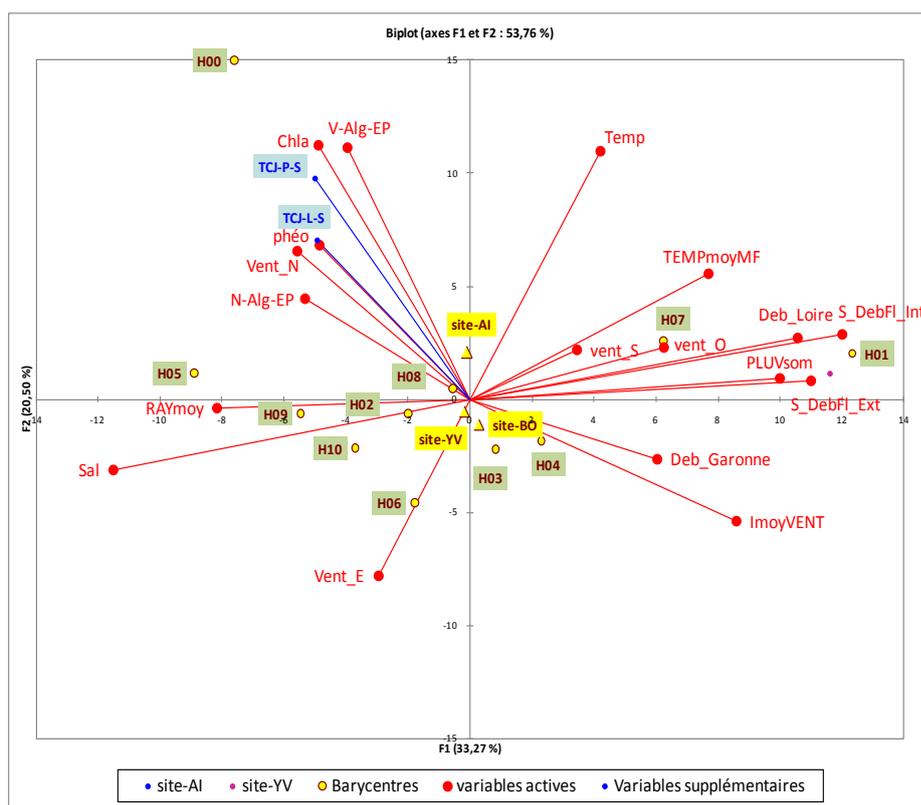


FIGURE 57. ACP SAISONNIERE : L'HIVER; REPRESENTATION DE 54% DE LA VARIABILITE ENVIRONNEMENTALE SUR LES AXES 1-2. PROJECTION DES VARIABLES ENVIRONNEMENTALES CONSTITUTIVES ; LES DEUX VARIABLES DE CROISSANCES SONT SUPPLEMENTAIRES ; BARYCENTRES POUR LES 3 SITES ET LES 11 HIVERS DE L'ETUDE.

Printemps

Au printemps, les corrélations sont significatives entre la croissance en poids sec et les 4 descripteurs de la ressource trophique (chlorophylle a, phéopigments, volume algal et nombre d'algues) (Tableau 22) ; La croissance en longueur est corrélée significativement au nombre d'algues.

TABEAU 22. MATRICE DE CORRELATION ENTRE LES VARIABLES DE L'ETUDE AU COURS DU PRINTEMPS.

Variables	Chla	phéo	N-Alg-EP	Sal	Temp	V-Alg-EP	TCJ-L-S	TCJ-P-S
Chla	1	0,464	0,448	-0,433	0,198	0,528	-0,054	0,523
phéo	0,464	1	0,477	0,016	0,448	0,507	0,146	0,557
N-Alg-EP	0,448	0,477	1	0,224	0,147	0,505	0,488	0,664
Sal	-0,433	0,016	0,224	1	0,204	-0,339	0,253	-0,253
Temp	0,198	0,448	0,147	0,204	1	0,058	-0,101	0,040
V-Alg-EP	0,528	0,507	0,505	-0,339	0,058	1	0,211	0,484
TCJ-L-S	-0,054	0,146	0,488	0,253	-0,101	0,211	1	0,528
TCJ-P-S	0,523	0,557	0,664	-0,253	0,040	0,484	0,528	1

Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification $\alpha=0,05$

Ressource trophique élevée et vent de Nord faible sont plutôt favorables à une bonne croissance des moules durant cette saison, comme ce fut le cas pour les printemps 2000 et 2007 (Figure 58, Figure 59).

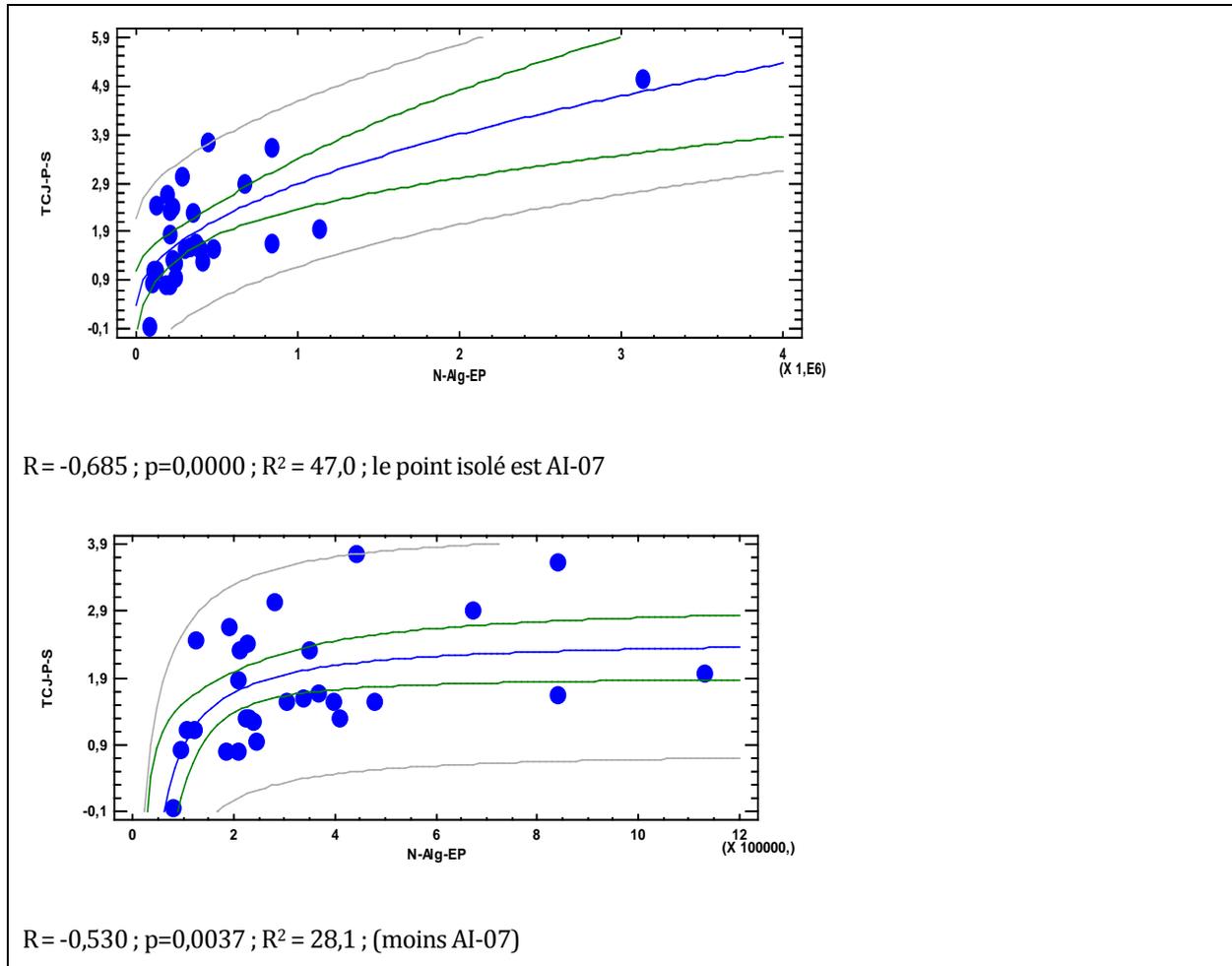


FIGURE 58. RELATION ENTRE LE TAUX DE CROISSANCE PRINTANIER ET LA RESSOURCE TROPHIQUE (NOMBRE D'ALGUES), AVEC (HAUT) ET SANS (BAS) LA STATION D'AIGUILLON EN 2007 (AI-07).

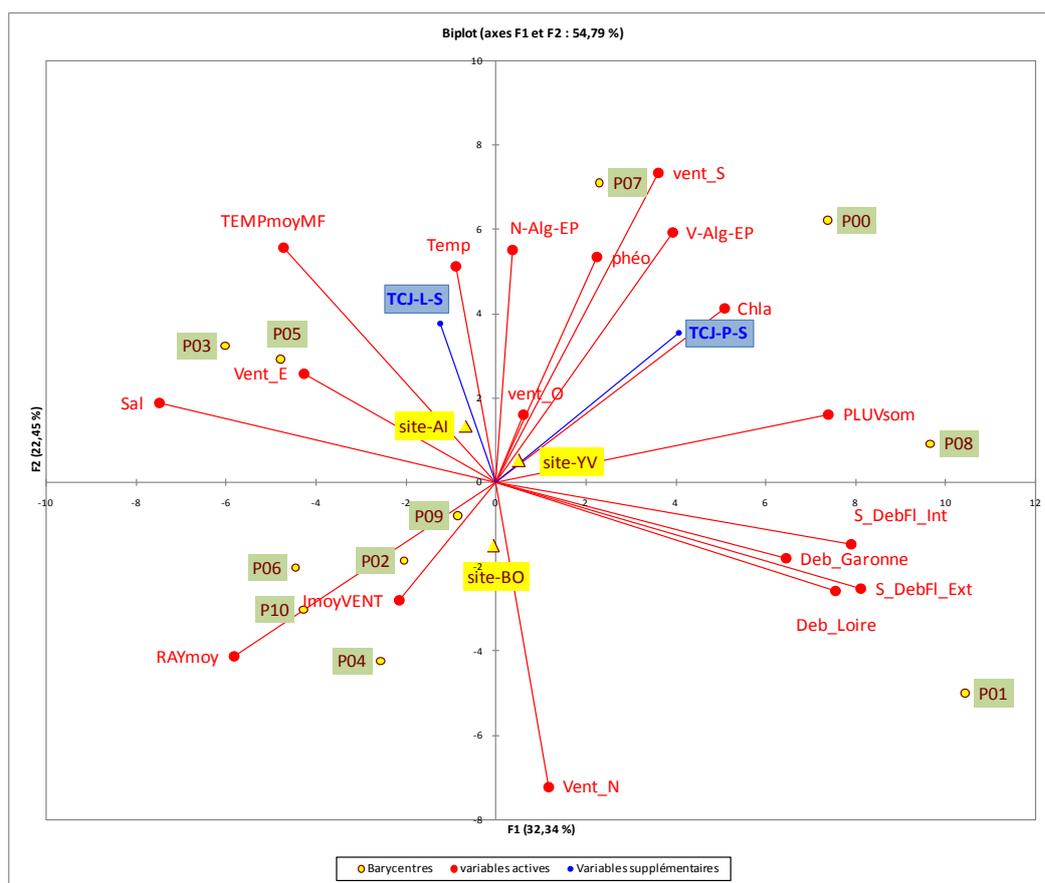


FIGURE 59. ACP SAISONNIERE : LE PRINTEMPS; REPRESENTATION DE 54% DE LA VARIABILITE ENVIRONNEMENTALE SUR LES AXES 1-2. PROJECTION DES VARIABLES ENVIRONNEMENTALES CONSTITUTIVES ; LES DEUX VARIABLES DE CROISSANCES SONT SUPPLEMENTAIRES ; BARYCENTRES POUR LES 3 SITES ET LES 11 PRINTEMPS DE L'ETUDE.

Ete

En été, le descripteur « ressource trophique » corrélé positivement à la croissance en longueur est la chlorophylle a. Par ailleurs la croissance en longueur semble meilleure quand la température est plutôt fraîche, comme ce fut le cas au cours de l'été 2002 (Tableau 23, Figure 60).

TABEAU 23. MATRICE DE CORRELATION ENTRE LES VARIABLES DE L'ETUDE AU COURS DE L'ETE

Variables	Chla	phéo	N-Alg-EP	Sal	Temp	V-Alg-EP	TCJ-L-S	TCJ-P-S
Chla	1	0,123	0,361	-0,525	-0,054	0,255	0,388	0,321
phéo	0,123	1	0,355	-0,364	0,090	0,288	-0,282	-0,341
N-Alg-EP	0,361	0,355	1	-0,493	-0,036	0,784	0,089	0,034
Sal	-0,525	-0,364	-0,493	1	0,086	-0,372	-0,089	-0,078
Temp	-0,054	0,090	-0,036	0,086	1	0,183	-0,520	-0,169
V-Alg-EP	0,255	0,288	0,784	-0,372	0,183	1	-0,063	0,103
TCJ-L-S	0,388	-0,282	0,089	-0,089	-0,520	-0,063	1	0,613
TCJ-P-S	0,321	-0,341	0,034	-0,078	-0,169	0,103	0,613	1

Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification $\alpha=0,05$

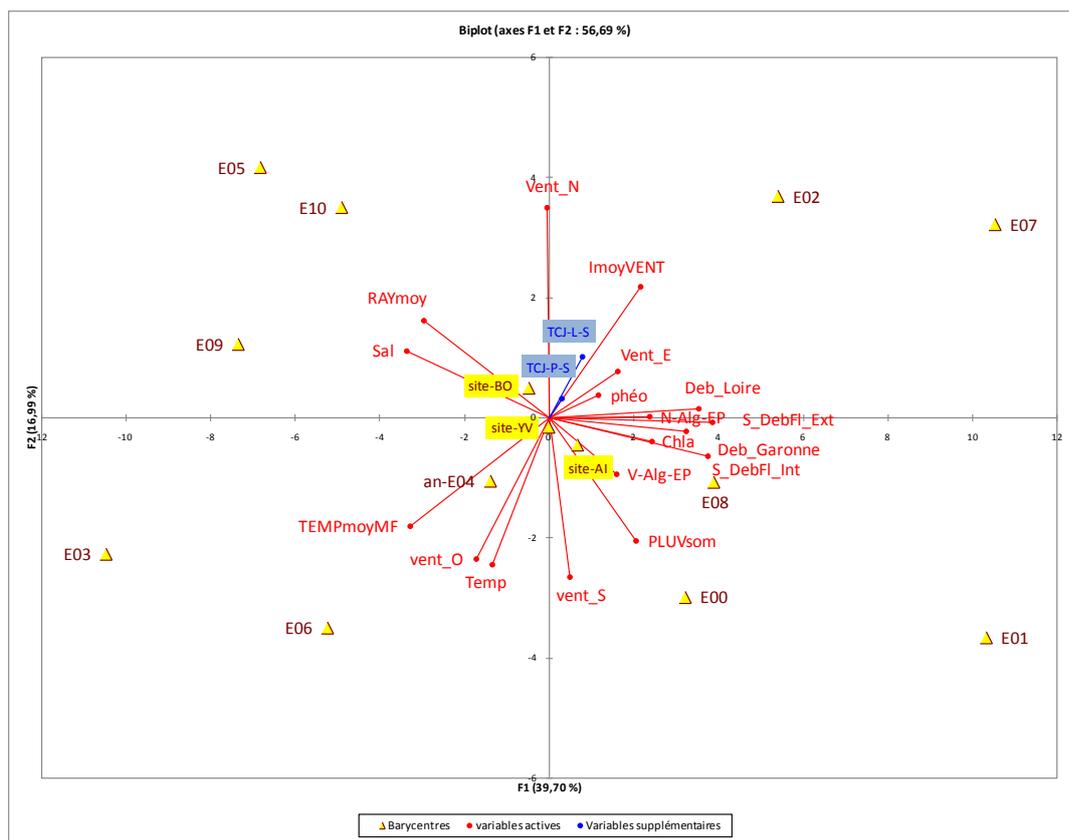


FIGURE 60. ACP SAISONNIERE : L' ETE; REPRESENTATION DE 54% DE LA VARIABLITE ENVIRONNEMENTALE SUR LES AXES 1-2. PROJECTION DES VARIABLES ENVIRONNEMENTALES CONSTITUTIVES ; LES DEUX VARIABLES DE CROISSANCES SONT SUPPLEMENTAIRES ; BARYCENTRES POUR LES 3 SITES ET LES 11 « ETE » DE L'ETUDE.

Automne

En automne, la croissance en poids sec et en longueur est inversement corrélée à l'abondance algale (N-Alg-EP) (Tableau 24, Figure 61) et corrélée positivement au vent de Nord, comme dans le cas des automnes 2004 et 2008 (Figure 62).

Tableau 24. Matrice de corrélation entre les variables de l'étude au cours de l'automne

Variables	Chla	phéo	N-Alg-EP	Sal	Temp	V-Alg-EP	TCJ-L-S	TCJ-P-S
Chla	1	0,728	0,182	-0,308	0,234	0,315	-0,242	-0,317
phéo	0,728	1	0,086	-0,290	0,064	0,135	-0,331	-0,224
N-Alg-EP	0,182	0,086	1	-0,066	0,347	0,712	-0,435	-0,441
Sal	-0,308	-0,290	-0,066	1	-0,178	-0,102	0,212	0,364
Temp	0,234	0,064	0,347	-0,178	1	0,390	-0,132	-0,428
V-Alg-EP	0,315	0,135	0,712	-0,102	0,390	1	-0,395	-0,366
TCJ-L-S	-0,242	-0,331	-0,435	0,212	-0,132	-0,395	1	0,612
TCJ-P-S	-0,317	-0,224	-0,441	0,364	-0,428	-0,366	0,612	1

Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification $\alpha=0,05$

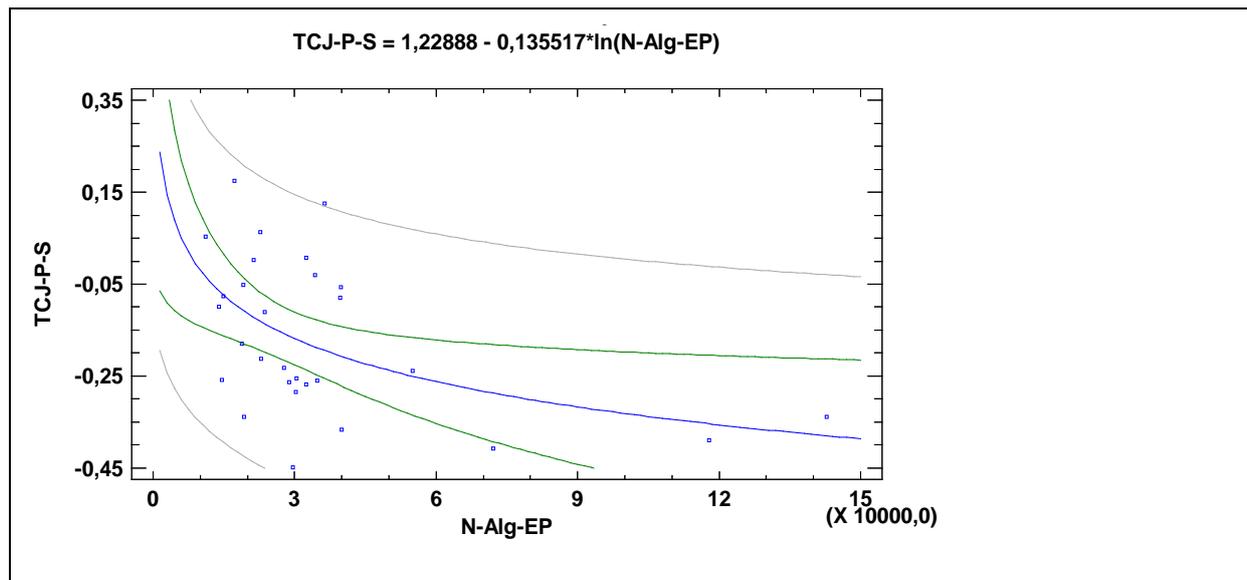


FIGURE 61. RELATION ENTRE LE TAUX DE CROISSANCE JOURNALIER (EN POIDS SEC) ET LA RESSOURCE TROPHIQUE EN ALGUES (REPHY); $R = -0,473$; $P = 0,0094$; $R^2 = 22,4$; LES 3 POINTS ISOLES SONT PAR ORDRE CROISSANT : AI-01, 02 ET 06.

