

Développement d'un modèle de production ostréicole au sein d'une approche systémique pour la gestion intégrée de l'étang de Thau



**Développement d'un modèle de production
ostréicole au sein d'une approche systémique
pour la gestion intégrée de l'étang de Thau**

Fiche documentaire

Numéro d'identification du rapport : Diffusion : libre : <input checked="" type="checkbox"/> restreinte : <input type="checkbox"/> interdite : <input type="checkbox"/>		date de publication : juillet 2010 nombre de pages : 38 bibliographie : 40 illustration(s) : 22 langue du rapport : française
Validé par : A. Fiandrino, T. Laugier Adresse électronique : annie.fiandrino@ifremer.fr thierry.laugier@ifremer.fr		
Titre de l'article		
Contrat n°		Rapport intermédiaire <input type="checkbox"/>
		Rapport définitif <input checked="" type="checkbox"/>
Auteur(s) principal(aux) : Franck Lagarde	Organisme / Direction / Service, laboratoire Ifremer / DOP / DOPLER / LERLR	
Encadrement(s) : A. Fiandrino, T. Laugier	Ifremer / DOP / DOPLER / LERLR	
Cadre de la recherche : SPICOSA & mémoire de Master Recherche Biologie et Ecologie Marine, Centre Océanographique de Marseille.		
Destinataire : Laboratoires LER Consortium SPICOSA		
Résumé <p>La Gestion Intégrée de la Zone Côtière permet de coordonner le développement et l'adaptation d'outils de modélisation systémique basée sur des activités économiques régionales. Au niveau de la lagune de Thau (Languedoc Roussillon, France), un modèle systémique régional intègre un outil de modélisation de production ostréicole d'huîtres creuses (<i>Crassostrea gigas</i>). La croissance des coquillages, les estimations de stock et la production récoltée sont simulées à partir d'une série historique de forçages environnementaux. Un scénario révèle la cohérence du modèle de production sur la période 2000-2009 par rapport à des données de référence bien que des améliorations soient à prévoir pour affiner la qualité des estimations (mortalité en période de malaïgues, prise en compte de forçage alimentaire par sélection floristique et faunistique). D'autre part, un scénario simulant la fermeture sanitaire de commercialisation de septembre 2006 révèle le faible impact généré au niveau de la production (variation de +6% de la récolte commercialisable mensuelle soit 360 tonnes pour un décalage des ventes de 11 jours) sans pour autant présager de l'absence d'impact économique au niveau de l'entreprise. L'étude des scénarios de surmortalité de naissains annonce des pertes sur la récolte annuelle allant jusqu'à -79% entre 2007 et 2009 alors que le modèle annonce que le doublement des quantités annuellesensemencées en 2008 et 2009 permettrait de limiter les pertes à -18% par rapport à une situation sans surmortalité. Ce genre de scénario est malgré tout à envisager avec prudence compte tenu de l'origine virale des surmortalités et de leur probable densité dépendance. Cet exercice révèle dès à présent l'apport d'un tel modèle de production ostréicole tant au niveau de l'analyse de scénarios que sur les processus intrinsèques du modèle (bilan sur les connaissances écosystémiques).</p>		
Abstract <p>Integrated Coastal Zone Management coordinates the development of systems modelling tools based on regional economic activity. A regional systems model created for the Thau lagoon (Languedoc Roussillon, France) includes a modelling tool for oyster production of <i>Crassostrea gigas</i>. Shellfish growth, estimates of stock and harvested production are simulated from a historical series of environmental forcing. One scenario shows the coherence of model output over the period 2000-2009 compared to baseline, although modifications are expected to refine the estimates (high death rate during dystrophic episodes, taken into account a new food forcing by flora and fauna selection). There is another scenario simulating the commercial ban of products from Thau Lagoon in September 2006 which revealed the weak impact generated on oyster production (range 6% of the marketable crop of 360 tonnes for a lag in sales of 11 days) although it's possible that an economic impact exist at the enterprise level. The study of high death rate scenarios indicates losses of annual harvest of up to -79% between 2007 and 2009; the doubling of annual seeding in 2008 and 2009 would limit losses to 18% compared to a situation without high death rate. This kind of scenario is still approached with caution because of viral origin of high death rate and their probable density dependence. This exercise reveals now the contribution of such a model of oyster production both in the scenario analysis and on the improving knowledge of intrinsic model processes.</p>		
Mots-clés Modélisation de production ostréicole, <i>Crassostrea gigas</i> , Gestion Intégrée de la Zone Côtière, lagune de Thau, surmortalité de naissains.		
Words keys Modelling tool for oyster production, <i>Crassostrea gigas</i> , Integrated Coastal Zone Management, Thau lagoon, spat high death rate.		

Table des matières

FICHE DOCUMENTAIRE	5
1. INTRODUCTION	9
2. OBJECTIFS DU STAGE	9
3. CONTEXTE	10
4. MATERIELS ET METHODE	11
4.1. Conchyliculture dans l'étang de Thau	11
4.2. Conceptualisation du modèle sous ExtendSim®	12
4.3. Jeux de données	14
4.4. Modèle Dynamic Energy Budget	15
4.5. Modèle de dynamique de population	16
4.6. Contrôle, étalonnage et calibrage du modèle DEB	17
4.7. Analyse de sensibilité	18
4.8. Scénarios testés	18
5. RESULTATS	20
5.1. Contrôle, étalonnage et calibrage du modèle DEB	20
5.2. Etalonnage et calibrage de la variabilité intra-cohorte	22
5.3. Tests de sensibilité du modèle de production	23
5.4. Scénarios testés	26
6. DISCUSSION	30
6.1. Contrôle, étalonnage et calibrage du modèle DEB	30
6.2. Scénarios testés	31
7. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	33

