

Universidad
de Las Palmas
de Gran Canaria

Universitat
de les Illes
Balears

Université
de Liège
(coordinateur)

Université
de Bretagne
Occidentale Brest

Université
de Corse
Pascal Paoli

Université
Pierre et Marie Curie
Paris VI

Universidade
Nova de Lisboa

Universitat Politècnica
de Catalunya

Universidade Técnica
de Lisboa

***DIPLOME D'ETUDES APPROFONDIES
EUROPEEN
EN MODELISATION DE L'ENVIRONNEMENT
MARIN***

SOCRATES/ERASMUS

**SIMULATION DES TRAJECTOIRES DE MATIERE ORGANIQUE
DANS LE PERTUIS BRETON. COUPLAGE DE
L'HYDRODYNAMISME ET D'UN MODELE ECOPHYSIOLOGIQUE DE
M.edulis.**

PALLAS SANZ, ENRIC
Année 2000/2001

responsable de stage: C. Bacher

Diploma Eruditionum Altarum

DEEA
europaeum

Résumé.

Le Pertuis Breton est un bassin macrotidal avec une importante exploitation mytilicole (*M.edulis*) des zones intertidales. En 1991, un parc de 240 filières a été immergé au centre du bassin. La concession pourra être augmentée, sur la base des résultats des études sur la potentialité mytilicole du site. Afin de connaître quelles sont les sources de nourriture arrivant aux moules des filières, ainsi que le devenir de ces particules dans le parc, deux modèles déterministes ont été développés; a) un modèle des trajectoires des particules de matière organique basé sur le modèle hydrodynamique SAM-2D, b) un modèle couplé, de l'hydrodynamisme local et de la croissance de *M.edulis*. Les résultats des simulations du modèle des trajectoires, montrent qu'après 5 jours, toutes les particules de matière organique qui arrivent aux filières, sont d'origine océanique (phytoplancton océanique). Par contre, les moules cultivées sur les zones intertidales (bouchots), reçoivent des apports différents de ce que reçoivent les filières.

Dans le parc, le modèle de déplétion permet de connaître les besoins trophiques des moules, en fonction de l'hydrodynamisme et du stock en élevage. Les simulations montrent une déplétion journalière très faible pour la situation actuelle du parc des filières. Cependant, une augmentation de 20 fois la biomasse du stock en élevage, produit une réduction de la concentration du phytoplancton de 2 % à 20 % dans la concession, dépendant de la saison. Les simulations montrent aussi la potentialité mytilicole élevée du Pertuis Breton, qui est en concordance avec les résultats trouvés dans la bibliographie.

Mots clés: *M. edulis*, potentialité mytilicole, déplétion, trajectoires, modélisation.

Abstract

The "Pertuis Breton" is a macrotidal estuary with an important mollusc exploitation of the inter-tidal zones. The main cultivated specie is *M.edulis*. In 1991, 250 long lines have been immersed in the centre of the bay. It will be able to extend the concession on the basis of the studies results about the trophy capacity of the "Pertuis Breton". Two deterministic models have been developed for to determining the geographical origin of the matter organic sources for the long line mussels culture, and the destine of this matter in the culture park:a) a model of trajectories of the organic matter particles, b) a coupled model of the hydrodynamic conditions and a ecophysiological model of the mussel growth. The result's simulations of the trajectories model reveals, after 5 days, that all particles of the organic matter witch arrive to the park, are the oceanic phytoplankton.

On the other hand, the cultivated mussels on "bouchots" receive the different supplies. In the mussel's park, the depletion model allows to known mussel's trophy provides, in function of the hydrodynamic and the biomasse of cultivated stock. The simulations shown a very weak day depletion for the present situation. However, an increase of 20 times the biomasse for this cultivated stock, produce a phytoplankton concentration reduction, in the concession, about to 2-20 % (in function of the season). The simulation also shown, the high trophy capacity in the "Pertuis Breton" which are in agree with the bibliography's studies.

Key words: *M. edulis*, trophy capacity, depletion, trajectories, modelling

I Introduction	2
II Le Pertuis Breton. Description du site.	3
II.1 Description géographique.	3
II.2 La mytiliculture sur filières et bouchots.	3
II.3 Description hydrodynamique.	4
II.4 Description hydrobiologique.	9
III Simulation des trajectoires de matière organique dans le Pertuis Breton.	12
III.1 Introduction	12
III.2 Modèle SAM-2D (Simulation d'Advection Multivariable 2D).	12
III.3 Modèle Hydrodynamique de SAM-2D	13
III.3.a Equations.	13
III.3.b Configuration de la grille de calcul.	15
III.3.c SAM-2D dans Marennes-Oléron.	16
III.3.d Conditions aux limites.	17
III.3.e Restrictions du modèle.	17
III.3.f Première validation du modèle.	18
III.4 Modèle de trajectoires et trajectoires inverses des particules dans le Pertuis.	19
III.4.a Modèle des trajectoires (en sens normal).	19
III.4.b Modèle des trajectoires inverses. Le devenir des particules de matière organique dans le Pertuis Breton.	23
III.5 Conclusion.	25
IV Modèle de déplétion de la nourriture du parc de filières du Pertuis Breton. Couplage hydrodynamisme-écophysiologie de <i>M. edulis</i>	28
IV.1 Introduction	28
IV.2 Modèle de transport particulaire 2D.	28
IV.2.a Equations	28
IV.2.b Discrétisation de l'équation du transport.	29
IV.2.c Construction de la grille. Choix du pas de temps (Δt) et du pas d'espace (Δx).	30
IV.3 Modèle écophysiologique de <i>Mytilus edulis</i>	31
IV.3.a Introduction.	31
IV.3.b Variables forçantes ¹ et variables d'état ²	33
IV.4 Couplage Hydrodynamisme-Physiologie.	35
IV.4.a Equations.	35
IV.4.b Variables d'état et forçantes du modèle.	35
IV.4.c Schéma conceptuel du modèle couplé.	36
IV.4.d Structure du parc à filières.	36
IV.4.e Configuration de la grille de calcul.	37
IV.4.f Conditions initiales et aux limites. Définitions du pas de temps du modèle.	38
IV.4.g Les variables forçantes établissant le niveau de déplétion des moules.	39
IV.5 Résultats et discussion.	39
V Conclusion générale.	46
ANNEXE I. Équation d'advection-diffusion. Validation et résultats du modèle.	47
ANNEXE II. Modèle écophysiologique de <i>Mytilus edulis</i> . Validation du modèle dans le Pertuis Breton.	50
VI BIBLIOGRAPHIE	64

I Introduction

Le Pertuis Breton est le plus important site mytilicole de la côte française avec un production annuelle sur bouchots de 8000 tn environ et sur filières de 800 tn environ. L'hydrodynamisme du Pertuis Breton, caractérisé principalement par les courants tidaux et le courant résiduelle nord-sud, est le principal forçage du devenir de la matière organique particulaire. Deux études à différentes échelles spatiales et temporelles (fig.II-1.) sont présentées afin d'une meilleure estimation du devenir des sources de nourriture par la moule sur filière:

a) Modèle global hydrodynamique (Chap.III); simulation des trajectoires des particules de matière organique sur toute le bassin du Pertuis Breton, afin d'identifier l'origine géographique des sources de nourriture des moules des différentes zones de culture.

Échelle d'étude : $L_c \sim 50\text{Km}$ (longueur caractéristique)
 $T_c \sim 1-10$ jours (période caractéristique)

Les simulations du modèle prédisent les trajectoires inverses des particules de matière organique, c'est à dire, les points de départ des particules qui sont arrivées sur une zone du Pertuis choisi par l'utilisateur. Le modèle ne discerne pas entre la taille des différentes natures des particules de matière organique. Plusieurs heures d'arrivée seront prises pour prendre en compte le cycle de la marée. Différentes simulations réalisées, montrent l'origine des particules de matière organique dans le parc de moules à filières et pour les moules sur bouchots du Pertuis (fig.II-2).

b) Modèle local hydrobiologique (Chap.IV); couplage de la croissance de la moule *Mytilus edulis* et l'hydrodynamisme local dans le parc à filières.

Échelle d'étude: $L_c \sim 1-10$ Km
 $T_c \sim 1-12$ mois

Le modèle prédit la croissance de la chair, de la coquille et l'évolution temporelle des concentrations des sources de nourriture de la moule (phytoplancton, matière détritique et la matière total particulaire) en fonction de l'hydrodynamisme (advection + diffusion), la concentration de nourriture, la température et la biomasse du stock en élevage. L'étude de la déplétion de la nourriture en fonction du stock de moules et l'hydrodynamisme dans le parc à filières, est réalisé. Ces flux de déplétion nous fourniront une valeur de la potentialité mytilicole du Pertuis Breton à l'échelle local.

II Le Pertuis Breton. Description du site.

II.1 Description géographique.

Le Pertuis Breton est un bassin macrotidal (forts coefficients de marée) orienté vers la direction NO-SE, avec une superficie total de 350 Km² (en incluant l'anse d'Aguillon). Géographiquement situé sous le bassin de Marennes Oléron, sur la façade Atlantique Française de la Charente-Maritime (fig.I-1.), le Pertuis est limité au Nord par la côte de Vendée et au Sud par l'île de Ré (46°24'N, 1°37'O – 46°9'N, 1°7'O). Il présente une profondeur maximale de 55 m environ ('Fosse de Chevarache') et une profondeur moyenne inférieur à 10m (baie peu profonde). Dans l'anse de l'Aiguillon (à l'Est) versent ses débits la Sèvre Niortaise, Lay et divers canaux (Luçon, Curé et Vieux), en générant une zone de forte sédimentation de matériel détritique d'origine terrestre facilement remise en suspension (Gouleau, 1975).

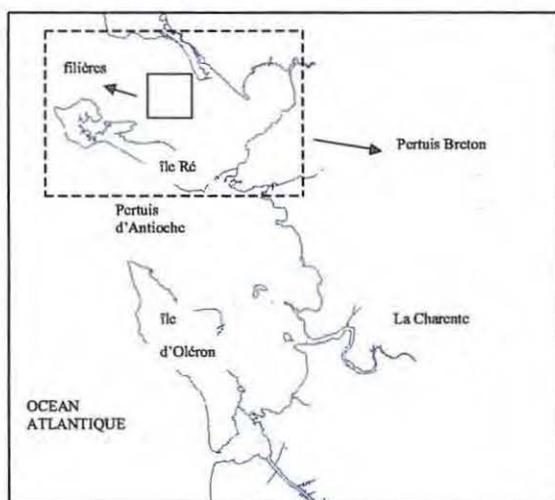


Figure II.1. Situation géographique et échelle des sites étudiés.

Deux études seront développées :
a) grande échelle (cadre en pointillé).
b) échelle local (cadre en trait continu).
(voir texte Introduction général).

II.2 La mytiliculture sur filières et bouchots.

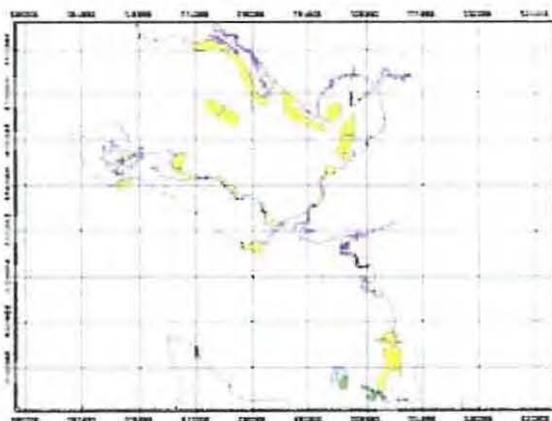


Figure II.2. Situation du parc de filières et des parcs de bouchots.

Traditionnellement, la moule (*Mytilus edulis*) a été mise en élevage sur bouchots dans les zones de balancement des marées. Pendant les dernières années, les zones intertidales pour bouchots ont été exploitées jusqu'à la saturation du Pertuis, en rendant nécessaire l'installation de parcs à filières dans eaux plus profondes et libres d'occupation.

En 1991, un parc de 250 filières de 100 m de long, est immergée dans le Pertuis Breton afin d'accroître la production annuelle du Pertuis. Le parc occupe une surface de 400 hectares (3.5Km x 1.15Km) et il est orienté vers NO (fig.II-2). Les études comparatives de deux populations de moules cultivées sur bouchots et sur filières, montrent une croissance beaucoup plus rapide de la population sur filières. Cette différence relève du temps d'immersion et de la qualité de la nourriture (Barille, 1996).

II.3 Description hydrodynamique.

Le Pertuis Breton, est soumise à un hydrodynamisme général typique d'une baie macrotidal. Les forçages principaux qui contrôlent ce type de baie peut profondes sont (Eisma et Ridderinkhof, 1997),

- 1) la marée,
- 2) les courants de densité (résiduelle),
- 3) les vagues,
- 4) les vents, et
- 5) les flux de drainage (des rivières).

Dû aux basses profondeurs ; la marée, les vagues et le vent perturberont presque toute la colonne d'eau (<10 m), en générant une élevée turbidité. Les courants de marée semi-diurnes, les vents d'ouest occasionnels et le courant Nord-Sud se présentent comme les forçages qui sont les plus influents sur la dynamique du Pertuis.

Pendant l'été, les directions des vents plus fréquents sont de l'Ouest et le Nord-Ouest (dépression à l'ouest d'Irlande). Le flux d'Ouest continue mais perturbé pendant printemps, dû la présence de nombreuses dépressions mobiles qui traversent le territoire Français. Par contre, en hiver (notamment janvier) le flux de l'Ouest disparaît et la présence des anticyclones continentaux peu mobiles donnent des vents d'Est à Nord-Est (froids). Des registres historiques de la station météorologique de la Rochelle, montrent que l'intensité des vents est maximale en hiver et printemps, avec une moyenne de 5 m/s et rafales de plus de 8 m/s.

La houle qui prédomine est principalement d'Ouest à Nord-Ouest, car la côte de Vendée limite l'existence de longs « Fetchs » vers la direction Nord, Nord-Nord-Ouest et l'île de Ré en limitant au Sud.

L'ouverture à l'océan du Pertuis (au nord de *Fier d'Ars*) et la sortie vers le Pertuis d'Antioche à travers le couloir de *La Palice* (fig.3.), génèrent une circulation résiduelle Nord-Sud responsable du transport particulaire (Bacher, 1989). Cependant, l'échelle temporelle caractéristique est très différente au phénomène de la marée mais. Il semble qu'il existe une corrélation positive entre le temps de rénovation des masses d'eau du Pertuis et le coefficient de marée (Barille,1996). Cette hypothèse doit se vérifier avec une étude hydrodynamique (ex :utilisation d'une « bouée dérivante », un traceur, etc.).

Plusieurs modèles pour exprimer l'hydrodynamisme du Pertuis ont été développés ces dernières années ; LCHF (1979), SOGREA (1986), SERPETE (1989), CREOCEAN (1991), MARS-2D (1995), SAM-2D (1999). Tous ces modèles sont basés sur les équations de Navier Stokes mais ils se différencient dans le choix des conditions aux limites et le type de maillage.

Un modèle hydrodynamique 2D déjà existant (SAM2D ;Strusky,2000) est appliqué dans le Pertuis afin de connaître les vitesses spatiales du courant (u, v) et la variation de la hauteur de la surface libre (z).

Les sorties de SAM-2D fournissent des archives hydrodynamiques utilisées par les deux modèles développés. Nous disposons d'un archive de SAM-2D de 30 jours de simulation (*tsimul*) initialisé 1 juillet 2000, avec un pas de 20 minutes (*dt*). Un total de 2160 enregistrements sont contenus dans l'archive de SAM-2D.

Le maillage utilisée par le modèle est variable dans l'espace, en présentant mailles de 500 m dans la zone du Pertuis Breton.

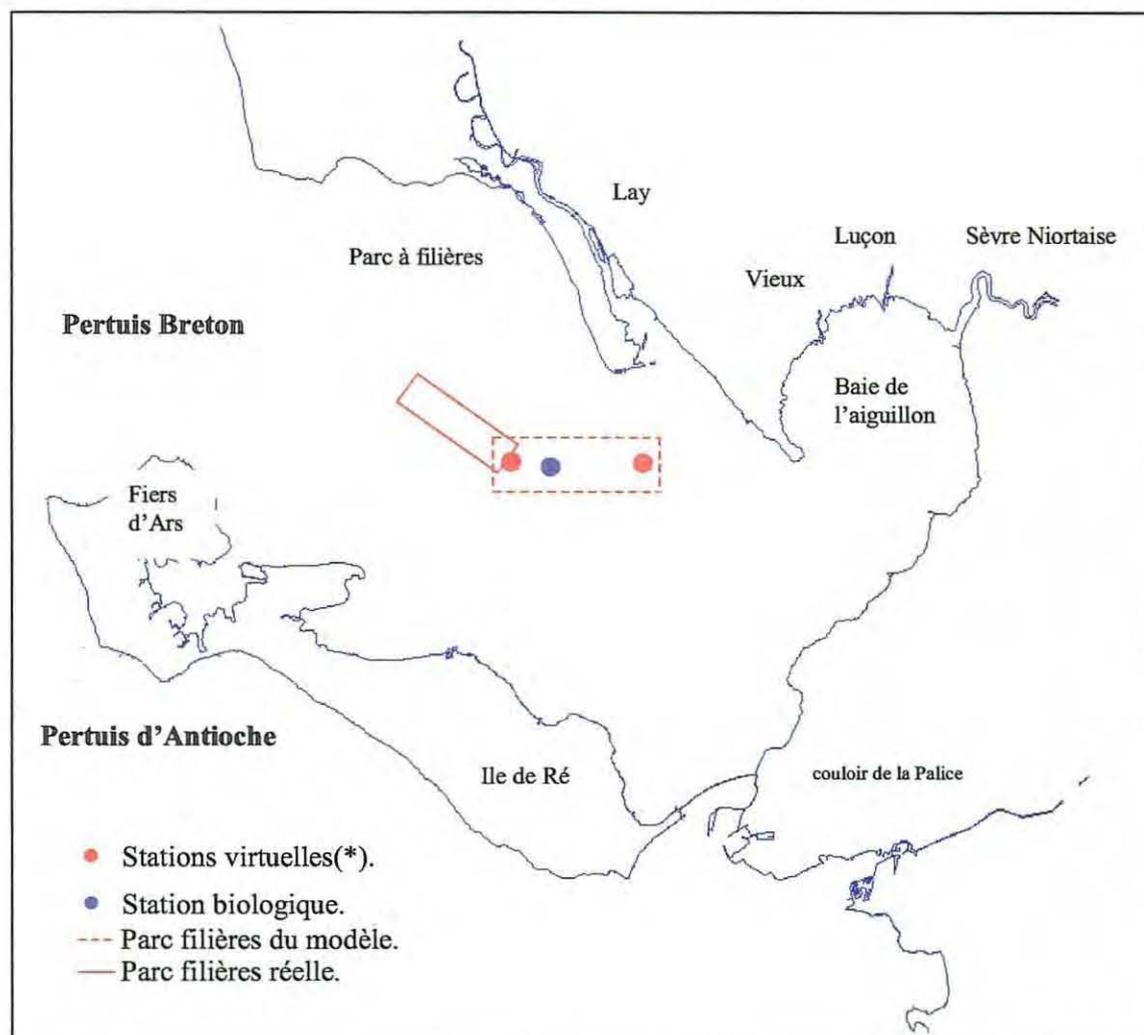
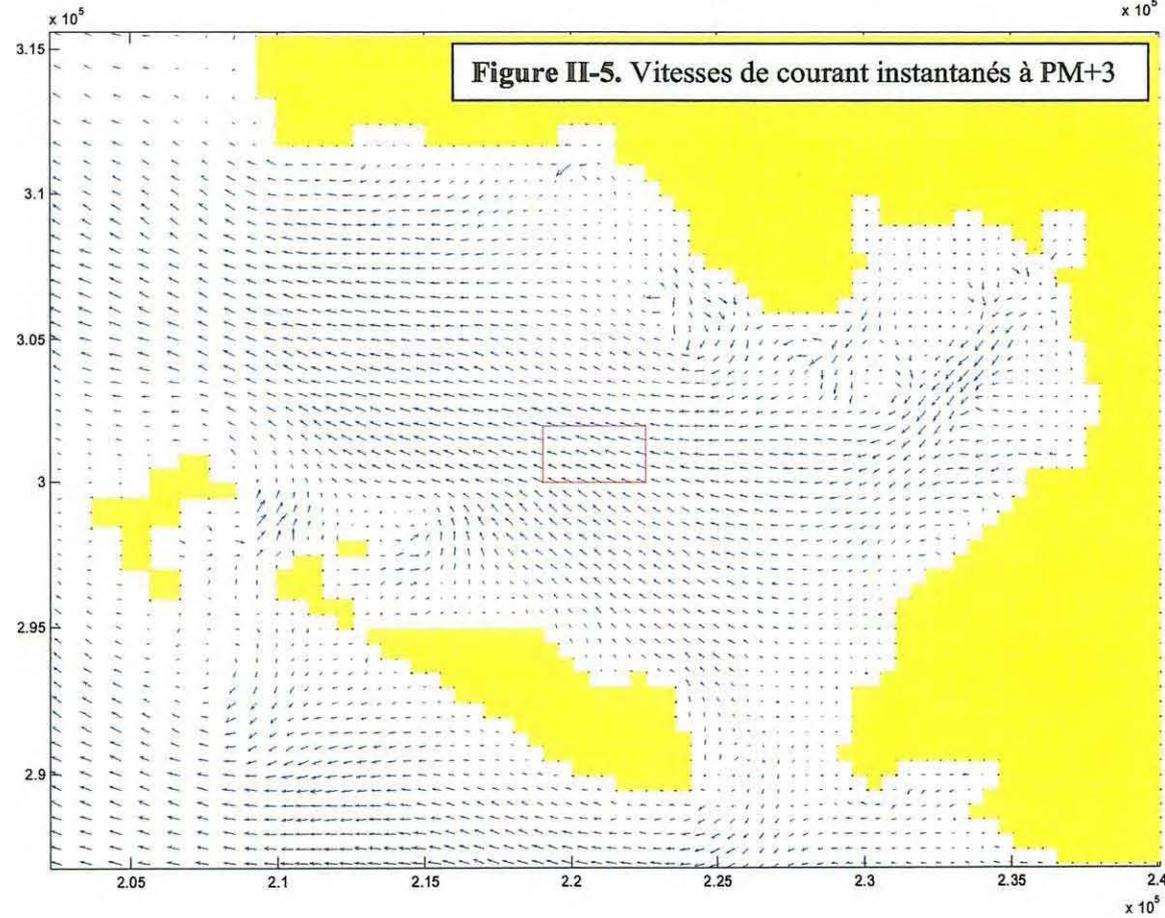
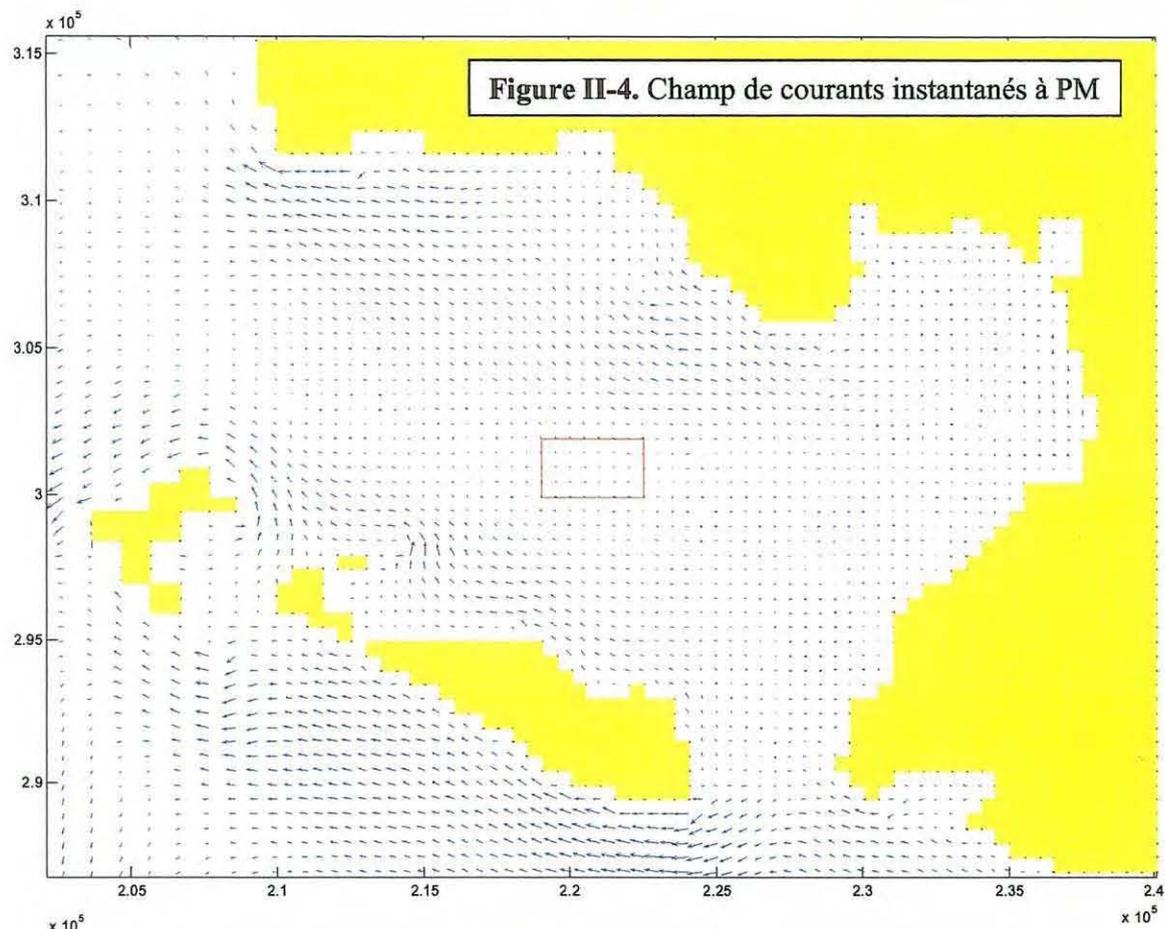
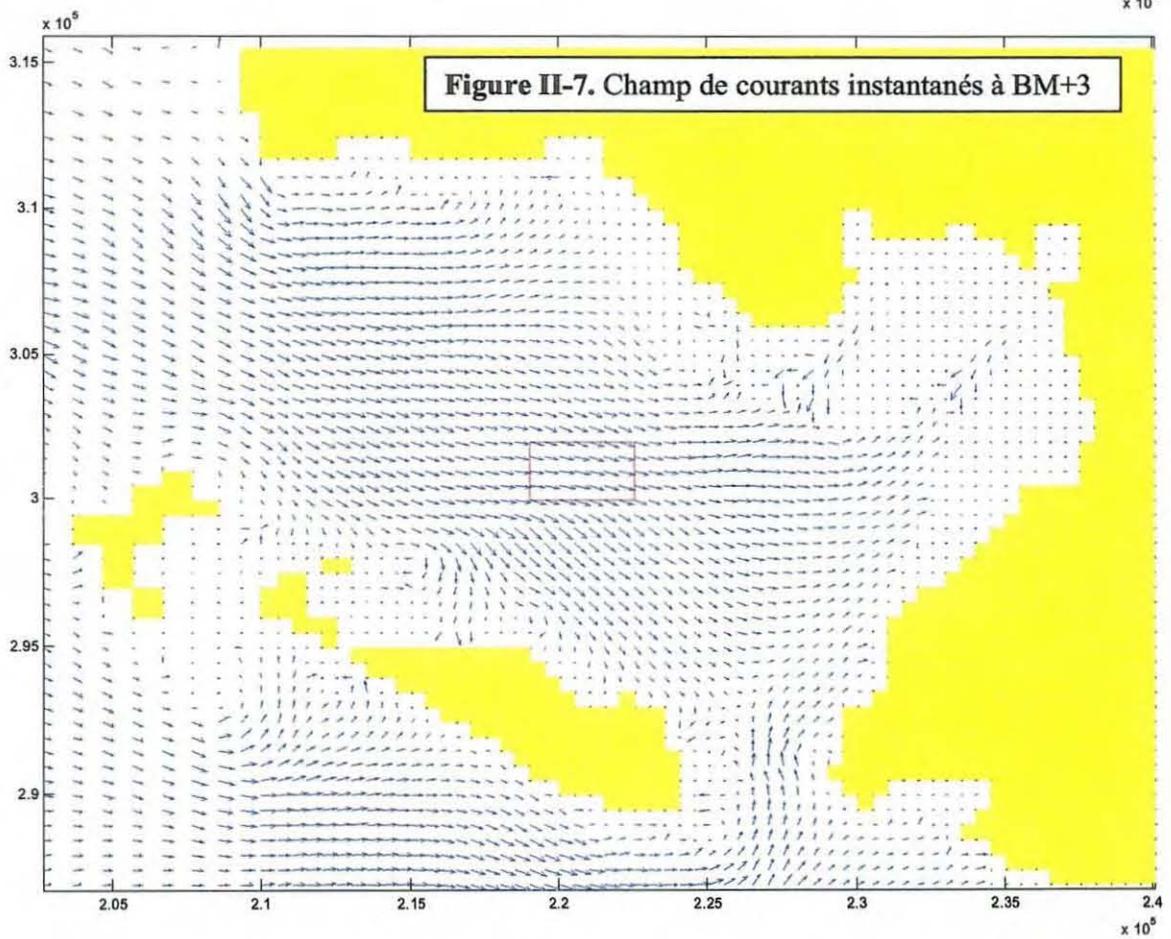
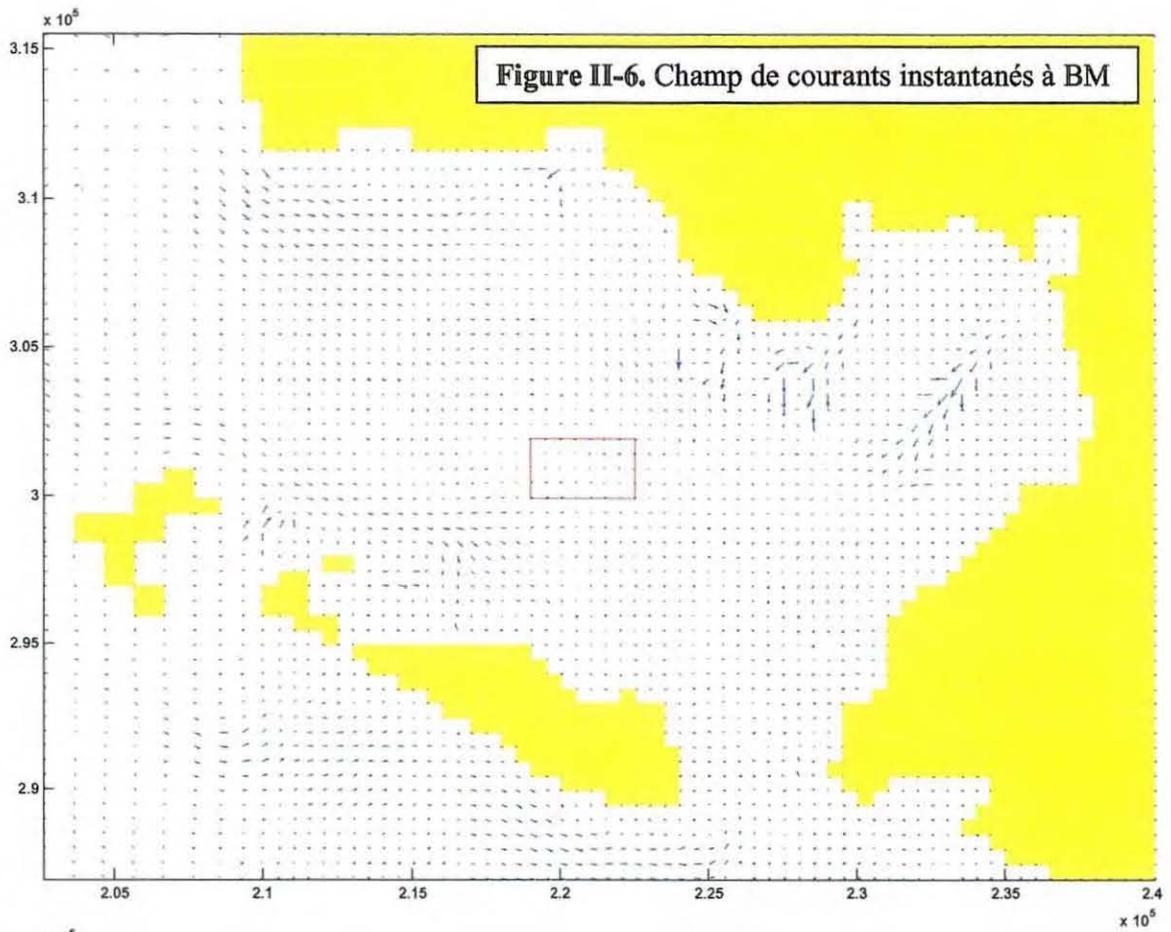