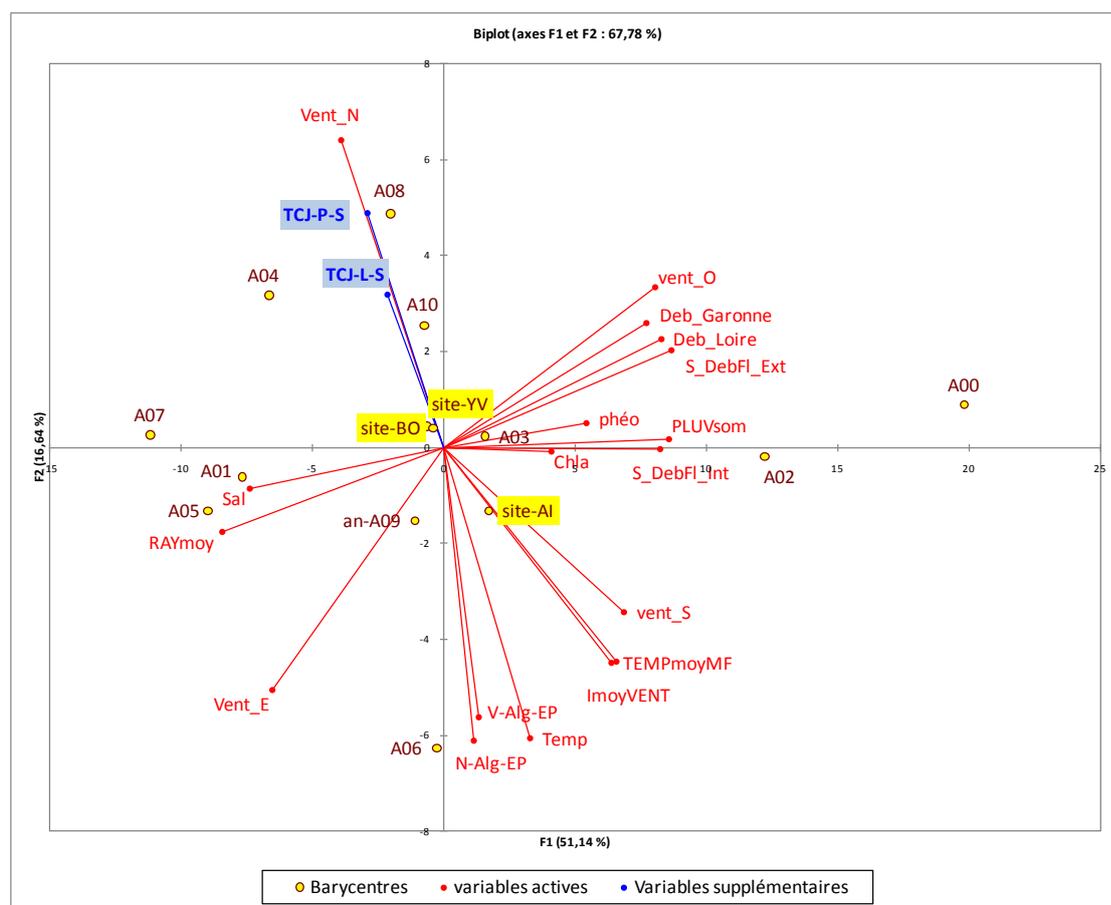
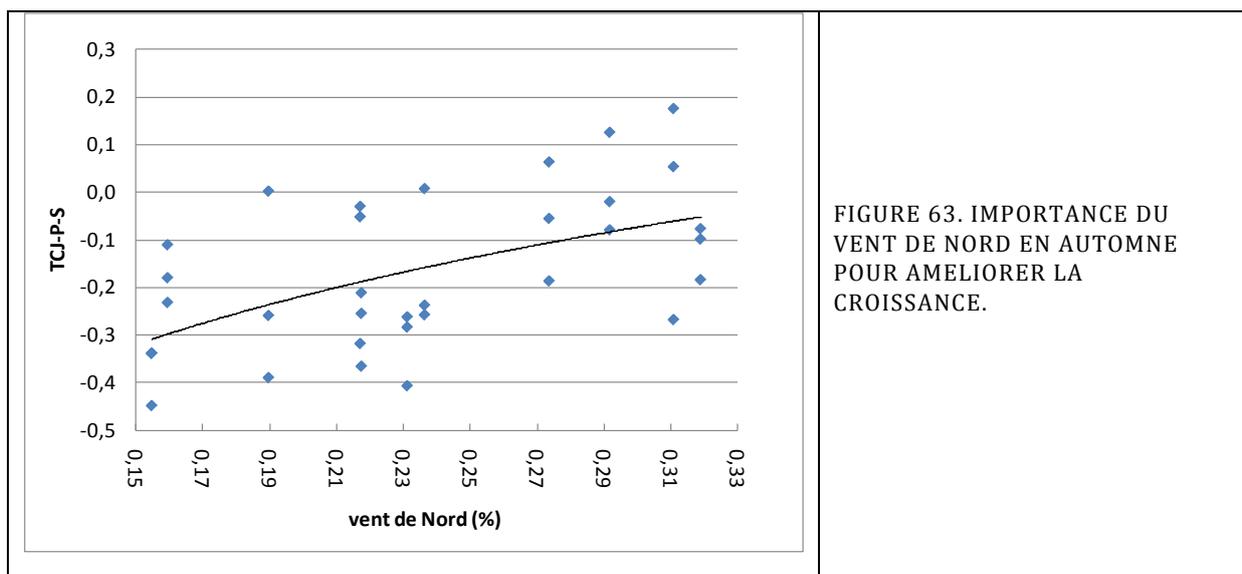
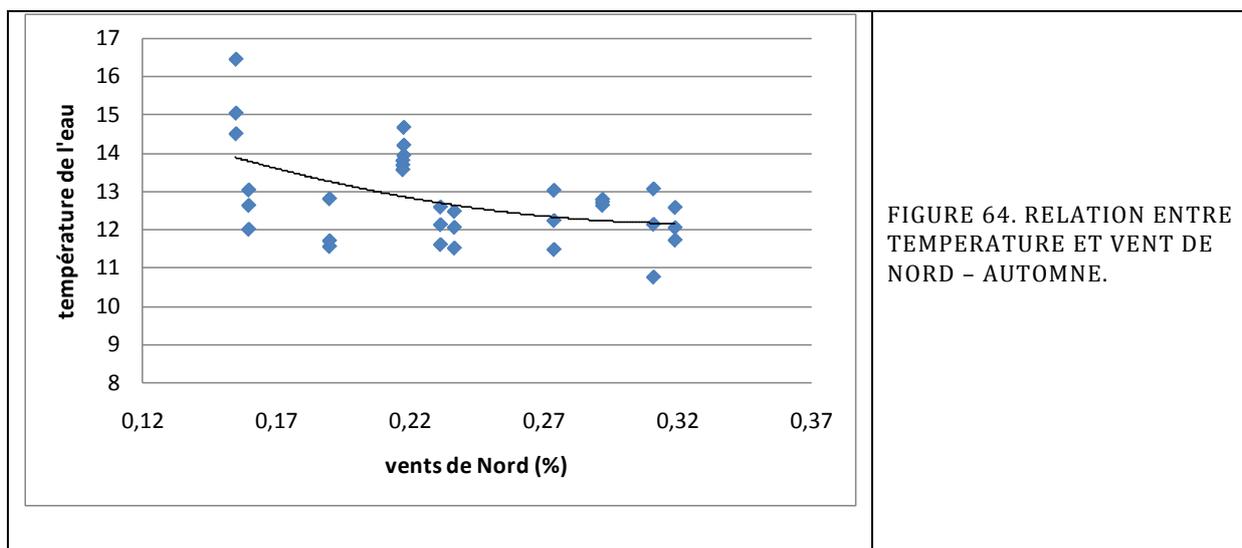


FIGURE 62. ACP SAISONNIERE : L'AUTOMNE; REPRESENTATION DE 54% DE LA VARIABLITE ENVIRONNEMENTALE SUR LES AXES 1-2. PROJECTION DES VARIABLES ENVIRONNEMENTALES CONSTITUTIVES ; LES DEUX VARIABLES DE CROISSANCES SONT SUPPLEMENTAIRES ; BARYCENTRES POUR LES 3 SITES ET LES 11 AUTOMNES DE L'ETUDE.



Les vents de nord « précoces », eux même associés à des faibles températures (air et eau), conduisent à des taux de croissance supérieurs en automne.



Les vents, courants et apports d'eau douce en provenance des fleuves sont des facteurs corrélés à la croissance et la qualité des moules ; Les vents de nord en hiver, et les vents de sud au printemps ont tendance à homogénéiser les masses d'eau et à rendre les résultats de croissance en longueur plus semblables entre les sites; Sur les Roulières, la croissance en longueur est d'autant meilleure que la salinité est forte (à l'opposé de l'indice de remplissage WM). L'indice de qualité de Walne et Mann (WM) est corrélé positivement aux apports d'eau douce pour 4 sites sur 5 (sauf Yves). Une hypothèse est de dire que durant l'hiver, les forts apports d'eau douce contrarient la croissance en longueur des

moules sur plusieurs sites d'élevage. Cette même hypothèse pourrait être retenue en automne, alors que la croissance en longueur sur Yves est inversement corrélée à l'apport en eau douce, et pour les quatre autres sites, l'indice de qualité de WM augmente avec les apports en eau douce ! ... Sur Boyard, l'indice de qualité est également corrélé à la force des courants. Si en hiver, le site des Roulières est impacté par les grands fleuves (et probablement plus par la Loire que par la Gironde), en automne, le site d'Yves est sous la forte influence de la Charente. Dans cette étude, les vents et les courants corrélés à la croissance des moules, en certaines saisons, et sur certains sites, laissent imaginer différents mécanismes de mise à disposition de la ressource trophique dans les élevages sur bouchots ; ainsi en hiver, l'indice de qualité (WM) est corrélé à la force du courant pour les deux sites ouverts des RO et BO, laissant supposer que des temps de résidence plus courts des masses d'eau, permettent une meilleure croissance. En hiver, sur les Roulières, la force du vent est également corrélée positivement à la croissance en longueur, sans doute également pour les mêmes raisons de transit rapide des masses d'eau...Au printemps par contre, les vents de sud sont positivement corrélés à la croissance en longueur, essentiellement sur les Roulières, laissant penser à une influence positive des blooms de panaches des grands fleuves, en provenance de régions plus chaudes, qui viendraient alimenter les pertuis ; ainsi, sur les deux sites plus océaniques des Roulière et de Boyard, l'indice de qualité (WM) est favorisé par des vents de sud plutôt faibles. En été, les apports en eau douce et les débits de fleuves sont corrélés positivement à l'indice de Walne et Mann sur les sites de Roulières et de Boyard, sans doute à cause du décalage de saisonnalité⁹des apports de la Gironde qui permettent une reprise de croissance estivale sur Boyard en particulier.

A l'échelle de la saison, les différences significatives entre les sites et les années apparaissent durant la saison de plus forte croissance ; c'est-à-dire au printemps, pour la longueur (pontes durant le printemps) ; Par contre, c'est durant l'été (absence de ponte) que des différences significatives de croissance en poids sec apparaissent. Au printemps, les années offrent plus de contraste que les sites, du fait de la forte variabilité des conditions environnementales de cette saison d'une année à l'autre. La situation est inverse en été, saison plus « stable » sur le plan environnemental, pendant laquelle les performances de croissance en poids sec sont différentes selon les sites. Les analyses de variance selon les années et les sites confirment la meilleure croissance (longueur et poids) des moules à Boyard en été, la meilleure croissance en longueur au printemps à Boyard, et une meilleure croissance en longueur au cours des printemps 2005 et 2007.

⁹ Décalage d'un mois des débits, mais décalage effectif de 2 mois, au regard des temps de transport des masses d'eau de l'embouchure de la Gironde jusque dans les pertuis charentais.

Au cours de ces 11 années de mesures, l'augmentation de la salinité dans l'écosystème estuarien des pertuis charentais s'accompagnerait d'une baisse sensible de ressource trophique, estimée par la chlorophylle. Sur cette période d'étude de 11 ans, et à l'échelle de l'année, seule l'année 2007, exceptionnelle, influe sur la croissance pondérale en chair, résultat du cycle de croissance. La relation qui montre que le taux de croissance annuel en coquille devient plus faible quand la température augmente demande à être explicitée.

Sur l'axe trophique de l'analyse en composante principale «annuelle», les 3 sites (Aiguillon, Yves et Boyard) se situent en ordre inverse de performances de croissance des moules. Les années : 2000, 2001 et 2007 sont très riches en ressources trophiques ; Si 2007 correspond bien à une année de forte croissance, ce n'est pas le cas de 2000 et 2001. L'opposition entre croissance en longueur d'une part et eau douce-température d'autre part, déjà vu dans la précédente analyse se retrouve également dans cette étude. Tout se passe en fait comme si une bonne croissance à l'échelle de l'année passe d'abord par une température plutôt fraîche en moyenne, mais un hiver plutôt doux, et surtout pas par une année caniculaire comme ce fut le cas en 2003.

En hiver, l'eau douce apportée par les précipitations, puis par les fleuves, résulte d'un régime dépressionnaire « plus chaud » ; Ainsi serait expliquée la corrélation négative entre température et salinité à l'échelle des 11 années et 3 sites dans les pertuis charentais. Au printemps, ressource trophique élevée et vent de nord faible sont plutôt favorables à une bonne croissance des moules. La croissance en longueur est corrélée à une température fraîche en été et à un régime de vent de nord en automne.

DISCUSSION GENERALE

L'environnement des pertuis charentais et des sites d'élevage

Si l'étude générale, objet de ce rapport, est bien mettre en relation les performances de croissance des moules sur les sites de bouchots avec leurs conditions d'élevage, l'étude environnementale envisagée à partir de données de simulations du modèle d'hydrodynamisme des pertuis charentais, de la climatologie générale, de la météorologie régionale et d'hydrobiologie, constitue en fait une expertise à part entière sur l'environnement des pertuis charentais durant la période 2000-2010. Une certaine évolution de l'environnement du bassin de Marennes – Oléron a été mis en évidence au cours des dernières décennies (Soletchnik 2001; Soletchnik 2002). A partir de l'étude de la chlorophylle *a*, comparée sur une période de 30 années l'auteur montre : (1) la précocité d'occurrence des premiers blooms saisonniers (en mars-avril) durant la dernière décennies de l'étude, (2) un élargissement de la saison de production primaire significative dans le bassin, et (3) un pic de concentration de chlorophylle *a* au mois de juin (au lieu du mois de mai comme c'était le cas dans le passé). Par ailleurs, l'auteur note également l'émergence d'une « saison des pluies » en avril responsable sans doute, en partie, de l'évolution dans la saisonnalité de la production primaire (Soletchnik 2001 ; Soletchnik et al. 1998).

Sur le plan hydrodynamique, Marsilly et Aiguillon présentent tout à la fois les courants moyens et maximaux les plus forts parmi les 5 sites d'élevage. Les directions de courant sont très marquées et contrastées ; plutôt d'Est, N-E pour Marsilly et Yves, et plutôt Ouest (Boyard) ou Ouest, N-O pour Roulières et Aiguillon. Dans les pertuis Breton (Aiguillon) et d'Antioche (Yves), plus profonds, la température est plus froide en hiver d'environ 1°C par rapport au bassin de Marennes (Boyard, Auger). Durant l'hiver, ces sites, également plus dessalés, présentent bien une influence plus terrigène que ceux d'Auger ou de Boyard.

Cette étude montre que le site de l'Eperon, dans le pertuis breton, présente une salinité hivernale plus basse que sur les autres sites. Les temps de résidence (théoriques) moyens des masses d'eau, de 12 et 85 jours respectivement pour le Bassin de Marennes – Oléron et le pertuis Breton (Stanisière, Dumas et al. 2006) compensent probablement les débits 3-4 fois plus faibles de la Sèvre niortaise comparés à ceux de la Charente; Finalement, malgré les apports en eau douce plus faible, les forts temps de résidence de l'eau dans le pertuis breton lui confère probablement un caractère plus euryhalin que le bassin de Marennes – Oléron. Cette spécificité du pertuis breton s'enrichirait également par la présence de taxons phytoplanctoniques caractéristique du panache de la Loire (Ryckaert, com pers). Sur Boyard, un léger pic de dessalure apparaît en mai, très certainement en lien avec la saisonnalité particulière du panache de la Garonne. La salinité augmente d'environ 3 g L⁻¹ dans les pertuis charentais durant cette

période de 11 ans. Les ACP « saisonnières » montrent que la corrélation négative entre température et salinité vient de la composante saisonnière hivernale. La hausse significative de température à la fin du siècle dernier (Soletchnik et al. 1998), l'augmentation sensible de l'insolation et la réduction des apports d'eau douce durant ces dernières années, ont pu conduire à réduire la turbidité moyenne dans les pertuis, permettant ainsi une meilleure pénétration de la lumière et contribueraient à favoriser le développement endogène des blooms phytoplanctoniques dans les pertuis. La turbidité est beaucoup plus forte sur le site d'Yves, toute l'année, que sur le site de Boyard, beaucoup plus marin. Le site d'Aiguillon, dans le pertuis Breton, montre un cycle de turbidité en lien avec les précipitations et les apports d'eau douce, avec en particulier une période de plus fortes turbidités durant les mois de mars à mai, bien visible avant les pluies automnales. Le site de La Carrelère (Marsilly) apparaît comme atypique d'un point de vue turbidité. Les sites de l'Eperon et de Boyard sont moins turbides que ceux d'Auger¹⁰ ou du Cornard ; Cette forte turbidité du bassin de Marennes-Oléron constitue un réel obstacle à la pénétration du rayonnement dans l'eau de mer et à la production primaire endogène (Struski 2005). A cause de ce cette turbidité, une part importante de la production primaire est due aux diatomées, à marée basse sur les vasières littorales des pertuis (Blanchard et al. 2001). En mars et avril, les concentrations en chlorophylle *a* des stations du pertuis Breton et d'Auger, dans le sud du bassin de Marennes, sont comprises entre 3 et 5 $\mu\text{g L}^{-1}$, alors que celles du pertuis d'Antioche (CO) et de Boyard (BO) sont encore inférieures à 3 $\mu\text{g L}^{-1}$. Au cours de l'été par contre, l'indice de chlorophylle *a* est plus faible à la station de l'Eperon, intermédiaire à Boyard et Auger, et plus élevé au Cornard. Le nombre de cellules algales est plus important en mars lors de blooms de diatomées qui dominant dans le milieu à cette saison ; durant l'été, autour de juillet, les dinoflagellés marquent un pic de florescence avant que d'autres diatomées n'émergent dans le milieu, moins nombreuses, mais représentant des biomasses algales beaucoup plus conséquentes. La diatomée *Skeletonema costatum* a une présence est très marquée au mois de mars, plus dans le pertuis Breton, sur le site de l'Eperon. Elle a la particularité de pouvoir se développer la première, dans des milieux encore turbides et à partir de 6°C (Yoder, 1979). Les diatomées culminent en mai - juin. La biomasse algale est maximale entre mai et août. Le mois de juillet est marqué par une chute de diatomées et un pic de dinophycées. En fin d'été, début d'automne, sous l'effet de la reminéralisation des microalgues détritiques, un autre bloom de diatomées apparaît dans le milieu. L'analyse floristique, conduite à partir des 3 sites de Boyard, Eperon et Cornard, montre que le schéma de succession des espèces de phytoplancton suit très exactement le modèle décrit par Margalef dès 1958 (d'après Gailhard 2003). Le premier stade est caractérisé par une croissance élevée des petites Diatomées, puis les Diatomées de plus grande taille et à faible taux de croissance deviennent dominantes. Le troisième stade est marqué par la présence de dinoflagellés, de grande taille également,

¹⁰ Bien que non associé à une zone de production de moules, Auger est une des deux stations hydrobiologiques du bassin de Marennes Oléron

et à taux de croissance encore plus faible. Le passage progressif du premier état au troisième s'accompagne d'une diminution de la concentration en nutriments dans le milieu. La transition d'un état à l'autre étant caractérisée par une variation de la stabilité de la colonne d'eau (Margalef 1958). Le brassage vertical de la colonne d'eau joue un rôle central dans la dominance relative des Diatomées sur les Flagellés dont le développement est plutôt associé à une stratification de la colonne d'eau (d'après Gailhard 2003). Dans le cas des pertuis charentais, le premier stade est atteint en mars, avec la prolifération de *Skeletonema costatum*, et le troisième en juillet, au moment où la stratification est la plus forte dans le milieu.