1. Introduction

Le principe de Gestion Intégrée de la Zone Côtière¹ offre de nouvelles perspectives pour la gestion des cultures marines en Europe et le caractère opérationnel des modèles systémiques nécessite la prise en compte des interactions entre les usages des acteurs socio-économiques des zones de production et la gouvernance (Gouletquer & Heral 2007, SPICOSA 2007). En France, comme dans de nombreux pays à vocation aquacole, des outils de modélisation biologique ont été développés durant ces dix dernières années, pour améliorer la compréhension des processus à différentes échelles (Ferreira *et al.* 2007, Ferreira *et al.* 2008), au niveau de l'écosystème (Chapelle *et al.* 2000, Ren *et al.* 2009), de la dynamique des populations (Bacher & Gangnery 2006) et de la physiologie des coquillages en élevage (Bacher & Gangnery 2006, Pouvreau *et al.* 2006, van der Meer 2006, Bourles *et al.* 2009). Certains de ces outils sont aujourd'hui utilisés pour aider à la gestion et à la décision de la filière conchylicole (Ren *et al.* 2009). Effectivement, les réponses attendues des modèles portent autant sur des aspects productivistes qu'économiques. Au niveau de la lagune de Thau, des pressions environnementales et anthropiques impactent fortement l'exploitation des cultures marines. L'objectif est de pouvoir estimer le potentiel de production des zones conchylicoles de la lagune de Thau, de répondre à des questions concernant l'état des stocks et aider à mesurer les impacts d'aléas environnementaux sur la production. Les questions d'importance qui se posent aujourd'hui au niveau des cultures marines de l'étang de Thau concernent les impacts de la qualité microbiologique de l'eau (Laugier *et al.* 2010) et l'effet du phénomène de surmortalités du naissain d'huîtres décrit depuis l'année 2007 (Renault 2008, Sauvage *et al.* 2009, Pernet 2010, Pernet *et al.* 2010) qui met en péril l'ostréiculture régionale et nationale. Une confrontation des données de production ostréicole de référence (d'origines scientifiques et professionnelles) et des résultats de simulation sur la période 2000-2009 permet de caractériser l'usage et les limites du modèle de production ostréicole.

2. Objectifs du stage

Le développement d'un modèle systémique pour une approche intégrée de l'étang de Thau nécessite la prise en compte d'un module « ostréiculture ». Le développement d'un modèle couplé physiologie/dynamique des populations de *Crassostrea gigas* exploités commercialement dans l'étang de Thau (Gangnery *et al.* 2004, Bacher & Gangnery 2006) permet de répondre, dans un premier temps, à ce besoin. Compte tenu des évolutions dans les pratiques culturelles ces dix dernières années, il est aujourd'hui nécessaire de faire une mise à jour de l'outil de modélisation de la production pour qu'il intègre des options offrant la possibilité de faire des scénarios sur des problématiques d'actualités (scénarios de contamination microbiologique, surmortalités virales, variation des taux d'ensemencement) et, à terme, de prendre en compte les impacts économiques sur la filière conchylicole.

Pour ce faire, les différentes étapes réalisées dans le présent travail sont :

¹ Recommandation 2002/413 du Parlement européen et du Conseil du 30 mai 2002 relative à la mise en œuvre d'une stratégie de gestion intégrée des zones côtières en Europe

1. l'étalonnage d'un modèle écophysiologique « huître creuse, *Crassostrea gigas* » par rapport à des données récentes de croissance d'huîtres sur Thau et des séries temporelles de données environnementales ;
2. l'adaptation d'un modèle de dynamique de population avec cohorte et intégration de calendrier de pratiques culturelles ;
3. l'élaboration de scénarios de production ostréicole impactée par des aléas environnementaux (suspension de commercialisation, surmortalité du naissain).

3. Contexte

Le programme SPICOSA « Science and Policy Integration for COastal System Assessment » est un projet de recherche européen intégré venant en soutien de la recommandation européenne (CE) 2002/413 de Mai 2002 pour la Gestion Intégrée de la Zone Côtière (GIZC).

Ce consortium européen regroupe 54 partenaires de 21 pays, universités, instituts de recherche, des gestionnaires et des experts européens du domaine côtier pour aider à la formalisation de la mise en œuvre du principe de GIZC. SPICOSA a pour objectif de mieux comprendre les effets des options de politiques de gestion face aux questions complexes qui se posent le long des zones côtières. Ce programme cherche à décrire les liens/rerelations/impacts entre les choix de gestion, les processus de gouvernance et les réponses des écosystèmes. Pour cela, dix-huit sites ateliers côtiers et lagunaires européens sont étudiés au travers d'un **cadre opérationnel d'approche systémique** (SAF), c'est-à-dire une méthodologie générique, prenant en considération les aspects écologiques, économiques et sociaux autour d'une problématique et d'une question prégnante propre. Aucune acquisition de données n'est prévue dans ce programme au profit de l'intégration de connaissances préexistantes sur chaque site. Dans cette approche systémique dynamique complexe, on s'attache plus à décrire des interactions entre les différentes composantes des systèmes qu'à décrire finement les composantes du système.

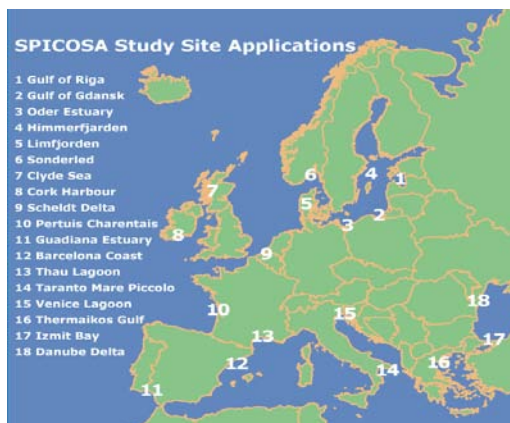


Figure 1 : Sites étudiés pour l'application du programme SPICOSA
(<http://www.spicosa.eu/studysites/index.htm>)

Le principal objectif de SPICOSA Thau est de focaliser sur des méthodes permettant de simuler le fonctionnement des systèmes de la zone côtière. A l'échelle de la lagune de Thau, l'objectif est double (Laugier *et al.* 2010) :

1. Etudier l'efficacité et le coût de nouveaux systèmes de traitement microbiologique de l'eau usée.
2. Estimer les impacts de plusieurs options opérationnelles de gestion des contaminations microbiologiques et/ou de gouvernance sur les activités traditionnelles (ostréiculture par exemple) et l'économie locale (tourisme).

La présente étude doit contribuer au deuxième point au travers de l'élément clé « qualité de l'eau » et de ces effets induits sur l'ostréiculture et l'économie régionale.