Figure II-3. Situation du site d'étude et des stations d'échantillonnage. (*) Stations hydrodynamiques définies à partir du registre SAM-2D.





Les représentations du champ de vitesse pour une onde de marée de vive-eau moyenne (coef. 95 environ) peuvent se voir en figures de II-4 à II-7. Les résultats montrent l'existence d'une onde stationnaire (superposition d'une onde incidente et d'une onde réfléchie) ; l'heure des pleines et basses mers est quasi-identique sur toute le secteur modélisé. Les courants sont minimums aux pleines mers (PM) et basses mers (BM) et maximums à mi-marée (PM+3, BM+3).

Les stations virtuelles (fig.II-3) nous révèlent les suivantes caractéristiques hydrodynamiques dans le parc mytilicole,

- Une vitesse du courant moyenne de $|U|=0.39$ m/s et $|V|=0.12$ m/s (fig.II-8.B).
- Une direction du courant d'Ouest-Nord-Ouest (fig.II-8.A), plus orientée vers l'Ouest à la station Filière Sud.
- Un marnage entre 2.5 et 5 m(fig.II-8.C).
- La profondeur moyenne de la colonne d'eau de 9.5 m environ.

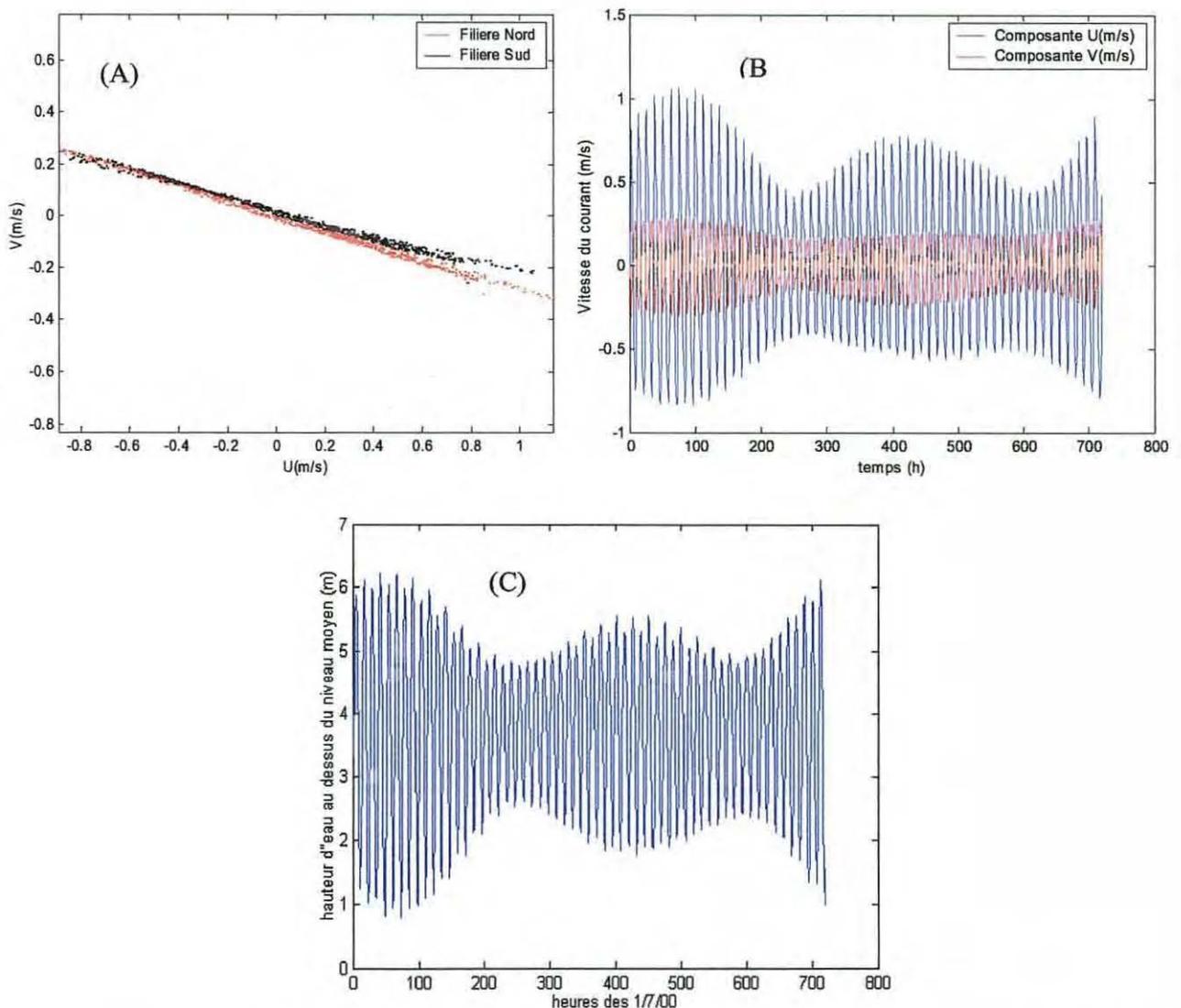


Figure II-8. (A) Représentation sur u point fixe des vitesses du courant en les deux stations virtuelles.(B) Vitesses du courant moyennes dans le parc à filières du modèle, (C) Représentation de l'onde de marée pendant un mois dans le parc à filières du modèle (moyenne spatiale).

II.4 Description hydrobiologique.

Caractéristiques physico-chimiques.

Température.

La température suit un cycle saisonnier très prononcé (fig.II-9.a), en dépendant des variations de l'ensoleillement à cette latitude; valeurs maximales pendant l'été (>20°C) et minimales en hiver (5°C). Les valeurs de température sont extrêmes en été et hiver dû la basse profondeur de la Baie. Logiquement, il existera un gradient de température entre les stations plus océaniques et les stations plus estuariennes.

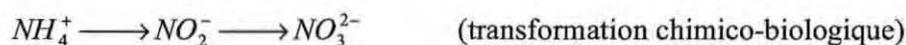
Salinité.

La salinité du Pertuis est plus variable dans l'espace. Les eaux de la baie d'Aiguillon, moins salées, sont influencées par les apports d'eaux douces de la Sèvre Niortaise, Lay et les canaux, principalement dès automne. Par contre, les eaux plus océaniques présentent une salinité plus élevée et temporellement très homogène. Il existe un gradient de dessalure dès stations plus estuariennes (moins salées) vers les plus océaniques (plus salées). Une processus de mélange horizontal des masses d'eau apparaît comme résultat du gradient de salinité.

Caractéristiques biologiques.

Les contenus de nourriture et des populations de micro algues, ont été étudiées dernièrement pendant une grande période (Barille, 1996). Les résultats montrent que dans l'ensemble le Pertuis présente les suivantes caractéristiques :

- Une turbidité élevée générée par la remise en suspension pendant les périodes de fort hydrodynamisme (forts coefficients de marée et forts vents). A cause de la basse pénétration de l'ensoleillement (turbidité → réflexion ou absorption), la couche photique diminue d'épaisseur et la production primaire est limitée. Par contre, il existe un important « input » de microphytobenthos et détritiques de Spartines pour les organismes filtreurs. Il y a un changement net de la composition de la nourriture des moules, indiquant l'utilisation d'une nourriture basée sur de la matière organique détritique (P.Richard 2000).
- Une relative abondance de nitrates mais très variables. Le temps de rénovation des masses d'eau du Pertuis est suffisant pour la transformation (lente) des formes d'azote inorganique :



- Il y a deux fois moins de silicates que de nitrates.
- Les phosphates sont quasi inexistantes. Il existera une limitation de la production primaire par les phosphates.
- Les principales sources de variation annuelle des populations phytoplanctoniques sont : l'ensoleillement, la limitation par nutriments (N, P, Si) et la turbidité. A une échelle locale, le phénomène de déplétion du phytoplancton par les populations conchylicoles (moules et huîtres) peut apparaître comme un facteur limitant la production primaire (Grant et al, 2001).
- Les débits des rivières constituent la principale entrée (source) des éléments nutritifs (N, P, Si) dans le Pertuis Breton. En général, les apports de sels nutritifs sont liés aux pratiques agricoles du bassin versant.

Les acquis hydrobiologiques sont obtenus d'une station biologique (fig.II-3) située au Sud du parc des filières (46°16'40 N – 1°19'80 O) entre le 31 mars de 1998 et le 15 février de 1999. La profondeur de la colonne d'eau à la station est de 10m. Les variables qu'ont été mesurées sont ; la matière particulaire totale (TPM), la température, la matière organique particulaire (POM) et les contenus en Chlorophylle a.

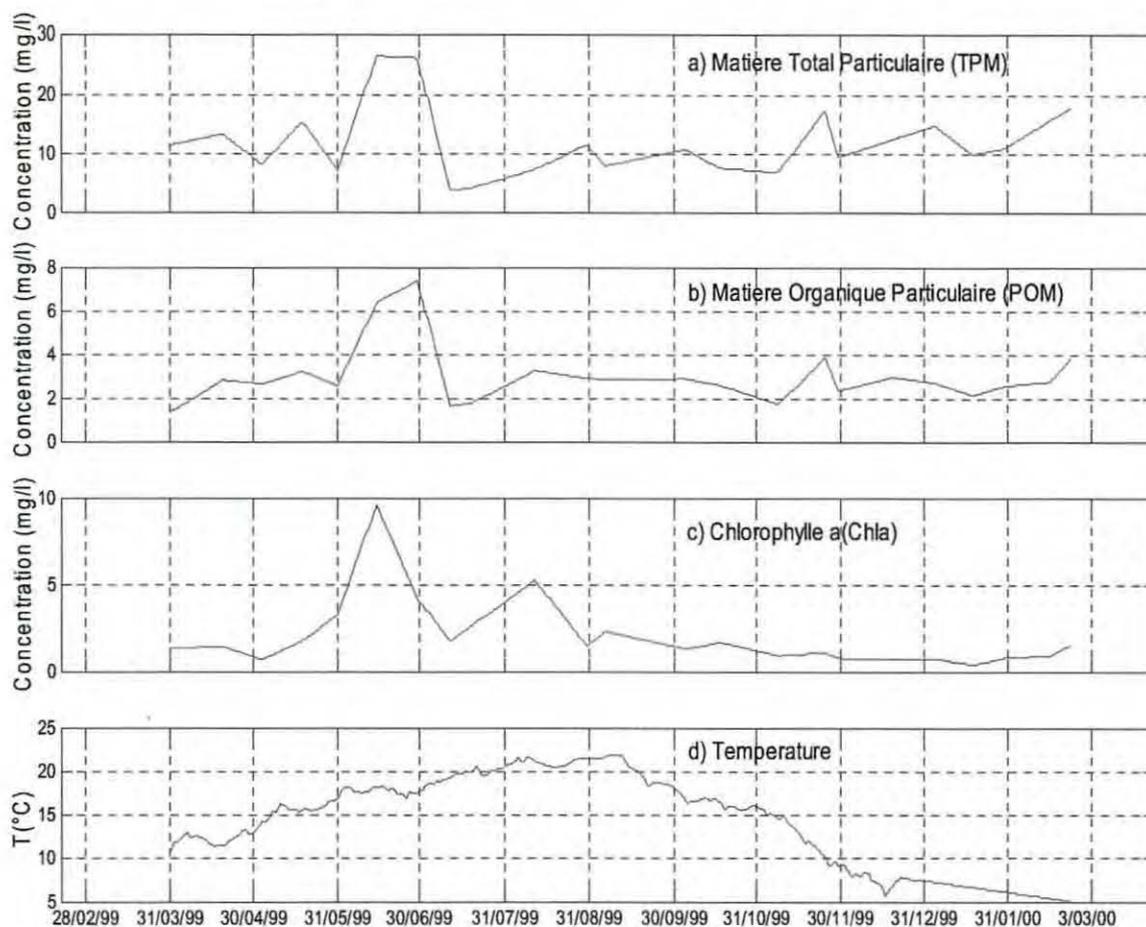


Figure II-9. Evolution temporelle des variables hydrobiologiques sur la station biologique (filières sud), interpolées chaque demi jour.

La concentration totale de chlorophylle (CHL-a) présente un important pic dès la fin de mai jusque au début de Juillet. Ce pic correspond au pic printanière retardé. Ce pic apparaît également pour la matière organique particulaire (POM) et la matière particulaire total (TPM). Dès la fin d'automne, les concentrations de TPM et POM commencent augmenter par la remise en suspension, mais la concentration de CHL-a descend par la réduction de la couche euphotique.

La qualité¹ de la nourriture pour les organismes filtreurs (la moule, l'huître, etc.) change tout au long de l'année, en affectant l'accroissement. On peut donc espérer, une plus forte croissance pendant le pic de printemps (haute température et haute qualité de la nourriture élevée) et une basse croissance en hiver (basse température et faible qualité de la nourriture).

¹rapport entre la matière organique particulaire et la matière particulaire total (POM/TPM).

III Simulation des trajectoires de matière organique dans le Pertuis Breton.

III.1 Introduction

Actuellement, l'océanographie physique développe des modèles hydrodynamiques côtiers qui permettent de disposer d'une bonne résolution spatiale des champs de vitesse dans une zone côtière déterminée. La principale finalité des modèles est de pouvoir répondre de manière autonome à des problèmes tels que : rejets de polluants, implantation et aménagement de stations d'eaux usées, etc.

L'océanographie biologique de son côté, essaie de mettre en évidence l'effet de cette dynamique marine sur la biologie. L'obtention des vitesses de courant, soit par des mesures de vitesses du courant in situ, soit par utilisation d'un modèle hydrodynamique prédictif, est alors nécessaire. Le coût élevé des appareils océanographiques (courantomètre, CTD, ...) et des campagnes in situ (bateau, couverture spatial,...), ainsi que le temps d'échantillonnage élevé, font de la modélisation la meilleure option pour obtenir rapidement des résultats. Un modèle hydrodynamique (SAM-2D) appliqué dans le Pertuis sera utilisé pour identifier les sources de nourriture qui arrivent dans le parc à filières.

La composition isotopique des moules à filières pendant les années 98/99, montre une utilisation des ressources nutritives différentes d'une partie à l'autre du parc de filières (Richard, 2000). Ainsi, les moules du Nord apparaissent utiliser plutôt du phytoplancton océanique, alors que celles du Sud sont plus influencées par les apports benthiques et continentales dès *l'anse de l'aiguillon*. Deux sites (filières Nord et filières Sud) ont été étudiés afin d'évaluer l'origine géographique des particules arrivant dans les filières. A cette fin, plusieurs trajectoires inverses¹, pour les deux sites, ont été simulées pour des temps inférieurs au temps de résidence des eaux du Pertuis.

III.2 Modèle SAM-2D (Simulation d'Advection Multivariable 2D).

Le modèle SAM-2D est un modèle multivariable développé par l'IFREMER (Le Hir et al., 1999) qui décrit, dans une zone spatiale définie, l'évolution temporelle d'un certain nombre de variables physico-chimiques :

u, v : courants en x et y,

z : la cote de la surface libre,

C_{iv} : concentrations de la variable iv dans la colonne d'eau (en moyenne sur la profondeur),

C_s : concentrations des variables dans les sédiments,

C_i : concentrations des variables dans les eaux interstitielles,

Le code de calcul est composé de différents sous-modèles (fig.III-1) :

a) Modèle de transport : résolution des équations de conservation de la masse, intégrées sur la hauteur d'eau, en chaque maille du domaine et à chaque pas de temps. Il y a autant d'équations de conservation de la masse qu'il y a de variables d'état. Les variables sont soit dissoutes, soit particulières ou adsorbées sur particules.

b) Modèle de transport sédimentaire : évaluation des processus de dépôt et d'érosion en terme de flux et s'introduction dans l'équation de conservation de la masse.

¹Trajectoires du point d'arrivée vers le point de départ.

c) Modèle de gestion du fond : couplé au modèle de transport, le modèle permet de suivre dans le temps et en chaque maille les masses de sédiment déposé et les concentrations de chaque variable dans les sédiments et dans les eaux interstitielles.

d) Modèle multivariable : comprend la résolution de l'équation de conservation de la masse pour chaque variable transportée, mais il inclut aussi la résolution et définition des interactions biogéochimiques entre les différents constituants de l'eau.

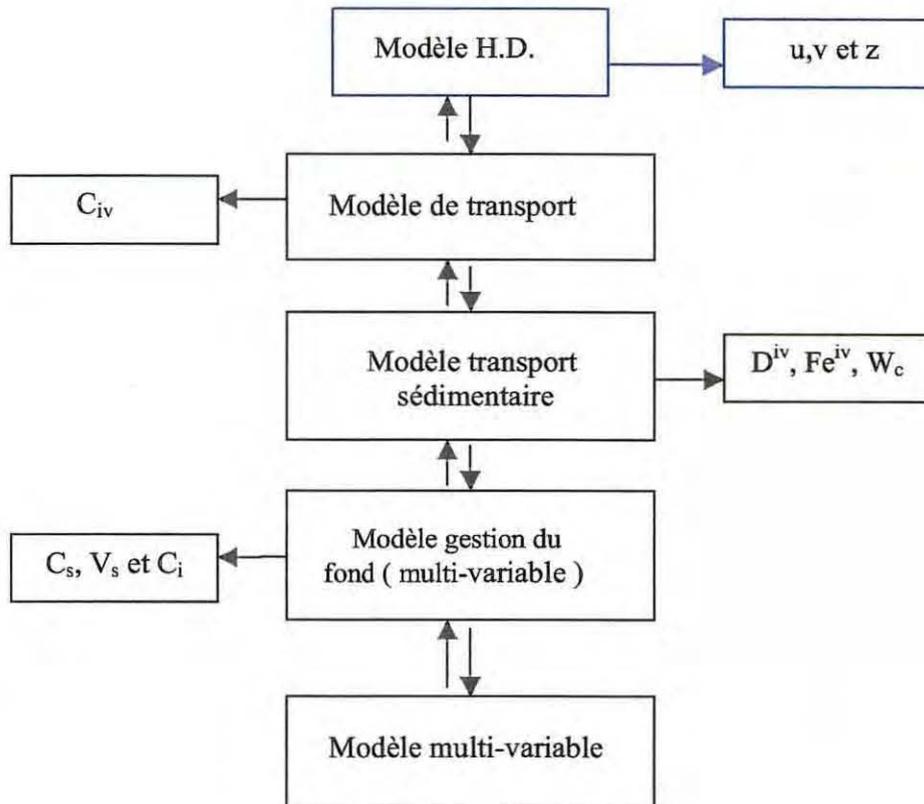


Figure III-1. Modèle multivariable SAM-2D.

On est intéressé uniquement par le modèle hydrodynamique qui nous fournira des archives temporelles de vitesse du courant et de la hauteur de la surface libre.

III.3 Modèle Hydrodynamique de SAM-2D

III.3.a Equations.

Ce modèle évalue les vitesses du courant u , v et de l'élévation de la surface libre (z) en chaque point de l'espace. Le modèle est basé sur les équations de Navier Stokes avec les

hypothèses de Boussinesq et d'hydrostaticité. En intégrant sur la verticale on obtient les équations de Saint Venant (éq.III-1 à éq.III-3) qui sont résolues avec une méthode ADI (Alternating Directions Implicit). L'ADI est un schéma numérique qui divise chaque pas de temps de calcul en deux sous-pas de temps (dt/2). Pour chaque étape, une direction (x ou y) est traitée implicitement et seulement la résolution d'un système tri-diagonal est nécessaire.

$$\frac{\delta u}{\delta t} + u \frac{\delta u}{\delta x} + v \frac{\delta u}{\delta y} - fv + g \frac{\delta z}{\delta x} + g \frac{H}{2\rho} \frac{\delta \rho}{\delta x} + g \frac{u\sqrt{u^2 + v^2}}{k_r^2 H^{4/3}} + \frac{\delta P_a}{\delta x} - \frac{\tau_{sx}}{\rho H} - \varepsilon \Delta u = 0 \quad (\text{éq.III-1})$$

$$\frac{\delta v}{\delta t} + u \frac{\delta v}{\delta x} + v \frac{\delta v}{\delta y} + fu + g \frac{\delta z}{\delta y} + g \frac{H}{2\rho} \frac{\delta \rho}{\delta y} + g \frac{v\sqrt{u^2 + v^2}}{k_r^2 H^{4/3}} + \frac{\delta P_a}{\delta y} - \frac{\tau_{sy}}{\rho H} - \varepsilon \Delta v = 0 \quad (\text{éq.III-2})$$

$$\frac{\delta v}{\delta t} + \frac{\delta(Hu)}{\delta x} + \frac{\delta(Hv)}{\delta y} = 0 \quad (\text{éq.III-3})$$

Avec les paramètres et variables suivantes,

u, v : composantes de la vitesse moyenne sur la hauteur d'eau selon les axes x et y.

z : élévation de la surface libre.

f : paramètres de Coriolis.

g : accélération de la gravité.

H : hauteur d'eau totale.

k_r : coefficient de Strikler (frottement sur le fond).

P_a : pression atmosphérique.

τ_{sx} : tension de surface vers x .

τ_{sy} : tension de surface vers y.

ε : viscosité .

ρ : masse volumique du fluide (fonction de la température et salinité).

La condition de stabilité du schéma numérique est donnée par la formule approchée suivante (Roache, 1982),

$$dt \leq \frac{2gdx^2}{k^2 H^{4/3} U}$$

La condition de stabilité du schéma nous fournira les valeurs adéquates du pas de temps utilisée par le schéma numérique. Lorsque, les conditions hydrodynamiques du site d'étude déterminant les valeurs de k, H et U, et g sont constantes, il existera un petit intervalle de valeurs adéquat pour dt et dx, qui sera caractéristique du site étudié.