Variabilité de la croissance selon les années et les saisons

Comme la météorologie, à l'échelle de la planète, régule les grands courants marins, à l'échelle des pertuis charentais, la variabilité inter annuelle d'origine climatique est une composante essentielle des fluctuations hydrobiologiques. Un des objectifs de l'étude est bien d'évaluer le poids de cette variabilité (effet année) au regard de la localisation géographique des élevages (effet site). Dans la baie de Vilaine, des résultats de croissance, antérieurs à ceux de cette étude, montrent que d'une manière générale, de grandes différences de croissance (du simple au double) peuvent être observées entre bonnes (1992, 1993) et les mauvaises années (1990, 1994, 1999) (Mazurie, Bouget et al. 2001). De même pour cette étude, quelques années : 2005, 2007 et 2010 apparaissent comme de très bonnes années de croissance en longueur et 2000, 2002, 2003 et 2005 sont les années de plus faible croissance en poids sec. Si 2005 et 2010 sont des années avec peu de pluie (peu d'apport en eau douce) et des températures plutôt froides, 2007 qui est de loin la meilleure année de croissance ne présente pas les mêmes caractéristiques (Tableau 25).

TABLEAU 25. CLASSEMENT DES ANNEES EN TAUX DE CROISSANCE ANNUELS DE LONGUEUR (TCJ-L) ET DE POIDS (TCJ-P) (TABLEAU DE GAUCHE) ET CARACTERES CLIMATIQUES DOMINANTS (TABLEAU DROITE).

années	TCJ-L	TCJ-P	
2000	2	1	
2001	2	3	
2002	2	1	
2003	3	1	
2004	1	2	
2005	4	1	
2006	2	2	
2007	5	5	
2008	2	3	
2009	2	3	
2010	5	3	
Roulières	3	3	
Aiguillon	1	1	
Marsilly	3	2	
Boyard	5	3	
Yves	2	1	
			2000, 2008 beaucoup de pluie, hiver doux et faible rayonnement
			2005, 2010 peu de pluie, peu d'apport en eau douce (2005 ; 2010) et température froides avec vents de Nord (2010)
			2003 températures élevées
			2004, 2005 vent de nord et AR_H positifs (flux de Nord)
			2002, 2006 vent de sud et vent d'Est dominant durant l'année et vents forts (2002)
			2001,2007, 2009 Pas de caractéristiques particulières

Les saisons au cours desquelles les performances de croissance ont été bonnes sont, l'hiver 2004, les printemps 2005 et 2007 pour la longueur, et le printemps 2007 et les automnes 2004 et 2007 pour la croissance en poids de chair. Les « mauvaises » saisons sont : l'hiver 2000, les printemps 2001, 2004 et 2009 pour la croissance en longueur, et les printemps 2002, 2004 2009 et l'automne 2006 pour la croissance en chair.

Toutes conditions égales par ailleurs, la croissance des moules est d'abord contrôlée par la température et la ressource trophique, variables forçantes du modèle biologique de croissance. Les écarts thermiques entre les sites sont relativement faibles pour expliquer des différences significatives de croissance. Entre 2000 et 2010, le cycle thermique est quasiment le même sur les deux sites de l'Aiguillon (station hydrologique de l'Eperon) et d'Yves (station hydrologique du Cornard). La température saisonnière fluctue entre 7°C en janvier et 21°C en juillet - août ; la station de Boyard est plus « tamponnée » avec une température hivernale de 8°C et une température estivale de 20°C. Cette différence s'explique par l'influence plus océanique de cette station ; les deux autres stations, Yves, à l'Est du pertuis d'Antioche, et l'Aiguillon, au faible taux de renouvellement en eau, sont plus estuariennes (Stanisiere, Le Moine et al. 2008). L'année 2003 est une année de canicule exceptionnelle caractérisée par une disparition brutale des moules sur les pieux d'élevage en 2-3 jours au mois d'août. 40 à 70% de la biomasse a été perdue sur Yves et Marsilly. Malgré cet évènement, cette année n'apparaît pas dans le réseau REMOULA comme une mauvaise année de croissance (Robert et Le Moine et al. 2003). Sans doute les

conditions spécifiques au suivi standard des moules, en élevage dans des poches fermées, n'est-il pas indépendant de cette réponse. L'expertise sur ces sites montre un affaiblissement des moules et une fragilité extrême du byssus qui les conduit à se détacher du pieux d'élevage. Un arrêt total de croissance a été observé en août 2003, conséquence probable du stress thermique supporté par les moules durant cette période alors que la température passait au delà de seuil maximal de tolérance thermique (environ 25°C). Ce seuil thermique a été dépassée pendant 22 jours sur le site de Marsilly, au cours de cet été 2003 (Robert, Le Moine et al. 2003).

Variabilité de la croissance selon les sites

Même si les différences de croissance des moules, entre les sites expérimentaux d'élevage sur bouchot, ne sont pas statistiquement significatives à l'échelle de l'année, un classement sur la croissance en longueur placerait Boyard comme le site le plus performant et Aiguillon, comme le site le moins performant ; les autres sites apparaissant en position intermédiaire. La croissance en poids sec de chair est meilleure sur les sites de Boyard et des Roulières, puis à Marsilly, et enfin, Aiguillon et Yves sont les sites les moins performants. Le site d'Yves, en 4^{ème} position en croissance de coquille, passe en 2^{ème} position dans le classement des indices de qualité. Une telle spécificité peut donner lieu à des préconisations de gestion de la filière mytilicole; En effet, il serait possible de mettre sur le site mytilicole d'Yves des moules prégrossies (origine filières) déjà de taille marchande (longueur requise), et qui atteindraient sur ce site la qualité de remplissage attendue par le marché. Une nouvelle fois, Boyard se singularise par un indice printanier faible, égal à celui de l'automne, alors que tous les autres sites ont un indice bien supérieur au printemps, par rapport à l'automne. A l'échelle des saisons, des différences significatives de longueur et de poids sec apparaissent entre les sites. En hiver et au printemps, le site des Roulières s'oppose en particulier à Yves et Boyard, moins performants ; En été, au contraire, les élevages sur le site de Boyard présentent de meilleures performances de croissance que sur les 4 autres sites.

Facteurs environnementaux et croissance

D'autres facteurs influent indirectement sur la disponibilité trophique dans les bouchots : les vents, les courants, la durée d'immersion des moules et la compétition entre les moules en élevage et les mollusques filtreurs. Les vents jouent un rôle prépondérant dans la productivité primaire des zones littorales, et plus encore dans les écosystèmes conchylicoles comme ceux des pertuis charentais. Selon leurs forces, leurs intensités, la saison, ils peuvent induire un clapot favorable à la remise en suspension d'algues microbenthiques, créer une turbidité défavorable à la croissance des moules, pousser les panaches des grands fleuves à l'intérieur des pertuis ou au

contraire les en éloigner, permettre la stratification des masses d'eau et les blooms précoces de fin d'hiver, etc. Si les deux années de bonne croissance : 2005 et 2010 présentent des hodographes identiques, l'excellente année de croissance 2007 ne présente pas le même, et d'autres années moins bonnes, telle 2006, présentent un hodographe proche des années 2005 et 2010 ... La corrélation significative obtenue entre la croissance printanière sur les sites « océaniques » et les vents de sud induisant un faible déplacement des masses d'eau sont en accord avec les connaissances acquises en production primaire dans le panache de la Gironde (Herbland et al. 1998). Les observations des images satellites montrent souvent, de façon indirecte, l'entrée de ces efflorescences algales dans les pertuis (www.previmier.org/). Si Struski considère que 12% de la production primaire est exogène au bassin de Marennes-Oléron (Struski 2005), cette production profite plus aux sites à l'entrée des pertuis, et en particulier à Boyard et aux Roulières. Des études plus précises sont à envisager sur la spatialisation et les origines de la production primaire dans les pertuis charentais, et sur la traçabilité de la ressource trophique dans la moule elle-même.

Struski (2005) et Stanisière (2006) montrent que le déplacement résiduel des masses d'eau est globalement orienté du Nord vers le Sud du bassin de Marennes-Oléron, et que les temps de résidence sont plus importants à l'Est des pertuis qu'à l'Ouest¹¹. Dans ces conditions, on peut émettre l'hypothèse d'indices de compétitions plus élevés sur les sites de Marsilly, d'Aiguillon et d'Yves que sur ceux de Boyard ou des Roulières qui présentent globalement une meilleure croissance. La direction générale des courants (courants moyens) est bien contrastée entre les sites ; Les sites d'Yves et d'Aiguillon, les moins performants en croissance, sont également les deux seuls sites pour lesquels la direction principale du courant vient de l'Est, drainant sans doute des eaux moins riches en phytoplancton (effet de déplétion liée à la compétition, apports de matière minérale en provenance des vasières, etc). En été par contre, période où la production phytoplanctonique est faible, les courants d'Est¹², au sortir des baies, semblent bien favoriser sensiblement la croissance des moules des sites d'Yves et de Marsilly, mettant ainsi en évidence la production phytobenthique des vasières durant l'été (Guarini et Blanchard 2000), non perceptible plus tôt dans la saison (Richard 2000). En 1999, une étude comparative entre le site d'Aiguillon sur bouchots et le site d'élevage sur filières au centre du pertuis Breton montre également une plus grande richesse trophique sur Aiguillon (influence partielle des vasières de

¹¹ Sauf dans les situations de vents de Nord dans les pertuis d'Antioche et le bassin de Marennes – Oléron (Annexe 1).

¹² Dans cette étude, l'hydrodynamisme est représentée par les courants et les vents ; en fait la remise en suspension et le transport de la matière particulaire seraient mieux représentés par la fetch¹² (voir définition en note de bas de page), variable forçante de la remise en suspension par l'hydrodynamisme (agitation locale).

l'Ouest de la baie de l'Aiguillon) par rapport à un secteur centre – ouest du pertuis (Garen, Robert et al. 2004). L'alternance d'une production primaire phytoplanctonique de printemps avec une production primaire phytobenthique estivale est un phénomène bien connu dans les écosystèmes estuariens, et dans les pertuis charentais en particulier (Blanchard et al. 2001). Toutefois, ces apports ne semblent pas constituer un avantage nutritif aux élevages puisque ces sites sont moins performants que ceux situés à l'entrée des pertuis (Boyard et Roulières). Les désavantages de tels sites (turbidité, forte charge minérale en suspension inhibitrices de la filtration, compétition trophique, apports anthropiques toxiques ?) l'emportent probablement sur les avantages d'une telle situation, sauf durant l'été, période pendant laquelle les coups de vent (et la turbidité) sont faibles et la productivité des vasières en algues phytobenthiques, importante. Dans le pertuis Breton, l'effet négatif de la turbidité sur la croissance des moules a d'abord été mis en évidence entre 1980 et 1992 (Dardignac-Corbeil 1996), puis sur le site de l'Aiguillon (Garen, Robert et al. 2004). D'autres auteurs également évoquent la turbidité, et en particulier les particules minérales en suspension (argiles), comme facteur susceptible de ralentir la croissance des moules sur bouchots (Marteil 1976 ; Bayne et Worrall 1980 ; Kiørboe et al. 1981).

Les deux sites les plus océaniques, Roulière et Boyard présentent des performances de croissance contrastées en hiver, excellentes pour les Roulières, et mauvaises pour Boyard. Il est possible que la Loire, sous influence des vents de Nord et Nord-Ouest représente le premier apport en sels nutritifs pour le pertuis Breton. A l'image de ce qui se passe dans l'embouchure de la Gironde (Herbland et al. 1998), des blooms s'y développent probablement, également quand la masse d'eau se stratifie. Puisque les vents de nord, nord ouest sont dominants en hiver, le pertuis Breton est le premier à bénéficier des apports du panache de la Loire qui n'impacterait pas (ou très peu), plus au sud, le pertuis d'Antioche. Plus tard au cours du printemps, lorsque les vents « tournent » au sud, les blooms du panache de Gironde viennent impacter les deux pertuis. En été, par contre, dans un milieu appauvri en sels nutritifs par les blooms printaniers, les débits des fleuves, même faibles, apporteraient les nutriments, nécessaires et suffisants pour relancer la production primaire. Ainsi pourrait s'expliquer la bonne relation observée entre la croissance des moules et les pluies estivales.

Ressource trophique et croissance des moules

La ressource trophique d'un écosystème estuarien et conchylicole n'est pas « infinie ». Variable d'une année sur l'autre, en interactions complexes avec une multitude d'autres facteurs, elle détermine néanmoins la capacité trophique de l'écosystème conchylicole. Celle ci peut être atteinte en quelques années, comme ce fut le cas dans les années 70 après l'introduction de

l'huître creuse *Crassostrea gigas* dans le bassin de Marennes-Oléron (Héral 1986). Au cours de cette étude, la ressource trophique est mesurée directement sur 3 stations hydrobiologiques de l'Eperon, le Cornard et Boyard, proches respectivement des 3 stations d'Aiguillon, d'Yves et de Boyard. Une telle approche de mise en relation des stations de mesures hydrobiologiques avec des sites d'élevage de « proximité » a déjà été envisagée sur l'huître creuse (*Crassostrea gigas*), à l'échelle de la façade atlantique (Soletchnik, Ropert et al. 2007 ; Alunno-Bruscia, Bourles 2011 ; Bernard 2011).

Les moules sont capable d'ingérer tout à la fois du matériel phytoplanctonique vivant que du matériel détritique (voir revue d'auteurs dans Marteil 1976 ; Hawkins et Bayne 1992). Des études plus récentes à l'aide d'isotopes naturels ont permis de préciser l'origine de la ressource trophique des moules dans les pertuis charentais (Richard, Blanchard et al. 2000 ; Malet 2001) (Annexe 5). Comme l'huître, la moule ingère la plupart des particules présentes dans le milieu qui l'entoure : diatomées, dinoflagellés, débris organiques, bactéries, flagellés et protozoaires divers, spores, fragments d'algues, débris inorganiques, etc. Cependant un processus de sélection des algues existe par l'intermédiaire des palpes labiaux (Dutertre et al. 2007). Buley (dans Marteil 1976) indique une nette préférence de *Mytilus californianus* pour les dinoflagellés alors que dans le milieu ambiant ce sont les diatomées qui dominant. Desgouille (dans Marteil, 1976) trouve au contraire une prépondérance de diatomées dans les contenus stomacaux de moules de la rade de Toulon.

La ressource trophique du bassin de Marennes-Oléron serait, pour les 2/3, produite dans l'estuaire de la Charente, puis sur les vasières littorales. Seulement 10% serait d'origine océanique (d'après Struski 2005). En 1999, sur le site de l'Aiguillon (pertuis Breton), des études de traçage isotopique sont réalisées pour déterminer l'origine de la ressource trophique des moules selon la saison (Malet 2001). Richard montre que les moules en élevage s'alimentent de phytoplancton d'origine néritique¹³, de microphytobenthos et de matériel détritique d'origine terrestre qui peut représenter 15-30% de la ration trophique en hiver (Richard, Blanchard et al. 2000). Une étude plus précise permet de comparer en juin (printemps) et septembre (été) 1999 les deux sites de l'Aiguillon et de Marsilly, respectivement au nord et au sud de l'anse de la baie de l'Aiguillon (Richard, Blanchard et al. 2000). Cette étude montre que la ressource trophique est la même sur les deux sites, en juin. Elle est alors constituée de 50% de phytoplancton néritique d'un peu moins de 40% de microphytobenthos et d'un peu plus de 10% d'apport organique continental. En été par contre, les deux sites se distinguent car l'Aiguillon continue de bénéficier

¹³ Qualifie les milieux marins situés entre la zone littorale et le rebord du plateau continental (~ 200 mètres)

de près de 50% d'apport néritique, et Marsilly, pratiquement plus. Comme sur ce dernier site, une partie de la ressource est remplacée par des détritiques de spartine, peu assimilables par les moules (Sauriau, com. pers). Ainsi cette « plus grande stabilité saisonnière » vis à vis de la ressource alimentaire, plus homogène selon les sites en septembre (fin d'été) et plus hétérogène au mois de juin (printemps) se retrouve-t-elle également au niveau de la croissance entre les sites, moins contrastée également durant l'été et l'hiver, plus « stables » sur le plan météorologique et hydrologique...

L'analyse de la flore totale, issue des données des stations REPHY des pertuis charentais précise la disponibilité en algues microscopiques présentes dans la colonne d'eau pendant les 11 années de l'étude. Même si la fréquence des échantillonnages est limitée à 2-4 mesures par mois sur chacun des sites, l'abondance de cette ressource trophique, en nombre et en volume d'algues est bien corrélée à la croissance des moules. Cette observation valide, à large échelle spatiale et temporelle, ce qui a été trouvé dans les études sur le modèle énergétique de l'huître (Alunno-Bruscia, Bourles et al. 2011). Ces auteurs ont montré que la prise en compte de la ressource trophique à partir de la numération des algues permet de mieux ajuster le modèle biologique de croissance que la prise en compte classique de la chlorophylle *a* comme indicateur de cette même ressource. Dans le cas de notre étude, on constate que le volume algal expliquerait mieux encore la croissance que la numération. Le volume algal d'un échantillon est calculé par la prise en compte des volumes individuels approchés de chaque espèce d'algue (Arnaudeau 2010; David, Ryckaert et al. 2012).

Dans cette étude, les performances de croissance de moules au printemps sont également corrélées à l'abondance annuelle de blooms¹⁴ phytoplanctoniques. Les deux années les plus pauvres en blooms : 2001 et 2004 correspondent aux deux années de moins bonne croissance printanière ; à l'inverse, les deux années les plus riches en blooms phytoplanctoniques : 2005 et 2007, correspondent bien aux deux printemps de meilleure croissance. Par ailleurs, la diatomée *Skeletonema costatum* représente à elle seule, au sein d'une population d'algues largement dominée par les diatomées (64% en nombre et 76% en volume), près de 35% de l'ensemble de la micro flore algale identifiée dans les pertuis charentais entre 2000 et 2010. Elle constitue une algue fourrage de « référence » pour la production mytilicole puisque les trois meilleures années de croissance de la moule sont corrélées aux trois années de plus grande abondance de la diatomée dans l'environnement des pertuis charentais.

En comparant les sites de bouchots à l'échelle des pertuis, on constate que la saisonnalité des indicateurs de la ressource trophique (chlorophylle *a*, blooms, numération d'algues, volume d'algues) est décalée de deux mois environ entre le pertuis Breton (référence site de l'Aiguillon) et le pertuis

¹⁴ Un bloom est identifié comme tel si la numération dépasse 100000 cellules / L (REPHY).

d'Antioche. Ce décalage des apports trophiques pourrait expliquer les meilleures performances de croissance des bouchots de Boyard en été, alors que le plus gros de la croissance en chair a lieu au printemps sur les autres sites. Ainsi, la spécificité hydrologique de la Garonne et l'influence des panaches des grands fleuves côtiers sur les pertuis charentais seraient à l'origine de cette particularité de production du site de Boyard. Au delà de la chlorophylle a , de la flore totale (comptage et volume),

Limites de l'étude

Au cours de cette étude, les caractérisations météorologiques et hydrologiques, à l'échelle de l'année, expliquent peu les différences annuelles de croissance de la moule. L'hydrobiologie et l'hydrodynamisme spécifique à chacun des sites expliquent mal les différences de croissance sur chacun des sites d'élevage. Ce constat constitue un élément essentiel de l'expertise réalisée. Il pointe du doigt certaines limites de l'étude : biais expérimentaux et facteurs non pris en compte: place du pieu expérimental dans le champ de bouchot, compétition avec les mollusques sauvages et d'élevage alentours. Sur la base d'un indice de compétition de « proximité », calculé comme un nombre de pieux de bouchots compris dans un cercle de 150 m de diamètre autour du pieu expérimentale, le site de Marsilly serait celui qui subirait le moins la compétition locale avec les moules en élevage, Roulière et Aiguillon, 2 fois plus et Boyard et Yves, quatre fois plus (Tableau 26, Figure 65). Le classement des sites selon cet un indice de compétition de « proximité » ne correspond pas au classement des sites selon leurs performances de croissance.