Une approche DPSIR (Driving Forces, Pressures, Impacts, Status, Responses) pour la gestion de l'eau et les contaminations microbiologiques a permis au préalable de définir les principaux processus sous-jacents et leurs interactions (Kristensen 2004, PNEC 2008, Laugier *et al.* 2010). A terme, le compartiment « ostréiculture » du modèle mesurera les impacts économiques directs supportés par les entreprises dus aux modifications de l'environnement (qualité de l'eau, surmortalité par exemple). Mais le travail présenté se limite pour l'instant à la production ostréicole, les aspects économiques de la filière ne sont pas abordés.

4. Matériels et Méthode

4.1. Conchyliculture dans l'étang de Thau

La lagune de Thau est la plus grande des lagunes du Languedoc Roussillon. D'une profondeur moyenne de 3.5 mètres, elle a une superficie de 7 500 hectares (19 km × 4.5 km) et est alimentée par des canaux (dénommés graus en occitan) permettant un apport en eau de mer. Le bassin versant couvre une superficie de 25 000 hectares.

La conchyliculture s'est développée depuis 1911 dans la lagune de Thau, concédée aujourd'hui sur un cinquième de sa surface (Deslous-Paoli *et al.* 1998) et divisée en trois zones : la zone de Bouzigues, la zone de Mèze, la zone de Marseillan. Des parcelles du domaine public maritime, appelées concessions (Figure 2), sont octroyées aux concessionnaires en vue de leur exploitation pour les cultures marines.

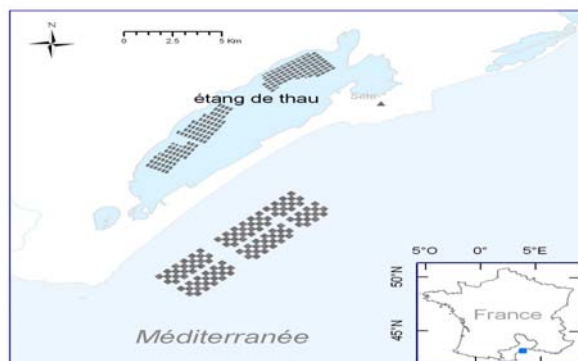


Figure 2 : L'étang de Thau et les concessions dédiées cultures marines au niveau de Thau et des filières marines (Géomatique : Gregory Messiaen, LER-LR)

En 2004, 671 concessionnaires étaient recensés autour de l'étang de Thau (SRC Méditerranée 2004). Cette activité traditionnelle représente environ 2 000 emplois directs sur le territoire.

Il existe 550 exploitations conchylicoles (unités de référence) pour l'étang de Thau regroupant des entreprises individuelles en nom propre et des sociétés de production sous statut juridique (GAEC, SCEA, EARL, SCA, etc.).

Traditionnellement, la taille des exploitations est estimée en fonction de son nombre de tables. En moyenne, en 2004, une exploitation a 4.8 tables, 1 au minimum et 38 au maximum.

Deux espèces de bivalves sont mises en culture dans la lagune de Thau, l'huître creuse *Crassostrea gigas* et la moule de Méditerranée *Mytilus galloprovincialis*. Des études de stocks ont été menées entre 1998 et 2001 estimant une biomasse d'huîtres creuses de 15200 tonnes en 1999-2000 et 17900 tonnes en 2000-2001 (Gangnery 1998, 1999, Gangnery *et al.* 2001). En 2004, la production d'huîtres est évaluée à 13000 tonnes et la production de moules à 3600 tonnes (SRC Méditerranée 2004). En 2006, la production d'huîtres est chiffrée à 12970 tonnes (DRAM Languedoc-Roussillon 2006). Depuis 2008, la production de *Crassostrea gigas* est à la baisse compte tenu des épisodes

catastrophiques annuels de surmortalité de naissains (11600 tonnes en 2008, 8400 tonnes en 2009, *sources SRCM², com. pers.*).

Aujourd'hui, 2656 tables aménagées (DRAM Languedoc-Roussillon 2006) sont attribuées sur 2816 concessions potentielles (Gangnery *et al.* 2003). L'élevage se faisant en suspension, des structures sous forme de tables d'élevage sont aménagées et les coquillages sont mis en culture selon différentes méthodes. Selon les techniques d'élevage utilisées, des éléments (cordes, pearl nets, casiers, etc.) sont suspendus à ces perches selon les méthodes d'élevage choisies (Cepralmar 2008).

Les méthodes d'élevage ont évolué depuis le 19^{ème} siècle et en particulier durant ces 10 dernières années. L'étang de Thau n'est pas, jusqu'à maintenant, un bassin de captage de naissains de *Crassostrea gigas*. Son approvisionnement en naissain dépend donc des bassins de production de naissains (Marennes-Oléron et Arcachon) et des écloséries. La généralisation du naissain d'écloserie a permis des modifications majeures dans les pratiques culturelles en particulier en donnant une plus grande souplesse dans les calendriers d'approvisionnement.

Outre les problèmes sanitaires liés aux contaminations microbiologiques d'origine fécale rencontrées à Thau, l'ostréiculture de *Crassostrea gigas*, est une activité qui fait face aujourd'hui à une crise majeure depuis son introduction en Europe dans les années 1970 : un phénomène de surmortalité printanier d'origine virale (OsHV1- μ var) touchant le naissain à des taux de 80% à 100% (Pernet 2010, Pernet *et al.* 2010).

4.2. Conceptualisation du modèle sous ExtendSim[®]

La formalisation du modèle sous le logiciel ExtendSim[®] permet de prendre en compte des variables d'état (*i.e.* croissance), de raisonner en flux (estimation de stock, transfert de stock commercialisable vers récolte) et d'avoir une vision dynamique des grandeurs étudiées (structure pondérale de la population, évolution populationnelle dans les cohortes, évolution de stock par catégorie de poids). L'interface didactique et graphique offre une interface des modèles aux décideurs, aux gestionnaires et aux scientifiques non modélisateurs. Le modèle est un ensemble de blocs paramétrables dont la composition est définie selon une hiérarchie reliée par des connecteurs véhiculant des valeurs ou par des bases de données.