III.3.b Configuration de la grille de calcul.

La grille utilisé par le modèle hydrodynamique de SAM-2D est une grille irrégulière et décentrée, où les variables u , v et z sont calculées en différentes positions (fig.III-3).

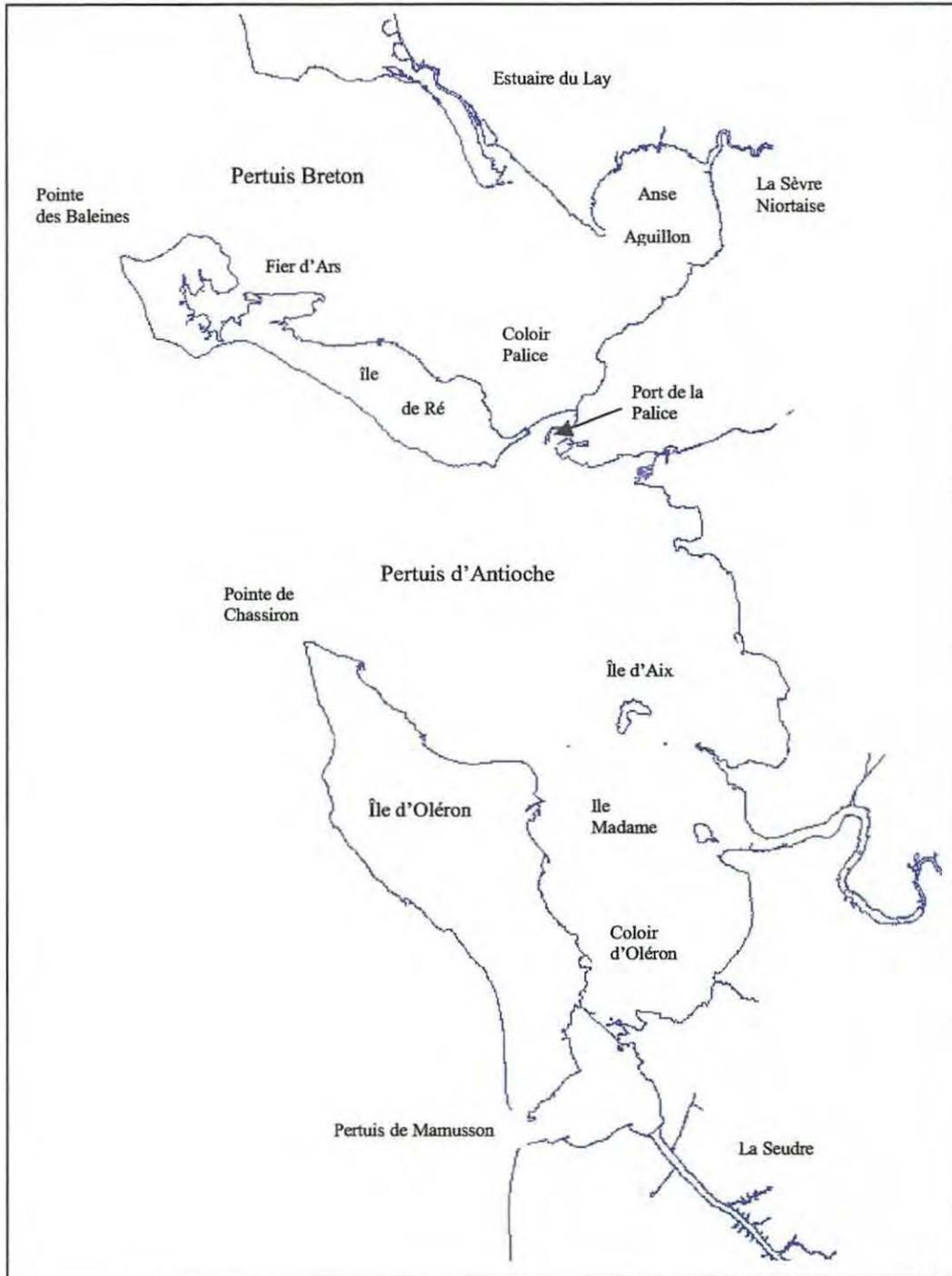


Figure III-2. Carte du Pertuis de Charentais. Il comprend le Pertuis Breton, le Pertuis de Marenne-Oléron et le Pertuis de Mamusson.

- vitesses (u et v) \Rightarrow sur les frontières de la maille.
- variation de la surface libre (z) \Rightarrow au centre de la maille.

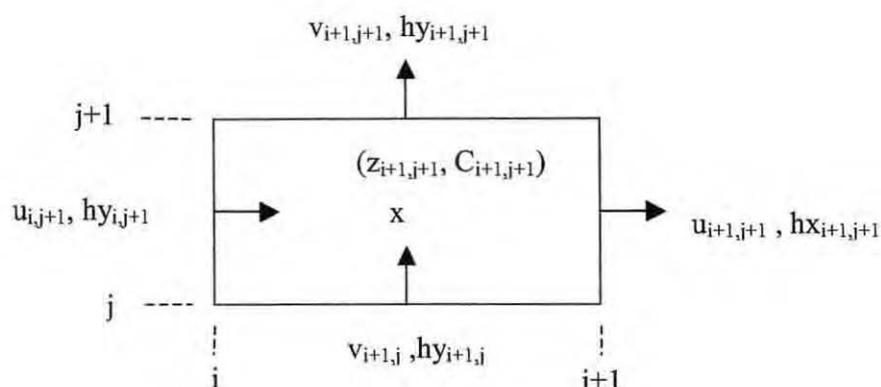


Figure III-3. Grille de calcul utilisée par SAM-

L'irrégularité de la maille est présente sur les zones d'hydrodynamisme particulière (secteurs sensibles). Ex : les sorties des chenaux avec forts gradients de salinité et de concentration qui demandent un maillage plus fin (échelle temporelle différente).

Maille standard : $dx=dy=500m$

Maille fine : $dx \in [100,1100] m$ et $dy \in [100,1100] m$

Chaque maille est décrite par deux profondeurs h_x et h_y calculés au point de définition de u et v ; Δh_x exprime la variation de la bathymétrie sur la direction x (Est-Ouest) et Δh_y la variation de la bathymétrie sur la direction y (Nord-Sud).

III.3.c SAM-2D dans Marennes-Oléron.

SAM-2D a été appliqué sur tout le Pertuis Charentais qui comprend le Pertuis Breton, le Pertuis d'Antioche au Sud de l'île de Ré et le Pertuis de Mamusson au Sud de l'île d'Oléron (voir fig.III-2). La dimension totale de la grille comprend un total de $85 \times 109=9265$ mailles (régulières et irrégulières). Les limites géographiques de la maille sont,

$[46^{\circ}25', -1^{\circ}25']$	Nord-Ouest
$[45^{\circ}46', -1^{\circ}1']$	Sud-Est

et le repérage est donné par les valeurs suivantes :

$X=190000m$

$Y=245584m$

SAM-2D a été déjà validé sur « La Seine » avec de résultats satisfaisants (Le Hir, 1999). L'application du modèle hydrodynamique sur le Pertuis Breton implique la définition des

conditions aux limites. Sa validation passera par la réalisation d'une campagne océanographique pour la détermination in-situ des vitesses du courant (installation de courantomètres). La variation de la surface libre (z) sera facilement vérifiée à travers des registres tidaux installés sur la côte Charente ou à travers d'une analyse des harmoniques principaux obtenus du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM).

III.3.d Conditions aux limites.

Le bassin de Marennes-Oléron est ouvert aux apports des eaux océaniques venant de l'ouest, et est limité à l'Est par la côte Charentaise. La rivière « Charente » est introduite comme un terme source et les limites physiques (obstacles) dans la baie sont l'île de Ré, l'île d'Aix et l'île d'Oléron (fig.III-2).

Conditions limites pour la hauteur d'eau.

Les limites en hauteur d'eau sont introduites sous la forme d'une marée réelle.

$$\text{Newman : } \left. \frac{dz}{dt} \right|_{\text{au large}} = F_3(t)$$

F_3 ; fonction qui considère la marée réelle, basée sur une composition harmonique des ondes de marée.

$$F_3(t) = z_0 + \sum \sum A_{ij} \cos(V_{ij} - G_{ij}) \quad (\text{éq.III-4})$$

z_0 ; est le niveau moyen autour duquel oscille le niveau de l'eau.

A_{ij} et G_{ij} sont respectivement l'amplitude et la situation d'une onde élémentaire qui ne dépendent que du port considéré.

V_{ij} ; est l'argument astronomique lié au temps t.

L'indice i caractérise la nature de l'onde, l'indice j se rapporte à sa période (j=0, ondes « annuelles » ; j=1, ondes « diurnes » ; j=2, ondes « semi-diurnes »).

Dans tous les modèles hydrodynamiques appliqués sur une baie semi-fermée (ex : Pertuis Breton), les composantes de la vitesse simulées viennent pratiquement déterminées par les conditions limites. Le choix des correctes conditions aux limites est donc fondamental.

III.3.e Restrictions du modèle.

1) Il ne considère pas l'effet du vent et des vagues (explicitement). Ces deux effets paraissent assez importants dans une baie peu profonde (II-3). C'est donc une forte restriction qu'il faut garder à l'esprit.

2) Il ne considère pas l'équation de conservation de la densité. Cette hypothèse est valable puisque la variation de la salinité dans le Pertuis Breton est très faible ($34,16 \pm 1,24 \text{ g l}^{-1}$:

Barille, 1996). En ce sens, le modèle considère négligeable les apports d'eau douce des rivières par rapport l'important flux de marée.

III.3.f Première validation du modèle.

A partir de la connaissance des harmoniques au port de « La Palice » (fig.III-2), qui dépend que de la position relative des astres, et la marée simulée par SAM-2D, nous pouvons valider l'équation de la conservation de la masse de Saint Venant (éq.III-3). La validation des équations pour les vitesses (éq.III-1 et éq.III-2), par contre, doit se faire avec une étude hydrodynamique. Lorsque dans le système d'équations de Saint Venant les variables d'état u et v sont liées à z (une variation d'hauteur d'eau va provoquer une variation des vitesses), la validation à travers des harmoniques est une bonne approximation.

La marée « réelle » a été calculée par moyen d'une composition des harmoniques principales qui agissent dans le Pertuis Breton. La table III-1, montre la liste des constantes harmoniques prises en compte dans le Port de la Palice (A_{ij} et G_{ij}). Un programme en MATLAB permet d'évaluer, avec l'équation III-4, la hauteur d'eau qui sera considérée comme une marée réelle.

La composition harmonique a donc été limité aux 14 ondes suivantes,

- ondes diurnes : O1, K1, P1
- ondes semi-diurnes ;N2, M2, S2, K2, 2v
- ondes quart-diurnes ;M4
- ondes 1/6-diurnes ;M6
- et les corrections nodales de O1, K1, M2 et K2

Table III-1. Constantes harmoniques pour La Palice.

Constantes	Amplitude (mm)	Situation (degrés)
N2	361	81.6
M2	1739	100
S2	631	132.2
K2	179	130.5
M4	240	14.6
M6	37	315.8
O1	74	327.3
K1	64	74.7
2v	59	68.3
P1	$-1/3 A_{K1}$	G_{K1}
O1*	$1/5.3 A_{O1}$	G_{O1}
M2*	$-1/27 A_{M2}$	G_{M2}
K1*	$1/7.4 A_{K1}$	G_{K1}
K2*	$1/12 A_{S2}$	G_{S2}

*corrections nodales

A partir de SAM-2D nous avons calculé la valeur de la hauteur d'eau dans « La Palice », en sélectionnant plusieurs points, afin d'obtenir la moyenne de la hauteur d'eau du site. Une simulation sur 1 mois, initialisée le 1-7-2000, a été réalisée.

Les résultats du test (fig.III-4), montrent un bon ajustement des données du modèle aux données réelles, avec une sur-estimation de la hauteur d'eau, surtout pendant les basses coefficients de marée (6-9 % environ). Ces résultats permettent affirmer que le modèle SAM-2D décrit correctement la variation temporelle de la hauteur d'eau (au dessus le niveau moyen) et donc d'espérer aussi une description correcte du champ de courants instantanés. Cependant, la validation finale du modèle passe par l'acquisition de données du champ de courants in situ.

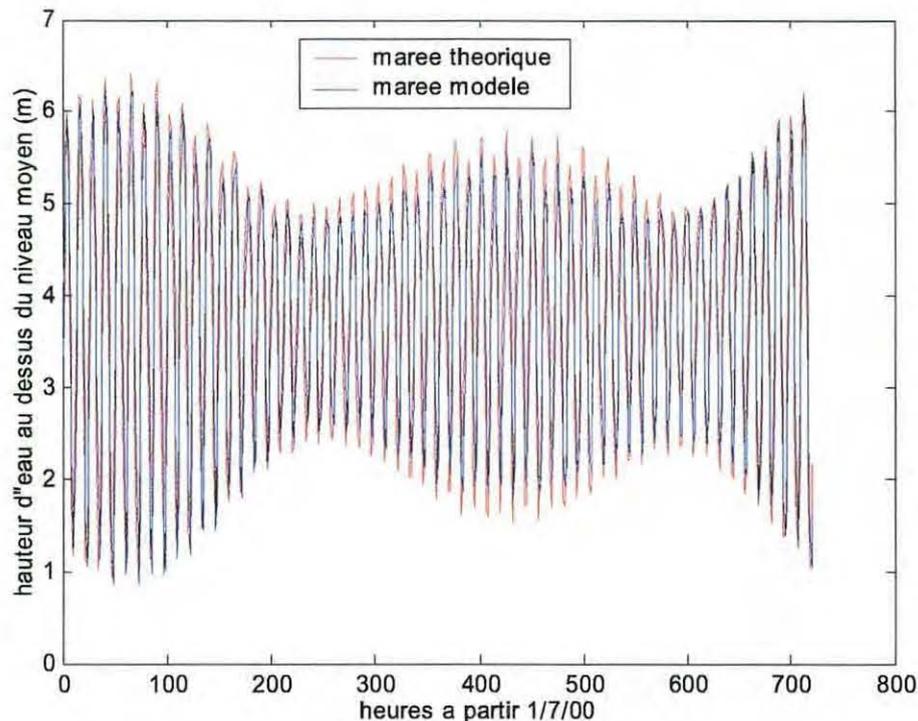


Figure III-4. Comparaison de l'onde de marée théorique et du modèle pour le port de La Palice.

III.4 Modèle de trajectoires et trajectoires inverses des particules dans le Pertuis.

Les codes de calcul de trajectoires ont été développés en MATLAB, à partir des résultats de simulations du modèle hydrodynamique.

III.4.a Modèle des trajectoires (en sens normal).

Les trajectoires «en sens normal» se basent sur les équations basiques d'un déplacement rectiligne uniforme:

$$\left. \begin{aligned} x(t) &= x_0 + u(x_0, y_0, t) * dt \\ y(t) &= y_0 + v(x_0, y_0, t) * dt \end{aligned} \right\} \text{ (éq.III-5) } \quad dt = 20 \text{ minutes (pas d'archivage de SAM-2D)}$$

d'Après un temps dt , une particule située dans un point (x_0, y_0) va se déplacer jusque le point (x, y) avec une vitesse égal au module de la vitesse dans le point de départ.

$$|U(x_0, y_0)| = \sqrt{u(x_0, y_0)^2 + v(x_0, y_0)^2} \text{ m/s.}$$

Lorsque la variation des champs de vitesse pendant dt minutes de simulation, n'est pas négligeable, les vitesses ont été interpolées linéairement dans le temps et dans l'espace. Dans le temps, nous avons interpolé chaque $dtt=2,2$ minutes environ, pour obtenir une plus fine description de l'hydrodynamisme. Dans l'espace, pour chaque pas de temps dtt , une interpolation des vitesses au centre de chaque côté des mailles les plus proches à la position de la particule (voir fig.III-5), permet de connaître la vitesse en ce point.

$$dtt = \frac{dt}{9} \approx 2.2 \text{ minutes} \quad (\text{pas de temps d'interpolation})$$

$$dx = dy = 500m \quad (\text{pas d'espace de SAM-2D})$$

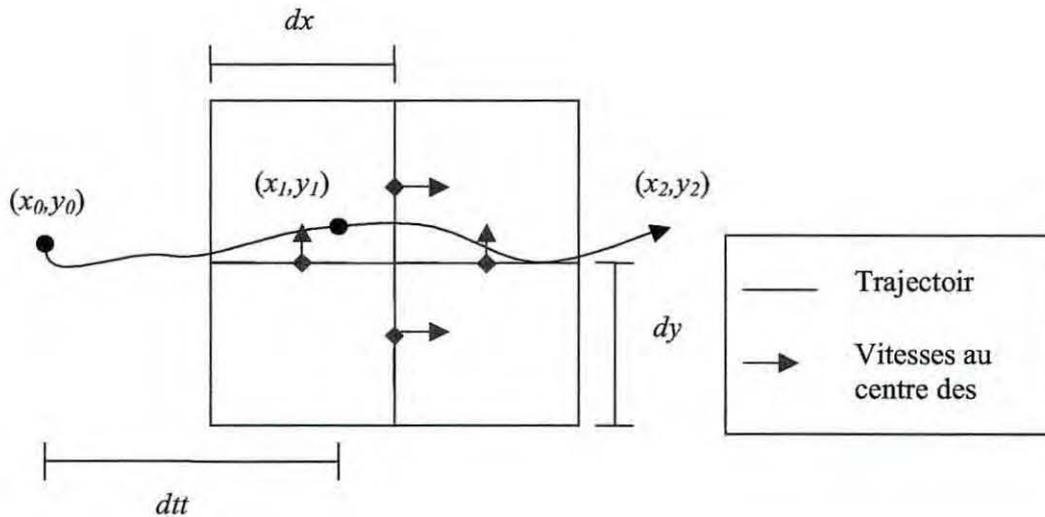


Figure III-5. Interpolation spatiale chaque dtt .

Ainsi, chaque petit pas de temps (dtt) le modèle fournira la position de la particule (x et y) et pourtant la trajectoire de la particule après d'une durée de simulation déterminée.

Restrictions du modèle.

- 1) Le modèle considère la conservation des particules, c'est à dire, pas de dégradation, pas de processus de floculation et pas de sédimentation.
- 2) Le modèle aussi considère les vitesses de courant constantes sur toute la colonne d'eau. C'est à dire, les particules sont transportées avec une vitesse moyenne sur toute la colonne d'eau.

L'effet de la marée sur le déplacement de la particule.

Une première simulation pendant deux jours, montre que les particules de matière organique dans le Pertuis sont soumises au cycle tidal semi-diurne (fig.III-6).

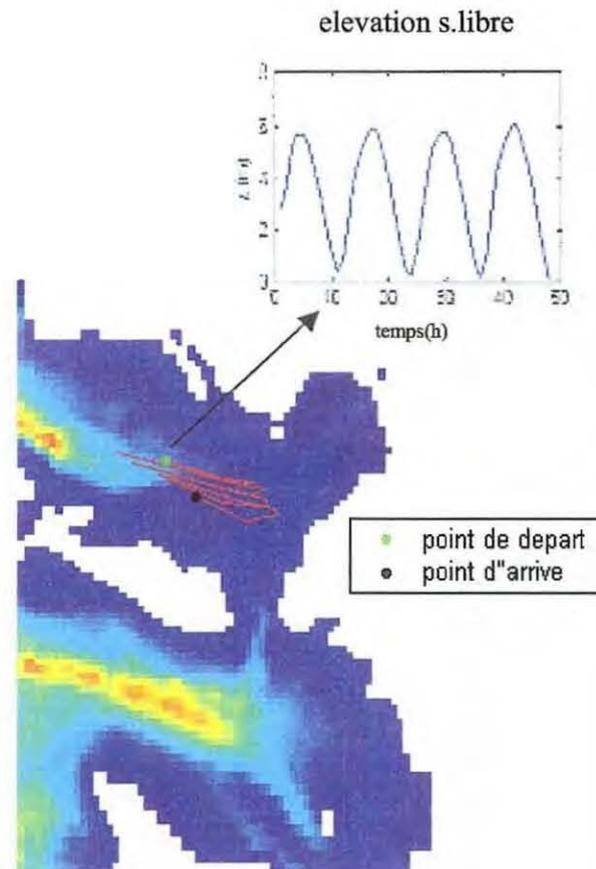


Figure III-6. Carte de bathymétrie du Pertuis Breton avec la trajectoire d'une particule soumise aux courants de marée.

Ce résultat confirme l'importance du cycle semi-diurne dans systèmes littoraux de type estuarien et peu profonds.

Corrélation temps de résidence des masses d'eau-coefficient de marée. L'effet du courant résiduelle Nord-Sud sur le déplacement de la particule

Afin d'estimer la corrélation existant entre les temps de résidence des masses d'eaux du Pertuis et le coefficient de marée, trois trajectoires sont simulées chaque 10 jours du registre hydrodynamique de SAM-2D (avec \neq coef.marée), pour le même point et la même heure de marée pour le départ .

Onde de marée correspondant à
chaque trajectoire

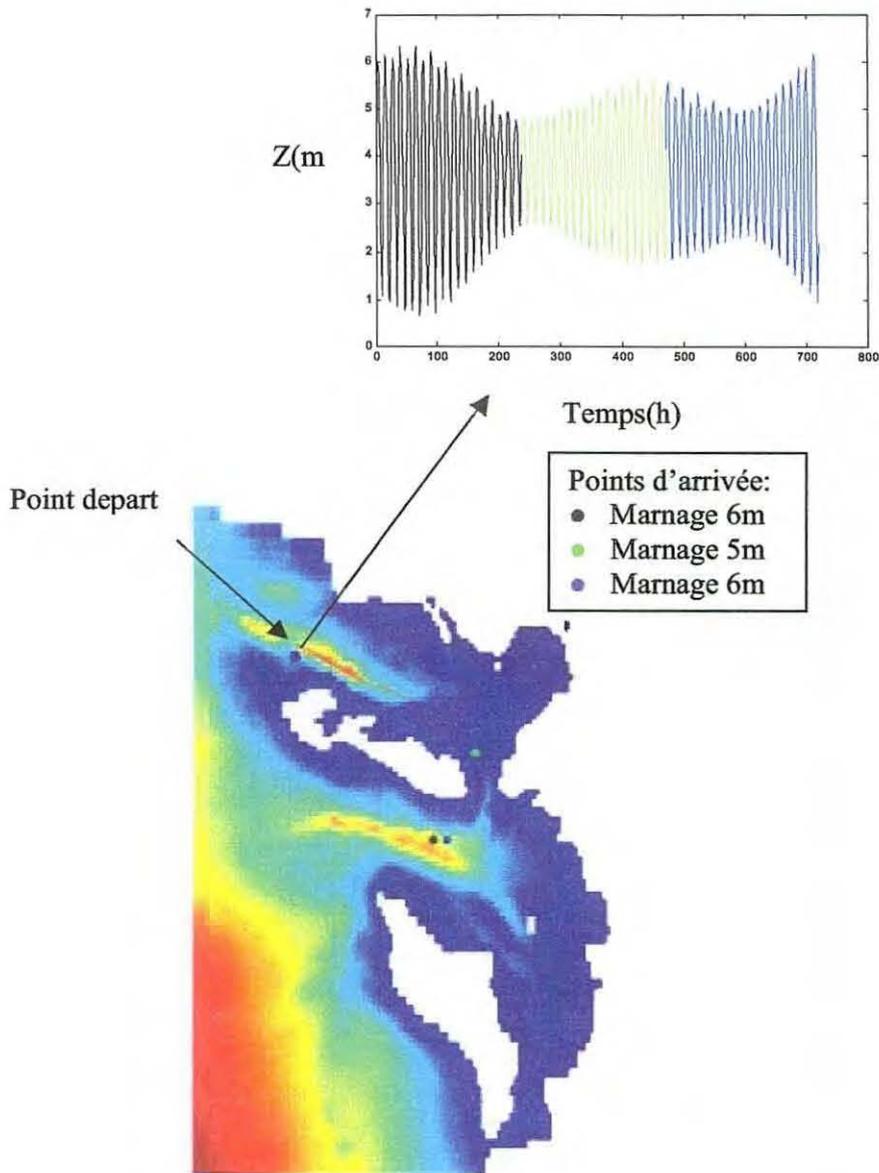


Figure III-7. Trajectoires pour différents marnages.

La figure III-7, montre qu'en fonction de la magnitude du marnage de la marée nous obtenons différents temps de résidence des masses d'eau du Pertuis Breton (différents longueurs des trajectoires). Plus grand est le coefficient, moins de temps est nécessaire pour qu'une particule sorte à travers le « couloir de la Palice ». Ces résultats sont en concordance avec la corrélation aussi existant dans le Pertuis Marennes-Oléron (Struski, 2000).

De la même façon, nous pouvons confirmer l'existence d'un transport particulaire vers le sud (Bacher, 1989).

Qualitativement, les temps de résidence des masses d'eau estimés pour une particule qui part du Nord de l'île de Ré et pour un coefficient de marée de vives-eaux moyenne de 96, sont l'ordre de 9-10 jours, avec l'exception des coefficients de marée extrêmes ; marées extraordinaires de vive-eau et marées extraordinaires de morte-eau.

III.4.b *Modèle des trajectoires inverses. Le devenir des particules de matière organique dans le Pertuis Breton.*

Les trajectoires inverses s'obtiennent en considérant le point d'arrivée d'une trajectoire « en sens normal » comme (x_0, y_0) , et le point de départ comme le point inconnu. C'est à dire, à partir de différents points d'arrivée dans une zone déterminée (plusieurs trajectoires), le modèle fournit un ensemble de points de départ. Les équations utilisées sont les éq.III-5 mais en utilisant un pas de temps dt négatif.

Une interface modèle-utilisateur a été développé pour la définition :

- 1) du nombre de zones étudiées.
- 2) du site, au moyen d'une zone carré dessinée sur la carte de bathymétrie du Pertuis.
- 3) du nombre de points qui arrivent sur la zone choisie.
- 4) du nombre d'heures de départ pour chaque point et chaque site.
- 5) du pas de temps d'interpolation (dt).
- 6) de la durée de simulation.

Les restrictions du modèle sont identiques à celles du modèle des trajectoires en sens normal.

Les filières du sud et les filières du nord sont sélectionnés, pour essayer de mettre en évidence l'effet de l'hydrodynamisme sur l'origine de la matière organique qui arrive au parc à moules. Chaque site choisi est défini par deux mailles situées au nord et au sud du parc à filières et orientées vers la direction y (fig.III-7) . La surface de chaque site sera $500 \times 1000 \text{ m}^2$.

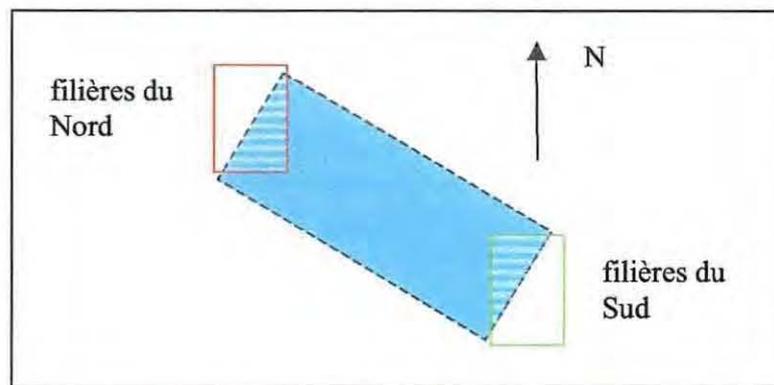


Figure III-8. Orientation des sites étudiés

Les paramètres du modèle sélectionnés sont,

- Six heures de départ espacées entre elles 2 h, pour prendre en compte l'heure de marée. Nous considérons donc un période semi-diurne de la marée ($6 \times 2 = 12$ heures).
- Dix points d'arrivée pour chaque site.
- Un pas de temps d'interpolation de $dt = 2,2$ minutes.