TABLEAU 26. CARACTERISTIQUES DES SITES; NOMBRE DE PIEUX DE BOUCHOTS INSCRITS DANS UN RAYON DE 150 METRES AUTOUR DU PIEU EXPERIMENTAL ET DISTANCE ENTRE LE PIEU EXPERIMENTAL ET LA STATION REPHY DE REFERENCE.

SITE	longueur de bouchots (m) (*)	nombre de pieux par mètre linéaire	nombre de pieux (*)	station Rephy de référence	distance entre site (remoula-rephy) (km)
Aiguillon	4389,92	1,90	8341	Eperon	1,94
Boyard	10580,69	1,50	15871	Boyard	1,87
Yves	13371,91	1,30	17383	Cornard	3,88
Marsilly	2179,23	1,80	3923	Carrelière	0,78
Roulières	4430,08	1,80	7974	W-filière PB	6,42

(*) Dans un rayon de 150 mètres autour du pieu expérimental.

Le site de l'Aiguillon, le plus favorable des trois du fait de la richesse trophique, et moyennement soumis à la compétition environnante, est en fait le site pour lequel la croissance est la plus mauvaise (parmi ces trois sites) montrant ainsi une des limites de l'étude. Le site de l'Aiguillon bénéficie, selon les saisons et la direction des vents, à la fois des apports trophiques du large, et également d'apports de la partie ouest de la baie de l'Aiguillon. Sur ce site, le pieu expérimental est proche de la terre, dans le

champ de bouchot. Il est pourtant situé non loin d'une pointe, sous la double influence du Lay et de la Sèvre, appelé « château Margaux » par les producteurs de moules, tant la qualité des moules produites y est élevée. Ce constat montre comment l'emplacement du site expérimental dans le champ de bouchot¹⁵ est important pour pouvoir comparer les sites entre eux et combien un indice de compétition à l'échelle des pertuis, pourrait permettre de pondérer les effets sites et rendre ainsi les comparaisons inter - sites plus justes. L'importance du facteur immersion, mesuré par les résultats de croissance obtenus sur filières (100 % d'immersion) ou par celle de la partie basse des pieux de bouchots, doit conduire à apporter une plus grande précision pour homogénéiser l'altitude des sites expérimentaux. De plus, la richesse trophique au niveau des stations REPHY, en pleine eau, à une distance de plusieurs centaines mètres (Tableau 26), n'est pas celle de l'eau environnant le lot expérimental. Il serait sans doute intéressant de vérifier si la relation environnement-croissance n'est pas meilleure quand on compare un site de prélèvement « de pleine eau » avec un élevage également de « pleine eau » tel l'élevage sur filières dans le pertuis Breton et dans le pertuis d'Antioche.

¹⁵ Les performances de croissance des moules sur un pieu expérimental, au milieu du champ de bouchot, reflète la capacité de production du secteur d'élevage : un pieu expérimental en limite de champ de filière reflète plus la richesse trophique de la zone.

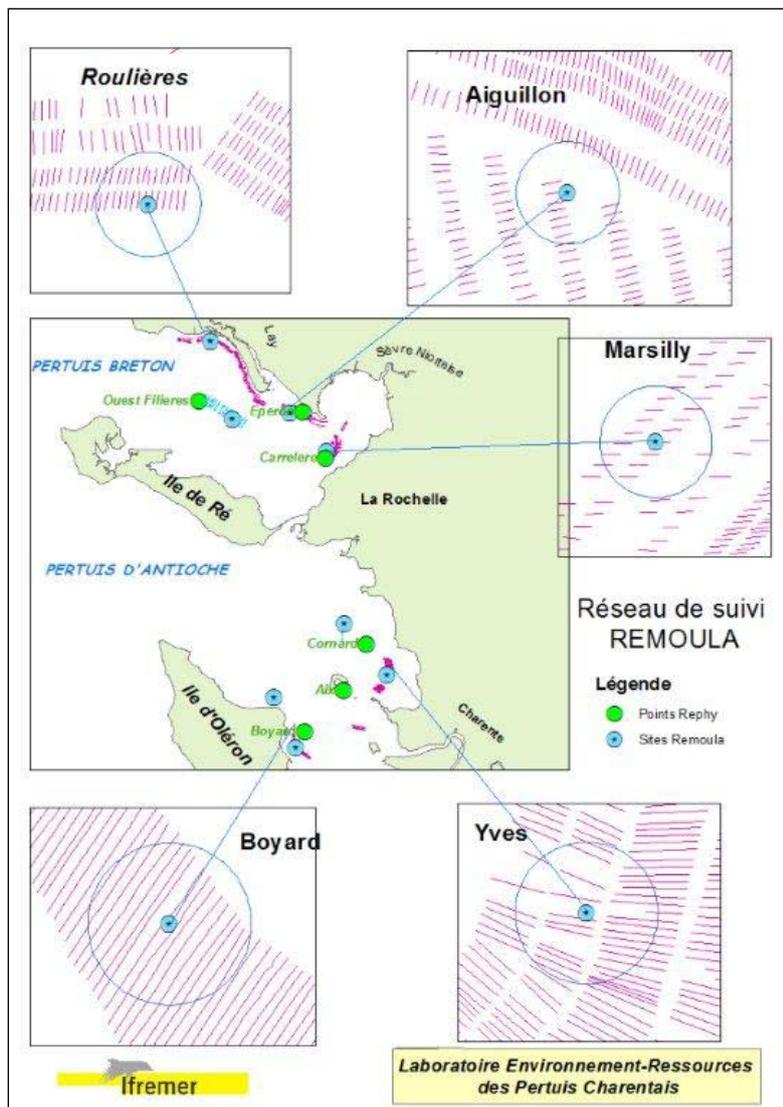


FIGURE 65. PLACEMENT DU PIEU EXPERIMENTAL DU RESEAU REMOULA (CERCLE BLEU) AU SEIN DES BOUCHOTS ; DISTANCE ENTRE LE SITE DU RESAU REMOULA ET LES STATIONS HYDROBIOLOGIQUES DE PROXIMITE (REPHY).

La moule bleue (*Mytilus edulis*) pond dans une gamme de température comprise entre 7°C et 18-20°C (Lubet 1959). L'étalement de sa saison de reproduction est également liée à la température moyenne du site, de quelques semaines sur les cotes anglaises, à plusieurs mois dans le bassin d'Arcachon (septembre à fin mai et pontes à partir de décembre) (Lubet 1959) ou les pertuis charentais (cette étude). Au niveau des stations plus océaniques (température >12°C), la maturité peut être atteinte dès la fin du mois d'août, et les pontes s'étalent d'août à fin juin (Marteil 1976). Un décalage saisonnier des pontes peut-il expliquer les écarts observés entre les indices de qualité printaniers du site de Boyard par rapport aux autres sites de bouchots ? Des pontes plus précoces ont-elles lieu sur ce site avant Marsilly ou d'Yves plus à l'est des pertuis ? Durant l'hiver et le printemps, sur un même site, les moules peuvent se reproduire plusieurs fois

en pontes fractionnées ou totales (Lubet 1959). En 2003 par exemple, l'évolution de l'indice de Walne et Mann est bien cohérent avec les analyses de maturation qui montrent deux pics de reproduction, en mars et mai (Robert , Soletchnik et al. 2007). L'abondance de la ressource trophique au printemps permet une bonne croissance en longueur (cette étude) et une maturation et ponte durant la même saison (Boromthanarat 1986 ; Barillé 1993).

Les deux variables indépendantes que sont les gains de croissance en longueurs et en poids sec des moules de bouchots ne sont pas corrélées dans cette étude. Pour des raisons biologiques de reproduction, le poids sec des moules adultes fluctue au printemps et en hiver en lien avec la libération des produits sexuels durant les pontes (Boromthanarat 1986 ; Dardignac-Corbeil 1996) qui peuvent être partielles ou totales à intervalle de seulement un mois quand les conditions environnementales sont bonnes (Lubet 1959). Pour cette raison, les échantillonnages de poids secs durant ces périodes, et plus encore au printemps quand les prises de poids sont rapides, peuvent varier selon que ces échantillonnages précèdent ou suivent une ponte. Cet artefact dans la mesure du poids sec rend difficile l'appréciation de la croissance et en particulier les comparaisons inter annuelle ou inter sites. Ce n'est que durant l'été et l'automne que des différences significatives apparaissent dans les mesures. L'analyse de l'indice de Walne et Mann, qui combine les variables longueur et poids sec, est donc également difficile. Ainsi, une étude menée en 1999 dans le pertuis Breton montre que les croissances en longueur et en poids sec sont meilleures sur filière mais que l'indice de Walne et Mann est supérieur pour les moules de bouchots (Garen, Robert et al. 2004). Ce résultat pourrait s'expliquer par le plus faible effort de ponte des moules sur les bouchots par rapport à celles sur filières (Robert , Soletchnik et al. 2007).

Parmi les facteurs pouvant induire une indépendance de croissance entre coquille et chair, les conditions météorologiques, et en particulier les coups de vents et les tempêtes, ont comme effet d'éroder les coquilles sur les sites les plus exposés comme celui des filières en 1999 (Garen, Robert et al. 2004). Malgré cela, la longueur reste sans doute le descripteur biologique le plus pertinent pour suivre la croissance des moules dans le contexte d'un plan d'échantillonnage à l'échelle du trimestre.

La compétition trophique est importante depuis toujours dans les pertuis charentais, et dans le bassin de Marennes Oléron en particulier puisque très vite, après l'importation de *Crassostrea gigas* au début des années 70, les populations (sauvage + élevage) ont atteint 70.000 tonnes puis 100.000 tonnes en quelques années (Héral 1986). La filière mytilicole représente une production moyenne de 9000 tonnes pour le pertuis Breton et quelques 4500 tonnes pour le pertuis d'Antioche (Robert et al. 2007). Toutefois, la pression trophique des moules sur la ressource alimentaire (à biomasse égale avec l'huître) est bien plus forte, puisque les moules filtrent 7 fois plus d'eau de mer, en mars-avril, que

l'huître (Boromthanarat et al. 1987). D'autres compétiteurs tels que les crépidules dont les stocks peuvent atteindre plusieurs milliers de tonnes (Sauriau 1987 ; Sauriau et de Montaudoin 1995 ; Curti 2009) s'ajoutent aux espèces en élevage et contribuent à la limitation des capacités de production secondaire des pertuis. Cette forte compétition intra et inter espèces dans les pertuis charentais n'a pas été prise en compte dans cette étude. Elle pourra l'être prochainement, à différentes échelles spatiales (pieux, bancs, pertuis) grâce aux travaux en cours sur les indicateurs spatiaux de compétition (Le Moine, com. Pers).

La relation entre croissance et immersion n'est pas toujours évidente à comprendre. Dans le cas du réseau de suivi en Normandie, inspiré de celui mis en place par (Dardignac-Corbeil 1996) puis (Robert, Bougrier et al. 1999), des comparaisons de croissance réalisées à trois hauteurs de pieux montrent très nettement de meilleures performances en automne-hiver sur la partie basse de bouchots (Blin, Pien et al. 2004), relation qui intègre l'immersion et l'accès à la ressource alimentaire. Des problèmes de fouling inversent la tendance au printemps – été, période pendant laquelle des spongiaires colonisent les paniers et limitent l'accès à la ressource trophique pour les moules dans les parties basses de bouchots. Dans le cadre d'une étude menée en Baie de Vilaine sur des poches expérimentales comprises entre 1,75 m et 2,30 m d'altitude, la différence d'immersion, de l'ordre de 20% du temps, ne serait pas responsable des différences de croissance observées entre les sites d'élevage (Mazurie, Bouget et al. 2001). Il s'agit là du même écart d'immersion entre les sites les plus extrêmes, de Marsilly, la moins immergée, et d'Yves, la plus immergée. Les deux meilleurs sites de production : les Roulières et Boyard, ont tous deux un taux d'immersion inférieur aux sites moins productifs d'Yves et d'Aiguillon.

Au moins 3 grands fleuves semblent influencer occasionnellement les pertuis charentais : la Loire, la Dordogne et la Garonne. L'impact de ces fleuves dont les débits moyens sont plus de dix fois supérieurs à la Charente, demanderait à être étudiée. La saisonnalité « positive » des apports de la Garonne en mai est exceptionnelle (ou annuelle si fonte des neiges ?). Elle est reliée à la fonte des neiges dans les Pyrénées. Combien de temps met le panache d'eau douce de la Gironde pour atteindre le site de Boyard ? Ce panache a-t-il un effet spécifique sur les filtreurs en élevage ? Si l'impact du panache des fleuves, riches en phytoplancton et en sels nutritifs est globalement favorable à la croissance des moules en fin d'hiver et au cours de l'été, la situation est moins claire durant les autres saisons. Les résultats de cette étude montrent qu'en hiver et au printemps, la croissance en coquille diminue avec les apports en eau douce ; ce déficit de croissance est plus marqué sur les 3 sites de plus forte influence terrigène et de fait les plus euryhalins : Marsilly, Aiguillon et Yves. Rien ne « justifie » ces corrélations négatives entre la croissance et les apports en eau douce, surtout au printemps, quand la croissance en coquille est élevée, et que l'alimentation à base de phytoplancton a une forte valeur énergétique (Barillé

1993). A contrario, en 2005, année la plus « sèche » parmi les 11 années de l'étude, l'indice de Walne et Mann et également la croissance sont tous deux excellents... Dans le pertuis Breton, la mise en cause de l'influence négative des fleuves et de leurs apports sur la production de moules n'est pas une hypothèse nouvelle ; Déjà dans les années 70, des différences dans les performances de croissance sont mises en évidence entre les sites de bouchots situés au Nord de la Sèvre Niortaise (cas des Roulières) et ceux situés au sud (Aiguillon ou Marsilly) (Dardignac et Feuillet 1974). Des mortalités importantes de moules sont constatées seulement les années de forte pluviométrie. Les herbicides libérés dans le bassin versant du chenal d'Esnandes, au débouché du canal du Curé sont fortement suspectés (Dardignac, Bodoy et al. 1990). La démonstration d'une contamination des eaux par les herbicides est montrée mais aucune relation de cause à effet n'est démontrée sur les élevages de moules. Les résultats de cette étude conduisent à ré-évoquer l'hypothèse d'un impact négatif des apports des fleuves sur la croissance des moules en élevage sur les sites les plus exposés (Dardignac and Prou 1995) ; (Samain and McCombie 2007) et poser une nouvelle fois la question de l'impact des apports anthropiques des fleuves sur la production conchylicole des pertuis (Soletchnik and Béchemin 2009).

CONCLUSION

L'étude est constituée : (1) d'une analyse spécifique d'une base de données sur la croissance des moules (poids sec, longueur et indice de qualité) durant 11 années sur 5 sites expérimentaux dans les bouchots à moules des pertuis charentais, (2) d'une analyse de l'environnement des pertuis charentais, et (3) d'analyses multi variées visant à explorer les relations entre la croissance et l'environnement des élevages. La mise en œuvre de paramètres explicatifs les plus pertinents possibles ont conduit les auteurs à réaliser une investigation environnementale à plusieurs échelles spatiales : la façade atlantique (régime climatiques généraux), la région (météorologie régionale) et les principaux sites d'élevage de moules sur bouchots (hydrobiologie et hydrodynamisme). L'exploration temporelle est réalisée à l'échelle de l'année et de la saison.

A l'échelle de l'année, de mauvaises années de croissance des moules de bouchots : 2000, 2002, 2003 et 2005 se distinguent d'autres années au cours desquelles la croissance a été bien meilleure : 2003, 2005, 2007. Par contre, ni les analyses en composantes principales, ni les essais de classifications hiérarchiques effectués à partir des descripteurs climatiques généraux (régimes climatiques) et régionaux (régimes de vents, température, rayonnement, pluviométrie, débits des fleuves) ne permettent de caractériser les « bonnes ou mauvaises années » ; la caractérisation se fera uniquement à partir des descripteurs de la ressource trophique : chlorophylle a, nombre d'algues, volume des algues, blooms (toutes espèces confondues) et blooms de la diatomée *Skeletonema costatum* (en mars), par ordre de corrélation croissante. A des fins prédictives vis-à-vis de la croissance des moules, il serait intéressant d'étudier le déterminisme de développement et d'abondance de ce taxon dans les pertuis charentais. Toutes années confondues, les sites ne se distinguent pas entre eux de façon significative montrant ainsi que « l'effet site », au sein des pertuis charentais est plus faible que « l'effet année » surtout lié à la météorologie régionale et aux régimes climatiques globaux à l'échelle de la façade atlantique (eg NAO, ...).

Au-delà de l'analyse du réseau REMOULA régional et de l'étude explicative de la croissance des moules en lien avec l'environnement, l'étude environnementale météorologique, hydrologique et hydrodynamique entre 2000 et 2011 constitue une expertise à part entière de l'écosystème des pertuis charentais. Sur le plan hydrologique, la tendance est bien à la « salinisation » des pertuis qui « gagnent » environ 3 g de sel par litre durant la période d'étude, en lien avec une diminution des précipitations (depuis 2002), une réduction des apports d'eau douce entre les années 1999-2001 au début de la période d'étude, et années suivantes, sans crue véritable, qu'il s'agisse des fleuves internes aux pertuis (Charente, Sèvre, Lay et Seudre) ou des grands fleuves qui

impactent également les pertuis (Dordogne, Garonne et Loire). Cette étude confirme l'apparition, depuis 15-20 ans, d'une pluviométrie importante centrée sur avril (mars à mai), et dont les conséquences pourraient se faire sentir sur les « blooms » phytoplanctoniques (production primaire), plus précoces (dès mars) et plus étalés au cours de l'année, de mars à juin-juillet, au lieu d'être centrés sur le mois de mai comme dans années 80-90. Sur les 11 années d'étude entre 2000 et 2010, c'est d'abord 2007 qui apparaît comme une année exceptionnelle de production primaire dans les pertuis. Les années 2005, 2007 et 2010 se caractérisent tout à la fois par la plus grande fréquence de blooms et par les plus forts comptages de diatomées, et en particulier, de *Skeletonema costatum* dont les principaux blooms ont lieu en mars. La température fluctue en cycles pluriannuels sans tendance marquée à la hausse ou à la baisse¹⁶. Le printemps-été 2003 caractérisé par une très forte canicule et l'automne 2006 est exceptionnellement chaud. Au contraire l'été et l'automne 2008 sont très froids. L'insolation (nombre d'heure de soleil par jour) augmente d'une heure environ entre 2000-2005 et 2005-2010.

Problématique importante, connaissances non stabilisées, les grands fleuves sont au centre d'un débat scientifique régional : quels sont leurs impacts sur le fonctionnement de l'écosystème des pertuis charentais ? Cette interrogation constitue une véritable question d'expertise. Si la Charente, principal fleuve des pertuis charentais, est susceptible d'impacter¹⁷ le pertuis Breton¹⁸, les trois grands fleuves côtiers : Loire, Garonne et Dordogne, dont les panaches balayent souvent ou occasionnellement le littoral charentais, ont des débits 25 fois supérieurs à l'ensemble des fleuves internes aux pertuis. La Garonne présente la spécificité saisonnière d'avoir un débit au mois de mai équivalent au débit hivernal alors que les autres fleuves ont, à cette période là, un débit équivalent à leur débit moyen annuel. Ce caractère saisonnier spécifique accentue très certainement l'impact de la Garonne sur l'écosystème des pertuis charentais. Les hodogrammes (représentation vectorielle de la force et la direction des vents) montrent combien les vents dominants varient d'une année à l'autre, présentant une typologie annuelle non corrélée aux performances de croissance des élevages de moules.

Deux sites, Roulière et Boyard présentent une influence plutôt marine (salinité de 31-35), alors que les trois autres (Yves, Aiguillon et Marsilly) sont de type euryhalin (salinité de 26 - 35). Yves est le site le plus euryhalin, sous l'influence quasi exclusive de la Charente ; Boyard reçoit près de trois fois moins d'eau douce en provenance de cette même Charente ; Les Roulières, dans le

¹⁶ Une hausse significative de plus de 1°C a marqué les années 80.

¹⁷ Les simulations (modèle hydrodynamique Mars 2D) sont réalisées à partir de substances dissoutes.