² Section Régionale Conchylicole de Méditerranée

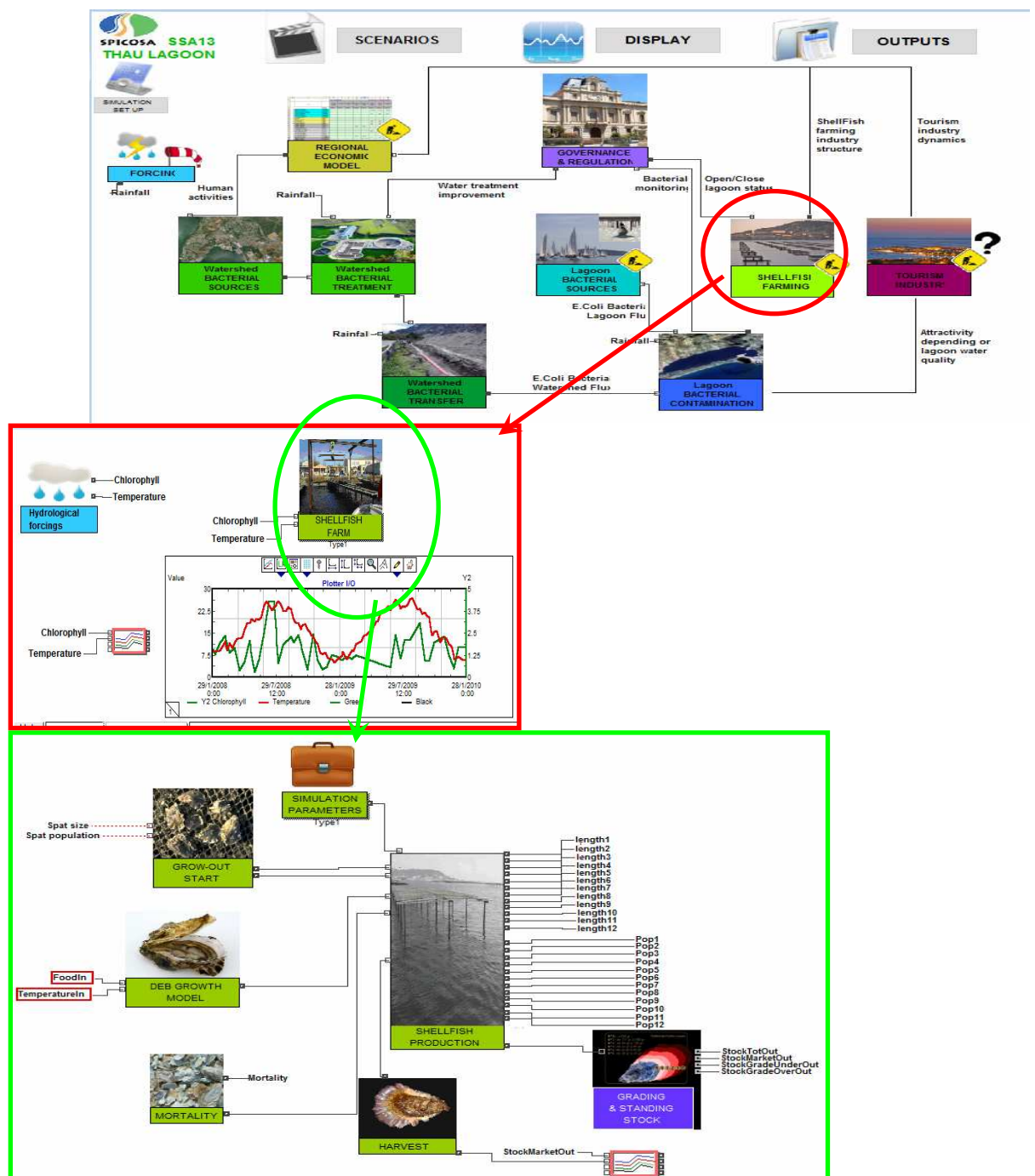


Figure 3 : Conceptualisation du modèle systémique et zoom sur le modèle de production ostréicole.

Dans le cadre du programme SPICOSA, l'objectif du module « ostréiculture » est d'améliorer la connaissance et de conceptualiser les interactions existantes entre des événements écologiques ou économiques et la production de biomasse d'huîtres. Le module décrit le fonctionnement de l'activité ostréicole de l'ensemencement du naissain jusqu'à la récolte des coquillages de taille commercialisable. Il simule une évolution de la production en suivant en parallèle l'évolution du nombre d'individus au sein d'une cohorte (gérée par le modèle de dynamique de population) et la croissance des individus (poids moyen représentatif d'un individu moyen) au sein des cohortes

selon le modèle d'écophysiologie. Le modèle de production permet de classer chaque cohorte et d'établir une biomasse d'huîtres par catégorie commerciale³ (**Tableau 1**).

Tableau 1 : Classification des catégories commerciales d'huîtres creuses

Calibre	5	4	3	2	1	0
Poids mini (g)	30	46	66	86	111	+ 150
Poids maxi (g)	45	65	85	110	150	

Dans la conceptualisation de la production ostréicole sous ExtendSim[®], l'hypothèse est faite que la variabilité spatiale de la croissance n'a que peu d'impacts sur la production totale.

Le développement d'un tel modèle nécessite une bonne connaissance du processus de production, à savoir, la croissance des mollusques dans l'étang, l'entrée des huîtres dans le bassin (*i.e.* mise en élevage), leur sortie (*i.e.* mortalités et récoltes) (Gangnery *et al.* 2004).

Comme spécifié pour le modèle SPICOSA Marennes Oléron (Prou *et al.* 2010), le niveau de développement du modèle sur Thau ne permet pas, pour l'instant, de faire de discernement sur les différentes pratiques culturales en fonction de la typologie des entreprises. La production est considérée comme venant d'une seule et unique technique de production (on peut alors assimiler l'étang de Thau comme une unique entreprise produisant une quantité de biomasse).

La fonction principale du module de production ostréicole sous le logiciel ExtendSim[®] sera, à terme, d'estimer les impacts économiques des aléas environnementaux sur la filière du bassin de Thau.

4.3. Jeux de données

Le jeu de données environnementales et de croissances de coquillage utilisé pour contrôler la fiabilité du modèle de production développé sous ExtendSim[®] a été publié par Gangnery *et al.* (2003). En ce qui concerne l'étalonnage, le calibrage du modèle et les simulations basées sur les scénarios, des données biométriques récentes et des séries historiques environnementales sont utilisées.

4.3.1. Conditions environnementales

Les forçages environnementaux ont une importance majeure dans les processus de production ostréicole. La température gère les flux physiologiques et la concentration en chlorophylle *a* est un *proxy* alimentaire largement disponible sur des séries long terme. Ces données (**Figure 4**) existent pour Thau avec des fréquences de mesures bimensuelles ou mensuelles depuis 1990⁴ au travers du réseau de surveillance phytoplanctonique (REPHY) opéré par l'Ifremer.