Les figures III-9.A à III-9.F, présentent cinq simulations pendant 1,2,3,4,5 et 8 jours, dès le 1 juillet de l'année 2000. Les points dessinés sur la carte de bathymétrie correspondent aux points à partir desquels les particules sont parties pour arriver, après la durée de simulation, aux sites sélectionnés. Un total de 60 trajectoires (10 points d'arrivée \times 6 heures de départ) sont calculées, pour chaque simulation.

Pour la suite, nous allons considérer que les particules qui restent à l'Ouest du site, sont de nature océanique ($\delta^{13}\text{C} = -19\text{‰}$ à -21.5‰) et celles qui restent à l'Est, d'origine estuarienne, qu'en dépendant de la saison peuvent être d'une nature différente (Richard,2000) :

- Printemps \rightarrow mélange qui doit inclure matière terrestre ($\delta^{13}\text{C} = -27\text{‰}$ à -34‰), en provenant des apports la rivière «Sèvre Niortaise».
- Été \rightarrow phytoplancton estuarienne ($\delta^{13}\text{C}$ très négatifs); différencié de ce qui vienne de l'océan.
- Hiver et automne \rightarrow matière détritique remise en suspension (débris de *Spartines* et microphytobentos).

Un comptage des points nous permet de quantifier les contributions des deux sources de matière organique (Table III-2).

Pour temps courts de simulation (fig.III-9.A à III-9.C), les moules des filières Sud sont très influencées par des particules qui viennent de « l'anse de l'Aiguillon », et une autre partie de particules venant de la mer au large (au Nord de l'île de Ré). Les moules des filières Nord, par contre, sont moins influencées par les apports estuariens. Pour un cycle de marée les résultats montrent aucune différence entre les sites sélectionnés.

Pour de longs temps de simulation (fig.III-9.D à III-9.F) l'apport estuarien diminue vers le parc à moules, en observant seulement, quelques particules qui arrivent au filière Sud. Le filière Nord, déjà ne reçoit pas de particules dès « l'anse de l'Aiguillon ». Dans ce cas, les particules d'origine océanique constituent la principale source de nourriture pour les moules. Effectivement, dû à l'existence d'un courant résiduel Ouest-Est, les particules proches de « l'anse de l'aiguillon », quittent le Pertuis Breton après quelques jours.

Durée de simulation (j)	Filières du Sud		Filières du Nord	
	Estuariennes	Océaniques	Estuariennes	Océaniques
1	30 %	60 %	30 %	60 %
2	16.6 %	83.3 %	13.3%	86.6%
3	10 %	90 %	-	100%
4	10 %	90 %	-	100%
5	10 %	90 %	-	100%
8	-	100%	-	100%

Table III-2. Importance relative des sources de nourriture pour les filières Nord et Sud.

Un fait important est la grande quantité de particules qui viennent du Pertuis d'Antioche (voir fig.III-9.E et III-9.F), lesquelles au même temps peuvent provenir soit de la large mer, soit de « La Charente », soit des eaux peu profondes de la côte de l'île de Ré. Le pourcentage de particules provenant du Pertuis d'Antioche est notamment marqué pour hautes temps de simulation car aucune particule de dans le Pertuis Breton peut rester dans le filière (temps proche au temps de résidence des masses d'eau).

III.5 Conclusion.

Les simulations des trajectoires inverses de particules révèlent une faible différence de la source de nourriture des moules des filières Nord par rapport les moules des filières Sud. D'après 5 jours de simulation, les moules de filières Nord pratiquement reçoit le double d'apports estuariens que ces que reçoivent les filières du Nord.

Moyenne du filière Sud (5 jours)= 15 % terrestre ; 85 % océanique
 Moyenne du filière Nord (5 jours)= 9 % terrestre ; 91 % océanique

Conclusion générale: A partir de 5 jours de simulation aucune particule ne provient pas de la baie en raison du courant résiduel Nord-Sud. La principal source de nourriture des moules des filières est donc principalement phytoplancton océanique.

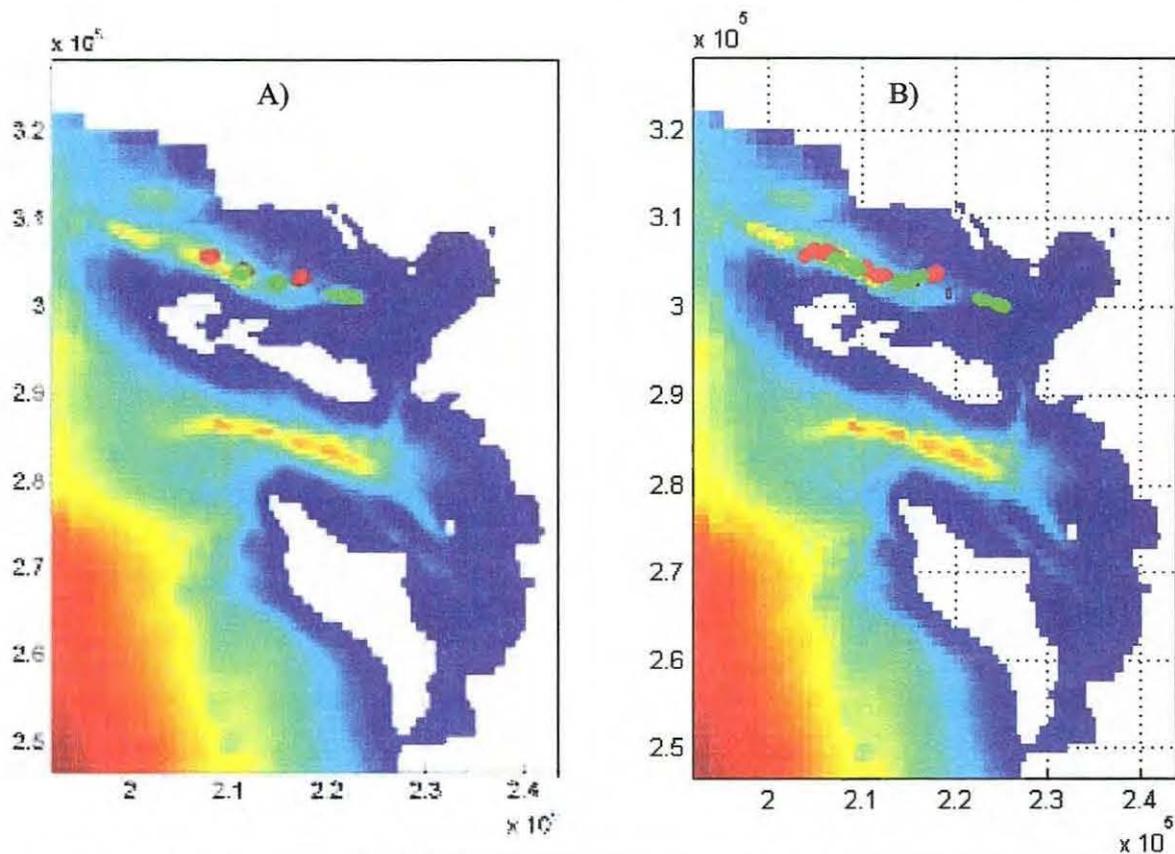


Figure III-9. Simulation des trajectoires des particules de matière organique du Pertuis Breton ;A) durée de simulation 1 jour, B) durée de simulation 2 jours.

● Filières Sud ● Filières Nord

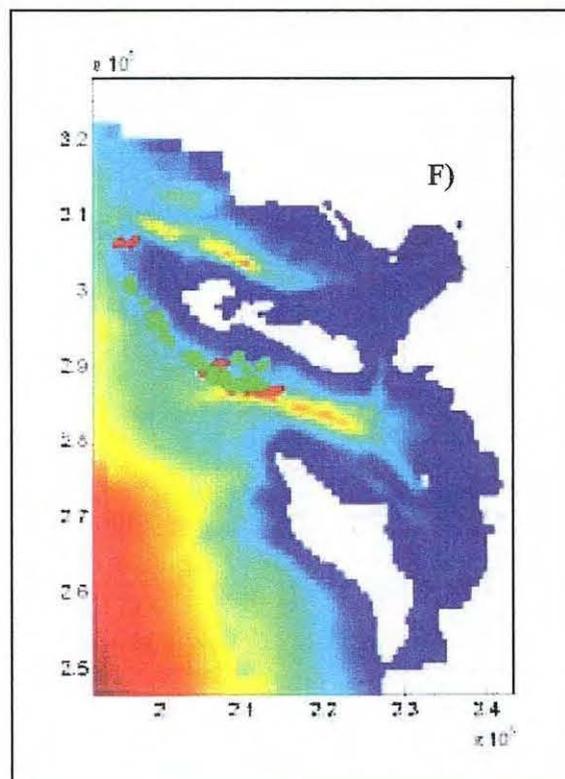
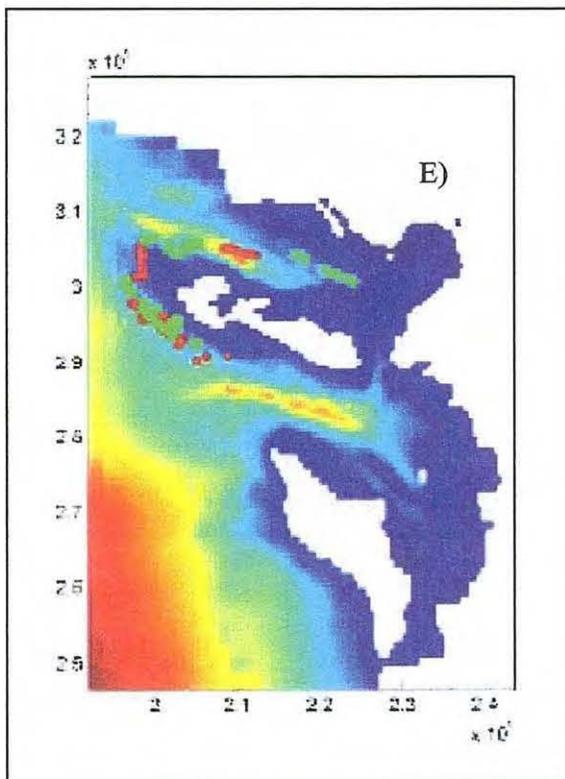
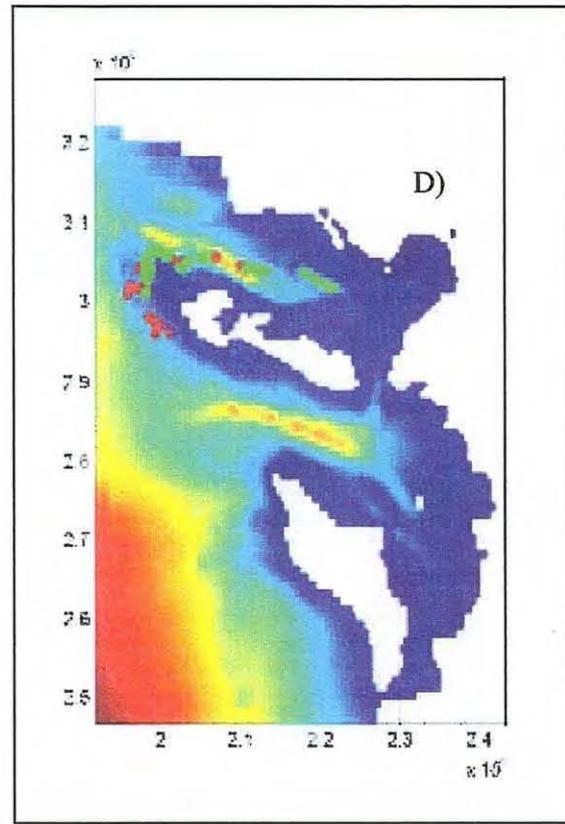
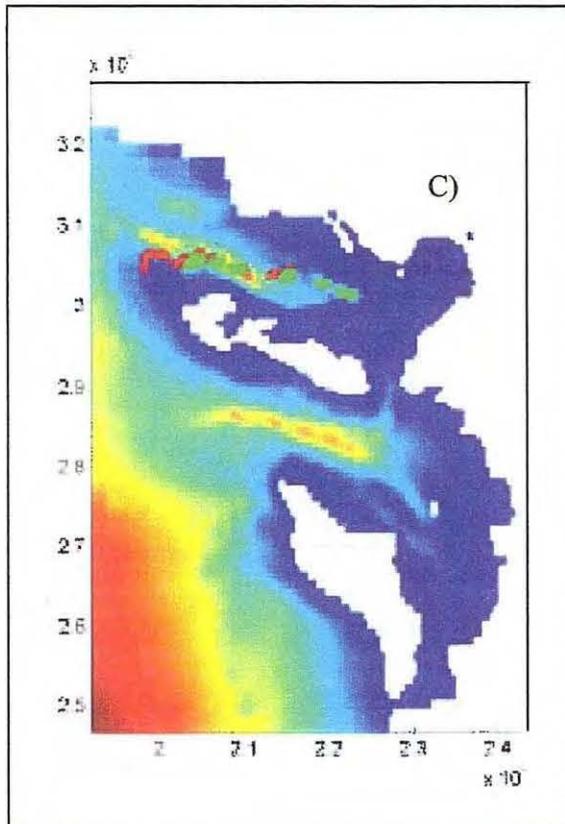


Figure III-9 (suite) : C) durée de simulation 3 jour, D) durée de simulation 4 jours. E) durée de simulation 5 jours, E) durée de simulation 8 jours.

Une dernière résultat est présenté, afin de montre une plus claire différenciation géographique des sources de nourriture des moules du Pertuis. En prenant les mêmes paramètres de simulation, on a choisi une zone de moules sur bouchots (inter-tidal) et une zone au centre du bassin correspondant aux filières (fig.III-10).

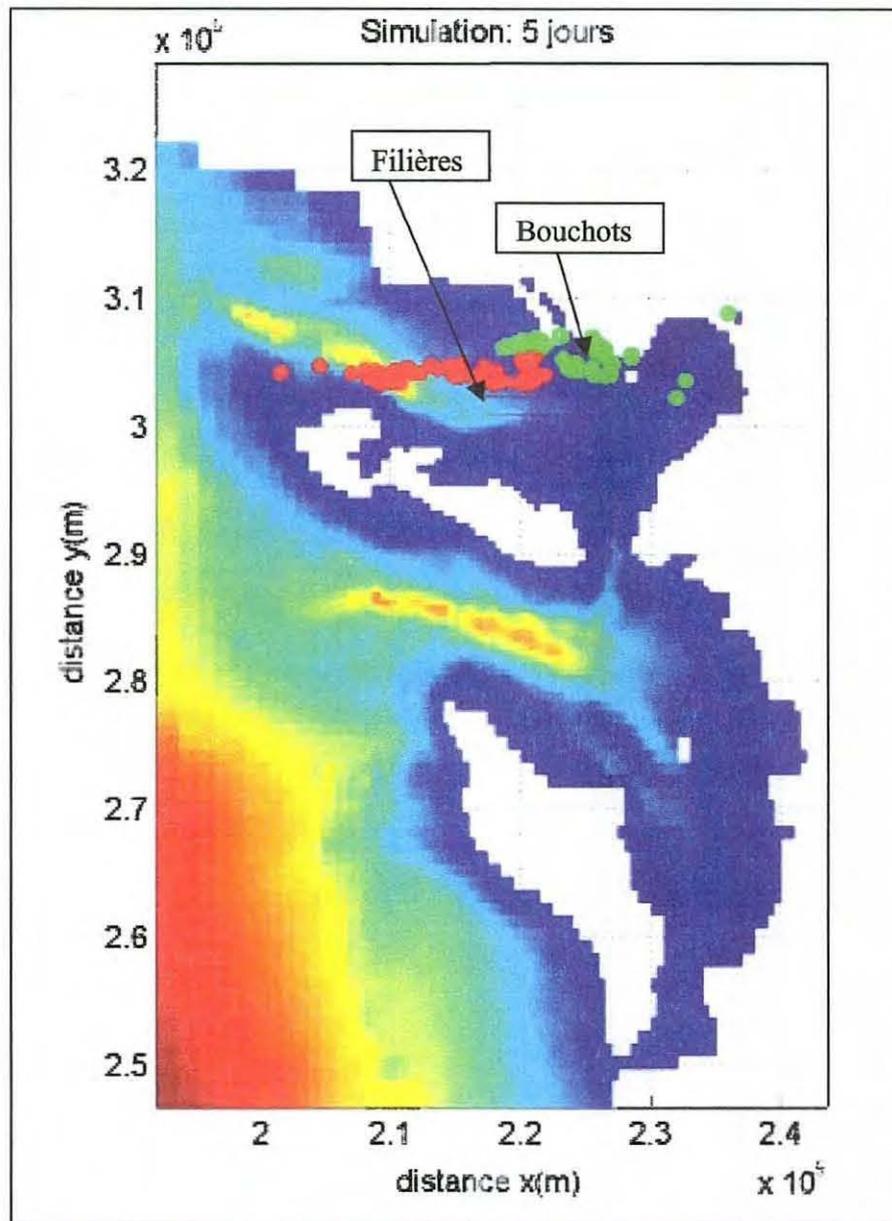


Figure III-10. Identification géographique des sources de nourriture pour les moules sur bouchots et les moules sur filières. ● Filières ● Bouchots

La simulation réalisée sur une durée de 5 jours, montre clairement une différence géographique des sources de nourriture ; les moules sur bouchots reçoivent des apports de la « Sèvre Niortaise » (matérielle terrestre) et typiquement estuariens (détritus, microphytobenthos, phytoplancton estuarien), par contre les moules sur filières reçoivent que des particules de la large mer (phytoplancton océanique).

IV Modèle de déplétion de la nourriture du parc de filières du Pertuis Breton. Couplage hydrodynamisme-écophysiologie de *M.edulis*.

IV.1 Introduction

La forte augmentation démographique par rapport l'augmentation des sources de nourriture, et d'un autre côté, la saturation des terrains terrestres, rendent nécessaire l'exploitation de nouvelles surfaces de production, telles que les baies et estuaires. Cependant, l'extrême variabilité des écosystèmes côtiers, ainsi que l'important déplacement de population vers la côte (utilisations récréatives), constituent très peu d'endroits adéquats pour la mytiliculture. Actuellement, presque tous les sites favorables sont déjà exploités.

Dû à cette situation, la gestion des parcs mytilicoles évolue vers une augmentation des densités en élevage (Grant et al.,1993). Les hautes densités initiales diminuent la vitesse de croissance de la moule dû au manque de nourriture, en fonction du potentiel trophique du site mytilicole (Héral, 1991). La connaissance des facteurs principaux qui fourniront la capacité de production maximale de l'écosystème, paraît donc primordial pour sa gestion.

En 1991, 250 filières à moules, sur un surface de 400 ha, ont été immergées dans le Pertuis Breton (fig.II-3). L'espèce essentiellement cultivée est *Mytilus edulis*. Les biomasses des stocks cultivées sur filières sont estimées entre 800 et 900 tn de moules adultes (Barille,1996).

Afin d'établir quelles seront les plus adéquates densités initiales en élevage et le niveau de déplétion de la matière particulaire par la moule, a été développé un modèle de transport de particules au niveau des filières et couplé à un modèle de croissance de la moule. Le modèle de déplétion fournira une idée du potentiel mytilicole du Pertuis Breton en fonction de 4 facteurs; l'hydrodynamisme, les sources potentielles de nourriture présentes dans le Pertuis, la température et la densité de moules en élevage. Le modèle nous permettra de quantifier la croissance des moules en fonction des différentes densités en élevage. De cette façon nous connaissons une estimation de la compétitivité intra-spécifique de la population de moules par la nourriture.

Plusieurs études sur les potentialités conchylicoles du Pertuis Breton existent déjà dans la bibliographie,

- Barille, 1996 ; étude des sources de nourriture disponibles pour les moules, modèle de production primaire, suivi de la croissance des moules et modèle physiologique de *M. edulis*.

-F. Houze, 1997 ; couplage d'un modèle de croissance de *Mytilus edulis* et d'un modèle de production primaire.

-P.Richard, 2000 ; étude des sources de nourriture utilisées par les mollusques cultivées par moyenne de traçage isotopique naturel.

-C.Bacher (communication personnelle); couplage d'une modèle de croissance de *Mytilus edulis* et conditions hydrodynamiques en 1D.

IV.2 Modèle de transport particulaire 2D.

IV.2.a Equations

Afin de déterminer la distribution de la nourriture dans le parc des filières par l'effet de l'hydrodynamisme, nous avons développé un modèle 2D de transport particulaire. Le modèle prédit la variation spatiale (2D) et temporelle locale de la concentration des particules

inorganiques, du phytoplancton et des particules organiques détritiques dans une zone soumise aux processus d'advection et diffusion.

Sur l'hypothèse qu'il existe un mélange vertical important (homogénéisation de la colonne d'eau), l'application d'un modèle d'advection-diffusion bidimensionnel est valable. La concentration prise en compte dans le modèle, est la concentration moyenne sur toute la colonne d'eau.

$$\frac{\delta}{\delta t}(C_i) = \frac{\delta}{\delta x}(uC_i) + \frac{\delta}{\delta y}(vC_i) + D_x \frac{\delta^2}{\delta x^2}(C_i) + D_y \frac{\delta^2}{\delta y^2}(C_i) \quad (\text{éq. IV-1})$$

C_i , concentration moyenne dans la colonne d'eau du constituant i (masse i/V).

u et v , composantes x et y de la vitesse du fluide (L/T).

D_x et D_y , coefficients spatiaux (x,y) de diffusion turbulente (L^2/T).

S_{ij} , surface définie par les vecteurs orthonormaux e_i et e_j (L^2).

L'équation du transport (IV-1) est une équation différentielle hyperbolique aux dérivées partielles (PDE). La résolution de ce type d'équations se fait à travers différents algorithmes, explicites et implicites, existants dans la bibliographie; Upwind, Leapford, Lax wendorf, Alternating Directions Implicit (ADI),...

IV.2.b Discrétisation de l'équation du transport.

L'équation de transport a été résolue numériquement avec un schéma explicite en différences finies. L'Upwind est utilisé pour les termes d'advection et un schéma en différences centrées est utilisé pour les termes de diffusion. L'Upwind est un algorithme explicite, qui en dépendant de la direction du courant, utilise un schéma progressif (« forward difference ») ou régressif (« backward difference »).

a) Termes de diffusion.

$$\nabla_H^2(C) = D_x \left(\frac{C_{i-1,j} - 2C_{i,j} + C_{i+1,j}}{dx^2} \right) + D_y \left(\frac{C_{i,j-1} - 2C_{i,j} + C_{i,j+1}}{dy^2} \right)$$

D_x , coefficient de diffusion turbulente vers la direction x

D_y , coefficient de diffusion turbulente vers la direction y

b) Termes d'advection.

$$\frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j}^n}{dt} = -u_{i,j}^n \begin{cases} \frac{C_{i,j}^n - C_{i-1,j}^n}{dx} & u_{i,j}^n > 0 \\ \frac{C_{i+1,j}^n - C_{i,j}^n}{dx} & u_{i,j}^n < 0 \end{cases} + -v_{i,j}^n \begin{cases} \frac{C_{i,j}^n - C_{i,j-1}^n}{dy} & v_{i,j}^n > 0 \\ \frac{C_{i,j+1}^n - C_{i,j}^n}{dy} & v_{i,j}^n < 0 \end{cases}$$

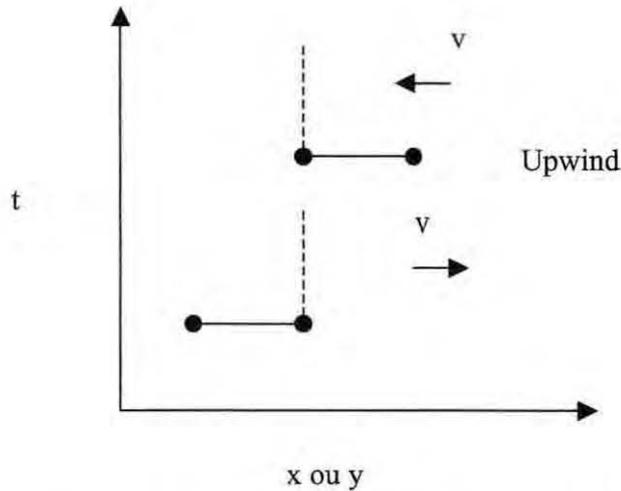


Figure IV-1. Schéma Upwind. En fonction du sens du courant s'utilise différences amont ou aval.

Le schéma Upwind, est seulement du premier ordre, cependant, il présente de très bonnes propriétés pour la description des variables transportées. En effet, quand $u > 0$, l'information se propage en direction des $x > 0$ et les différences avalées sont utilisées, par contre si $u < 0$, l'information se propage en direction des $x < 0$ et les différences amont sont utilisées.

L'écriture de l'équation du transport discrétisée, prend l'aspect suivante :

$$\begin{aligned} \frac{1}{dt} (z_{i,j}^{n+1} C_{i,j}^{n+1} - z_{i,j}^n C_{i,j}^n) = & -\frac{(1-\varepsilon_1)}{2dx} (C_{i+1,j}^n u_{i,j}^n z_{x i,j}^n - C_{i,j}^n u_{i-1,j}^n z_{x i-1,j}^n) - \frac{(1+\varepsilon_2)}{2dx} (C_{i,j}^n u_{i,j}^n z_{x i,j}^n - C_{i-1,j}^n u_{i-1,j}^n z_{x i-1,j}^n) - \\ & -\frac{(1-\varepsilon_2)}{2dy} (C_{i,j+1}^n v_{i,j}^n z_{y i,j}^n - C_{i,j}^n v_{i,j-1}^n z_{y i,j-1}^n) - \frac{(1+\varepsilon_1)}{2dy} (C_{i,j}^n v_{i,j}^n z_{y i,j}^n - C_{i,j-1}^n v_{i,j-1}^n z_{y i,j-1}^n) + \\ & + \frac{D_x}{dx^2} (z_{x i,j-1} C_{i,j-1} - 2z_{x i,j} C_{i,j} + z_{x i,j+1} C_{i,j+1}) + \frac{D_y}{dy^2} (z_{y i,j-1} C_{i,j-1} - 2z_{y i,j} C_{i,j} + z_{y i,j+1} C_{i,j+1}) \end{aligned} \quad (\text{eq.IV-2})$$

ou $\varepsilon_1 = \text{sign}(u)$ et $\varepsilon_2 = \text{sign}(v)$.

IV.2.c Construction de la grille. Choix du pas de temps (dt) et du pas d'espace (dx).

Dû la forme de la grille, la variable C_{ij} et les paramètres u , v et z sont évalués en différentes positions dans l'espace. Le schéma de discrétisation est montré en figure IV-2.