¹⁸ Ce qui n'est pas le cas, à contrario du deuxième grand fleuve des pertuis charentais : la Sèvre Niortaise, qui n'impacte pas (ou très peu) le pertuis d'Antioche, et encore moins le bassin de Marennes – Oléron !

pertuis Breton, est le site le plus marin de tous. Il reçoit près de deux fois moins d'eau douce que Boyard. Par contre, il est influencé par les trois fleuves ; Lay, Sèvre et Charente ; les deux autres sites du pertuis Breton : Marsilly et Aiguillon, plus euryhalins, sont sous influence, par ordre d'importance décroissant, de la Sèvre, du Lay et de la Charente. La Charente au sud, influence les sites du pertuis Breton, ce qui n'est pas le cas des fleuves du Pertuis breton vers les sites du sud (pertuis d'Antioche).

Les indices saisonniers de chlorophylle a , comme les mesures réalisées sur la flore totale montrent très nettement que la plus forte production primaire a lieu en mars sur l'Aiguillon et plus tardivement sur Yves et Boyard. En été, par contre, la ressource trophique est plus importante sur le site d'Yves, à proximité des vasières. En flore totale, les 212 taxons identifiés se répartissent en 13 grandes classes dont les Diatomées et les Dinoflagellées représentent quelques 92% et 99% respectivement en nombre et en volume d'algues déterminées dans les échantillons. Parmi les diatomées, *Skeletonema costatum*, espèce estuarienne par excellence, représente à elle seule plus d'un tiers du volume des algues identifiées (et comptées). Si 90% des blooms phytoplanctoniques ont lieu au printemps-été, ils sont 2 fois plus nombreux sur le site d'Aiguillon que sur les 3 autres sites étudiés (Auger, Boyard et Yves). La succession des espèces : diatomées puis dinophycées est liée à la possibilité pour les diatomées de se développer dans l'écosystème estuarien encore très turbide et froid, dès le mois de mars, en profitant des stocks de silice présents dans le milieu.

Pour étudier plus précisément les relations entre la croissance et l'environnement des pertuis, une première analyse est réalisée à partir des paramètres hydrodynamiques (modèle Mars2D), et concerne les 5 stations de bouchots : les Roulières, Aiguillon, Marsilly (pertuis Breton) et Boyard et Yves (pertuis d'Antioche). Le choix méthodologique d'étudier la flore totale des sites à bouchots limite le plan d'expérience de la deuxième analyse à 3 stations : Aiguillon, Boyard et Yves. Les analyses multivariées réalisées (analyses en composantes principales, matrices de corrélations, analyses de variance) ont montré que la croissance, à l'échelle de l'année, est très nettement associée à la ressource alimentaire, bien traduite par le dénombrement et le volume algal, mais mieux encore par la fréquence des blooms et l'abondance de diatomées qui sont parfaitement corrélées aux trois plus belles années de croissance : 2005, 2007 et 2010. A l'échelle des pertuis charentais, la croissance en longueur (TCJ) est liée aux descripteurs de l'environnement seulement en hiver et au printemps. Ce sont les vents, dans les deux cas, selon leur orientation Nord ou Sud, qui semblent contrôler en partie cette croissance. L'indice de qualité (WM) est sensible aux variables environnementales des pertuis durant les quatre saisons. C'est d'abord l'apport en eau douce (hiver, été et printemps) qui favorise un bon indice de qualité (WM), puis également le vent, et en particulier le vent de nord qui permettrait

l'élévation de l'indice de qualité en automne. En deuxième analyse (3 stations), les croissances en poids comme en longueur sont mieux corrélées aux volumes d'algues résultant des comptages de flore totale (REPHY) qu'à l'indicateur de chlorophylle a , en lien avec une NAO hivernale forte. Tout se passe donc comme si la bonne croissance à l'échelle de l'année passe d'abord par une température plutôt fraîche en moyenne, mais un hiver plutôt doux. Par contre, une année de très fortes températures, telle 2003, n'est pas particulièrement favorable à la croissance des moules. A l'échelle de l'année, aucune relation n'existe entre les débits des fleuves, la pluviométrie, la salinité et la croissance en longueur ou en poids sec des moules sur ces trois sites d'Aiguillon, Yves et Boyard.

Parmi les 5 sites d'élevage de bouchot, les Roulières en entrée nord du pertuis Breton semble le plus productif ; l'absence de mesures hydrobiologiques à proximité de ce site ne permet pas d'en expliquer la croissance exceptionnelle. Toutefois, les analyses météorologiques et hydrodynamiques permettent de comprendre que ce site « océanique » est bien sous influence « favorable » du panache des grands fleuves côtiers. Il bénéficie précocement (dès mars) de blooms dont il faudra préciser si l'origine est endogène ou exogène. Le site de Boyard, deuxième site « océanique » étudié reste néanmoins soumis à l'influence du panache de la Charente. Il présente d'ailleurs, en certaines saisons, une légère stratification. Une faible dessalure au mois de mai signe l'influence de la Garonne sur ce site. Site ouvert à l'entrée du bassin de Marennes-Oléron, ses mauvaises performances de croissance printanière ne sont pas clairement expliquées à l'issue de l'étude. Globalement, une relation négative existe entre la croissance en longueur et le caractère euryhalin plus ou moins prononcé des sites. S'agit-il d'une cause anthropique et (ou ?) de conséquences liées à l'écophysiologie des moules en zone turbide ? L'hypothèse la plus probable est celle d'un impact négatif hivernal et printanier des apports anthropiques en provenance des fleuves internes ou externes. Dans des études antérieures, dès les années 70, les deux causes ont été évoquées, sans conclusion... Ces résultats montrent la nécessité d'une étude de la saisonnalité des usages au niveau des bassins versant afin d'évaluer l'impact des apports d'effluents terrigènes dans la mer des pertuis.

En été, alors que l'apport d'eau douce est extrêmement faible, le site de Boyard présente les meilleures performances de croissance... Le site d'Aiguillon, au Nord - Est dans le pertuis Breton est également un site euryhalin soumis à la double influence des apports océaniques d'une part (à l'ouest) et à l'influence des vasières de la baie de l'Aiguillon (sous certaines conditions météo) ; il est globalement moins turbide que le site de Marsilly, sous l'influence du panache de la Sèvre Niortaise. Bien que situé à proximité d'un excellent site de production, un peu plus à l'ouest, à l'embouchure du Lay, l'élevage expérimentale, positionné en arrière plan (après plusieurs lignes de bouchots), est bien moins productif ! Le site de Marsilly à 2 km plus à l'Est

est plus performant que le site de l'Aiguillon. Comme le site d'Yves à l'Est du pertuis d'Antioche, il bénéficie de l'influence saisonnière (principalement automnale) des apports des vasières (respectivement de la baie d'Aiguillon et de la baie d'Yves).

Si à l'échelle spatiale, et des sites de bouchots en particulier, la croissance des moules est mal reliée aux indicateurs de ressource trophique, certaines années de bonne croissance sont bien corrélées aux concentrations de la diatomée *Skeletonema costatum*. Ainsi la présence de cette micro algue « boosterait » la croissance printanière de la moule, constituant ainsi, dès le mois de mars, un bon indicateur « prédictif » des performances de croissance de la moule pour l'année en cours.

D'autres études et analyses seraient à prévoir pour avancer plus encore dans cette expertise, en sachant, par exemple d'intégrer un signal de ressource trophique grâce aux images satellitaires en lien avec les modèles biologiques de croissance de la moule. Enfin, le classement des performances de croissance des sites de bouchots est globalement orienté en faveur des sites situés à l'Ouest des pertuis. Ce résultat laisse penser qu'un facteur de compétition inter et intra spécifique devrait être pris à l'occasion d'une prochaine expertise sur la filière mytilicole dans les pertuis charentais.

REFERENCES

- Alunno-Bruscia, M., Y. Bourles, et al. (2011). A single bio-energetics growth and reproduction model for the oyster *Crassostrea gigas* in six Atlantic ecosystems. *Journal Of Sea Research* 66, 340-348.
- Arnaud C., N. Faury et al. (2000). Suivi de la reproduction de l'huître creuse *Crassostrea gigas* et de la moule *Mytilus edulis* dans le bassin de Marennes-Oléron. Bilan de trois années d'observation de 1997 à 2000. Rapport Ifremer, 25 p.
- Arnaudeau V. (2010). Analyse des variations à long terme du microphytoplancton sur le littoral atlantique IFREMER: 34 p.
- Barillé A. L. (1996). Contribution à l'étude des potentialités conchylicoles du Pertuis Breton. Thèse Université d'Aix-Marseille II, 312 p.
- Bayne B.L., Worrall C.M. (1980). Growth and production of mussels *Mytilus edulis* from twopopulations. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 3, 317-328.
- Bernard I. (2011). Écologie de la reproduction de l'huître creuse, *Crassostrea gigas*, sur les côtes atlantiques françaises. Vers une explication de la variabilité du captage. Ecole Doctorale Gay Lussac. La Rochelle La Rochelle 196 p.
- Blanchard G. F., J. M. Guarini et al. (2001). Dynamic behaviour of benthic microalgal biomass in intertidal mudflats. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 264, 85-100.
- Belin C., Raffin B. (1998) (1). Les les espèces phytoplanctoniques toxiques et nuisibles sur le littoral français de 1984 à 1995, résultats du REPHY (réseau de surveillance du phytoplancton et des phycotoxines). Tome 1. Rapport Ifremer, RST.DEL/MP-AO 98-16, 133 p.
- Belin C. Raffin B. (1998) (2). Les espèces phytoplanctoniques toxiques et nuisibles sur le littoral français de 1984 à 1995, résultats du REPHY (réseau de surveillance du phytoplancton et des phycotoxines). Tome 2. Rapport Ifremer, RST.DEL/MP-AO 98-16, 151 p.
- Blin J.-L., S. Pien et al. (2004). Suivi sur pieux de la production mytilicole Bas-Normande - résultats 2003-2004 - Etude préliminaire d'un suivi de productivité standard. SMEL: 32 p.
- Boromthanasari S. (1986). Les bouchots à *Mytilus edulis* dans l'écosystème estuarien du bassin de Marennes-Oléron (France). Aspects biologique et énergétique, Thèse Université Aix-Marseille II, 142 p.
- Cassou C., L. Terray et al. (2005). Tropical atlantic influence on European heat waves. *J. Climate* 18, 2805-2811.

- Curti C. (2009). Cartographie des bancs de crépidules dans le bassin de Marennes-Oléron. Analyse par imagerie acoustique et sondeur de sédiment. Rapport de Master Environnement marin, Université de la Méditerranée Centre d'Océanologie de Marseille, 45 p.
- Dardignac M.J. and M. Feuillet (1974). Croissance des moules de bouchots dans la baie de l'Aiguillon (premières observations). Conseil International pour l'Exploration de la Mer.
- Dardignac-Corbeil M.J.(1975). La culture des moules sur bouchots. Science et Pêche, 244 10 p.
- Dardignac, M.-J., A. Bodoy, et al. (1990). Etude de la mortalité des moules dans le Pertuis Breton en 1989. R. INT.DRV-90.32/RA/L'HOUMEAU, 28 p.
- Dardignac M.-J. (1994). Estimation des biomasse de moules (*Mytilus edulis* L.) en élevage dans les bouchots du Pertuis Breton - Evolution entre 1988 et 1993. R. INT.DRVRA/L'HOUMEAU, 21 p.
- Dardignac M.-J. and J. Prou (1995). A propos des problèmes de captage de naissain de moules (*Mytilus edulis* L.) dans le Pertuis Breton de 1989 à 1991 : Observations préliminaires. Haliotis 24, 13-31.
- Dardignac-Corbeil M.-J. (1996). La mytiliculture dans le Pertuis Breton. Synthèse des travaux réalisés de 1980 à 1992, Rapport Scientifique et Technique, DRV/RA/RST/96-10, IFREMER, Nantes, 96 p.
- David V., M. Ryckaert et al. (2012). Spatial and long-term changes in the functional and structural phytoplankton communities along the French Atlantic coast. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1-15.
- Dutertre M., Barillé L., Haure J., Cognie, B. (2007). Functional responses associated with pallial organ variations in Pacific oyster *Crassostrea gigas* (Thunberg, 1793). J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 163, 235–250.
- Gailhard I. (2003). Analyse de la variabilité spatio-temporelle des populations microalgales côtières observées par le REseau de surveillance du PHYtoplankton et des phycotoxines (REPHY). Thèse d'Université de la Méditerranée Aix-Marseille II en Sciences de l'Environnement Marin, 293 p.
- Gailhard I. and P. Gros (2003). Analysis of the spatio-temporal variability of coastal microalgal populations with Phytoplankton and Phycotoxins Monitoring Network (REPHY), Université de la Méditerranée Aix-Marseille 2, Plouzane (France). 279 p.
- Garen P., S. Robert et al. (2004). Comparison of growth of mussel, *Mytilus edulis*, on longline, pole and bottom culture sites in the Pertuis Breton, France. Aquaculture 232, 511-524.

- Gosling E. (ed). (1992). The Mussel, *Mytilus*: Ecology, Physiology, Genetics and Culture. Elsevier. Devel. Aquaculture Fish. Sci. 25: 589 p
- Gosling E. (2002). Bivalve Molluscs, Biology, Ecology and Culture. Fishing News Books. Blackwell Publishing, UK: 443 p.
- Grouhel A., C. Belin et al. (2006). Recommandations techniques pour le contrôle et la surveillance dans le cadre de la DCE, pour le phytoplancton et les paramètres physico-chimiques (hors contaminants chimiques). Stratégies d'échantillonnage, indicateurs, et grilles de classement. Rapport IFREMER.
- Guarini J. M., G. F. Blanchard et al. (2000). Dynamic model of the short-term variability of microphytobenthic biomass on temperate intertidal mudflats. Mar. Ecol. Prog. Ser. 195, 291-303.
- Hawkins A., Bayne B.L. (1992). Physiological interrelations, and the regulation of production, In The mussel *mytilus* : Ecology, Physiology, Genetics and Culture, Gosling Editor, 171-222.
- Héral M. (1986). Evolution et état du cheptel ostréicole dans le bassin de Marennes-Oléron : intérêt d'une régulation., R. INT.DRV-86-06-RA/TREM 35 p.
- Herbland A., D. Delmas et al., (1998). Phytoplankton spring bloom of the Gironde plume waters in the Bay of Biscay: early phosphorus limitation and food-web consequences. Oceanol. Acta 21, 279-291.
- Kjørboe T., Møhlenberg F., Nøhr O. (1981). Effect of suspended bottom material on growth and energetics in *Mytilus edulis*. Mar. Biol. 61, 283-288.
- Le Moine O. (2013). Bassins versants et débits des principaux fleuves des pertuis charentais. Rapport Ifremer, R.INT ODE / LER / LERPC 2013.
- Lubet P. (1959). "Recherches sur le cycle sexuel et l'émission des gamètes chez les mytilidés et les pectinidés (mollusques bivalves)." Revue des Travaux de l'Institut des Pêches Maritimes 23, 395-547.
- Malet N. (2001). Ressources trophiques de *Mytilus edulis* dans le pertuis Breton pour trois conditions de culture (filières, têtes et pieds de bouchot) : apport du traçage isotopique naturel. , Faculté des Sciences et Technologies de la Rochelle 49 p.
- Marteil L. (1976). La conchyliculture française. 2eme partie. Biologie de l'huitre et de la moule." Revue des Travaux de l'Institut des Pêches Maritimes 40, 149-346.
- Mazurie J. (2010). Expertise sur l'impact potentiel d'essais d'élevages de moules en rivière d'Auray. Expertise, LER/MPL n° 10.047/Tm, 15 p.

- Mazurie J., J.-F. Bouget et al. (2001). Comparaison des performances d'élevage de moules en 4 sites mytilicoles de la baie de Vilaine, de février 2000 à février 2001. DRV/RA/RST/01/NUM, 43 p.
- Richard P. (2000). Etude des potentialités conchylicoles du Pertuis Breton : mise en évidence de l'utilisation des différentes sources de matière organique par traçage isotopique naturel. Rapport final de contrat n° 98000-127 à la Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt de Charente-Maritime. - L'Houmeau. Rapport interne, 40 p
- Richard P., G. Blanchard et al. (2000). Mise en évidence par traçage isotopique naturel de ressources trophiques des moules dans la Baie de l'Aiguillon (France). Journal de la Recherche Océanographique 26, 125-128.
- Robert S., S. Bougrier et al. (1999). suivi de la croissance de la moule *Mytilus edulis* dans le Pertuis Breton sur 3 sites différents : filière, bouchot, fond, rapport IFREMER RA/LCPC Novembre 1999: 28 p.
- Robert S., Geairon P., Guilpain P., Razet D., Faury N., Grizon J., Soletchnik P., Le Moine O., Gouletquer P. (2001). REMOULA 2000. Réseau de Croissance Moule des Pertuis Charentais. Mars 2000 - Février 2001. Rapport Ifremer, 40 p.
- Robert S., O. Le Moine et al. (2003). Expertise des élevages de moules après la canicule estivale : rapport préliminaire. 15p.
- Robert S., Soletchnik P., Le Moine O., Zanker S. (2007). Bilan d'étude sur la croissance de la moule (*Mytilus edulis*) sur bouchots et filières dans les Pertuis Charentais entre 2000 et 2005. Réseau REMOULA. Rapport Ifremer, 34 p.
- Ryckaert M, S. Genauzeau, A. Derrien, A. Schmitt et G. Thomas (2009). Etat de la situation sanitaire des zones de production conchylicole dans les pertuis charentais. 2 – Phytoplancton toxique. Contrat de projets Etat-Région Poitou-Charentes 2007 - 2013 Convention n° 08/RPC-A-29 du 19 mai 2008: 32 p.
- Ryckaert M, S. Genauzeau, A. Schmitt et A. Derrien (2011). Influence de la Gironde sur la composition spécifique du phytoplancton – campagne 2011. Contrat de projets Etat-Région Poitou-Charentes 2007 - 2013 Convention n° 08/RPC-A-29 du 19 mai 2008: 7 p.
- Samain J. et H. McCombie Eds. (2007). Mortalités estivales de l'huître creuse *Crassostrea gigas*. Défi Morest, Ed. Ifremer/Quae.
- Sauriau P. G. (1987). Les mollusques non-cultivés du bassin de Marennes-Oléron : quantification et répartition géographique des stocks. Haliotis 16, 527-541.

- Sauriau P-G. et de Montaudouin X (1995) La crépidule (*Crepidula fornicata*) dans le bassin de Marennes-Oléron et la presqu'île de Fouras : cartographie et estimation des stocks. Rapport CNRS-IFREMER, 32 p.
- Soletchnik P., N. Faury et al. (1998). Hydrobiology of the Marennes-Oleron Bay. Seasonal indices and analysis of trends from 1978 to 1995. *Hydrobiologia* 386, 131-146.
- Soletchnik P. (2001). Impact du changement climatique sur un écosystème estuarien : le Bassin de Marennes Oléron / Impact of the climatic change on an estuarian ecosystem : the Marennes Oléron Bay. *Lettre pigb-pmrc France* 12, 37-41. Open Access version : <http://archimer.ifremer.fr/doc/00090/20101/>
- Soletchnik P. (2002). Evolution à moyen terme d'un écosystème estuarien : le bassin de Marennes Oléron Journées du Département Ressources Aquacoles - Thème Ecosystèmes La Tremblade. Actes de colloque, 20p.
- Soletchnik P., M. Ropert et al. (2007). Relationships between oyster mortality patterns and environmental data from monitoring databases along the coasts of France. *Aquaculture* 271, 1-4.
- Soletchnik P. and C. Béchemin (2009). Les pesticides dans les Pertuis charentais; impacts sur les écosystèmes conchylicoles Contrat de projets Etat-Région Poitou-Charentes 2007 - 2013 Convention n° 08/RPC-A-29 du 19 mai 2008: 44 p.
- Spung M. (1984). Physiological energetic of mussel larvae (*Mytilus edulis*). I. Shell growth and biomass. *Mar.Ecol. Prog. Ser.*, 17, 283-293.
- Stanisiere J.-Y., O. Le Moine et al. (2008). Morphologie et hydrodynamique comparées des pertuis charentais : résultats de modélisation par Mars 2D. 36ème Salon National du Matériel Ostréicole, Mytilicole, Cultures Marines et Pêche. Poster
- Stanisière J.Y., Dumas F., Plus M., Maurer D., Robert S. (2006). Caractérisation des composantes hydrodynamiques d'un système côtier semi-fermé : Le Bassin de Marennes – Oléron. Rapport DOP/LER.LER/PC/06.1059, 112 p.
- Struski C. (2005). Modélisation des flux de matière dans la baie de Marennes-Oléron : couplage de l'hydrodynamisme, de la production primaire et de la consommation par les huîtres. UMR 10 CNRS/IFREMER. La Rochelle 334 p.
- Thomas Y., J.Mazurie et al. (2006). Modélisation de la croissance des moules *Mytilus edulis* en fonction des pratiques culturelles et des données environnementales. Application aux résultats de 2003-2004 en Baie du Mont Saint Michel. Rapport Ifremer, 46 p.

www.hydro.eaufrance.fr

www.MeteoFrance.fr

www.previmer.org/

www.ifremer.fr/lerpc/reseaux/remoula

Yoder J.A. (1979). Effect of temperature on light-limited growth and chemical composition of *Skeletonema costatum*. J. phycol. 15, 362-370.