L'hypothèse faite est que la température et la chlorophylle sont, pour l'instant, considérées comme des variables forçantes homogènes sur l'ensemble des zones d'élevage de la lagune de Thau.

³ Selon l'accord interprofessionnel du Comité National de la Conchyliculture

⁴ Nota bene : L'absence de données chlorophylle *a* REPHY entre le 16 mars et le 08 juin 2009 est compensée par les données du réseau Adaptation et diversification des écosystèmes conchylicoles méditerranéens ADECOM, mesurées à cette période.

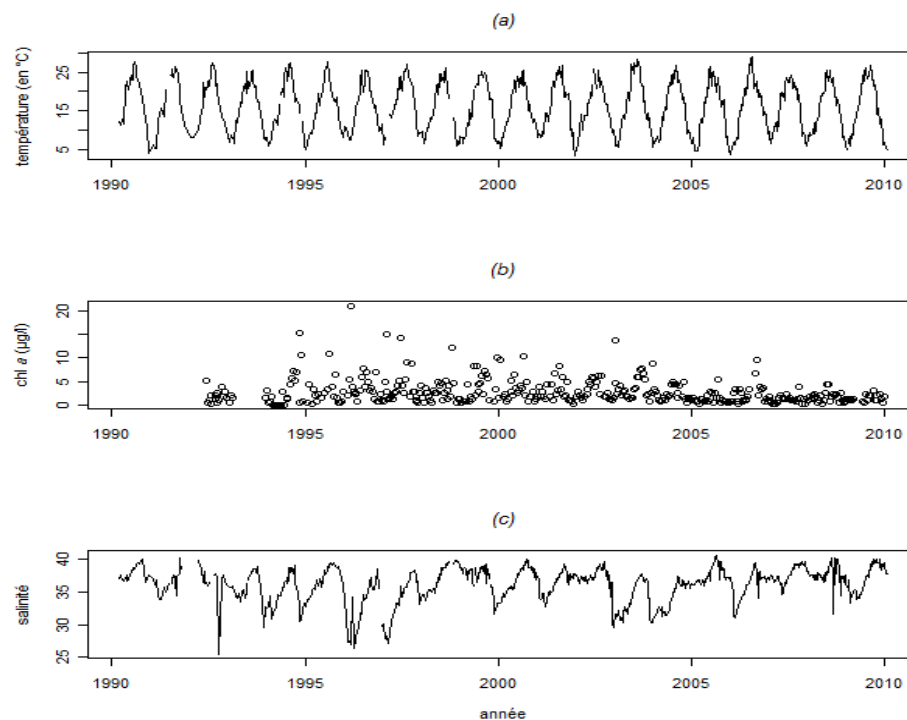


Figure 4 : Conditions hydrologiques de la lagune de Thau de 1990 à 2010 (Réphy), (a) température, (b) chlorophylle *a*, (c) salinité.

Les données de forçages « température » et « chlorophylle *a* » sont interpolées linéairement à un pas de temps journalier lors des simulations.

4.3.2. Données biologiques

Les données biologiques et en particulier biométriques utilisées pour le calibrage du modèle d'écophysiologie sont issues de plusieurs suivis :

- l'Observatoire de la croissance et de la survie de *Crassostrea gigas* (projet Ostreos) devenu l'Observatoire des ressources conchylicoles » pour l'année 2008
- l'action « Adaptation et diversification des écosystèmes conchylicoles méditerranéens » (ADECOM) pour l'année 2009 (Pernet 2010).

4.4. Modèle Dynamic Energy Budget

Le modèle d'écophysiologie utilisé dans cette étude est issu du modèle générique Dynamic Energy and Mass Budgets (Kooijman 1986, 2000), essentiellement axé sur la dynamique de réserve énergétique orientée vers la croissance et la maintenance (par la règle du Kappa $\kappa=0.45$) et la reproduction. La maintenance régit des processus nécessaires à la survie comme par exemple, la maintenance de gradients de concentration à travers des membranes, l'osmorégulation, le turnover de protéines structurales des tissus, les tensions musculaires et mouvements de coquilles, la production continue de coquille et de mucus (Bacher & Gangnery 2006).

Le modèle DEB a été adapté avec succès pour décrire la dynamique de la croissance et de la reproduction de l'huître du pacifique *Crassostrea gigas* en élevage d'une part sous conditions contrôlées et d'autre part, dans des conditions naturelles dont la lagune de Thau (Bacher & Gangnery 2006, Pouvreau *et al.* 2006, Bourles *et al.* 2009, Pernet

2010). Compte tenu de l'objectif du modèle développé ici, la condition de reproduction n'est pas prise en compte et seuls les processus de croissance et maintenance sont simulés. Les variables d'état simulées par le DEB à Thau sont la réserve énergétique E (J) et le volume structurel V (cm³) (Bacher & Gangnery 2006).

La variable injectée dans le modèle de production est le poids individuel W (g) d'un individu représentatif de sa cohorte calculé par l'intermédiaire de la longueur de coquille L (cm), du volume structurel et du coefficient de forme δ_m (sans unité) (équation 1). Le poids individuel est relié à la longueur par une relation allométrique (équation 2).

$$L = \frac{V^{1/3}}{\delta_m} \quad \text{Équation 1}$$

$$W = 0.0934 \times L^3 \quad \text{Équation 2}$$

La paramétrisation a révélé une quasi-uniformité des paramètres malgré les différentes conditions environnementales et les multiples sites d'élevage en France (Bacher & Gangnery 2006, Pouvreau *et al.* 2006, Bourles *et al.* 2009):

Seul le coefficient de demi-saturation X_k contenu dans la réponse fonctionnelle (Holling, type II) régissant le taux d'assimilation énergétique et la réserve énergétique est ajustable en fonction des environnements de production. La réponse fonctionnelle décrit la capacité d'un prédateur à ingérer des proies et la variabilité du paramètre X_k est directement liée aux conditions alimentaires (quantité et qualité) différente selon les sites et les conditions d'élevage.