Les valeurs pour dx , dy et dt permettent de contrôler la stabilité et dispersion numérique du schéma. Ainsi, il est très important de choisir des valeurs adéquats pour dx , dy et dt . Les valeurs $dx=dy= 500\text{m}$, et $dt=20$ minutes sont définies par la grille de calcul de SAM-2D: une interpolation dans le temps et dans l'espace permet les modifier. Nous avons préféré de conserver les valeurs pour dx et dy , et de modifier la valeur de dt , pour « contrôler » la

stabilité numérique. Le niveau de dispersion numérique vient fixé par le pas d'espace $dx=dy=500$ m (voir ANNEXE I).

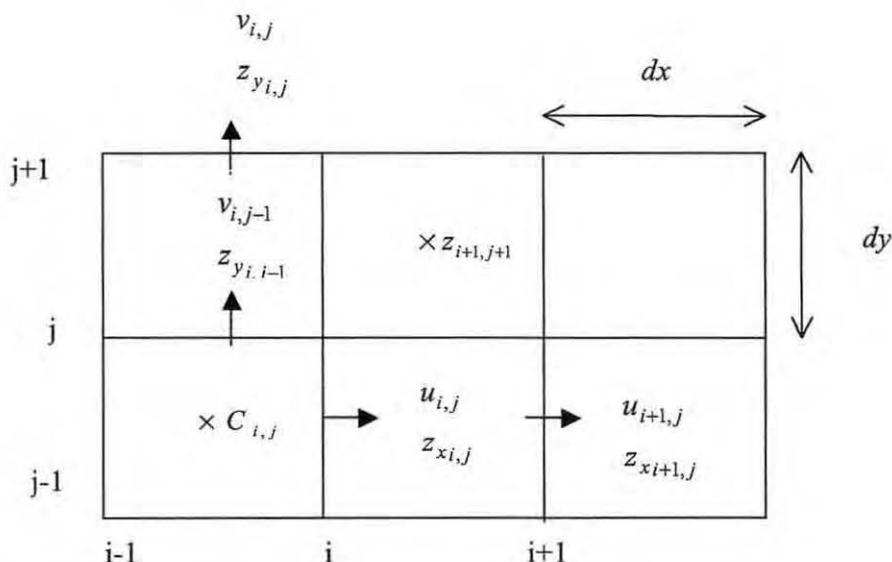


Figure IV-2. Discrétisation spatiale pour le modèle de Transport 2D.

Les validation du modèle de transport utilisée, ainsi qu'une étude du niveau de sensibilité du modèle aux coefficients de diffusion, sont montrées dans l'ANNEXE I.

IV.3 Modèle écophysiologique de *Mytilus edulis*.

IV.3.a Introduction.

Pour la détermination de la « potentialité mytilicole » du Pertuis Breton il est fondamental d'avoir une estimation des flux de consommation de *Mytilus edulis*. Le flux de consommation ou « déplétion » de la nourriture par la moule dans un site, dépend des conditions hydrobiologiques du site et de l'effet de celles-ci sur l'efficacité des différents processus physiologiques impliqués dans la croissance de la moule. Nous devons donc déterminer le flux instantané de consommation, c'est à dire, la consommation des moules à un instant donné où les conditions hydrobiologiques sont constants (e.x. quantité de nourriture, température,...)

Grâce à la conceptualisation¹ des processus physiologiques qui participent à la croissance de la moule, la modélisation se présente comme la meilleure option pour l'estimation du flux instantané de consommation par la moule. C'est pour quoi, un modèle de croissance de la moule en fonction des principaux processus physiologiques a été développé.

Une grande quantité de modèles de croissance de *M.edulis* existent déjà; Radford et al.(1981), Verhagen (1981), Incze et al. (1980), Brylinsky et Sephton (1991), Barille, A-L. (1996), Smaal et Scholten (1998), Grant et Bacher (1998). Chaque modèle essaie d'exprimer la croissance de la moule en fonction de différents processus métaboliques observés.

¹Transformation de la réalité en équations mathématiques.

Nous nous sommes basés principalement dans le travail de Barille, A-L (1996), sans prendre en compte les processus de stockage d'énergie utilisée pour l'obtention de réserves (glycogène) et pour la reproduction (accroissement de gonades, accroissement de gamètes et la ponte). Cependant, quelques paramètres du modèle seront modifiés sur la base des derniers travaux sur *Mytilus edulis* développés par C. Bacher (Communication personnelle), concernant une nouvelle description mathématique du processus respiratoire.

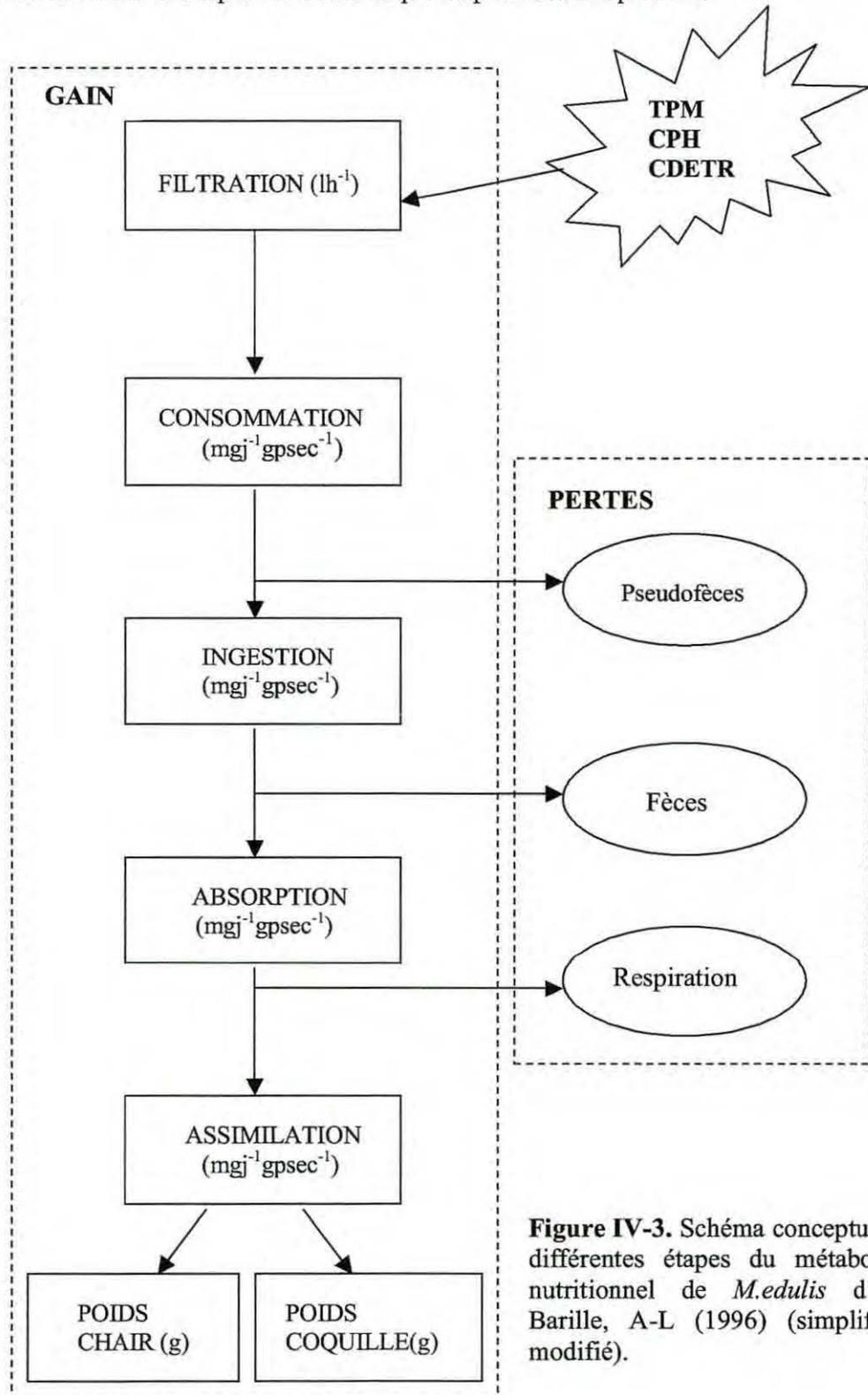


Figure IV-3. Schéma conceptuel des différentes étapes du métabolisme nutritionnel de *M.edulis* d'après Barille, A-L (1996) (simplifié et modifié).

IV.3.b Variables forçantes¹ et variables d'état².

Les facteurs environnementaux qui agissent sur la croissance de *M.edulis*, en conditions immergées, sont :

- a) La concentration de la nourriture particulaire totale (>2µm); elle est composée par une fraction détritique, une fraction phytoplanctonique, plus une fraction inorganique particulaire.

$$TPM = CDETR + CPHYT + PIM$$

TPM : concentration de matière particulaire total (mg l⁻¹).

CDETR : concentration de matière détritique (mg Cl⁻¹).

CPHYT : concentration de phytoplancton (mg Cl⁻¹).

PIM ; matière inorganique particulaire (mg Cl⁻¹).

Les concentrations de phytoplancton, en termes de carbone organique, ont été obtenues à travers de la transformation des acquis de masse de chlorophylle à masse de carbone organique, par moyenne du facteur de conversion *c2chl* (Table IV-1), trouvé sur bibliographie. Les concentrations de matière détritique, sont similairement obtenues à partir de la transformation de la masse de matière organique particulaire (POM) à masse de carbone organique particulaire (POC), depuis enlevant la masse de carbone du phytoplancton.

$$CPHYT = c2chl * [CHL]$$

$$POC = fc1 * [POM]$$

$$CDETR = POC - CPHYT \Leftrightarrow CPHYT < POC$$

- b) La température : elle agit sur les rendements des réactions métaboliques de la moule.

TEMP; température de l'eau (°C).

- c) La qualité de la nourriture ; c'est le rapport de la matière organique particulaire (POM) et la matière particulaire total (TPM):

$$qualité = \frac{POM}{TPM} \quad (\text{s.u.})$$

La salinité est aussi une variable forçante mais elle n'est pas prise en compte ceci dû aux faibles variations annuelles que présente le Pertuis Breton (Barille, 1996).

Les variables d'état sont le poids de la chair sèche (*biochair*) et le poids de la coquille organique (*biosho*) et inorganique (*bioshi*). Elles sont donc trois équations différentielles qui constituent le modèle. Les paramètres utilisées par le modèle (Table IV-1) sont obtenus à travers d'une recherche bibliographique.

¹variables environnementales qui vont influencer la croissance du moule dans les Pertuis Breton.

²variables simulées par des équations différentielles (temporelles).

biochair ; biomasse de la chair (g psec).
biosho ; shell organique biomasse (g psec).
bioshi ; shell inorganique biomasse (g psec).

Parametre	Expresion	valeur	Reference
<i>abphyt</i>		0.8 (s.u.)	Grant et Bacher,1998
<i>abdetr</i>		0.4 (s.u.)	Grant et Bacher,1998
<i>irmax1</i>	Ingestion maximale (individu d'un gramme de poids sec de la chair).	$14 \text{ mg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{gpsec}^{-1}$	C. Bacher (com.personelle)
<i>respfac1</i>	Respiration de base où standard (sans l'effet de l'absorption)	$6.34 \text{ mgC}\cdot\text{j}^{-1}\cdot\text{gpsec}^{-1}$	C. Bacher (com.personelle)
<i>respfac2</i>	Pente de la droit de régression	0.587 (s.u.)	C. Bacher (com.personelle)
<i>parcr</i>	Taux de filtration standardisé (individu de 0.7 g de psec)	$1.8 \text{ l}\cdot\text{h}^{-1}$	Barille,1996
<i>partpm</i>	Coefficient de proportionalité entre <i>firef</i> et TPM.	$8.6\text{e-}03 \text{ l}^2\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$	Widdows et al.,1979 Grant et Bacher, 1998
<i>allfr</i>	Exposant d'allometrie pour l'effet du poids sur la filtration.	0.75 (s.u.)	Bayne et al.,1993 Grant et Bacher,1998
<i>fcPOMgC</i>	Facteur de conversion POM à carbone organique	$0.38 \text{ mgPOM}\cdot\text{mgC}^{-1}$	Grant et Bacher,1998
<i>esel</i>	Efficacité de sélection.	0.8 (s.u.)	Grant et Bacher,1998
<i>alling</i>	Exposant d'allometrie pour l'effet du poids sec de la chair sur l'ingestion maximale.	0.40 (s.u.)	Barillé,1996
<i>allresp</i>	Exposant d'allometrie pour l'effet du poids sur la respiration	0.68 (s.u.)	Bayne et al.,1993 Grant et Bacher,1998
<i>fcCsec</i>	Facteur de conversion C organique à masse sèche de la chair.	$0.40 \text{ mgC}\cdot\text{mgsec}\cdot\text{chair}^{-1}$	Smaalet Sholten,1997 Grant et Bacher,1998
<i>ptot2pcoq</i>	Facteur de conversion poids de la coquille à poids totale.	$2.74 \text{ gpffrais}\cdot\text{gsec}^{-1}$	Barillé,1996
<i>c2chl</i>	Facteur de conversion masse chla à masse de C organique.	$50 \text{ mgC}\cdot\text{mgChla}$	Eppley et al. 1971
<i>shinor</i>	Rapport de masse matière organique, matière inorganique dans la coquille.	$19 \text{ ginorg}\cdot\text{gorg}^{-1}$	Barillé,1996
<i>q10bt</i>	Coefficient correcteur des basses températures.	$0.07 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$	Grant et Bacher,1998
<i>q10ht</i>	Coefficient correcteur des hautes températures	$0.07 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$	Grant et Bacher,1998
<i>q10coq</i>	Coefficient correcteur de l'effet de la TEMP sur l'incorporation de matière inorganique à la coquille.	$0.07 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$	Grant et Bacher,1998
<i>respjeu1</i>	Pourcentage de réjection dans les pseudofèces (TPM<5mg/l)	0	Grant et Bacher, 1998
<i>respjeu2</i>	Pourcentage de réjection dans les pseudofèces (5<TPM<10mg/l)	0.2	
<i>respjeu3</i>	Pourcentage de réjection dans les pseudofèces (10<TPM<40mg/l)	0.4	
<i>respjeu3</i>	Pourcentage de réjection dans les pseudofèces (TPM>40mg/l)	0.7	

Table IV-1. Liste des paramètres pour le modèle écophysologique de *M. edulis*

L'ANNEXE II montre en détail la conceptualisation des processus physiologiques de *M.edulis*, ainsi comme la validation du modèle dans le Pertuis Breton.

IV.4 Couplage Hydrodynamisme-Physiologie.

IV.4.a Equations.

Le « couplage » des deux modèles consiste en l' introduction de la déplétion de la nourriture dans l'équation général du transport (éq.IV-1). La déplétion est quantifiée par les taux instantanés d'ingestion (*ingreel*, *ingphyt* et *ingdetr*) évaluées à travers le modèle écophysologique (voir texte ANNEXE II)..

$$\frac{\delta C}{\delta t} = \underbrace{-u_{(t)} \frac{\delta C}{\delta x} - v_{(t)} \frac{\delta C}{\delta y} + D_x \frac{\delta^2 C}{\delta x^2} + D_y \frac{\delta^2 C}{\delta y^2}}_{\text{Modèle de transport}} \underbrace{- FluxC}_{\text{Modèle écophysologique}}$$

C, est la concentration de particules de matière par la moule : CPHYT, CDETR, TPM
FluxC, est la quantité de matière consommée par litre et unité de temps.

Le flux de déplétion est obtenue à travers du produit de la taux instantané d'ingestion (*ingestion*) multipliée par l'effective de moules présent dans le parc,

$$\boxed{FluxC = Stock * ingestion * V_{Stock}^{-1}} \quad (mg * l^{-1} * jour^{-1})$$

V_{Stock} : volume occupé par le stock de moules.
Stock ; grammes de poids sec totaux de chair dans le parc.
ingestion ; *ingreel*, *ingphyt*, *ingdetr*.

IV.4.b Variables d'état et forçantes du modèle.

Sis variables d'état sont considérés : concentration de matière organique total (*TPM*), concentration de matière détritique (*CDETR*), concentration de phytoplancton (*CPHYT*), psec de la chair (*biochair*) et psec organique (*biosho*) et inorganique (*bioshi*) de la coquille. Le poids frais total de la moule (*biotot*) est déterminé par moyenne d'une régression linéaire avec le poids sec total de la coquille (*shellwt*).

Les variables forçantes du modèle sont ; l'hydrodynamisme (*u,v* et *z*), la concentration de nourriture disponible pour la moule (*TPM*, *CPHYT*, *CDETR*), la température de l'eau (*TEMP*) et la biomasse du stock en élevage (*Stock*) dans le parc à filières.

$$\boxed{Stock = n^{\circ} \text{ moules} * biochair} \quad g \text{ psec chair du stock du parc à filières.}$$

IV.4.c Schéma conceptuel du modèle couplé.

Le schéma conceptuel du modèle couplé est présenté en figure IV-4.

Les particules de matière organique sont transportées par les effets d'advection et diffusion et depuis elles sont consommées (*FluxC*) par le stock de moules (*Stock*).

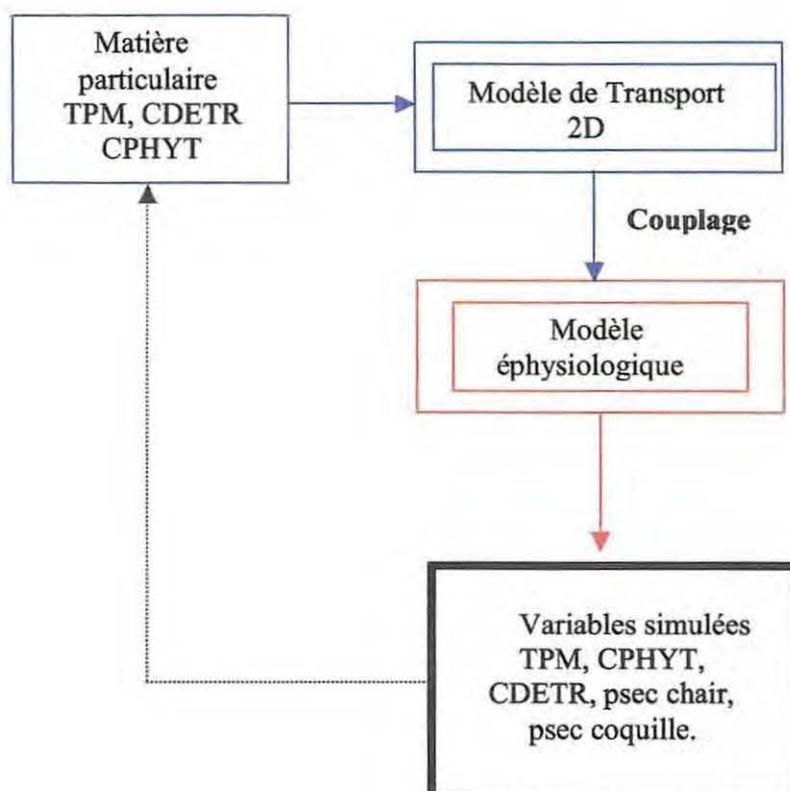


Figure IV-4. Schéma conceptuel du modèle couplé. Modèle de transport particulaire / Modèle de croissance de *M. edulis*.

IV.4.d Structure du parc à filières.

Le parc à moules immergée dans le centre du Pertuis est formé par 240 filières de 100 m arrangées en 20 lots. Chaque filière contient 85 cordes verticales de 6 m de longueur. La profondeur moyenne de la colonne d'eau du parc est 9.5m. Le plan de répartition des lots est présenté en figure IV-2.

Nous avons fait une approximation de la distribution des filières (ligne pointillée), en prenant 10 mailles égales de 500*500 m, qui contiennent 48 filières (2 lots) chacune. L'extension totale couverte est de 2500000 m². D'une certaine façon, nous avons compressé la distribution des filières, en élevant les espaces vides entre les lots et entre les deux lignes de lots. En fait, le modèle considère pour chaque maille une distribution uniforme des moules sur toute la colonne d'eau.

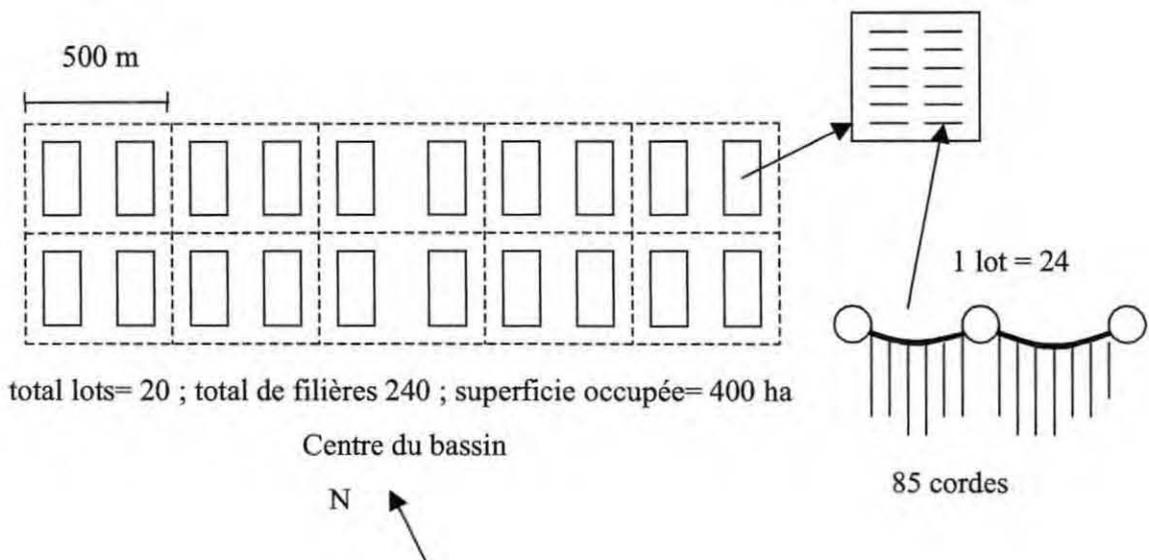


Figure IV-5. Structure du parc de filières du Pertuis Breton.

Une autre façon de modéliser la distribution des filières est considérer une distribution uniforme sur les 6 premiers mètres, et depuis réaliser une estimation du flux de matière de la couche de fond vers la couche des filières.

L'orientation du parc du modèle est aussi adapté à la grille de calcul de SAM-2D (orthogonal X-Y) de la façon montrée en figure II-3. Le nombre de moules par maille dans le parc est déterminé comme suit,

$$n^{\circ} \text{ moules} = n_{\text{filières}} * n_{\text{moule_corde}} * n_{\text{cordes}} * \text{longueur}$$

- n_{filières}* : nombre de filières par maille.
- n_{cordes}* : nombre de cordes par filière.
- n_{moule_corde}* : nombre de moules par corde.
- longueur* : longueur des cordes verticales.

IV.4.e Configuration de la grille de calcul.

La grille de calcul du modèle couplé est celle utilisée dans le modèle de transport (fig.IV-2). Ainsi, les vitesses du courant et la profondeur sont définies sur les cotés des mailles ; la concentration et la profondeur moyenne, au centre des mailles.

Un total de 8*5 mailles sont prises en compte pour l'application du modèle de transport, des mailles externes ayant été ajoutées pour les limites du modèle (fig. IV-6).

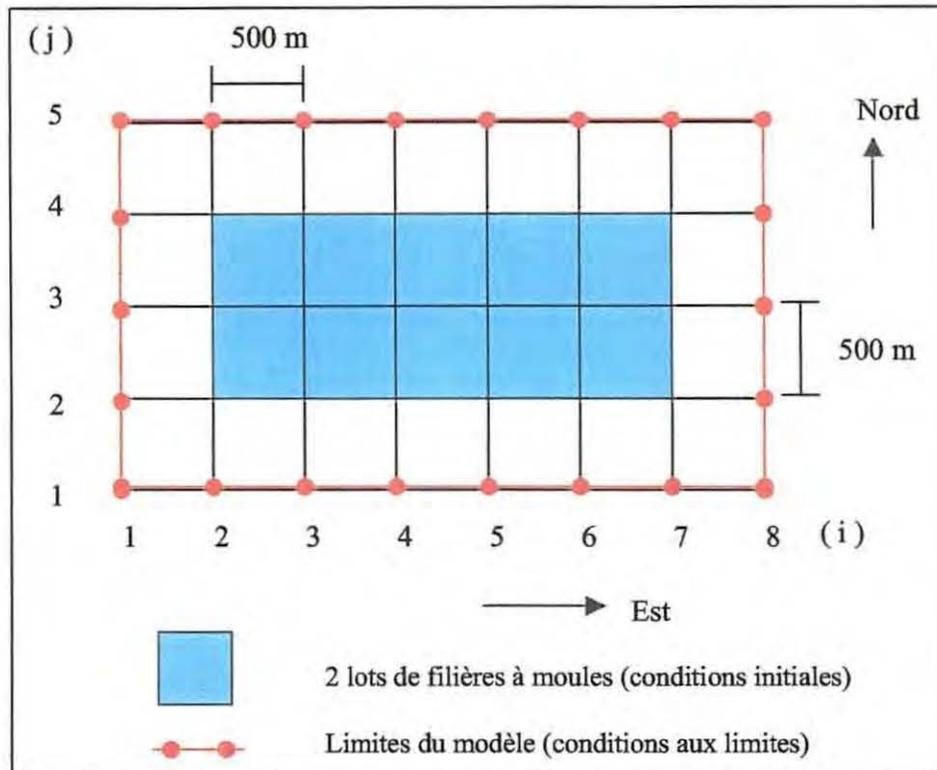


Figure IV-6. Configuration de la grille de calcul du modèle de déplétion de la nourriture.

IV.4.f Conditions initiales et aux limites. Définitions du pas de temps du modèle.

Conditions initiales.

Initialement, la concentration de matière particulaire dans le parc est égal à la concentration mesurée dans la station biologique. Une concentration uniforme dans tout le domaine est appliquée au début de la simulation. Lorsque le modèle de transport modifie la distribution uniforme de la concentration, il existe une différenciation de la consommation par la moule dans l'espace. La consommation est alors évaluée à chaque pas de temps de calcul du transport (dt).

La condition initiale pour la biologie est la biomasse totale du stock en poids sec de la chair (*Stock*), mise en élevage. La croissance du *Stock* est déterminée à chaque pas de temps dt_{bio} à travers du modèle écophysique (ANNEXE II).

Condition aux limites

Les conditions aux limites du modèle sont les valeurs des concentrations mesurées dans la station biologique. Pendant la simulation, les concentrations seront changées avec un pas de temps égal à dt_{bound} . C'est à dire, pour chaque pas de temps dt_{bound} sont lues les nouvelles valeurs de concentration mesurées à dans la station biologique.

Dû à la condition de stabilité du modèle de transport (voir ANEXE I, éq.2), le pas de temps utilisé (dt) doit être inférieur au pas de temps prédéterminé par SAM-2D ($dt=20$ min.). Pour assurer la stabilité de le schéma du transport particulaire, un $dt=200$ secondes sera suffisent.

La définition des pas de temps dt_{bio} et dt_{bound} , permet une importante réduction du temps de calcul du modèle.