LISTE DES FIGURES

Figure 1. Sites de bouchots du réseau REMOULA dans le pertuis Breton : Ro : Roulières, Ai : Aiguillon, Ma : Marsilly et dans le pertuis d'Antioche : Yv : Yves et Bo : Boyard.....	9
Figure 2. Croissances en longueur (A), en poids sec (B) et indices de qualité de Walne et Mann (C) comparés entre les 5 sites d'élevage sur bouchots au cours des cycles d'élevage 2000 à 2010.	20
Figure 3. Taux de croissance journalier (relatif) annuel ($dL/Lxdt$) x100 (A) et ($dP/Pxdt$) x 100 (B) au cours des 11 années de l'étude (2000-2010).....	21
Figure 4. Taux de croissance journalier (TCJ-L_an) selon les années et les sites : R : Roulières, A : Aiguillon, M : Marsilly, Y : Yves et B : Boyard.....	22
Figure 5. Taux de croissance journaliers printaniers, en longueur (gauche) ($p<0,001$) et en poids (droite) ($p<0,001$) au cours des 11 années (2000-2010).	24
Figure 6. Taux de croissance journaliers estivaux, en longueur (gauche) ($p<0,001$) et en poids (droite) ($p<0,001$) au cours des 11 années (2000-2010).	24
Figure 7. Taux de croissance journaliers automnaux, en longueur (gauche) ($p<0,001$) et en poids (droite) ($p<0,001$) au cours des 11 années (2000-2010).	25
Figure 8. Taux de croissance journaliers hivernaux en longueur (gauche) ($p<0,001$) et en poids (droite) ($p<0,001$) au cours des 11 années (2000-2010).	25
Figure 9. Taux de croissance journalier (relatif) annuel ($dL/Lxdt$)*100 (gauche) et ($dP/Pxdt$)*100 (droite) sur les 5 sites de l'étude.....	26
Figure 10. Croissances en longueur (TCJ-L) (A) et en poids sec (TCJ-P) (B) comparées entre les sites et les saisons.	28
Figure 11. Indice de Qualité de Walne et Mann selon les sites d'élevage (A) et les saisons (B).....	31
Figure 12.Indices de Walne et Mann (WM) à l'échelle de l'année, comparés entre les 5 sites d'élevage (11 années pour chacun des sites).....	32
Figure 13. Indice de Walne et Mann au cours des 4 saisons (2000 et 2007 incomplètes, ne sont pas représentées).....	32
Figure 14. Indices de Walne et Mann (WM) comparés d'une année à l'autre (5 sites d'élevage pour chaque année) à l'échelle de l'année.....	33
Figure 15; Indices de Walne et Mann (WM) comparés d'un site à l'autre (gauche) et d'une année à l'autre (droite) - echelle de la saison.....	34
Figure 16. Relation longueur – poids ; moyennes annuelles de l'ensemble des sites	35
Figure 17. Absence de relation entre les taux de croissance en longueur (TCJ-L) et les indices de qualité (WM) à l'échelle des cycles d'élevage annuel.	35
Figure 18. Relation entre les taux de croissance en longueur et les en poids des moules, au cours des 4 saisons : HIVER (H) ; printemps (P) ; été € et automne (A).....	36

Figure 19. Les sites expérimentaux du réseau REMOULA dans des environnements plus ou moins euryhalins des pertuis charentais : Les Roulières, Aiguillon, Marsilly, Yves et Boyard.	39
Figure 20. Les fleuves et bassins versants des pertuis Charentais.....	40
Figure 21. Exemple d'évolution d'un bloom phytoplanctonique entre le panache externe de la Gironde (sud des cartes), la cote Ouest d'Oleron et les pertuis charentais.....	41
Figure 22. Débits annuels moyens des fleuves côtiers influençant les pertuis (Loire, Garonne, Dordogne), et des 5 fleuves internes aux pertuis.....	42
Figure 23. Apport en eau douce relatif des fleuves internes aux pertuis charentais (période 2000-2010).	42
Figure 24. Débits comparés des fleuves internes aux pertuis charentais par rapports à l'ensemble des fleuves susceptibles d'impacter les pertuis charentais (« tous les fleuves »).	43
Figure 25. Comparaison inter annuelle des débits des fleuves internes aux pertuis charentais et de la pluviométrie à la Rochelle (A) et corrélation à 80% (B).	43
Figure 26. Saisonnalité d'apport d'eau douce des fleuves influençant les pertuis charentais. La flèche rouge indique le mois de mai.	44
Figure 27. Représentation (%) des 4 régimes hivernaux principaux chaque année entre 1999 et 2010 ; le régime est considéré comme établi (et pris en compte dans l'analyse) si il persiste pendant au moins 5 jours de suite	45
Figure 28. Moyennes journalières saisonnières de la température (A), insolation (B), rayonnement (C) et pluviometrie (D) durant la période 2000-2010 à la station météorologique regionale de la Rochelle (données météo-France).	47
Figure 29. classification hierarchique des années entre elles, selon les caractéristiques régionales annuelles des pertuis charentais (methode de Ward).	49
Figure 30. Exemple d'une situation de dessalure en hiver dans les pertuis charentais en lien avec les apports des fleuves internes aux pertuis.	50
Figure 31. Salinité comparée sur les 5 sites d'élevage de moules dans les pertuis charentais entre 2000 et 2010.	51
Figure 32. Apport en eau douce (cl /L) pourquoi cette unité?des 4 fleuves des pertuis, sur les 5 sites de bouchots de l'étude.	52
Figure 33. Apports en eau douce (cl dans 1 litre) en provenance des principaux fleuves internes aux pertuis (SE, LA, CH), aux différentes sites de bouchots.....	53
Figure 34. Temps d'immersion (heures / mois) durant 11 années (2000-2011), pour chacune des 5 sites de l'étude (Rou, Mar, Aig, Yve et Boy) (moyenne d'environ 350 données par mois).	54
Figure 35. Intensités moyennes (A) et maximales (B) des courants (m/s) au cours d'un mois, durant 11 années (2000-2011) (n=133), pour chacune des 5 stations de l'étude (Rou, Mar, Aig, Yve et Boy).	55

Figure 36. Direction moyenne du courant (m/s) durant 11 années (2000 - 2011) (n=133), pour chacun des 5 sites de l'étude (Rou, Mar, Aig, Yve et Boy) (moyenne d'environ 350 données par mois).....	56
Figure 37. Représentation de l'intensité (diamètre du cercle rouge) et de la direction résiduelle des courants (flèche bleue) sur chacun des sites de l'étude.....	56
Figure 38. sites expérimentaux dans les secteurs de bouchots (ronds et légendes en bleu) et stations hydrobiologiques de mesure de phytoplancton (ronds et légendes en vert) dans les pertuis charentais.....	58
Figure 39. Comparaison entre les stations hydrobiologiques; moyennes mensuelles de température (A), salinité (B), turbidité (C).....	60
Figure 40. Comparaison entre les stations hydrobiologiques; moyennes mensuelles de chlorophylle a (A), pheopigments (B) et rapport de pheo / (chla + pheo) (C).....	61
Figure 41. saisonnalité de présence des microalgues en nombre (A) et en volume (B) sur les différentes stations et sur l'ensemble des sites (C).....	62
Figure 42. saisonnalité de présence : des diatomées en nombre (A), en volume (B), des dinophycées en volume (C), des diatomées et des dinophycees (tous sites confondus) (D), de <i>Skeletonema costatum</i> en nombre (E).....	64
Figure 43. Représentation en pourcentage des effectifs des classes de microphytes dans les pertuis charentais entre 2000 et 2010.....	65
Figure 44. Nombre de blooms phytoplanctoniques annuels relevés sur les stations rephy des pertuis charentais (Eperon, Cornard, Boyard et Auger).....	65
Figure 45. Blooms phytoplanctoniques enregistrées dans le cadre du réseau REPHY sur 4 stations des pertuis Charentais (Auger, Boyard, Eperon et le Cornard) entre 2000 et 2011 (gauche) ; résultats sur l'ensemble de la période (droite).....	66
Figure 46. Abondance cumulée des 3 principales classes de phytoplancton dans les numérations algales entre 2000 et 2010 dans les pertuis charentais (cumul des 4 sites : Auger, Yves, Boyard et Aiguillon).....	66
Figure 47. Abondance de la classe des chlorophycées au cours des années (A), des saisons (b) et sur les quatre sites du réseau REPHY (c).....	67
Figure 48. Représentation graphique d'une analyse en composantes principales réalisée à partir des descripteurs environnementaux régionaux (Tableau 3).....	71
Figure 49. Sites de prélèvements hydrobiologiques de flore totale : Eperon (EP), Cornard (CO) et Boyard (BO), de flore partielle : Filières-ouest (FW), Carrelère (CA) et stations rémoula (Roulières, Aiguillon, Marsilly, Yves et Boyard).....	78
Figure 50. Taux de croissance journalier moyen en poids sec (A) et longueur (B), à l'échelle de l'année, pour les 3 sites d'étude : Aiguillon (AI), Boyard (BO) et Yves (YV).....	79
Figure 51. Croissance en longueur et poids de moules des sites d'Aiguillon, Boyard et Yves entre 2000 et 2011.....	81

Figure 52. relation entre salinité et chlorophylle a (échelle de l'année pour chacun des sites)(R2 = -0,573).....	82
Figure 53. Relation entre temperature et taux de croissance en longueur (échelle de l'année pour chacun des sites)(R2 = -0,541).	82
Figure 54. Analyse en composantes principales à l'échelle de l'année.....	83
Figure 55. Analyse en composantes principales; representation des axes 1-2 et projection des variables environnementales constitutives ; les deux variables de croissances sont supplémentaires ; barycentres pour les sites et les années.....	84
Figure 56. Relation entre temperature et salinité – hiver ($R = -0,729 ; p=0,0000$).....	86
Figure 57. ACP saisonnière : l'hiver; representation de 54% de la variabilité environnementale sur les axes 1-2. projection des variables environnementales constitutives ; les deux variables de croissances sont supplémentaires ; barycentres pour les 3 sites et les 11 hivers de l'étude.....	87
Figure 58. Relation entre le taux de croissance printanier et la ressource trophique (nombre d'algues), avec (haut) et sans (bas) la station d'aiguillon en 2007 (AI-07).....	88
Figure 59. ACP saisonnière : le printemps; représentation de 54% de la variabilité environnementale sur les axes 1-2. Projection des variables environnementales constitutives ; les deux variables de croissances sont supplémentaires ; barycentres pour les 3 sites et les 11 printemps de l'étude.....	89
Figure 60. ACP saisonnière : l'été; representation de 54% de la variabilité environnementale sur les axes 1-2. projection des variables environnementales constitutives ; les deux variables de croissances sont supplémentaires ; barycentres pour les 3 sites et les 11 « été » de l'étude.....	90
Figure 61. Relation entre le taux de croissance journalier (en poids sec) et la ressource trophique en algues (Rephy); $R = -0,473 ; p=0,0094 ; R2 = 22,4$; les 3 points isolés sont par ordre croissant : AI-01, 02 et 06.	91
Figure 62. ACP saisonnière : l'automne; représentation de 54% de la variabilité environnementale sur les axes 1-2. projection des variables environnementales constitutives ; les deux variables de croissances sont supplémentaires ; barycentres pour les 3 sites et les 11 automnes de l'étude.	91
Figure 63. Importance du vent de nord en automne pour améliorer la croissance.....	92
Figure 64. Relation entre température et vent de nord – automne.	92
Figure 65. placement du pieu expérimental du réseau remoula (cercle bleu) au sein des bouchots ; distance entre le site du resau remoula et les stations hydrobiologiques de proximité (rephy).....	106

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Cycles d'élevage et échantillonnage au cours des 11 années de l'étude.....	11
Tableau 2. Variables biologiques de l'étude.....	12
Tableau 3. Les descripteurs de l'étude : qualification des sites, descripteurs généraux aux pertuis et spécifiques aux sites d'élevage. MF = origine Météo-France ; MH = simulation modèle hydrodynamique des pertuis charentais ; HF :Hydro-EauFrance et Cassous, 2004 pour les régimes météo généraux	15
Tableau 4. comparaison relative (échelle 1-5) des performances de croissance à l'échelle de l'année entre 2000 et 2010 et entre les stations.	21
Tableau 5. Comparaison des taux de croissance saisonniers (longueur et poids) selon les 5 stations et les 11 années.....	23
Tableau 6. comparaison relative (échelle 1-5) des performances de croissance à l'échelle des saisons entre 2000 et 2010.	26
Tableau 7. comparaison relative (échelle 1-5) des performances de croissance à l'échelle des saisons des différents sites d'élevage.....	27
Tableau 8. Analyse de variance de l'indice de Walne et Mann selon 3 facteurs : années (11), sites (5) et saison (4).	29
Tableau 9. Analyse de la variance de l'indice de qualité (WM) selon les facteurs sites, année et leurs interactions. Récapitulatif des 4 ACP saisonnières.	30
Tableau 10 ; Classement de l'indice de Walne et Mann selon les années (tests des étendues multiples par la méthode LSD - Statgraphics).	33
Tableau 11. Coefficient de corrélation entre les 3 variables de la croissance. données par saison (11 années).	37
Tableau 12. Altitudes des pieux et des poches d'élevage expérimental selon les sites. Toutes les altitudes sont données par rapport au « 0 » des cartes marines.....	40
Tableau 13. Orientation principale annuelle des vents entre 2000 et 2011 dans les pertuis charentais (d'après les hodographes). l'orientation du vent est définie par son origine.....	48
Tableau 14. Caractérisation météorologique des années d'étude.....	49
Tableau 15. Temps et pourcentage d'immersion selon les sites d'élevage.....	53
Tableau 16. Principaux résultats issus des ACP décrivant les 4 saisons (H, P, E et A) pour les taux de croissance saisonnier (TCJ_S) et l'indice de Walne et Mann saisonnier (WM_S) et première interprétation.....	72
Tableau 17. Relations entre les variables biologiques (Taux de croissance Journalier – TCJ- et indice de Walne et Mann –WM-) et les descripteurs de l'environnement (Tableau 3) à travers ACP et matrices de corrélations (Statgraphics Centurion XV II).	75

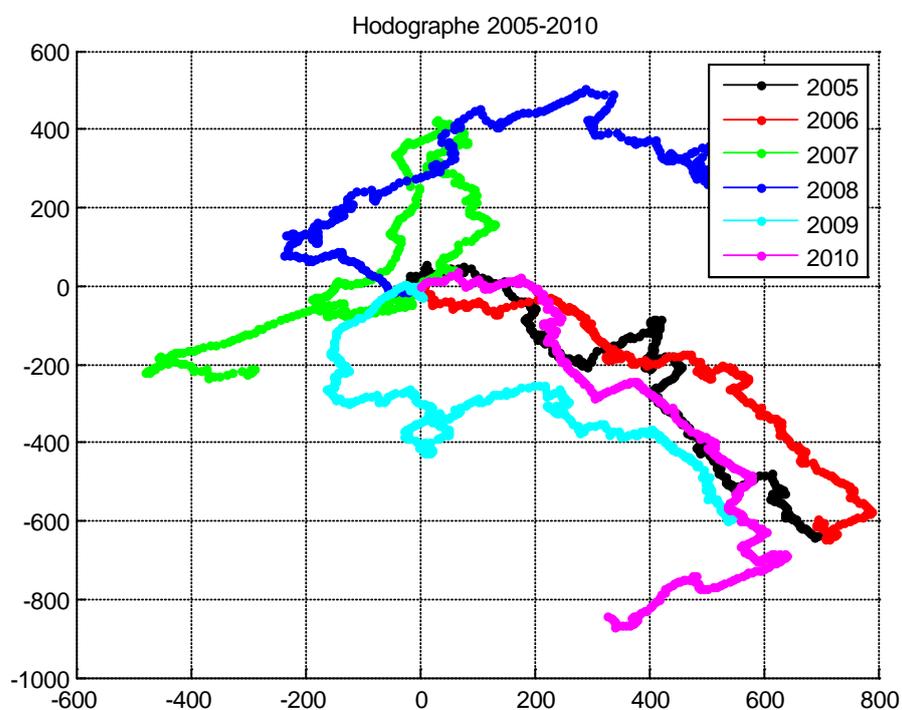
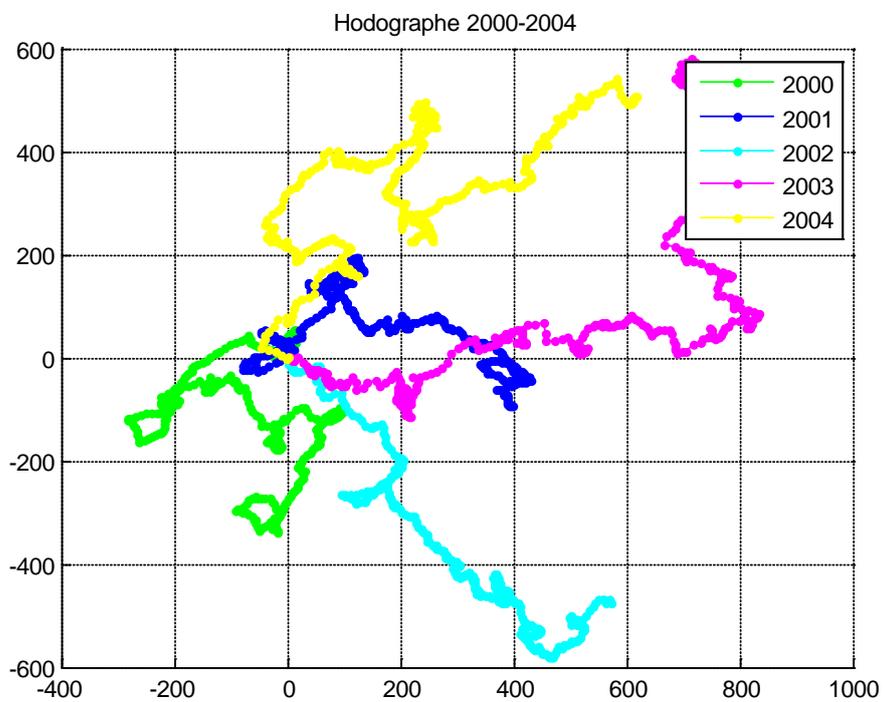
Tableau 18. analyse de variance des taux de croissance en longueur et en poids sec aux différentes saisons (hiver, printemps, été, automne) selon les stations (Boyard, Yves et Aiguillon) et les années de mesure (2000-2010).....	80
Tableau 19. Matrice de corrélation entre les variables hydrobiologiques (REPHY) et les variable de croissance – echelle annuelle (les corrélation significatives sont en gras).....	81
Tableau 20. corrélations significatives entre les performances de croissance et les descripteurs de l’environnement. Analyse par saison (3 sites d’élevage).....	85
Tableau 21. Matrice de corrélation entre les variables de l’étude au cours de l’hiver.....	86
Tableau 22. Matrice de corrélation entre les variables de l’étude au cours du printemps.....	87
Tableau 23. Matrice de corrélation entre les variables de l’étude au cours de l’été.....	89
Tableau 24. Matrice de corrélation entre les variables de l’étude au cours de l’automne.....	90
Tableau 25. Classement des années en taux de croissance annuels de longueur (TCJ-L) et de poids (TCJ-P) (tableau de gauche) et caracteres climatiques dominants (tableau droite)....	98
Tableau 26. caractéristiques des sites; nombre de pieux de bouchots inscrits dans un rayon de 150 mètres autour du pieu expérimental et distance entre le pieu expérimental et la station rephy de référence.....	104