4.5. Modèle de dynamique de population

4.5.1. Modélisation de la variabilité intra-cohorte

Le modèle de dynamique de population individus-centré est caractérisé par la gestion de cohortes (Bacher & Gangnery 2006) et sous-cohortes. Les cohortes sont créées à chaque ensemencement et 3 sous-cohortes par cohorte sont générées afin de reproduire de la variabilité inter-individuelle.

Cette variabilité est reproduite dans le modèle de production en prenant en compte deux sources de variation :

- i*) l'ensemencement de 3 cohortes à chaque date d'ensemencement mensuelle dont les tailles des coquillages varient de $\pm 10\%$ autour de la moyenne de taille souhaitée.
- ii*) 3 valeurs de X_k attribuées au développement de chaque sous-cohorte sont tirées aléatoirement selon la distribution théorique de la loi de Gauss. Le tirage est borné entre 3 et 17 $\mu\text{g l}^{-1}$ (Pouvreau *et al.* 2006, Bourles *et al.* 2009).

4.5.2. Processus d'ensemencement, de récolte et de mortalité

Les conditions initiales d'ensemencement du naissain pour chaque cohorte sont paramétrées dans une base de données d'ensemencement avec une date mensuelle, une taille moyenne d'individus, un taux d'ensemencement mensuel τ_{ij}^{ens} par rapport à une quantité annuelle de naissains à ensemercer (N_{tot}) fixée à 448 096 000 individus (soit en moyenne 35 bouquets de 4 huîtres par corde, 1100 cordes par tables et 2546 tables

attribuées et exploitées par de l'ostréiculture). N_{ij} représente le nombre d'individus dans la cohorte i / sous-cohorte j (j variant de 1 à 3).

$$\frac{dN_{ij}}{dt} = -h_{ij} \cdot N_{ij} - m_{ij} \cdot N_{ij} + \tau_{ij}^{ens}(N_{tot}) \quad \text{Équation 3}$$

Où h_{ij} est le taux de récolte mensuel et m_{ij} est le taux journalier de mortalité. Le taux de récolte est défini par rapport à un pourcentage de stock commercialisable disponible (Gangnery *et al.* 2004). La mortalité est définie constante à 10 % annuelle et est ramenée à un taux journalier (Gangnery *et al.* 2003). D'autre part, le phénomène de surmortalité est simulé en fonction de la saison, de la température et de la taille des coquillages comme décrit dans la littérature (Pernet 2010). Les surmortalités sont printanières, s'étalant potentiellement sur 2 mois (mai-juin). La température seuil de déclenchement des surmortalités est 17.5°C.

La production P_{ij} (kg) est définie comme la biomasse disponible au sein de chaque cohorte i et sous-cohorte j . La variable W_{ij} représente le poids total individuel de l'huître creuse représentative de sa cohorte i / sous-cohorte j :

$$P_{ij}(t) = N_{ij}(t) \cdot W_{ij}(t) \quad \text{Équation 4}$$

Le stock commercialisable correspond à la somme des productions par cohortes et sous-cohortes dont les tailles moyennes appartiennent aux catégories commercialisables définies précédemment.

Un cycle d'élevage a une durée de 10 à 18 mois au niveau de l'étang de Thau (Gangnery 2004). En conséquence, plusieurs cohortes sont simultanément en élevage, offrant un panel de catégories d'huîtres commercialisables. Le stock « sous-taille » est caractérisé par les huîtres dont le poids est inférieur au poids minimal de la catégorie commerciale 5 (**Tableau I**). Le stock « sur-taille » est caractérisé par les huîtres dont le poids est supérieur au poids maximal de la catégorie commerciale 0 (**Tableau I**).

La récolte R (kg) est définie comme la récolte cumulée des cohortes et sous-cohortes :

$$R(t) = \sum_i \sum_j h_{ij} N_{ij}(t) \cdot W_{ij}(t) \quad \text{Équation 5}$$

Le stock total (kg) présent dans l'étang à un instant donné est :

$$ST(t) = \sum_i \sum_j P_{ij}(t) \quad \text{Équation 6}$$

Les équations différentielles sont résolues selon le schéma d'Euler à un pas de temps journalier.

4.6. Contrôle, étalonnage et calibrage du modèle DEB

Le contrôle du modèle DEB sous ExtendSim[®] est réalisé par rapport aux données de terrain publiées issues du suivi environnemental et du suivi de croissance de 2000-2001 (Gangnery *et al.* 2003).

Un étalonnage du paramètre X_k est réalisé sur la base des forçages environnementaux issus du REPHY et des données de croissance 2008 et 2009 décrites au §Jeux de données. Une optimisation du paramètre X_k est réalisée par la méthode des moindres carrés.

Concernant la variabilité intra-cohorte et intra-sous-cohorte, les paramètres « moyenne » et « écart type » de la loi Normale du tirage aléatoire du X_k ainsi que la variabilité des

longueurs d'huîtres à l'ensemencement sont fixés par un étalonnage et un calibrage des résultats de 30 simulations par rapport aux données biométriques de lots de *Crassostrea gigas* de 2008 et de 2009. Le coefficient de variation est utilisé comme indicateur de dispersion des écart types autour de la moyenne.

4.7. Analyse de sensibilité

4.7.1. Test de la sensibilité du modèle au X_k

Le modèle ostréicole est étudié dans un premier temps pour définir la sensibilité de la production au paramètre optimisé X_k (dans sa gamme de variation sur la base du tirage aléatoire pour 30 simulations) et aux conditions environnementales.

Un indice de sensibilité SI du modèle de production est calculé dans l'objectif de caractériser l'impact du paramètre X_k sur un indicateur λ , stock de biomasse totale puis stock de biomasse commercialisable.

$$SI = \frac{1}{n} \times \sum_{t=1}^n \left(\frac{|\lambda_t^1 - \lambda_t^0|}{\lambda_t^0} \right) \times 100 \quad \text{Équation 7}$$

On considère n : le nombre de jours simulés, λ_t^1 : le résultat de l'indicateur simulé avec les différentes valeurs de X_k et λ_t^0 : l'indicateur de référence simulé au temps t à partir du paramètre X_k optimisé.

Deux dates d'initialisation du modèle (1 janvier 2000 et 1 janvier 2004) sont testées pour vérifier l'absence de sensibilité du modèle aux conditions initiales de date et de durée de simulation (10 ans et 6 ans). La variabilité des trajectoires est évaluée graphiquement par des boîtes à moustache.