	Valeur	Unités	Description de l'étape du modèle
dt	2,2	minutes	consommation de la moule et transport
dt_{bio}	12	heures	croissance de la moule
dt_{bound}	3	heures	lecture des concentrations aux limites

Table IV-2. Pas de temps du modèle de déplétion de la matière particulaire.

IV.4.g Les variables forçantes établissant le niveau de déplétion des moules.

Lorsque l'hydrodynamisme, la température de l'eau et la quantité de nourriture présente sont caractéristiques du Pertuis Breton, c'est à dire, nous ne pouvons pas les modifier, il sera la biomasse total du *Stock* qui nous fournira le potentiel mytilicole du parc.

Plusieurs scénarios seront étudiés afin d'étudier la déplétion de la nourriture par la moule. Les différents scénarios sont montrées dans la table IV-3.

	Nominal	Future I	Future II	Future III	Future IV	Future V
$n_{filières}$	24	250	500	750	1000	500
ρ_{moules} (moules/m ³)	5	53	107	161	214	107
dimension du parc ($L_x * L_y$)	$L_x=2500m$ $L_y=1000m$	$L_x=2500m$ $L_y=1000m$	$L_x=2500m$ $L_y=1000m$	$L_x=2500m$ $L_y=1000m$	$L_x=2500m$ $L_y=1000m$	$L_x=2500m$ $L_y=2500m$
geometrie du parc	rectang.	rectang.	rectang.	rectang.	rectang.	carre

Table IV-3. Scénarios du modèle de déplétion de la matière particulaire.

Les simulations du modèle sont réalisées pendant 10 mois. Lorsqu'on dispose que d'un registre d'un mois du champ de courants dans la filière (archive SAM-2D), nous avons utilisé 10 fois le même registre afin de considérer l'hydrodynamisme pendant la durée de simulation du modèle de déplétion.

La simulation nominal correspond à la situation actuelle du parc à filières ; un total de 240 filières (24/maître) disposés au centre du bassin. Le coefficient de diffusion turbulente pris dans le modèle de transport particulaire est $D=D_x=D_y=50m^2s^{-1}$ mais il correspond à un coefficient de diffusion turbulente réelle de $100m^2s^{-1}$ (voir ANNEXE I).

IV.5 Résultats et discussion.

Bien que l'obstruction par l'équipement d'élevage doive diminuer le flux matière particulaire vers le parc des filières (Pilditch et al., 2001), on constate cependant qu'il n'existe pas de réduction de la concentration de la matière particulaire. Le base niveau de déplétion prédit par la simulation nominal est consistant avec les observations mesurées sur la station biologique (voir fig. IV-7.A).

Les résultats pour les différents futures, montrent un très faible déplétion des différentes types de matière organique particulaire, en existant un flux de consommation par la moule,

beaucoup plus élevé pour le phytoplancton (Table IV-4, fig.IV-8.B). Cette situation est logique puisque le phytoplancton constitué la principal source de nourriture de la moule (Kautsky, 1982, cité par Barille,1996).

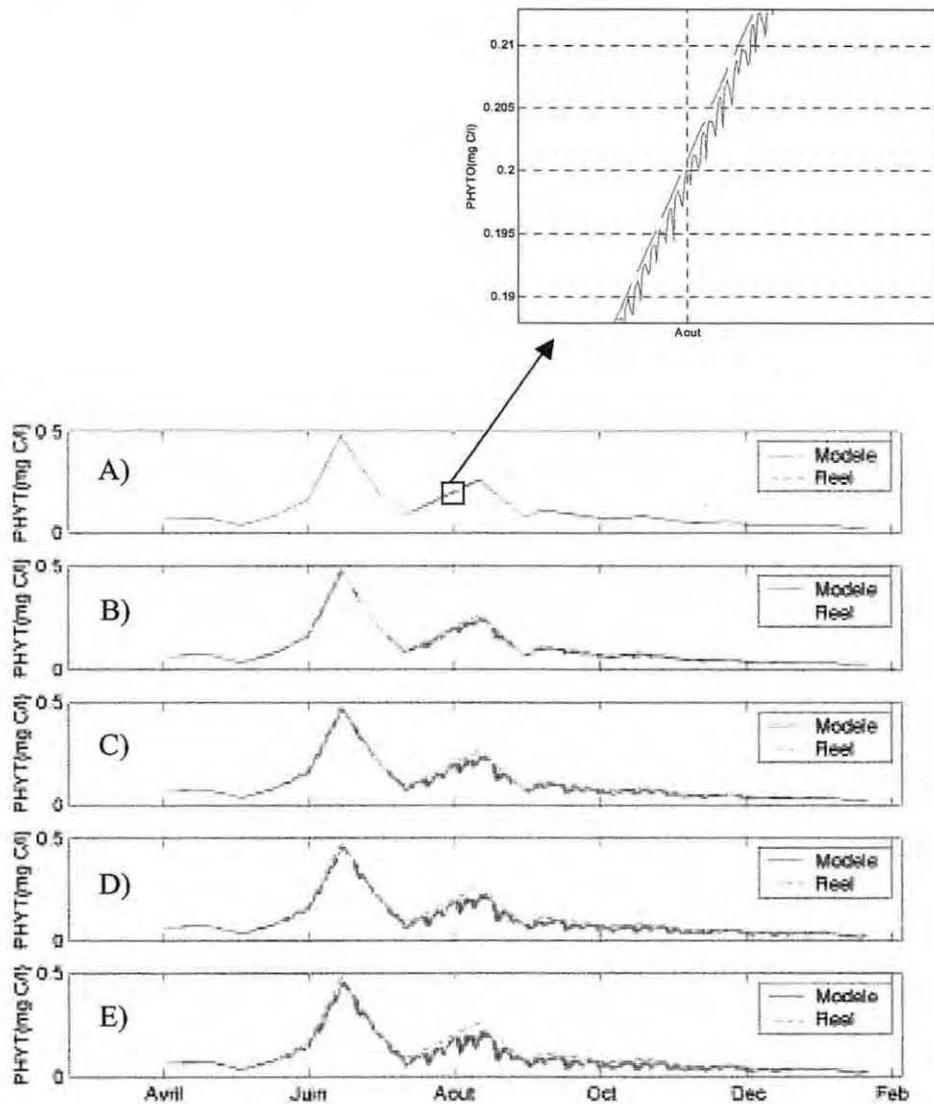


Figure IV-7. Evolution temporelle de la concentration de phytoplancton dans la maille (2,2) pour les différents scénarios : A) Nominal , B) Future I, C) Future II, D) Future III, E) Future IV. Les fluctuations présentes dans la solution du modèle (voir zoom), sont dues à la non-conservation exacte de la masse dans le modèle de transport utilisé (éq.IV-2), c'est à dire, la quantité de masse qui entre dans une maille n'est pas exactement égal à la quantité de masse qui sort (ANEXE I, fig.3-A). Cette petite quantité de masse disparue est la responsable l'apparition des pics descendants dans la solution. La perte de masse observée est de l'ordre d'un 0.1 %.

La table IV-4 montre les pourcentages de déplétion par jour dans tout le parc à filières, moyennés sur l'année.

$$\% \text{ déplétion journalière} = \frac{C_{input}^j}{C_{cons}^j} * 100$$

C_{input}^j : matière qu'entre dans le parc par jour

C_{cons}^j : matière consommée dans le parc par jour

Un augmentation de 10 fois le stock de moules du présent (Future I), seulement réduit la concentration de la matière particulaire dans le parc entre 4-5.5 %, en dépendant du type de nourriture. Ces base pourcentage de déplétion est en concordance avec l'élévée potentialité mytilicole du site ; le Pertuis Breton est un des sites les plus productifs du monde, avec un production annuelle de 450 mgC/m² (Barille, 1996).

Scénarios	% déplétion journalière		
	Matière particulaire total	Phytoplancton	Matière détritique
Nominal	0.4	0.56	0.44
Future I	4	5.5	4.4
Future II	7.7	10.2	8.3
Future III	11	14.4	11.9
Future IV	14	18	15
Future V	13.2	17.2	14.2

Table IV-4. Déplétion journalière de la matière particulaire pour les différents scénarios.

Le niveau de déplétion a été moyenné pour chaque mois (fig.IV-8), en observant un forte déplétion journalière dès le mois d'août jusqu'à le mois de Novembre. Cette situation correspond à la forte croissance que connaît la moule pendant cette période (voir ANEXE II, fig.3-A). Malgré q'on trouve des pourcentages de déplétion jusqu'à 10% (en Août) pour une augmentation de 10 fois le stock de moules actuelle dans le Pertuis Breton, nous pouvons affirmer qu'est viable car la station biologique montre très forts valeurs de Chl-a (fig.II-9). D'un point de vu écologique, augmenter la densité des moules de 5 à 53 moules/m³ ne limite pas la production primaire du site. Par contre, à mesure qu'on augmente la densité de moules dans le parc, l'augmentation du niveau de déplétion peut limiter localement la production primaire, surtout pendant l'été et automne (fig.IV-8.B).

L'effet du flux bidirectionnel de la marée sur la déplétion

Du le flux bidirectionnel de la marée, nous trouvons en fonction du sens du flux, un gradient de concentration vers la direction contraire du déplacement du courant. En marée montant, il existe un gradient de concentration dès l'Est vers l'Ouest du parc (fig.IV-9). Du la consommation des particules des masses d'eau qui entrent par l'ouest du parc (voir fig.IV-6), les filières plus côtières reçoivent mois de nourriture. Quand le flux de marée se reverse, il y a une inversion du gradient de concentration, en étant maintenant, les filières de l'Ouest qui reçoivent mois de nourriture (fig.IV-10). Ainsi, d'après une cycle de marée complet, sont les

zones du centre du parc qui vont présenter la plus élevée déplétion car elles sont qui reçoivent en moyenne moins d'apports de nourriture. Par contre, les moules présents aux limites du parc (Est et Ouest du parc) sont les plus bénéficiés par le flux de nourriture.

Logiquement, la magnitude du gradient de concentration établi, dépend du niveau de déplétion. Ce fait, peut s'observer en figure IV-9 où en dépendant de la densité de moules mise en élevage le gradient est plus prononcé ; pour la simulation nominal il y a un très faible gradient ($grad_{max_x} \in O[10^{-7} \text{ mgC/l/m}]$), pour le Future II le gradient commence augmenter ($grad_{max_x} \in O[10^{-6} \text{ mgC/l/m}]$) et pour le Future IV le gradient est notamment élevé par rapport la simulation nominal ($grad_{max_x} \in O[10^{-5} \text{ mgC/l/m}]$).

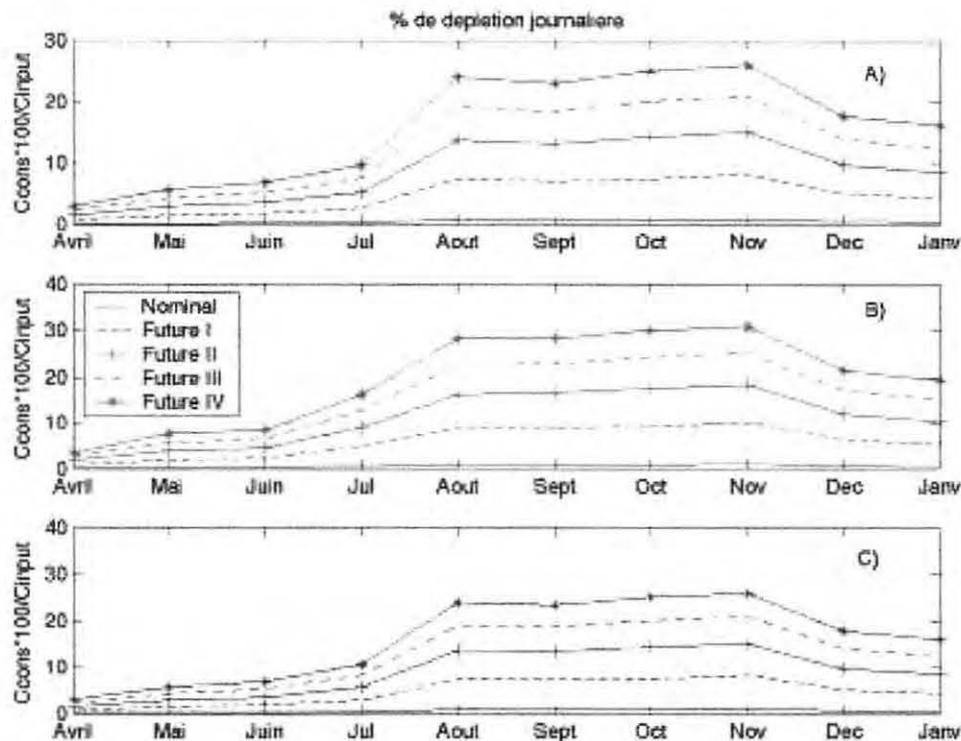


Figure IV-8. Pourcentages de déplétion journalière, dans tout le parc, moyennés chaque mois :A) Concentration de matière total particulaire (TPM), B) Concentration de phytoplancton (CPHYT), C) Concentration de matière détritifique

L'effet de la déplétion de la matière particulaire sur la croissance de *M.edulis*

Nous avons représenté la croissance individuelle de la moule des filières aux limites (maille 2,3 et maille 6, 3) et des filières centrales (maille 4,3), pour les différents scénarios, afin d'observer la différence en croissance due le flux bidirectionnelle de la marée. Les résultats sont montrés dans la figure IV-11.

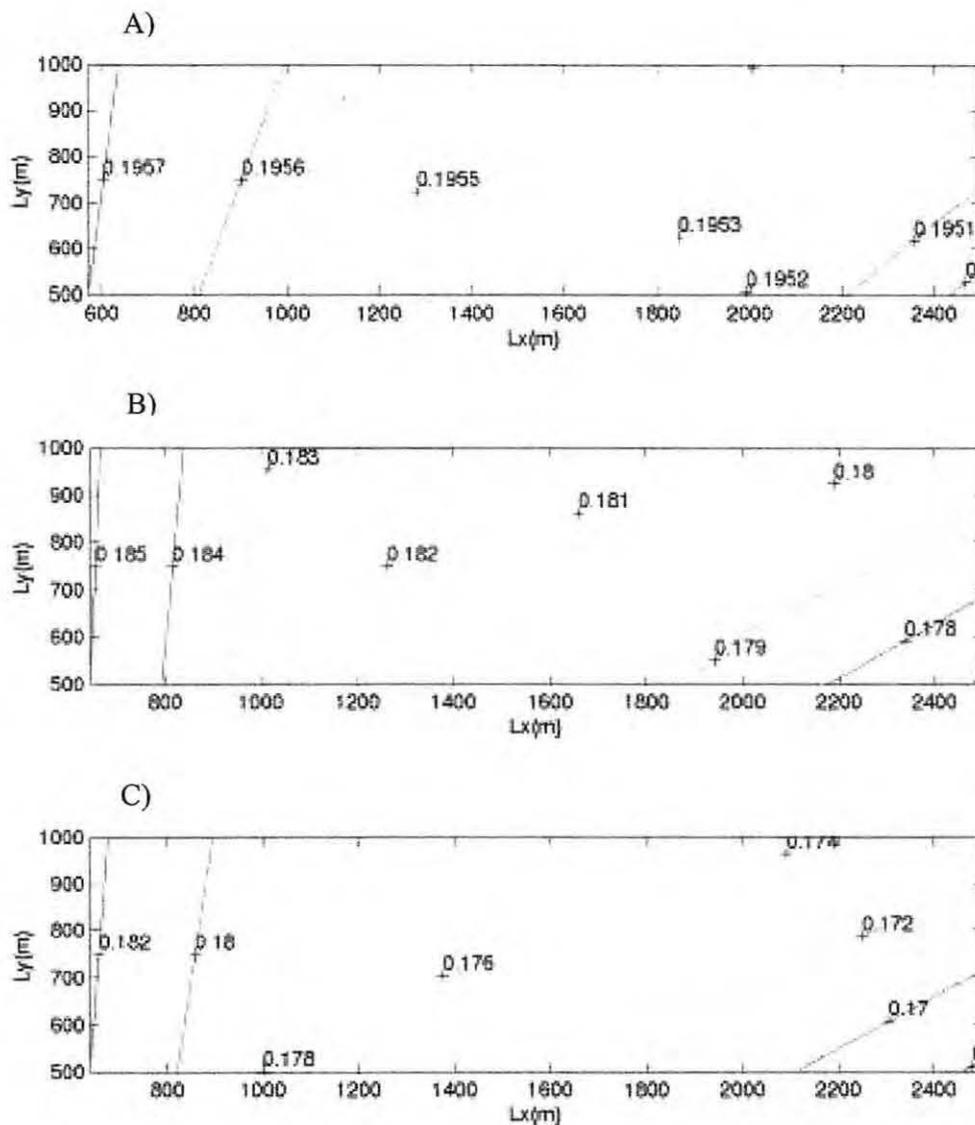


Figure IV-9. Distribution spatiale de la concentration de phytoplancton (mgC/l) dans le filière, le 1 d'août, en marée montant et pour différents scénarios : A) Nominal, B) Future II, C) Future IV.

La figure IV-11, montre une différence en la croissance individuelle de la moule dans l'espace, du précisément l'existence du flux bidirectionnelle de la marée. De cette manière, les moules de l'Ouest et l'Est (mailles 2,3 et 6,3) ont plus apports de nourriture par la marée et ils vont être moins limitées par la nourriture (fig.IV-11.A et IV-11.C), par contre, les moules centrales (maille 4,3) ont moins d'apports de particules et pourtant il existera une compétitivité par la nourriture plus élevé (fig.IV-11.B). La compétitivité par la nourriture est observée dans l'espace (effet de l'hydrodynamisme) et en fonction de la densité de moules.

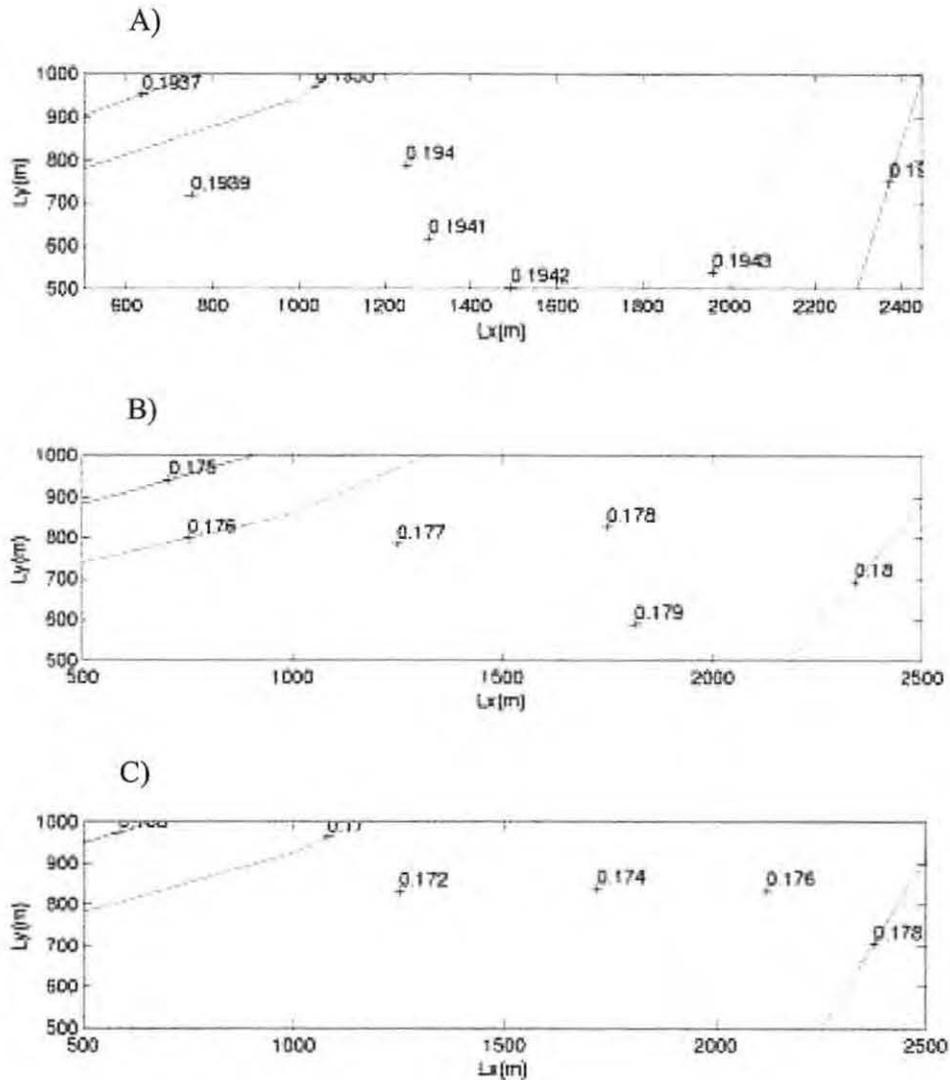
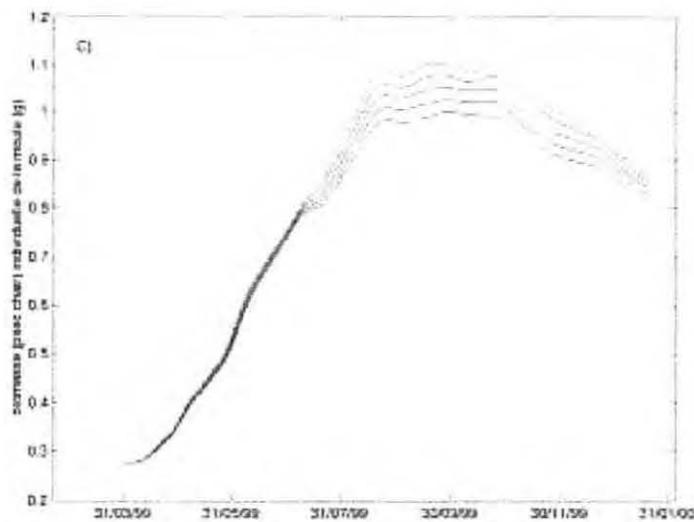
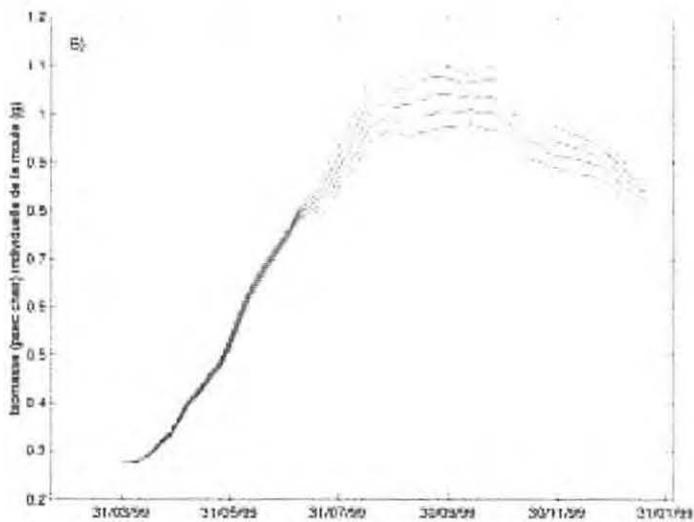
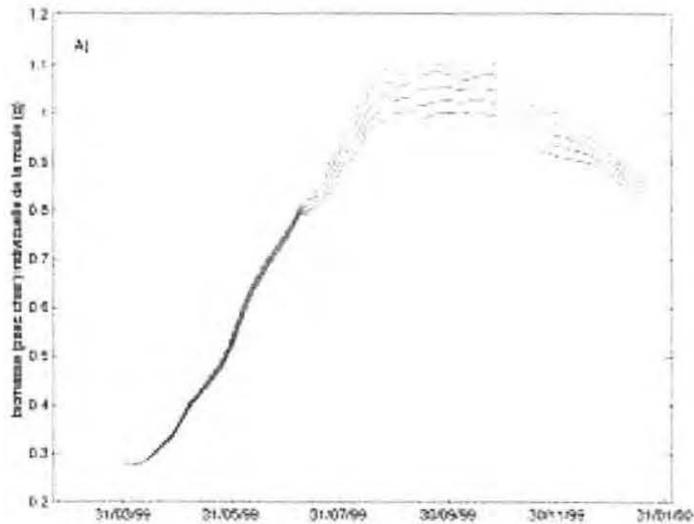


Figure IV-10. Distribution spatiale de la concentration de phytoplancton (mgC/l) dans le filière, le 1 d'août, en marée descendant et pour différents scénarios : A) Nominal, B) Future II, C) Future IV.

Malgré la forte augmentation du stock de moules mise en élevage, pendant le début de la simulation (d'Avril jusqu'à Août), la quantité de nourriture présente dans le parc, est suffisante pour les demandes métaboliques du stock de « jeunes » moules ; il n'existe pas une grande différence entre les trajectoires des croissances individuelles de la moule (fig.IV-11).

A partir du mois d'août, on a les niveaux de déplétion les plus élevés (fig.IV-11) et une croissance plus lente est observée à mesure que nous augmentons le nombre de moules (Future I vers Future IV). Cependant, les poids sec final obtenue par les différents scénarios, n'est pas assez différent. Nous rencontrons l'élévée potentialité mytilicole du site étudié.



FigureIV-11. Représentations du poids sec de la chair de *M.edulis* dans différentes mailles et pour les différents scénarios : A) Maille (2,3), B) Maille (4,3), C) Maille (6,3).

----- Nominal

—— Scénarios

En fonction des résultats obtenus, la gestion du parc des filières peut s'orienter de 2 façons :

- a) L'obtention de petites moules mais une grande biomasse de stock final.
- b) L'obtention de moules plus grandes mais moins de biomasse en fin de culture annuelle.

V Conclusion générale

L'étude sur le devenir des particules de matière organique, ainsi comme la déplétion de la moule dans le parc de filières du Pertuis Breton, ont mise en évidence le *forte hydrodynamisme* que caractérise le Pertuis Breton :

- Un faible temps de résidence des particules de matière organique. D'après 5 jours, aucune particule du bassin peut rester dans le Pertuis Breton, à raison du courant résiduelle Nord-Sud.
- Les moules sur filières sont très influencés par les apports océaniques. Dans le parc des filières arrive, principalement, phytoplancton océanique, provenant de la large mer. Il est très important le flux entrant de marée.
- Une faible déplétion des moules dû l'important flux de nourriture apporté pour les courants de marée. Les résultats montrent que le stock de moules qu'il y a en l'actualité, peut-être augmenté au mois 10 fois, sans agiter fortement sur la croissance de la moule (fig.IV-11). Cette décision, ne va pas provoquer la déstabilisation de l'écosystème « producteur » du Pertuis Breton, vis-à-vis les pourcentages de déplétion journalière observées ; les courants de marée, sont très élevés, en proportionnant aux moules sur filières, assez de particules de matière organique.

ANNEXE I. Équation d'advection-diffusion. Validation et résultats du modèle.

Solution exacte de l'équation d'advection-diffusion.

La solution analytique de l'équation d'advection-diffusion en 2D, peut s'obtenir à partir de plusieurs méthodes analytiques de résolution de PDE's : séparation de variables, méthode des images, etc.

$$C(x, y, t) = \frac{1}{\sigma_x(t)\sigma_y(t)\sqrt{2\pi}} \exp\left[\frac{-(x-ut-x_0)^2}{2\sigma_x^2(t)} + \frac{-(y-vt-y_0)^2}{2\sigma_y^2(t)} \right] \quad (\text{éq.1})$$

x_0, y_0 sont les coordonnées du maximum de concentration.