ANNEXES

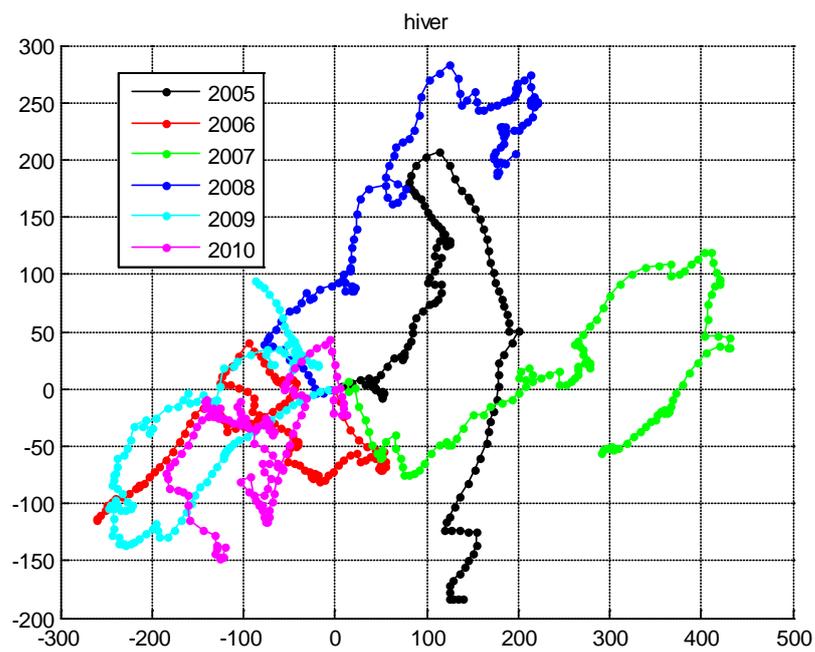
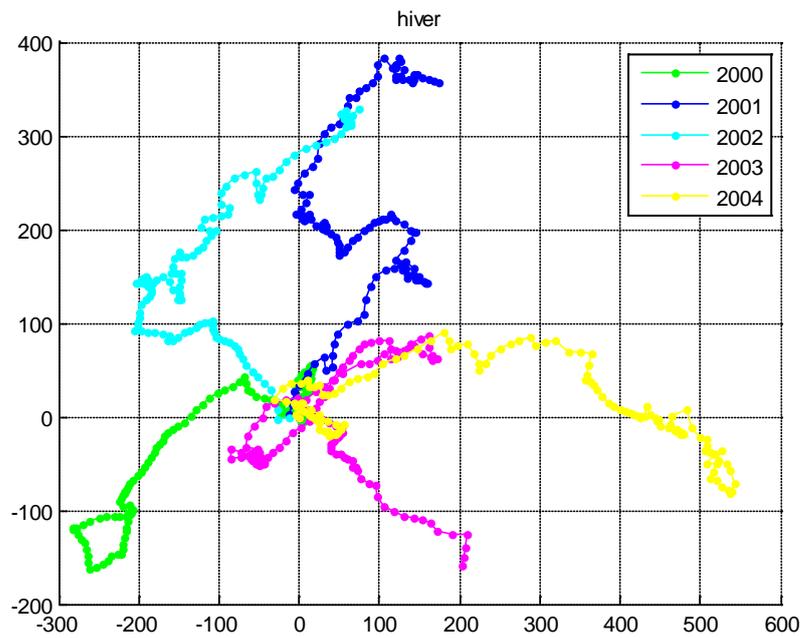
Annexe 1. Hodographes 2000-2010 (vents Arpège).....	128
Annexe 2. Temps de renouvellement des masse d'eau dans les pertuis charentais (d'après Stanisière et al., 2006 et com. pers.)	133
Annexe 3. Représentation (en nombre par année) des principaux taxons de diatomées comptées dans la flore totale pendant 11 ans, sur 4 stations de pertuis charentais. Les chiffres en haut de chaque figure representent le pourcentage du taxon au sein des 20 principaux taxons de diatomées.....	135
Annexe 4. Relations entre les variables biologiques (Taux de croissance Journalier – TCJ- et indice de Walne et Mann –WM-) et les descripteurs de l'environnement. Résultats obtenus par des ACP et matrices de corrélations (Statgraphics Centurion XV II).....	137
Annexe 5. Estimation des contributions des diverses sources de nourriture des mollusques du pertuis breton par analyse de la composition isotopique (Richard, Blanchard et al. 2000)	138

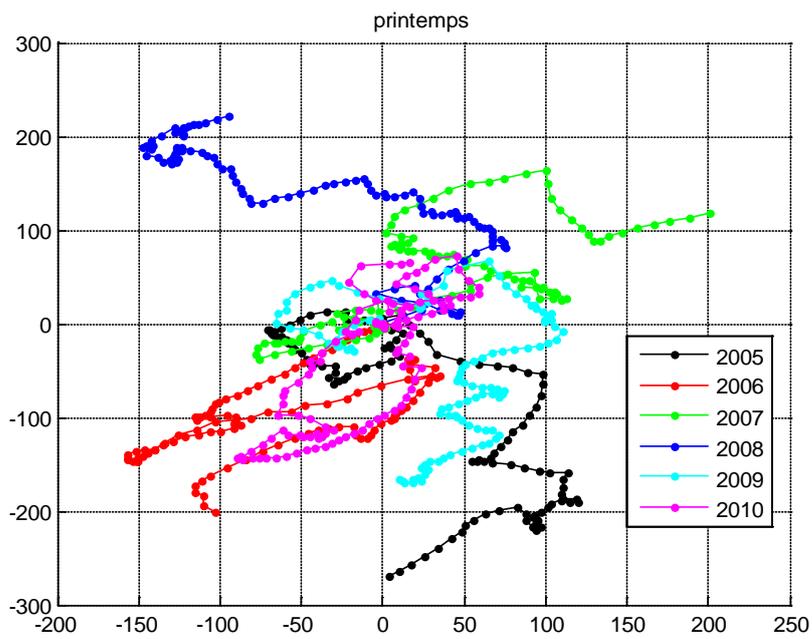
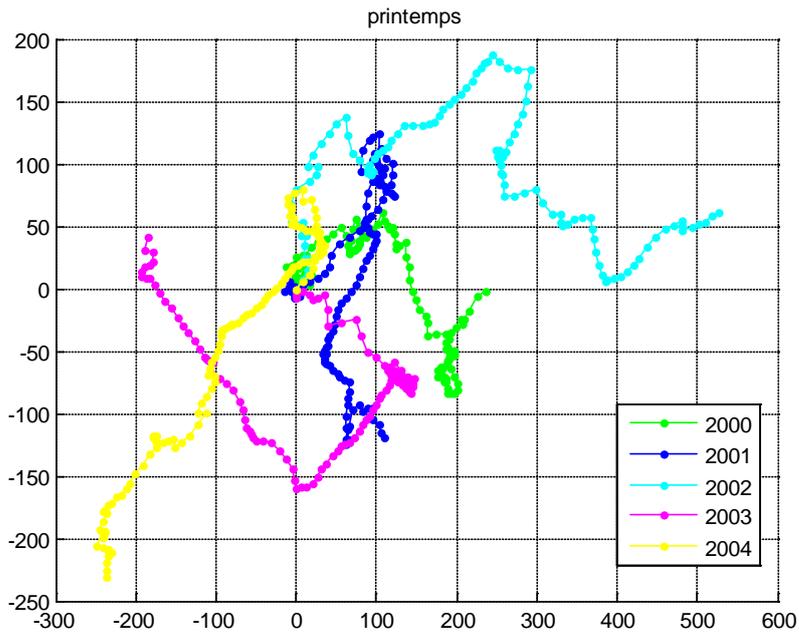
ANNEXE 1. HODOGRAPHES 2000-2010 (VENTS ARPEGE)

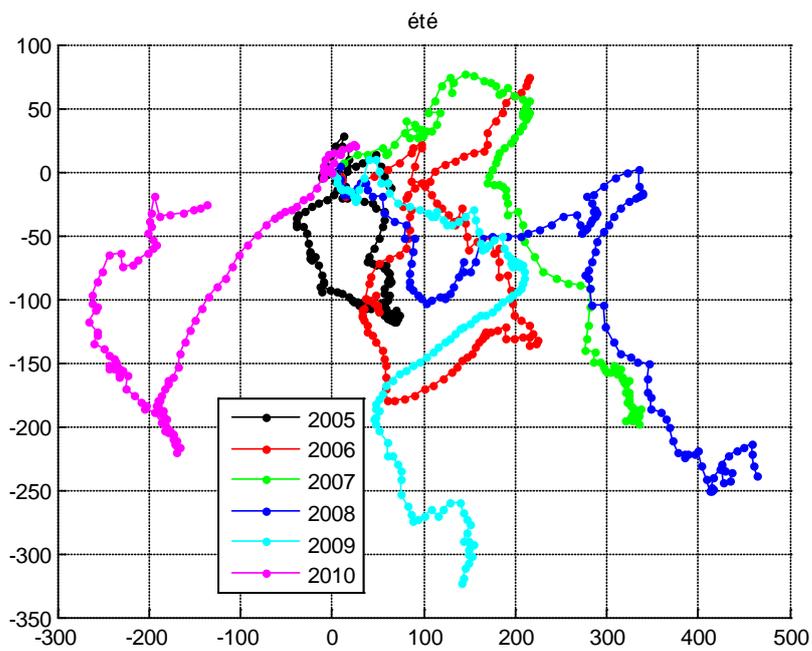
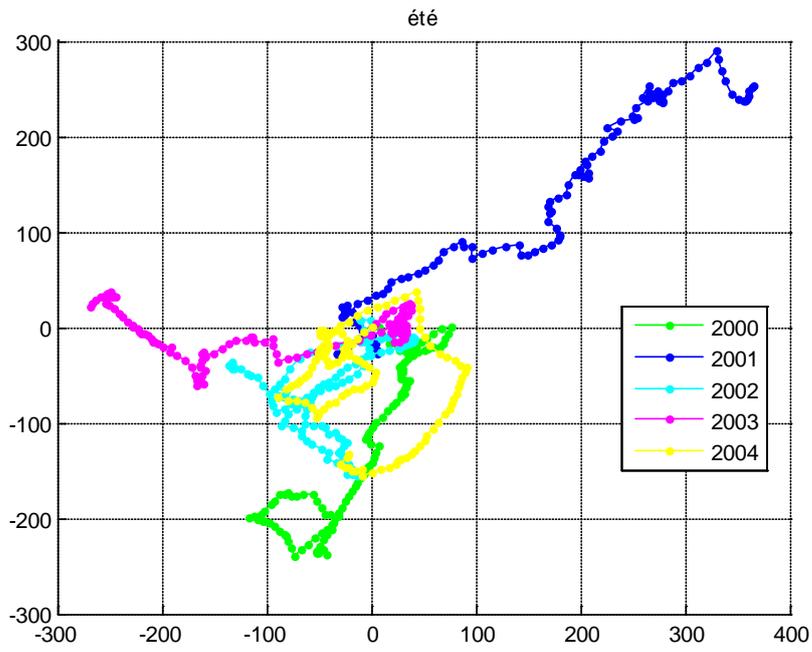
Par années

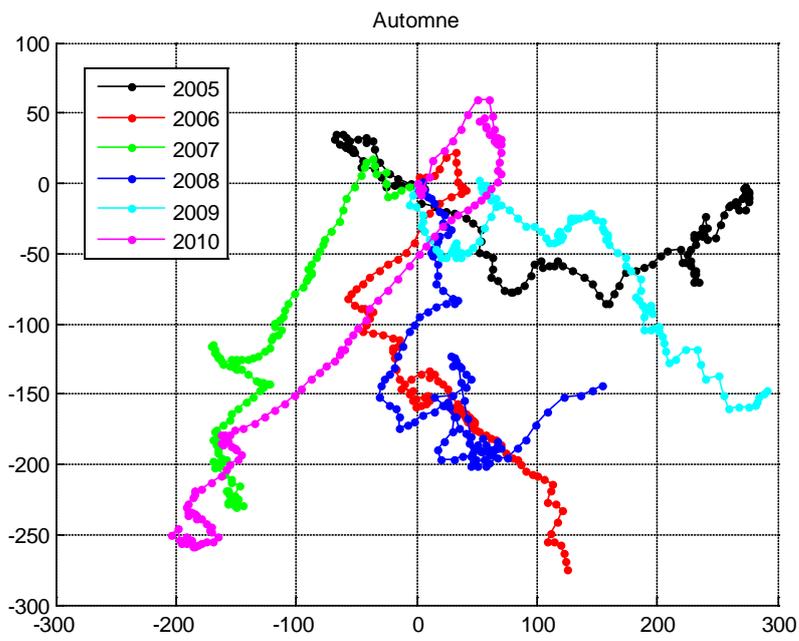
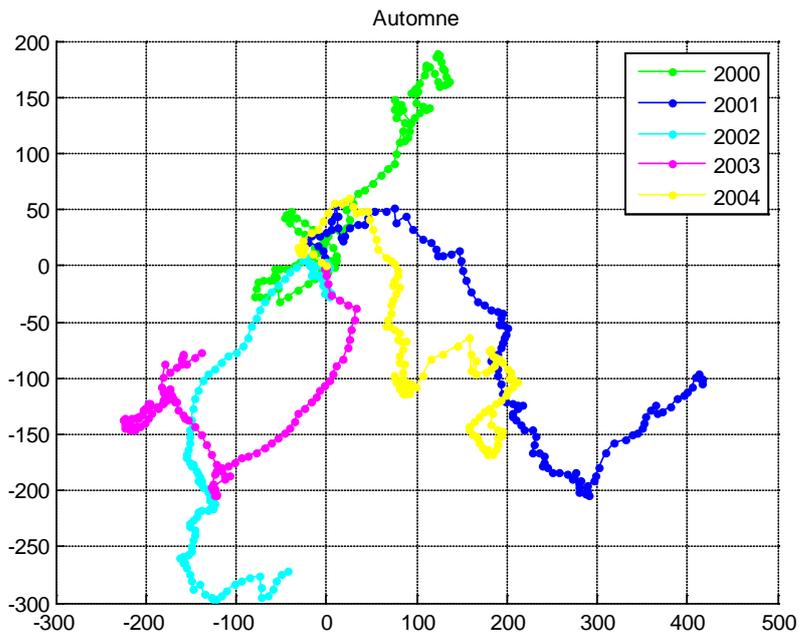


Saisons



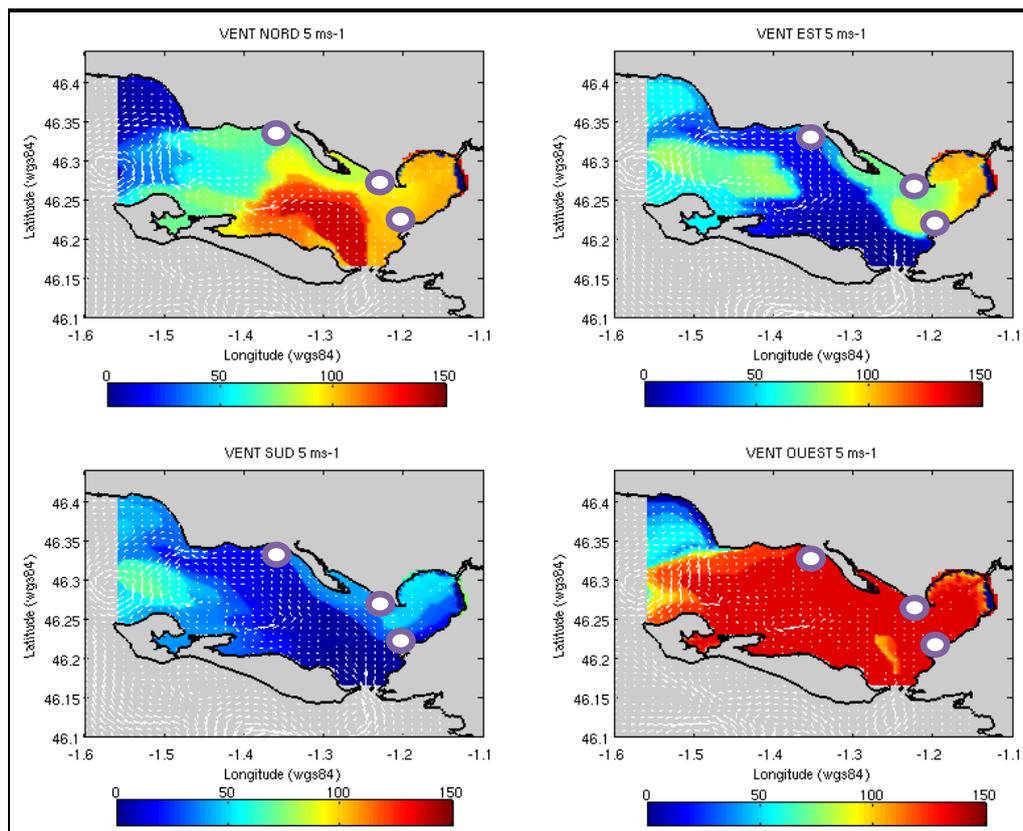


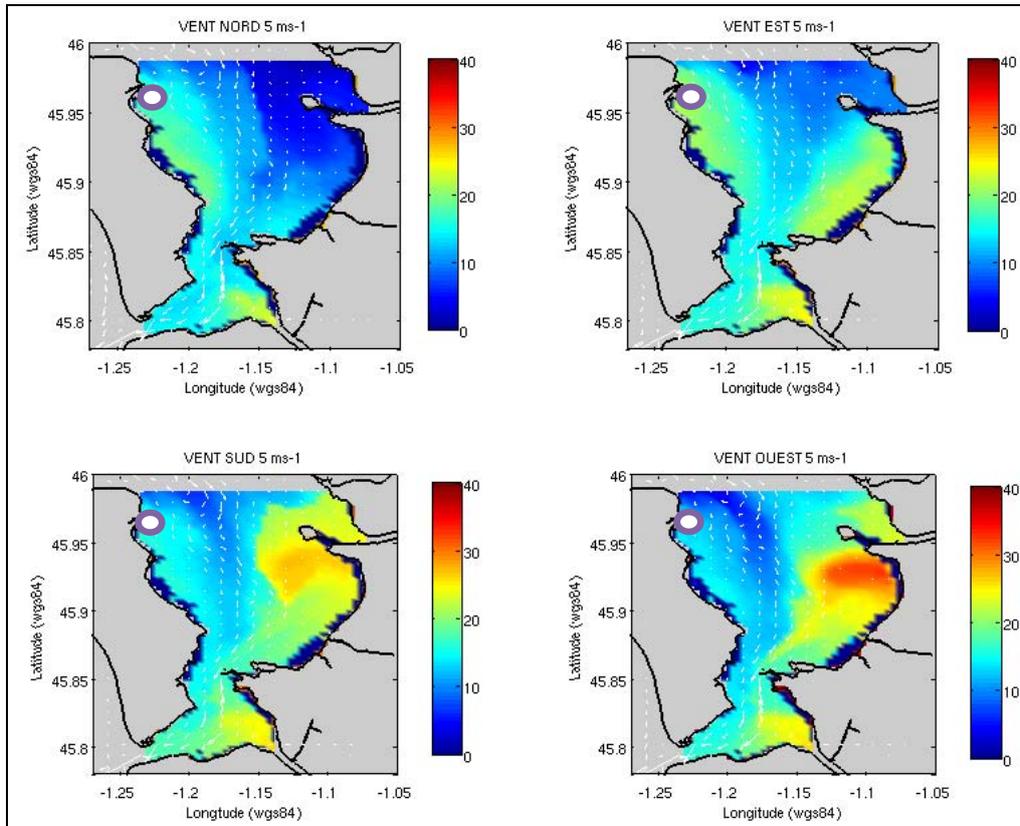
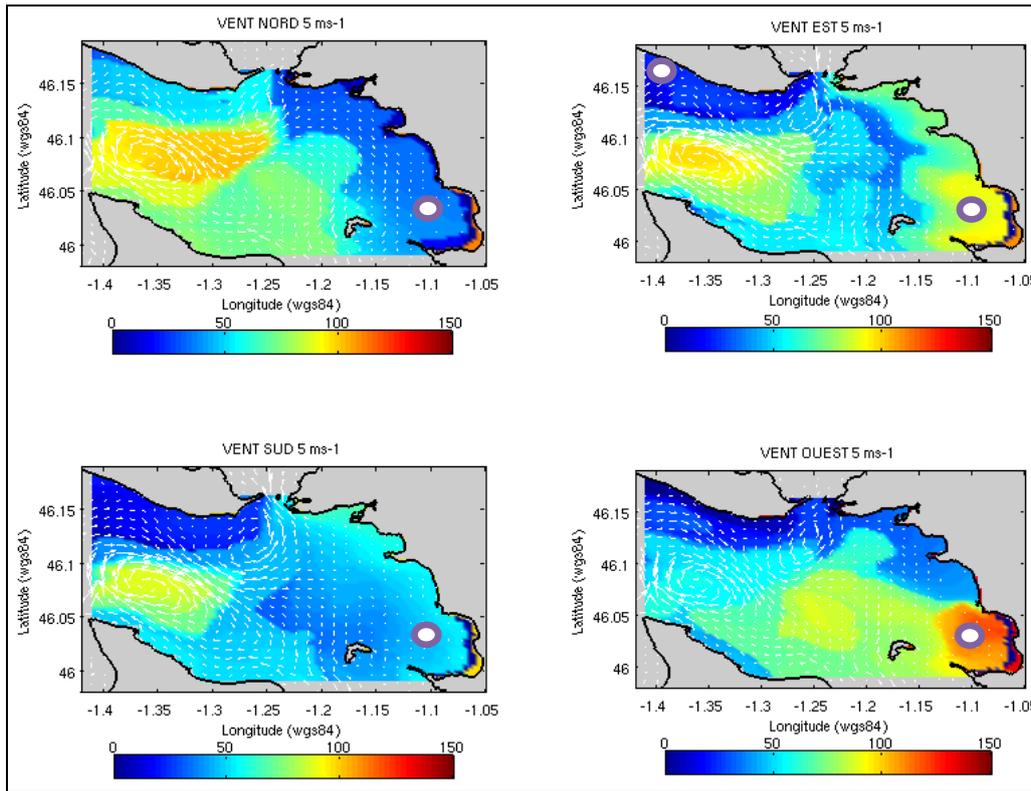