4.8. Scénarios testés

Le modèle de production est utilisé pour comprendre la dynamique des stocks totaux, des stocks commercialisables et des récoltes d'huîtres creuses *Crassostrea gigas* élevées dans le bassin de Thau. Trois scénarios différents sont étudiés, le premier pour observer le comportement du modèle de production face à des données de la bibliographie et les deux autres portent sur des thèmes d'actualités ayant un impact sur les stocks de coquillage en élevage, à savoir les fermetures sanitaires de commercialisation des coquillages suite à des pollutions microbiologiques, les surmortalités de naissain d'huîtres tel que décrit par Pernet *et al.* (2010) avec la prise en compte d'alternatives ou d'aléas culturels.

En ce qui concerne les conditions initiales, les huîtres ensemencées pèsent 8 gr pour une taille de 44 mm avec une variabilité de $\pm 10\%$ répartie dans les 3 cohortes. Au début des simulations, le nombre d'individus au sein des cohortes et les sous-cohortes est initialisé à 0.

4.8.1. Simulation de la récolte entre 2000 et 2009

Une simulation est réalisée sur la période 2000-2009 pour confronter les données de récoltes du modèle de production ostréicole à des données de référence. Les forçages liés aux pratiques culturales sont basés sur une activité traditionnelle [nombre total de naissains ensemencés N_{tot} et calendrier d'ensemencement de référence (**Tableau 3**) et de

récolte comme défini par Gangnery *et al.* (2004)]. Le phénomène de surmortalité est initié en 2007.

4.8.2. Fermeture sanitaire de commercialisation

La lagune de Thau a pour usage prioritaire la conchyliculture selon le Schéma de Mise en Valeur de la Mer⁵. Cependant, des pics de contamination bactériologique apparaissent en cas de fortes pluies sur le bassin versant ou ponctuellement en période de temps sec (Brocard *et al.* 2010). L'administration compétente déclenche alors la fermeture de la commercialisation des coquillages sur la base des résultats du réseau national de contrôle microbiologique des zones de production de coquillages (REMI, Ifremer). Le scénario simulé concerne la fermeture entre le 15 septembre 2006 et le 11 octobre 2006 faisant suite à de fortes précipitations (Guillou J. L.⁶, *com. pers.*). La récolte est donc déplacée de 11 jours (du 30 septembre au 11 octobre). La simulation est initialisée en janvier 2003 pour la mise en place d'un stock dans la lagune.

Nota bene : L'effet de la malaïgue ayant induit des mortalités estivales importantes sur le cheptel en 2006 n'est pas pris en compte dans cette simulation.

4.8.3. Surmortalité

La définition du scénario de surmortalité du naissain à Thau est basée sur le phénomène décrits pour les années 2007, 2008 et 2009 (Pernet *et al.*, 2010). Les 30 simulations sont initiées en janvier 2006. Plusieurs conditions (**Tableau 2**) sont testées pour comprendre l'effet de ce phénomène. La condition *a* est définie comme un scénario de référence :

- DR_{ref} : le taux de mortalité constant de 10% annuel,
- S_{ref} : nombre de naissains N_{tot} ,
- PC_{ref} : calendrier d'ensemencement traditionnel (**Tableau 3**),

Tableau 2 : Tableau synoptique des conditions du scénario de surmortalité

	Taux de mortalité		Ensemencement			Pratiques culturelles	
	DR _{ref}	DR ₁	S _{ref}	S ₁	S ₂	PC _{ref}	PC ₁
Condition <i>a</i>	•		•			•	
Condition <i>b</i>		•	•			•	
Condition <i>c</i>		•	•				•
Condition <i>d</i>		•		•		•	
Condition <i>e</i>		•		•			•
Condition <i>f</i>		•			•	•	

Avec :

- DR₁ : phénomène de surmortalité,
- S₁ : doublement du nombre de naissains N_{tot} pour les années 2008 et 2009,
- S₂ : nombre de naissains N_{tot} ensemencés divisé par deux en 2009,
- PC₁ : calendrier d'ensemencement modifié (Tableau 3).

⁵ http://www.languedoc-roussillon.pref.gouv.fr/actualites/Thau/schema_mise_valeur_mer.pdf

⁶ Laboratoire Environnement Ressource du Languedoc Roussillon, Ifremer Sète.

Tableau 3 : Tableau mensuel des pratiques culturales (fréquences d'ensemencement (%))

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
PC _{ref}	12	12	12	12	9	6	6	6	6	9	6	4
PC ₁	5	5	5	5	5	5	6	6	24	24	6	4

L'objectif est de comparer les résultats de simulation sur les variables « Stock Total », « Stock Commercialisable » et « Récolte » pour les 3 années d'élevage 2007 ,2008 et 2009 avec et sans ce phénomène de surmortalité.

Nota bene : Les conditions *d*, *e* et *f* sont étudiées pour comprendre des effets de conditions initiales. Les quantitésensemencées choisies ne sont pas en lien avec la réalité. Par rapport à la condition *f*, le phénomène de surmortalité entraîne une demande excessive d'approvisionnement en naissain depuis 2007 au niveau des lotissements conchylicoles de la lagune de thau. Les écloseries, à la base de cet approvisionnement, peuvent difficilement faire face à la demande. Il est décrit par les professionnels ostréicoles des ruptures dans leur approvisionnement, sans pouvoir, à ce jour, décrire précisément ces ruptures d'approvisionnement par manque de connaissances sur le sujet.

Les logiciels R, ExtendSim et Microsoft Excel sont utilisés pour le traitement des données.

5. Résultats

5.1. Contrôle, étalonnage et calibrage du modèle DEB

Un contrôle du modèle DEB sous ExtendSim[®] a été réalisé par rapport aux données de terrain publiées issues du suivi environnemental et du suivi de croissance de 2000-2001 (Gangnery *et al.* 2003, Bacher & Gangnery 2006). Cependant, un problème majeur d'ajustement des résultats de croissance du DEB par rapport aux données de terrain (**Figure 5**) apparaît lors de l'utilisation de forçages environnementaux (chlorophylle *a*) issues des séries historique REPHY. Le protocole analytique étant différent entre REPHY et Gangnery (2003) pour les mesures chlorophylliennes, les valeurs de forçages du Réphy (Figure 6) sont plus élevées et amènent à une surestimation de la longueur de coquillages dans le DEB.