La solution est une distribution de Gauss 2D modifiée. La diffusion intervient dans l'équation en augmentant l'écart type de la distribution. Elle s'incrémente dans le temps comme suit,

$$\sigma(t) = \sqrt{2Dt}$$

Quand $t \rightarrow \infty$ alors $\sigma(t) \rightarrow \infty$ et la concentration tombe à zéro (dilution complète).

Analyse de la stabilité du schéma : Von Newman.

L'analyse de Von Newman prend comme hypothèse que les coefficients de l'équation différentielle analysée, varient lentement pour pouvoir les considérer constants dans l'espace et le temps. En ces conditions, la solution de l'équation peut s'exprimer comment :

$$C_m^n = \zeta^n e^{ikm\Delta x} \quad 1D$$

$$C_{m,l}^n = \zeta^n e^{ik_x m \Delta} e^{ik_y l \Delta} \quad 2D$$

ou k c'est un numéro d'onde et $\zeta = \zeta(k)$ est un numéro complexe qui dépend de k et s'appelle facteur d'amplification de le schéma. La condition de stabilité donc faite assurer que le facteur d'amplification n'augmente pas au cours du temps pour quelque k donnée; c'est à dire : $|\zeta(k)| \leq 1 \quad \forall t$.

L'application de l'analyse de Von Newman à l'équation (1) donne la condition suivante, si $\Delta = dx = dy$ (Peyret et Taylor, 1983).

$$\boxed{dt \leq \frac{\Delta^2}{4D + (|u| + |v|)\Delta}} \quad (\text{éq.2})$$

en remarquant que $D=D_x=D_y$.

Cet schéma, présente un autre variété d'erreur très commun des équations hyperboliques ; la dispersion numérique ou erreurs de phase. La dispersion numérique ne peut pas être éliminée, mais peut se diminuer en réduisant le pas de temps (dt).

Validation et résultats.

Une simulation pendant un temps de 16000 secondes (≈ 27 minutes), appliquée à un point de concentration constant (*cond.I*) avec une condition aux limites de Dirichlet (*cond.II*), a été réalisée, afin de valider le modèle de transport. Les paramètres utilisées sont présentés en table 1.

Condition I :

$$\begin{aligned} C(x=0, y=0, t) &= 0 \\ C(x=L_x, y=L_y, t) &= 0 \end{aligned}$$

Condition II :

$$\begin{aligned} C(x_0, y_0, t=0) &= 1 \text{ mg/l} \\ x_0, y_0 & ; \text{ position initial du point de concentration} \end{aligned}$$

Le simulation du modèle de transport montre une bonne corrélation entre la solution exacte (éq.1) et la solution numérique (voir fig.2). Cependant, la dispersion numérique est présente car pour un coefficient de diffusion turbulente $D_x = 50$, le modèle simule une diffusion réelle correspondant à $D=100$, vis-à-vis la solution analytique. Il existe donc une sur-estimation de la diffusion par le modèle (50% environ). La forme de la distribution normal prédite par le modèle, n'est pas symétrique, elle est allongée vers la direction transversal au vecteur résultant de vitesse (fig.1). Ce phénomène est produit par la dispersion numérique du schéma. L'advection est très bien simulée pour le modèle, en observant le même déplacement de la distribution de concentration (fig.1).

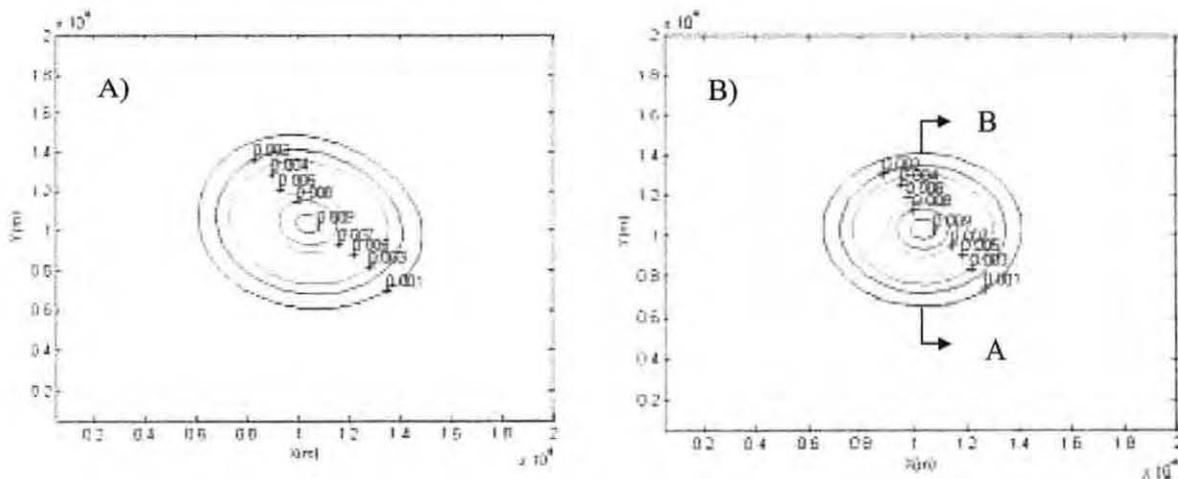


Figure 1. Comparaison qualitative des distributions de la concentration (mg/l) d'après $t \approx 27$ minutes environ. A) Solution du modèle ; B) Solution analytique.

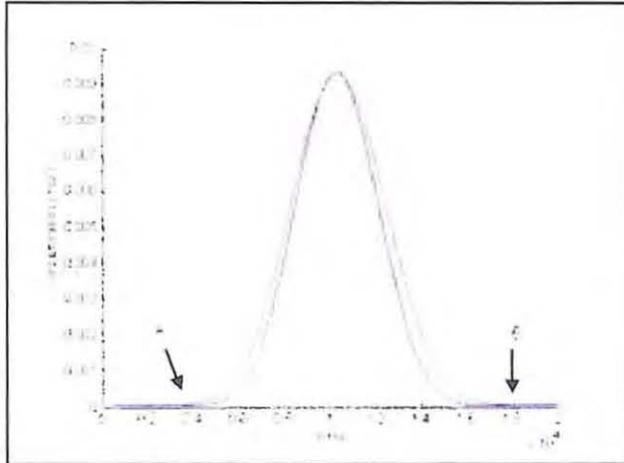


Figure 2. Comparaison de la solution réelle et du modèle d'après 27 minutes

paramètre	valeur	unités
$dx=dy$	500	m
dt	200	s
$u=v$	0.4	$m s^{-1}$
$D_{théorique}$	100	$m^2 s^{-1}$
$D_{modèle}$	50	$m^2 s^{-1}$

Table 1. Paramètres utilisés pour la validation du modèle de transport.

Pour la même section A-B, ont été représentées les distributions de concentration à la fin de la simulation avec différents coefficients de diffusion pour la solution analytique et pour le modèle. Les résultats permettent estimer le niveau de sensibilité du modèle aux changements de la valeur du coefficient de diffusion.

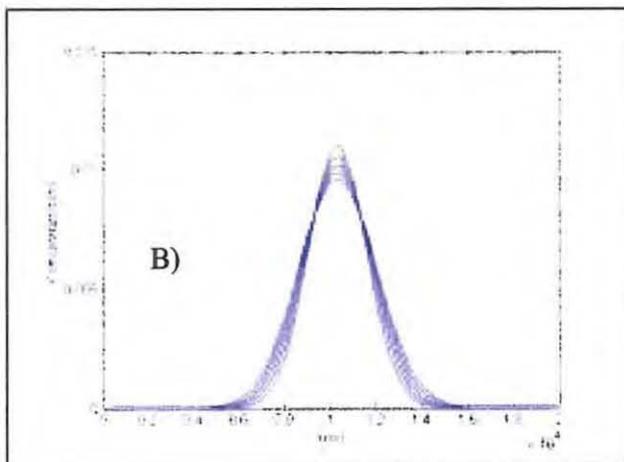
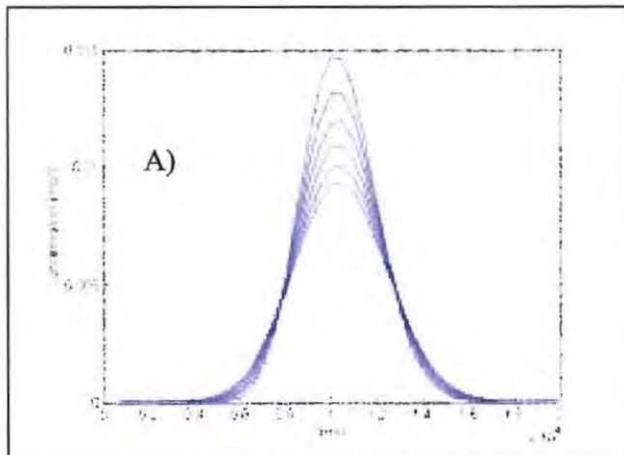


Figure 3. Comparaison des niveaux de diffusion de la solution théorique et de la solution du modèle en fonction du coefficient de diffusion turbulente. A) Solution du modèle pour les coefficients ; 0, 10, 20, 30, 40 et 50. B) Solution analytique pour les coefficients ; 50, 60, 70, 80, 90 et 100.

Les résultats de l'analyse montrent effectivement une très important dispersion numérique de la solution du modèle; élevé écart type. Cependant, la solution numérique s'approche à la solution analytique pour de valeurs élevés du coefficient de diffusion turbulente. Ainsi, en conditions de forte diffusion turbulente du milieu, le modèle exprime correctement le phénomène de diffusion.

La fig.3.A montre un autre problème du modèle ; il existe une non conservation de la masse, car une diminution du pic de concentration, n'est pas en concordance avec l'augmentation de l'écart type.

ANNEXE II. Modèle écophysologique de *Mytilus edulis*. Validation du modèle dans le Pertuis Breton.

1. Modèle écophysologique de *M.edulis*.

a) Stratégie de la modélisation.

- 1) Définition des principaux processus physiologiques qui participent à la croissance de la moule (fig.1).
- 2) Conceptualisation mathématique des processus. Identification des variables forçantes² et des variables d'état³. Cette étape est la plus difficile pour la construction d'un modèle.
- 3) Détermination des paramètres participant aux équations. Chaque espèce de moule est caractérisée par quelques paramètres écophysologiques intrinsèques qui sont caractéristiques des conditions environnementales. L'obtention des paramètres intervenant dans le modèle se fait au moyen d'expériences de laboratoire. Une recherche bibliographique nous permettra de connaître les valeurs caractéristiques pour *M.edulis*.
- 4) Etablissement de la condition initiale pour les équations différentielles qui décrivent la croissance de la moule. Elles sont fondamentales pour une caractérisation correcte des variables d'état dans le site d'application du modèle.
- 5) Validation et analyse de sensibilité des paramètres qui ont le plus d'influence sur la valeur des variables d'état. L'analyse est très importante pour établir « un niveau de précision » des simulations et la hiérarchisation des paramètres à déterminer expérimentalement.

b) Conceptualisation des processus physiologiques de *M.edulis*.

1) FILTRATION.

L'intensité de filtration de *M.edulis* sera fonction de la concentration de la nourriture, de la température et du poids de la moule.

Effet de la TPM (frref).

La nourriture de *M.edulis* est composée par une grande part d'algues unicellulaires ; phytoplancton (Kautsky, 1982 ; Brown et Hartwick 1998; cité par Barille, 1996) et par une part plus faible de détritus (Coe et Fox, 1994 ; Fraga et Vives, 1960, cité par Barille, 1996).

L'effet de la concentration de la nourriture sur le taux de filtration de *M.edulis* a été déjà étudié dans des nombreux travaux de laboratoire déjà existants. Certains auteurs trouvent une dépendance décroissante entre la filtration et la concentration de TPM (Bayne et al, 1976 ; Hawkins et Bayne, 1994). Par contre, Brylinsky et al. (1991) ne trouvent pas d'effet de la TPM sur la filtration et d'autres auteurs, ex : Barille, A-L (1996), ne prennent comme variable que la concentration de matière organique particulaire (POM).

Le modèle ici présenté, prend l'effet négatif de la concentration de matière particulaire total (TPM) sur la filtration (Widdows et al., 1979 ; cité par Barille 1996) car il existe une forte remise en suspension dans le Pertuis Breton (TPM=32± 34 mg l⁻¹ ; Barille, A-L, 1996).

$$frref = parcr - partpm * TPM$$

frref (lh⁻¹) : taux de filtration de référence (pour un individu de 0.7 g de psec).

parcr (lh^{-1}) : taux de filtration standardisé (pour un individu de 0.7 g de psec). C'est pour une concentration nulle de TPM (sans l'effet de la turbidité).

partpm ($l^2mg^{-1}h^{-1}$) : coefficient de proportionnalité entre *frref* et TPM.

L'effet de la température (*eftemp*).

Le travail de Widdows et Bayne (1991) montre l'existence de trois intervalles de température dans lesquels la filtration a un comportement différent. Pour des températures plus basses de 5°C, une augmentation exponentielle de la filtration est constatée ; dans l'intervalle [5, 20°C] la température n'a pas d'effet ; à partir de 20°C il existera une diminution exponentielle de la filtration.

$$\text{Si } TEMP < 5^{\circ}C \quad \Rightarrow \quad e_{temp} = \exp((TEMP - 5) * q_{10bt}) \quad (\text{s.u.})$$

$$\text{Si } 5^{\circ}C \leq TEMP \leq 20^{\circ}C \quad \Rightarrow \quad e_{temp} = 1 \quad (\text{s.u.})$$

$$\text{Si } TEMP > 20^{\circ}C \quad \Rightarrow \quad e_{temp} = \exp((TEMP - 20) * q_{10ht}) \quad (\text{s.u.})$$

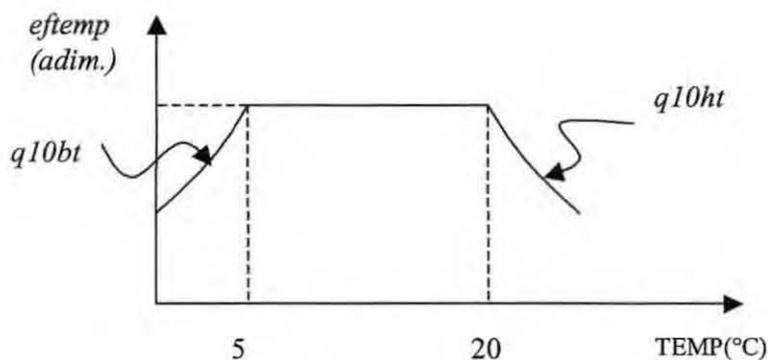


Figure1. Conceptualisation de l'effet de la température sur la filtration.

q_{10bt} ; coefficient correcteur des basses températures ($^{\circ}C^{-1}$).

q_{10ht} ; coefficient correcteur des hautes températures ($^{\circ}C^{-1}$).

L'effet du poids (*efpoid1*).

La quantité de particules retenue par une moule dépend de la surface de ses branchies. Logiquement, la surface des branchies est liée à la taille de la moule.

La relation existant entre le taux de filtration et le poids est une relation d'allométrie⁴.

$$efpoid1 = (biochair / 0.7)^{allfr} \quad (\text{s.u.})$$

allfr (s.u.) : exposant d'allométrie¹ pour l'effet du poids sur la filtration.

¹relation selon laquelle les individus dont le poids est inférieur à 0.7 g (moules petites) auront une intensité de filtration par unité de poids sec, plus grande que celle que présentent des individus > 0.7 g (moules grosses).

Taux de filtration par jour (*frjour*)

Le taux de filtration par jour sera une interaction (produit) entre la filtration de référence (*frref*) qui considère l'effet du poids et les effets de la température (*eftemp*) et du poids de la moule (*efpoidl*).

$$\boxed{frjour = frref * eftimep * efpoidl} \quad \text{unité : l}^{-1}\text{gpsec}^{-1}$$

2) CONSOMMATION.

En partant du fait que la matière organique particulaire ($> 2\mu\text{m}$) est complètement retenue par les branchies de la moule (Bayne et al., 1976), nous pouvons considérer que le taux de consommation de la nourriture par jour (*cotot*) sera proportionnel à la concentration de matière organique particulaire (TPM) avec, comme facteur de proportionnalité, le taux de filtration par jour (*frjour*).

$$\boxed{cotot = frjour * TPM * t_{im}} \quad \text{unité : mgj}^{-1}\text{gpsec}^{-1}$$

t_{im} (h) ; temps d'immersion de la moule par jour.

3) INGESTION.

Puisque le processus d'ingestion est limité par la capacité de l'espace stomacal (Widdows, 1979), qui est elle-même liée à la taille de l'individu, il existera un processus parallèle « d'excrétion » ou rejection de pseudofèces². Pour de basses concentrations de nourriture, il ne sera pas efficace pour la moule de rejeter une part de celle-là. Par contre, quand la quantité de nourriture est plus grande que l'ingestion maximale (capacité stomacale), l'excès de nourriture est rejeté sous forme de pseudofèces.

L'effet de la concentration de la nourriture sur le pourcentage de réjection est modélisé à partir d'une fonction discrète de 4 niveaux constants, établie par Widdows et al. (1979), Bayne et al. (1993) et d'autres auteurs :

$$\begin{aligned} \text{Si } TPM \in [0 - 5] \text{ mgl}^{-1} & \Rightarrow \text{rejpseu} = 0 \\ \text{Si } 5\text{mgl}^{-1} \leq TPM \leq 10\text{mgl}^{-1} & \Rightarrow \text{rejpseu} = 0.2 \\ \text{Si } 10\text{mgl}^{-1} < TPM \leq 40\text{mgl}^{-1} & \Rightarrow \text{rejpseu} = 0.4 \\ \text{Si } TPM > 40\text{mgl}^{-1} & \Rightarrow \text{rejpseu} = 0.7 \end{aligned}$$

rejpseu (s.u.) : pourcentage de réjection dans les pseudofèces.

²énergie directement rejetée par la moule dû à l'existence d'une ingestion maximale.

L'ingestion théorique³ sera le reste de la nourriture qui n'est pas rejetée :

$$\text{ingteor} = (1 - \text{rejpseu}) * \text{cotot}$$

unités : $\text{mgj}^{-1} \text{gpsec}^{-1}$

L'ingestion maximale (*irmax*), est rapportée au poids sec de la moule (*biochair*) par une fonction d'allométrie (*Barillé, 1996*).

$$\text{irmax} = t_{im} * \text{irmaxI} * (\text{biochair})^{\text{alling}}$$

unités : $\text{mgj}^{-1} \text{gpsec}^{-1}$

irmaxI ($\text{mgh}^{-1} \text{gpsec}^{-1}$) : ingestion maximale (standard) d'un individu d'un gramme de poids sec de la chair.

alling (s.u.) : exposant d'allométrie pour l'effet du poids sec de la chair sur l'ingestion maximale.

La production de pseudofèces (*pseudof*) apparaît à partir du moment où le taux de consommation excède le taux maximal d'ingestion. Puisque biologiquement *pseudof* ne peut pas être négative, quand $\text{cotot} < \text{irmax}$ alors $\text{pseudof} = 0$.

$$\text{pseudof} = \max[0, (\text{cotot} - \text{irmax})]$$

unités : $\text{mgj}^{-1} \text{gpsec}^{-1}$

Le taux d'ingestion réelle (*ingreel*) sera égal à,

- l'ingestion réelle maximale (*irmax*) $\Leftrightarrow \text{ingteor} > \text{irmax}$
- l'ingestion théorique (*ingteor*) $\Leftrightarrow \text{ingteor} < \text{irmax}$

Ceci est traduit mathématiquement comme la valeur minimale entre *ingteor* et *irmax* :

$$\text{ingreel} = \min(\text{ingteor}, \text{irmax})$$

unités : $\text{mgTPMj}^{-1} \text{gpsec}^{-1}$

Effet de la qualité de la nourriture sur l'ingestion.

L'ingestion du matériel détritique (*ingdetr*) est proportionnelle au pourcentage de matière détritique présent dans la matière particulière totale (*pourdetr*). Cette ingestion n'est pas optimisée par la moule, c'est à dire, il n'existe pas de sélection (elle est imposée par la turbidité du milieu).

L'ingestion du phytoplancton (*ingphyt*), par contre, est optimisée par la moule. Il existe une efficacité de sélection (*esel*).

$$\text{ingdetr} = \text{ingreel} * (\text{pourdetr})$$

unités : $\text{mgCj}^{-1} \text{gpsec}^{-1}$

³ingestion sans prendre en compte la limitation stomacale

$$\text{ingphyt} = \text{ingreel} * (\text{pourphyt}) * \text{esel}^l$$

unités : $\text{mgCj}^{-1} \text{gpsec}^{-1}$

En remarquant que,

$$\text{pourdetr} = \frac{\text{CDE TR}}{\text{TPM}} ; \text{pourphyt} = \frac{\text{CPHYT}}{\text{TPM}} \quad (\text{mgC} * \text{mgTPM}^{-1})$$

et

esel (s.u.); Efficacité de sélection.

5) ABSORPTION.

L'absorption est la quantité de matière absorbée par la moule et l'assimilation est la quantité de matière absorbée moins l'excrétion, c'est à dire qui participe à la croissance de la moule; soma, coquille, réserves, gonades, ... Nous n'avons pas pris en compte les processus d'excrétion. Cependant des auteurs (ex : Bayne et Hawkins, 1985 ; cité par Barille, 1996) considèrent souvent l'excrétion négligeable.

L'absorption des différentes natures de la nourriture, dépend de sa digestibilité. Les efficacités d'absorption pour le matériel détritique (*efabsdetr*) et pour le phytoplancton ont été considérées fixées en fonction des résultats trouvés par *Grant et Bacher (1998)*.

Effet de la qualité de la nourriture sur l'absorption.

L'absorption du matériel détritique est un pourcentage (*efabsdetr*) du taux d'ingestion du matériel détritique (*ingdetr*) et l'absorption du phytoplancton sera un pourcentage (*efasphyt*) de l'ingestion du phytoplancton (*ingphyt*). Deux taux d'absorption sont simulés en fonction de la nature de la nourriture :

$$\text{eneabsphy} = \text{ingphyt} * \text{efabsphyt}$$

unités : $\text{mgCj}^{-1} \text{gpsec}$

$$\text{eneabsdetr} = \text{ingdetr} * \text{efabsdetr}$$

La somme des deux taux d'absorption sera le taux d'absorption total :

$$\text{eneabstot} = \text{eneabsphy} + \text{eneabsdetr}$$

unités : $\text{mgCj}^{-1} \text{gpsec}$

La production de fèces sera la quantité de matière non absorbée:

$$\text{feces} = 1 - \text{eneabstot}$$

unités : $\text{mgCj}^{-1} \text{gpsec}$

6) RESPIRATION.

La respiration est le processus d'obtention d'énergie nécessaire pour la maintenance du métabolisme basal et pour la nutrition. C'est une perte métabolique de l'énergie absorbée. Plus sont importants les processus de nutrition (filtration, ingestion,...), plus sera élevée la respiration.

La respiration sera donc une fonction du poids de la moule et du taux d'absorption.

Effet de la nutrition sur la respiration(*respnutr*).

L'effet du traitement des particules (processus de nutrition) sur la consommation d'oxygène est simulé par une droite de régression (Bacher, com.pers.). D'autres auteurs ont choisi une relation allométrique (Bayne et al., 1989).

$$\text{respnutr} = \text{respfact1} + \text{respfact2} * \text{eneabstot} \quad \text{unités : mgCj}^{-1} \text{gpsec}^{-1}$$

respfact1 (mgCj⁻¹gpsec⁻¹) ; respiration de base où standard, sans l'effet de l'absorption.
respfact2 (s.u.) ; pente de la droite de régression.

Effet du poids (*efpoid2*).

Une relation allométrique a été utilisée pour simuler l'effet du poids sur la respiration pour un individu d'un gramme (Bayne et al., 1993).

$$\text{efpoid2} = (\text{biochair})^{\text{allresp}} \quad \text{unités : s.u.}$$

allresp (s.u.) ; exposant d'allométrie pour l'effet du poids sur la respiration.

La respiration réelle donnera une idée des pertes métaboliques liées à l'activité de la moule. Elle représente l'interaction des effets définis plus haut (*respnutr* et *efpoid2*).

$$\boxed{\text{respreel} = \text{respnutr} * \text{efpoid2}} \quad \text{unités : mgCj}^{-1} \text{gpsec}^{-1}$$

6) BILAN METABOLIQUE

Le bilan métabolique correspond à la quantité de carbone absorbé moins la quantité de carbone respiré dû à l'activité de la moule (*respreel*).

$$\boxed{\text{croiss} = \text{eneabstot} - \text{respreel}} \quad \text{unités : mgCj}^{-1} \text{gpsec}^{-1}$$

croiss ; taux d'assimilation par jour en négligeant l'excrétion.

Discussion des cas.

1) Si $eneabstot < respreel$, il y aura une diminution du poids de la chair mais pas du poids de la coquille.

2) Si $eneabstot > respreel$, il y aura une augmentation du poids de la chair et du poids de la coquille.

Un coefficient de 90% de l'énergie assimilée (g C) est utilisée pour l'accroissement de la chair, les 10% restant pour l'accroissement organique de la coquille (Barille, A-L ; 1996).

Grant et Bacher (1998) considèrent que le poids sec de la chair représente 40% du carbone assimilé.

Les résultats suivants expriment la variation en poids de la chair ($dbiochair$) et la variation en poids organique de la coquille ($dbiosho$),

1) Si $croiss > 0 \Rightarrow$ $dbiochair = 0.9 * croiss / (fcCsec * 1000)$ unités : jour⁻¹

$$dbiosho = 0.1 * croiss / (fcCsec * 1000)$$

2) Si $croiss < 0 \Rightarrow$ $dbiochair = croiss / (fcCsec * 1000)$ unités : jour⁻¹

$$dbiosho = 0$$

$fcCsec (mgC \cdot mgsec^{-1})$; facteur de conversion de masse de C organique à masse sèche de la chair de la moule.

Barille, A.L. (1996) considère que la quantité de matière inorganique ($bioshi$) présente dans la coquille est 19 fois celle que présente de matière organique ($biosho$). L'incorporation de matière inorganique présente une dépendance avec la température du milieu (Barille, 1996). Il existe une température à partir de laquelle l'incorporation de matière inorganique augmente de forme exponentielle :

$$bioshi = shinor * biosho * (exp((TEMP - 10) * q10coq))$$
 unités: grammes

$shinor (s.u.)$: facteur de proportionnalité entre la quantité de matière organique et inorganique dans la coquille.

$q10coq (^{\circ}C^{-1})$: facteur correcteur de l'effet de la température sur l'incorporation de matière inorganique dans la coquille.

Le poids sec total (*Shellwt*) de la coquille (inorganique + organique) est la somme de la partie organique plus l'inorganique,

$$\text{Shellwt} = \text{biosho} + \text{bioshi}$$

unités : g psec

La longueur de la coquille est calculée à partir des relations linéaires entre le poids total de la coquille et la taille de la moule (Barille, 1996) :

$$\text{Shelllg} = 35 + 4.90 * \text{Shellwt}$$

unités : mm

Le poids total (*Biotot*) de la moule est exprimé par moyenne d'une régression linéaire avec le poids de la coquille (*Shellwt*) :

$$\text{Biotot} = \text{Shellwt} * \text{ptot2pcoq}$$

unités : g totaux

c) Établissement des équations.