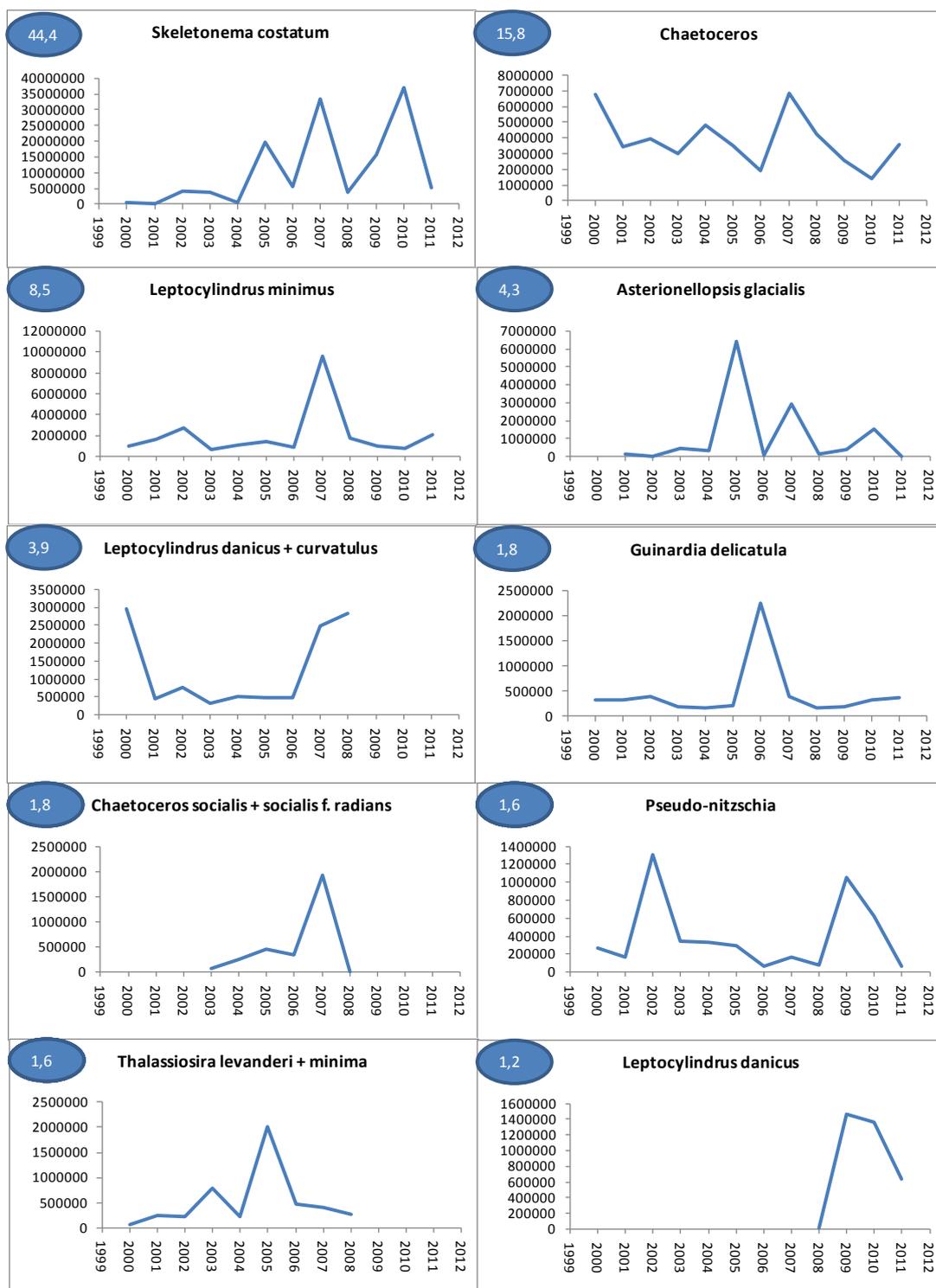
Annexe 2. Temps de renouvellement des masse d'eau dans les pertuis charentais (d'après Stanisière et al., 2006 et com. pers.)

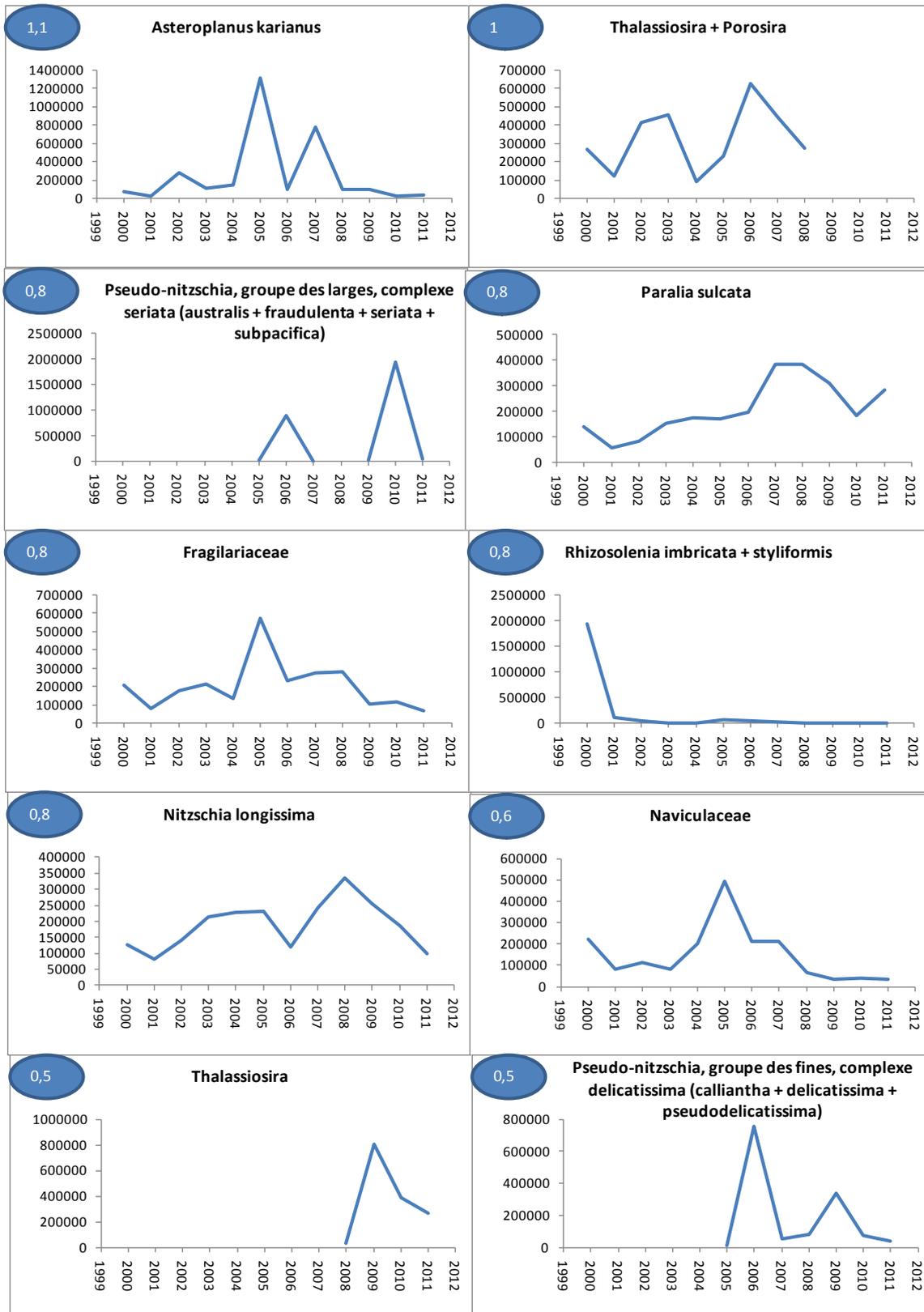
Le temps de renouvellement de la masse d'eau est une donnée physique qui représente le temps au bout duquel la concentration en traceur tombe définitivement en dessous de 37% (Stanisière et al., 2006). Un exemple est pris ici d'un vent constant de 5 m/s pour les 4 directions de vent : Nord, Est, Sud et Ouest.





ANNEXE 3. REPRESENTATION (EN NOMBRE PAR ANNEE) DES PRINCIPAUX TAXONS DE DIATOMÉES COMPTÉES DANS LA FLORE TOTALE PENDANT 11 ANS, SUR 4 STATIONS DE PERTUIS CHARENTAIS. LES CHIFFRES EN HAUT DE CHAQUE FIGURE REPRESENTENT LE POURCENTAGE DU TAXON AU SEIN DES 20 PRINCIPAUX TAXONS DE DIATOMÉES.



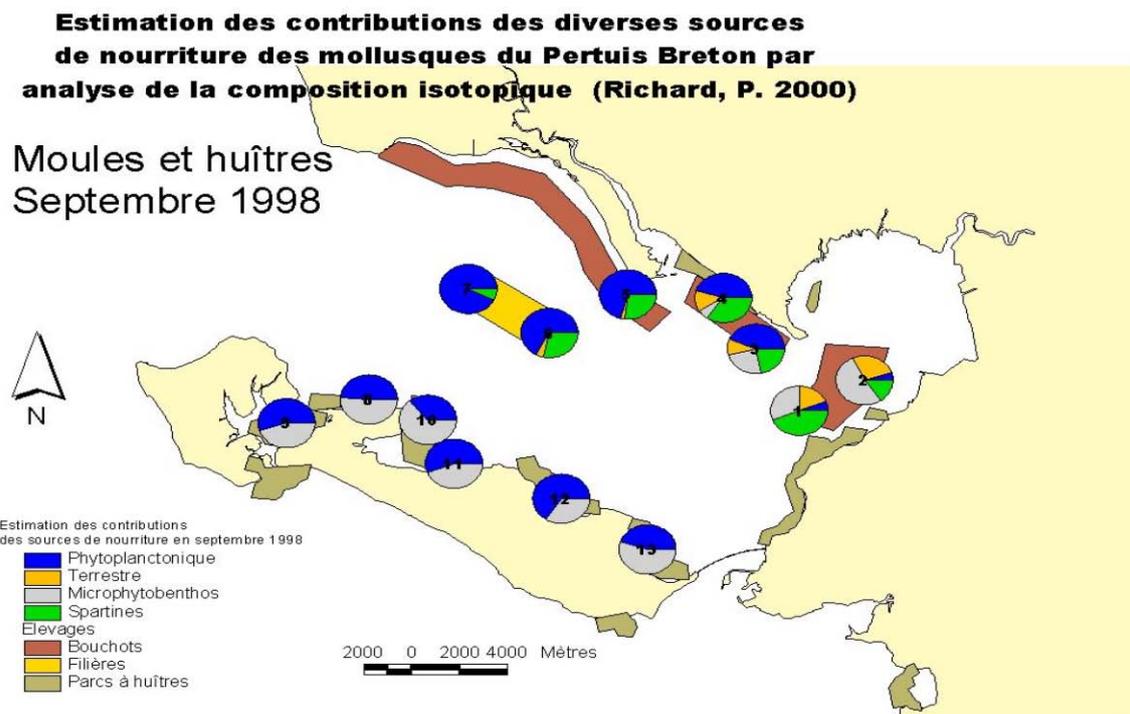


ANNEXE 4. RELATIONS ENTRE LES VARIABLES BIOLOGIQUES (TAUX DE CROISSANCE JOURNALIER – TCJ- ET INDICE DE WALNE ET MANN –WM-) ET LES DESCRIPTEURS DE L'ENVIRONNEMENT. RESULTATS OBTENUS PAR DES ACP ET MATRICES DE CORRELATIONS (STATGRAPHICS CENTURION XV II).

Saison	variable	pds variable par saison	site	axe	Projection sur l'axe	Représentation de l'axe (%)	Relation variables environnementales et variables biologique supplémentaires	poids de la relation (dans la saison)	poids de la relation (dans l'année)
P	TCJ	0,52	RO	1	0,6	38	eau marine, peu d'apport d'eau douce des fleuves internes et externes et vents de sud faibles	0,23	0,12
P	TCJ	0,52	MA	3	0,67	15	temp fortes, lmax fort et apport Lay faibles	0,10	0,05
P	TCJ	0,52	AI	3	-0,48	15	vents de sud	-0,07	-0,04
P	TCJ	0,52	YV	2	-0,46	20	vents de sud	-0,09	-0,05
P	TCJ	0,52	BO	2	-0,45	19	vents du sud et vents faibles et temp élevées	-0,09	-0,04
P	WM	0,28	RO	2	0,69	17	vents du sud et vents faibles	0,12	0,03
P	WM	0,28	MA			<i>p.r.</i>	<i>non représenté de façon significative</i>	<i>p.r.</i>	<i>p.r.</i>
P	WM	0,28	AI	1	-0,61	38	apport en eau douce des fleuves	-0,23	-0,06
P	WM	0,28	YV	3	-0,53	15	mieux si courants faibles	-0,08	-0,02
P	WM	0,28	BO	3	-0,62	15	vents du sud et vents faibles	-0,09	-0,03
E	TCJ	0,26	RO	4	0,58	8	vents de sud	0,05	0,01
E	TCJ	0,26	MA	2	0,43	25	pas d'eau douce de la Charente et de la Sèvre, mais de Garonne et courants forts	0,11	0,03
E	TCJ	0,26	AI	3	0,61	15	vent de Nord et vent forts avec courants faibles	0,09	0,02
E	TCJ	0,26	YV	2	-0,37	23	courants plutôt forts, pas d'apports de Charente et apports du Lay ?	-0,09	-0,02
E	TCJ	0,26	BO	2	0,33	23	courants plutôt forts, pas d'apports de Charente et apports du Lay ?	0,08	0,02
E	WM	0,32	RO	1	0,77	39	apports en eau douce et débits de fleuves	0,30	0,10
E	WM	0,32	MA			<i>p.r.</i>	<i>non représenté de façon significative</i>	<i>p.r.</i>	<i>p.r.</i>
E	WM	0,32	AI	1	0,49	36	apports en eau douce et débits de fleuves	0,18	0,06
E	WM	0,32	YV			<i>p.r.</i>	<i>non représenté de façon significative</i>	<i>p.r.</i>	<i>p.r.</i>
E	WM	0,32	BO	1	0,56	36	débit des fleuves internes et externes	0,20	0,06
A	TCJ	0,15	RO	2	0,31	13	avec les forts courants et les vents de Nord	0,04	0,01
A	TCJ	0,15	MA			<i>p.r.</i>	<i>non représenté de façon significative</i>	<i>p.r.</i>	<i>p.r.</i>
A	TCJ	0,15	AI			<i>p.r.</i>	<i>non représenté de façon significative</i>	<i>p.r.</i>	<i>p.r.</i>
A	TCJ	0,15	YV	1	-0,65	54	salinité, pas d'eau douce et le vent d'Est	-0,35	-0,05
A	TCJ	0,15	BO	2	0,56	17	augmente avec faible vent de Nord et faible courant	0,10	0,01
A	WM	0,25	RO	1	-0,4	61	augmente avec la salinité et vent de Nord	-0,24	-0,06
A	WM	0,25	MA	2	-0,38	16	augmente avec le vent de Nord	-0,06	-0,02
A	WM	0,25	AI	2	-0,73	13	augmente avec le vent de Nord	-0,09	-0,02
A	WM	0,25	YV	1	-0,43	54	salinité, pas d'eau douce et le vent d'Est	-0,23	-0,06
A	WM	0,25	BO	2	0,56	17	augmente avec faible vent de Nord et faible courant	0,10	0,02
H	TCJ	0,07	RO	1	-0,79	48	salinité forte ; WM et TCJ s'opposent sur axe 1	-0,38	-0,03
H	TCJ	0,07	MA	2	-0,5	20	Débits de Garonne et vent de N et E	-0,10	-0,01
H	TCJ	0,07	AI	2	0,37	18	forts vents d'Ouest	0,07	0,00
H	TCJ	0,07	YV	2	-0,44	23	vents forts d'O et de S (avec pluie)	-0,10	-0,01
H	TCJ	0,07	BO	1	-0,34	39	salinités fortes	-0,13	-0,01
H	WM	0,15	RO	1	0,53	48	l'eau douce , apports fleuve	0,25	0,04
H	WM	0,15	MA	1	0,46	45	eau douce (et Loire, mais pas Garonne !!)	0,21	0,03
H	WM	0,15	AI	1	0,58	46	eau douce (et Loire, mais pas Garonne !!)	0,27	0,04
H	WM	0,15	YV			<i>p.r.</i>	<i>non représenté de façon significative</i>	<i>p.r.</i>	<i>p.r.</i>
H	WM	0,15	BO	1	0,52	39	débits forts et courants forts	0,20	0,03

ANNEXE 5. ESTIMATION DES CONTRIBUTIONS DES DIVERSES SOURCES DE NOURRITURE DES MOLLUSQUES DU PERTUIS BRETON PAR ANALYSE DE LA COMPOSITION ISOTOPIQUE (RICHARD, BLANCHARD ET AL. 2000)

« Les ressources trophiques des moules de bouchots et de filières de la Baie de l'Aiguillon ont été caractérisées et leur contribution à la nourriture des Mollusques estimée par traçage isotopique naturel. La matière organique terrigène a un rôle relativement mineur, elle contribue en moyenne à un peu plus de 10 % des ressources des moules, avec une importance un peu plus grande en hiver (15 à 30 %). Une forte variabilité saisonnière est observée dans l'utilisation des sources océaniques et littorales benthiques (microphytobenthos et détritiques de spartines,). Globalement, les ressources trophiques viennent principalement des productions benthiques pour les moules élevées sur bouchots, surtout dans le Sud de la Baie, et du phytoplancton pour les moules élevées sur filières » (Richard, Blanchard et al. 2000).



« Les deux types de culture (sur bouchots et sur filières) ont des sources de nourriture bien distinctes seulement au printemps avec une influence forte du phytoplancton océanique sur les filières et des productions benthiques sur les bouchots, mais avec là une influence des détritiques terrestres remis en suspension qui explique les valeurs appauvries en ^{13}C et enrichies en ^{15}N par rapport aux filières. Pendant l'été, les conditions météorologiques plus calmes favorisent l'utilisation de ressources beaucoup plus localisées, ce qui entraîne des signatures

caractéristiques des stations, alors qu'en hiver l'augmentation de l'hydrodynamisme a l'effet inverse ; Ceci montre bien l'utilité de considérer à la fois les différentes sources à une échelle locale et les conditions hydrologiques du système pour estimer les ressources trophiques réellement utilisées dans ce type d'écosystème » (Richard, Blanchard et al. 2000).