Le modèle simule les trois variables d'état (*biochair*, *bioshi* et *biosho*) d'après un différentielle de temps *dt*. Les équations sont les suivantes :

$$\text{biochair}(t+dt) = \text{biochair}(t) + d\text{biochair} * \text{biochair} * dt$$

(éq. 1) g psec

$$\text{biosho}(t+dt) = \text{biosho}(t) + d\text{biosho} * \text{biosho} * dt$$

(éq. 2) g psec

$$\text{bioshi}(t+dt) = \text{bioshi}(t) + d\text{bioshi} * \text{bioshi} * dt$$

(éq. 3) g psec

d) Condition initiale.

Lorsque le modèle est déterministe nous n'avons pas de limites spatiales.

La condition initiale utilisée est le poids de la chair et de la coquille (org. + inorg.) d'une moule en élevage. Nous utiliserons les poids de la moule observées au débout du registre de la station biologique des filières du sud.

$$\text{Biochair}(t=0) = 0.2793g$$

$$\text{Biosho}^7(t=0) = 0.0636g$$

$$\text{Bioshi}^8(t=0) = 1.2719g$$

2. Validation du modèle écophysiological dans le Pertuis Breton. Discussion.

La simulation nominale a été effectuée sur 330 jours (11 mois environ) avec un pas de temps (dt) de 0.5 jour (12 heures). Les concentrations de matière particulaire totale, de phytoplancton et de matériel détritique (TPM , $CPHYT$ et $CDETR$) et la variable forçante « température » (TPM) mesurées dans la station biologique (fig.I-3), ont été interpolées afin de connaître leurs valeurs chaque demi-journée. L'évolution temporelle des variables hydrobiologiques dans la station biologique sont montrées en Figure I-9. Le modèle a été écrit en langage MATLAB.

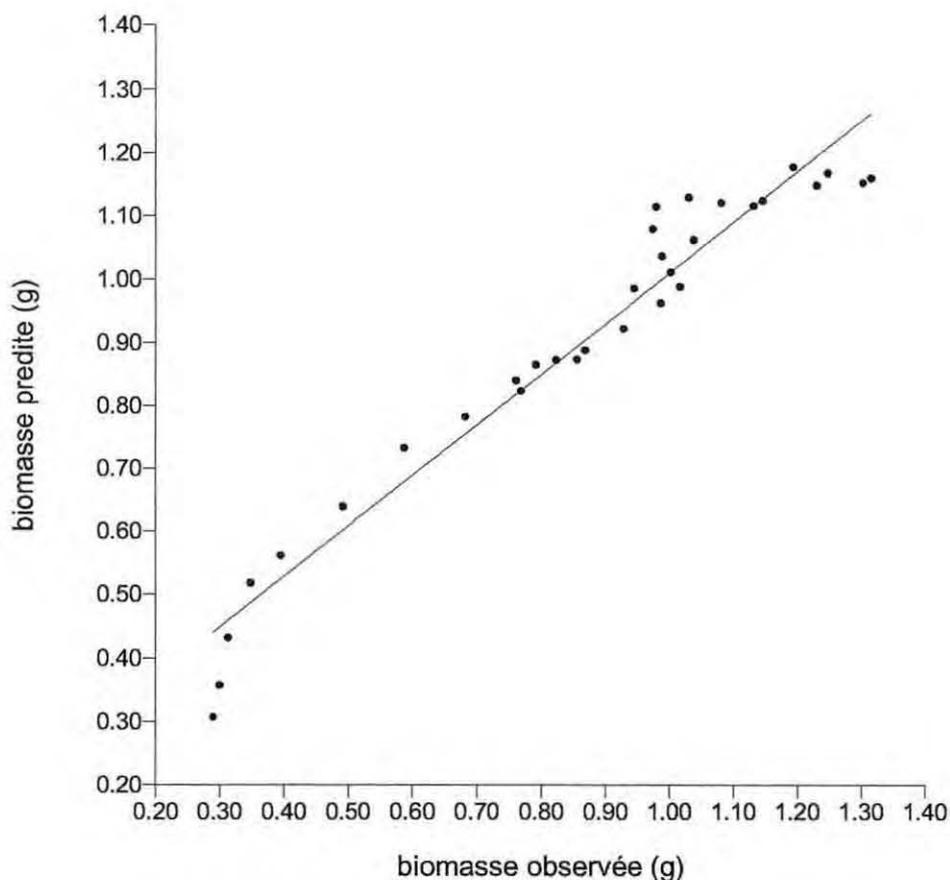


Figure 2. Représentation des biomasses observées et simulées de la moule.

La biomasse de la chair prédite par le modèle est bien corrélée avec les observations (fig.2), cependant, il existe une sous-estimation de la biomasse pendant l'été et le début de l'automne (fig.3-A). Le modèle n'est pas suffisamment sensible à la forte augmentation estivale de la température. D'une façon similaire, l'augmentation de TPM et POM observée dès le début de novembre dû à la remise en suspension du matériel détritique, n'est pas reproduite par le modèle. Il faudrait donc une amélioration des effets de la température sur les processus physiologiques et une révision des coefficients d'absorption de la matière détritique et du phytoplancton pendant les épisodes de fort hydrodynamisme.

Le poids sec de la coquille simulée, est également assez fidèle aux observations (fig.3-B), mais on retrouve le problème de la remise en suspension ; une forte incorporation de matière détritique à la coquille (voir la forte pente) n'est pas simulée par le modèle.

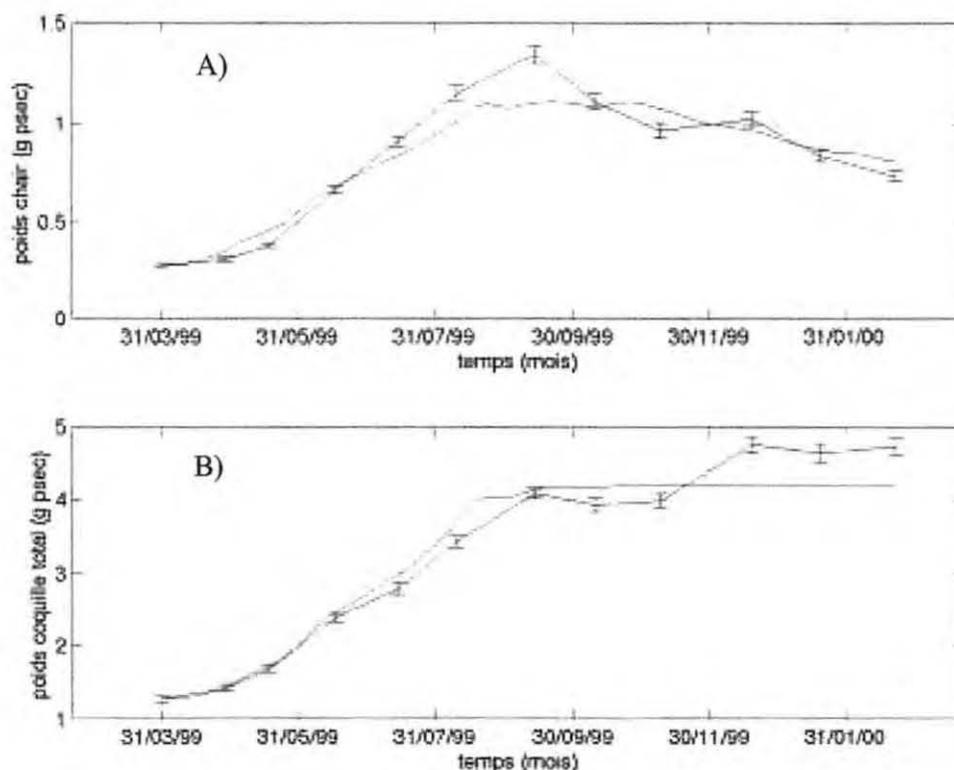


Figure 3. Simulation nominale du modèle écophysiological de *M. edulis*. Comparaison avec des observations ; A) Poids sec de la chair, B) Poids total sec de la coquille (org.+ inorg.).

— Modèle ; - - - Observations

La représentation des moyennes temporelles des principaux processus physiologiques de la moule, permet d'observer sa croissance en fonction des conditions environnementales saisonnières.

La consommation total ($\text{mgj}^{-1}\text{gpsec}^{-1}$) suit clairement l'évolution de la matière total particulaire (TPM). Il y a une consommation maximale pendant juin, en correspondance avec le pic retardé de printemps. Pendant le mois d'août la consommation descend dû aux hautes températures et la basse turbidité. On peut observer la forte production de pseudofèces pendant toute l'année. Cette situation est liée à la turbidité du Pertuis Breton. Pendant le mois

de Juin, le pic de TPM provoquera une forte production de pseudofèces par la moule et d'une façon similaire, à la fin de la simulation dû la remise en suspension (fig4-A).

La consommation de matière détritique ($\text{mgCj}^{-1}\text{gpsec}^{-1}$) est très élevée pendant toute la simulation, ce qui indique que la matière détritique se constitue comme la source de nourriture, la plus important par la moule.

La consommation de phytoplancton ($\text{mgCj}^{-1}\text{gpsec}^{-1}$) suivie l'évolution temporelle de la CHL-a, en présentant, deux fortes augmentations pendant les pics de Juin et Août (fig.4-B). La qualité de la nourriture est mise en évidence car l'absorption totale présente deux fortes pentes (fig.4-C) pendant les pics de CHL-a.

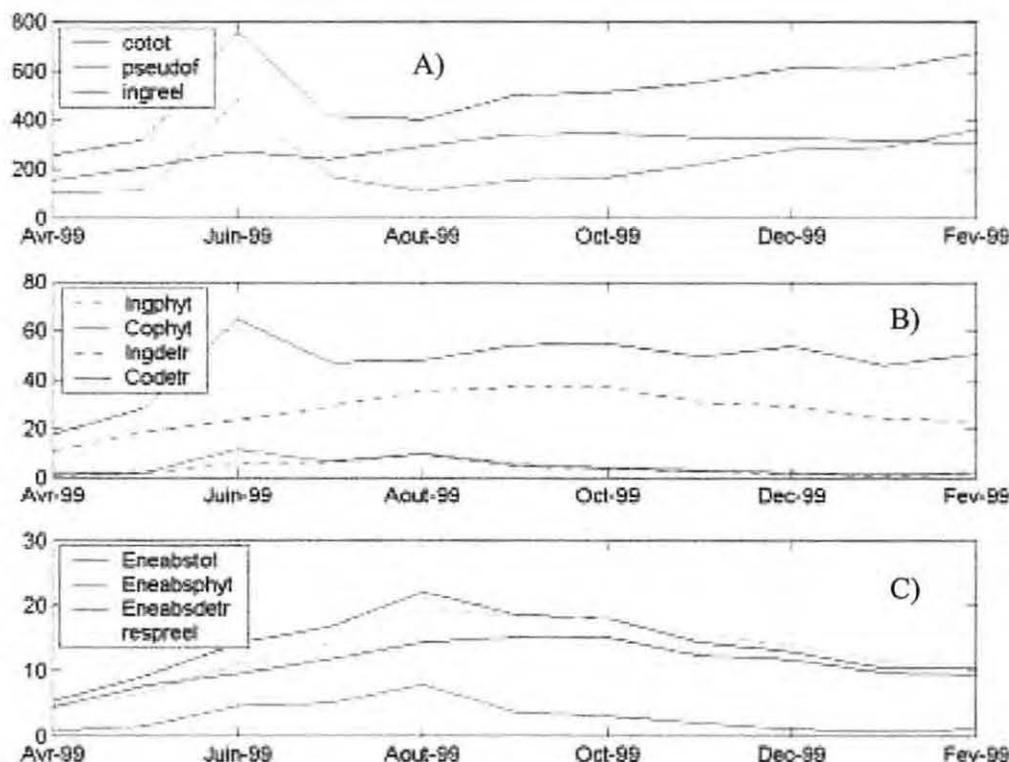


Figure 4. Représentation des moyennes mensuelles des principaux processus physiologiques de *M. edulis*.

Dans l'ensemble, l'ingestion, l'absorption et la respiration simulées par le modèle, suivent un cycle saisonnier : une augmentation du début de la simulation (Avril) jusqu'à au mois d'août (le maximum de température), moment à partir duquel le descent de la température et la baisse de nourriture, provoquent une diminution de l'activité de la moule jusqu'à la fin de la simulation.

On voit que la croissance de la moule est très influencée par la température et par la concentration de matière organique totale (TPM). Ce que ne prédit pas le modèle est la reprise de croissance observée en novembre et décembre (fig3-A).

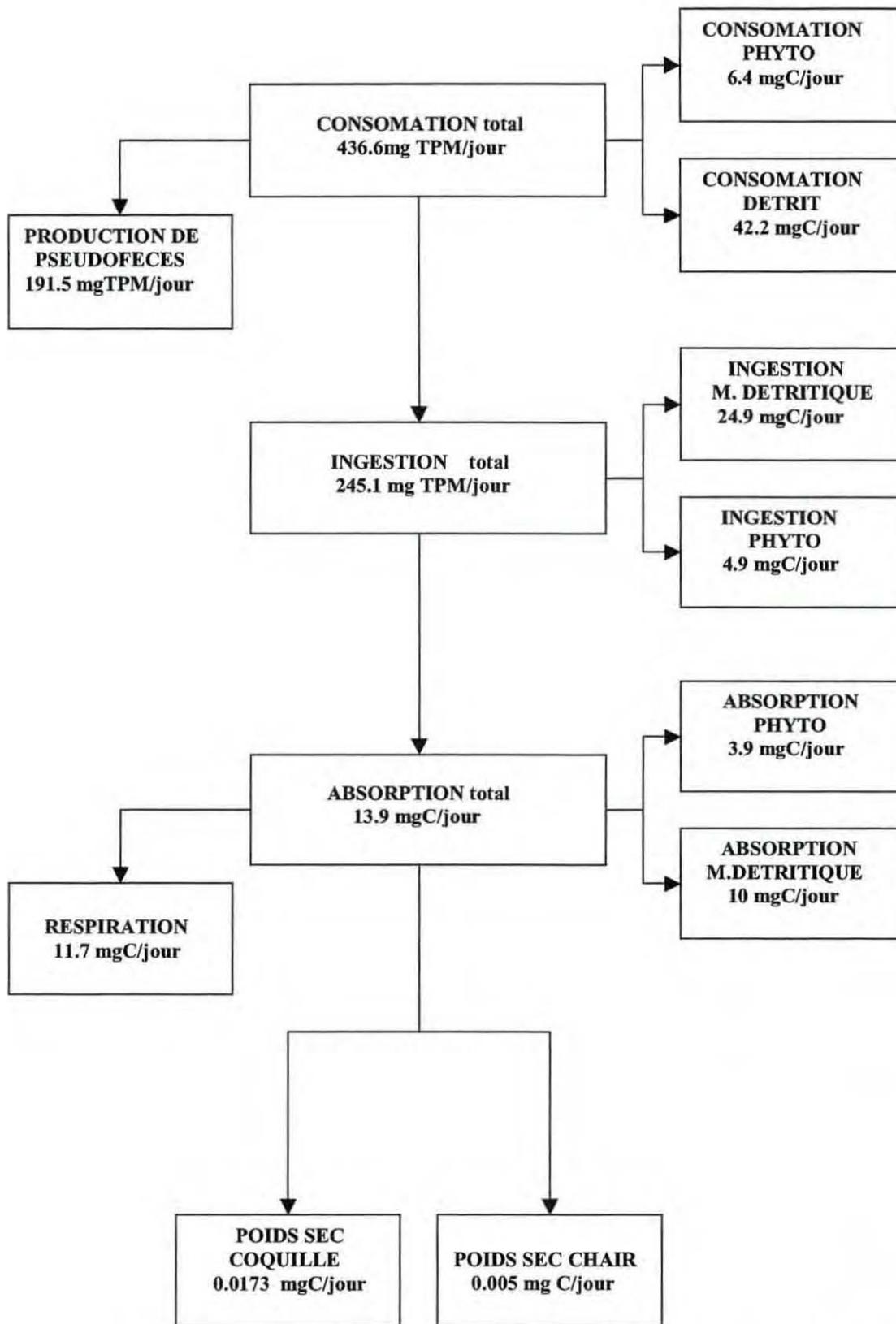


Figure 5. Diagramme de flux de transfert de matière de *M.edulis* dans le Pertuis Breton.

Les flux de transfert journalières, moyennés sur un an (fig.5), montrent l'importance de la matière détritique dans la nutrition de la moule et la forte production de pseudofèces par rapport à la consommation totale.

Analyse de sensibilité.

Différents paramètres sont modifiés (Table 1) afin de connaître,

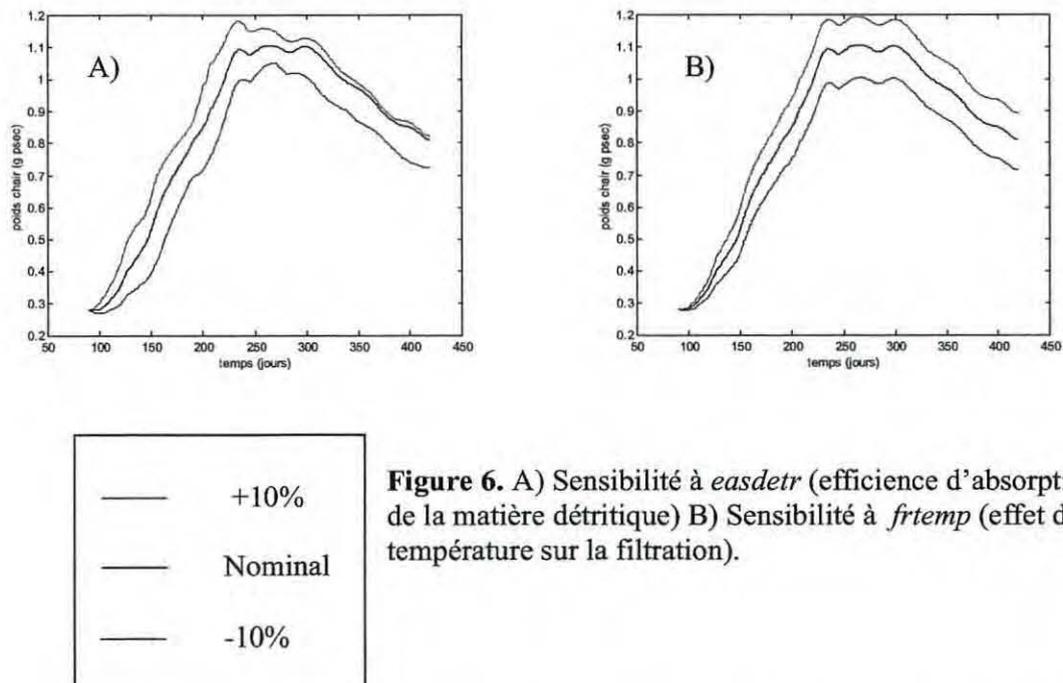
- Quelles sont les limitations d'application de notre modèle.
- Quels paramètres doivent être réévalués ou évalués avec plus de précision.

La choix des paramètres s'a fait en fonction des facteurs les plus influents sur la croissance de la moule dans le Pertuis Breton. Ces facteurs sont la qualité de la nourriture, la température du milieu et la capacité maximal d'ingestion quand la nourriture n'est pas limitant.

	Nominal	+10 %	- 10 %
<i>eabsphyt</i>	0.8	0.88	0.72
<i>eabsdetr</i>	0.4	0.44	0.36
<i>frtemp(5-20°C)</i>	1	1.1	0.9
<i>irmax1</i>	14	15.4	12.6

Table 1. Valeurs et variables utilisées dans l'analyse de sensibilité

Ici dessous sont montrés les représentations pour *easdet* et *frtemp* :



L'analyse nous montre que le modèle est très influencé par les paramètres *eabsdetr*, *frtemp* et *irmax1*. Une variation d'un 10 %, entraîne une variation important de la croissance de la chair de la moule.

Les paramètres *easdetr* et *frtemp* (fig.6-A et fig.6-B), nous permettent d'observer l'importance de la température et de la quantité de matière détritique sur la croissance de la moule. Une plus description précise de l'effet de la température sur la filtration (pour élevées températures) et du processus d'absorption, sont nécessaires afin de simuler la forte croissance observée pendant le mois d'août (fig.3-A) et la forte croissance de la coquille observée en automne-hiver (fig.3-B) par la remise en suspension.

Lorsque la concentration de matière organique présent dans le Pertuis Breton, est assez élevée, la capacité d'ingestion maximale de la moule (*irmax1*) limite sa croissance.

Conclusion.

Le modèle physiologique, décrit assez fidèlement les différents processus impliqués dans la croissance de *M.edulis*. Cependant, la considération des processus de reproduction, ponte, excretion, ...ne sont pas considérés et quelques améliorations sur les processus de filtration (l'effet de la temperature) et sur l'absorption de la matière détritique en épisodes de remise en suspension, doivent se développer.

VI BIBLIOGRAPHIE

- Bayne B. L. , A.J.S. Hauwkins, E. Navarro & I.P. Iglesias, 1989.** Effects of Seston Concentration on feeding, digestion and growth in the mussel *Mytilus edulis*, Marine Ecology Progress series., 55 : 47-54.
- Bayne B. L. , Iglesias J. I. P. , Hawkins A.J.S. , Navarro E. , Heral M. & Deslous-Paoli J.M.,1993.
Feeding Behaviour of the Mussel, *Mytilus edulis* : Responses to variations in Quantity and Organic content of the seston. J.Mar. Biol.,73 : 813-829.
- Bayne B. L. , 1998.** The Physiology of Suspension feeding by bivalve mollusc : an Introduction to the Plymouth « TROPHEE » workshop.(REV) 219:1-9.
- Bacher C. , P. Duarte, J.G. Ferreira, M. Héral & O. Raillard, 1998.** Assement and Comparison of the Marrenes-Oléron (France) and Carlingford Lough (Ireland) Carrying Capacity with Ecosystem Models (Lecture). Aqua. Ecol.,31 :379-394.
- Brylinsky M. & Sephton T. W., 1991 (cité par Barille, 1996).** Development of a computer simulation model of a cultured blue mussel *Mytilus edulis* (L.) population. Can. Tech. Report. Of Fish. And Aquat. Sci. 1805.
- Barille A. L. , 1996.** Contributions à l'étude des potentialités conchylicoles du Pertuis Breton . Th. Doct : océanologie : Aix Marseille II, 312 p.
- Bayne B. L. , 1976.** Marine mussels , their ecology and physiology . Cambridge University Press, London.
- Brown J. R. & Hartwich E. B. , 1988 (cité par Barille, 1996).** A habitat suitability index model for suspended tray culture of the Pacific Oysters *Crassostrea gigas* (Thunberg). Aquat. Fish. Manag. , 19 :109-126.
- Cyril Mallet, Hélène Howa, Thierry Garlan, Aldo Sottolichio, Pierre Le Hir & Denis Michel, 2000.** Utilisation of Numerical and Statistical Techniques to Describe Sedimentary Circulation Patterns in the Mouth of the Gironde Estuary (Lecture). Earth and Planetary Sciences., 331 :491-497.
- Caroline S., 2000.** Modélisation du couplage de la production primaire planctonique et de l'hydrodynamisme dans le bassin de Marrenes-Oléron. DEA Sciences de L'environnement marine., 44p.
- Dardignac-Corbeil, 1996.** La mytiliculture dans le Pertuis Breton. Synthèse des travaux réalisés de 1980 à 1992 (rapport interne CREMA-IFREMER, L'Houmeau.
- Fabien H., 1997.** Modélisation de la capacité trophique du pertuis breton. Couplage entre un modèle de croissance de *Mytilus edulis* et un modèle de production primaire. DEA d'Océanologie Biologique., 35 p.
- Garcia, A.L., 1994.** Numerical methods for physics. San Jose State University. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632.
- Grant J. & Bacher C. , 1998.** Comparative Models of Mussel Bioenergetics and their Validation at fields Culture sites. J. Exp. Mar. Biol Ecol., 219 :21-44.
- Grant J. & Bacher C. , 2001.** A numerical model of flow modification induced by suspended aquaculture in a Chinese bay (Lecture). Can. J. fish. Aqua. Sci., 58 : 1-9.
- Gouleau D.,1975 (cité par Barille, 1996).** Les premières stades de la sédimentation sur les vasières littorales atlantiques; rôle de l'immersion: Thèse de troisième cycle, Université de Nantes.
- Incze L.S., Lutz R.A. & Watling L., 1980 (cité par Barille, 1996).** Relationship between effects of environmental temperature and seston on the growth and mortality of *Mytilus edulis* in a temperate northern estuary (Lecture). Mar. Biol., 57:147-156.
- Jones H.D., Richard O.G. & Southern T.A., 1992 (cité par Barille, 1996).** Gill dimension water pumping rate and body size in the mussel *mytilus edulis*. (Lecture). J. Exp. Ma Biol. Ecol., 155: 213-237.

Kautsky N. , 1982 (cité par Barille, 1996). Quantitative studies on gonad cycle, fecundity, reproductive output and recruitment in a baltic *Mytilus edulis* population. *Mar. Biol.*, 68 :143-160.

Koutitas, G. 1998. Mathematical Models in Coastal Engineering. Pentech Press, London.

Le hir P. , W. Roberts, O. Cazaillet, M. Christie, P. Bassoullet & C. Bacher, 2000. Charactrisation of intertidal flat hydrodynamics. *Continental Shelf Research.*, 20 :1433-1459.

Marcel Fréchette & Cedric Bacher, 1998. A modelling of optimal stocking density of mussel populations kept in eperimental tanks. *J. Mar. Biol. Ecol.*,219 : 241-255.

Pilditch C.A , Grant J. & Bryan K.R. , 2001. Seston supply to sea scallops (*Placopecten megellanicus*) in suspended culture. *Can. J. fish. Aqua. Sc.*, 58 :241-253.

Press, W.H et al., 1992. Numerical Recipes in FORTRAN (second edition). Cambridge University Press. New York.

Peyret et Taylor, 1983. Computational methods for fluid flow. Springer-Verlag, New York. Heidelber (Berlin)

Radford P.J., Joint I.R. & Hiby, A.R., 1981 (cité par Barille, 1996). Simulation models of individual production processes. A. R. Longhurst (ed.). *Analysis of Marine Ecosystems Academic*:677-700.

Richard,P. 2000. Etude des potentialites conchylicoles du Pertuis Breton (Rapport interne). CREMA L'Houmeau, CNRS-IFREMER. B.P. 5, 17137 L'Houmeau (France)

SHOM, 1984. Table des marées des grands ports du monde. Service Hydrographie et Oeanographique de la Marine.Paris.

Service Aménagement du Littoral, 1991. Modele hydrodynamique regional de la zone des Pertuis Charentais. CREOCEAN, La Rochelle.

Widdows J. & Baynes B. L., 1971. Temperature acclimatisation of *Mytilus edulis* with reference to energy budget. *J. Mar. Biol. Ass. U. K.*, 51 : 827-843.

Widdows J. , Fieth P. & Worrall C. M. , 1979 (cité par Barille, 1996). Relationship between seston, available food and feeding activity in the common mussel *Mytilus edulis*. *Mar. Biol.*, 50 :195-207.