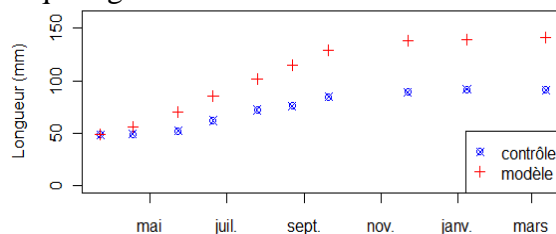


Figure 5 : Comparaison mesure vs modèle DEB sur la base des résultats de simulation forcée avec les données environnementales du REPHY

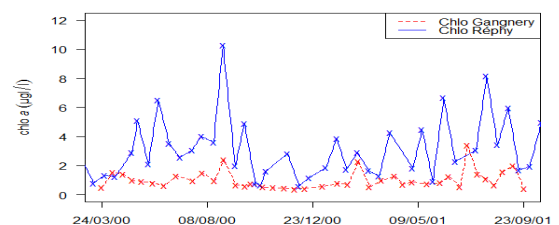


Figure 6 : Comparaison des mesures de chlorophylle a du REPHY et de Gangnery (2003)

Il n'y a pas de décalage entre les données de température du REPHY et de Gangnery (2003).

Un nouvel étalonnage du paramètre X_k en fonction du paramètre chlorophyllien du REPHY est donc nécessaire en utilisant les jeux de données biométriques de 2008 et 2009 comme données d'étalonnage. Le jeu de données « Mean » (**Figure 7**) représente les longueurs moyennes de coquilles sur le lot mesuré. Les valeurs de X_k faibles ($X_k=2 \mu\text{g l}^{-1}$, $X_k=4 \mu\text{g l}^{-1}$) surestiment fortement les longueurs par rapport aux données de référence alors qu'elles sont sous estimées pour des X_k supérieurs à $10 \mu\text{g l}^{-1}$.

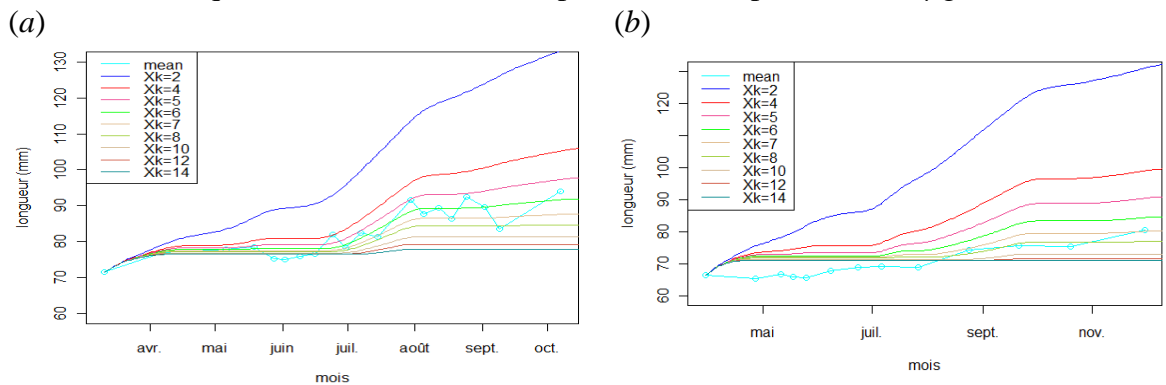


Figure 7 : Etalonnage du paramètre X_k avec (a) le jeux de données biométriques de 2008 et (b) le jeux de données biométriques de 2009 ; (mean —) moyenne des longueurs de référence.

L'optimisation du paramètre X_k est réalisée par la méthode des moindres carrés (**Figure 8**). En 2008, la valeur $X_k = 6 \mu\text{g l}^{-1}$ minimise les différence mesure/modèle (écart type = $2.5 \mu\text{g l}^{-1}$) alors qu'en 2009, l'écart type le plus faible (écart-type = $3.9 \mu\text{g l}^{-1}$) est obtenu pour $X_k = 8 \mu\text{g l}^{-1}$. On choisit la valeur du paramètre X_k intermédiaire soit $X_k=7 \mu\text{g l}^{-1}$.

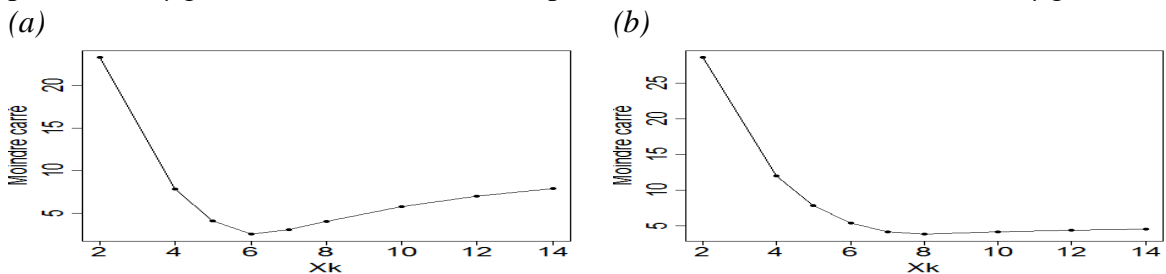


Figure 8 : Application de la méthode des moindres carrés pour l'optimisation du paramètre X_k avec les données de forçage chlorophylle du (a) REPHY 2008 et (b) REPHY 2009.

L'optimisation du $X_k 7 \mu\text{g l}^{-1}$ est réalisée pour des huîtres dont les tailles à l'ensemencement sont de 71 mm en 2008 et 66 mm pour l'année 2009, c'est-à-dire des huîtres en fin de phase de prégrossissement.

Un contrôle du modèle DEB avec la valeur de paramètre X_k optimisé appliquée sur des coquillages de plus petites tailles (données de référence AEDCOM 2009, naissain de 28 mm) ne donne pas un ajustement satisfaisant (**Figure 9**). Cette valeur de X_k induit une sous-estimation de 30% des longueurs.

Une tentative d'amélioration de l'ajustement des résultats de simulation montre un meilleur ajustement (**Figure 10**) en considérant :

- $X_k=3 \mu\text{g l}^{-1}$ pour $28\text{mm} \leq \text{longueur de coquillage} \leq 60 \text{ mm}$
- Puis, $X_k=7 \mu\text{g l}^{-1}$ des longueurs de coquillage $> 60\text{mm}$.

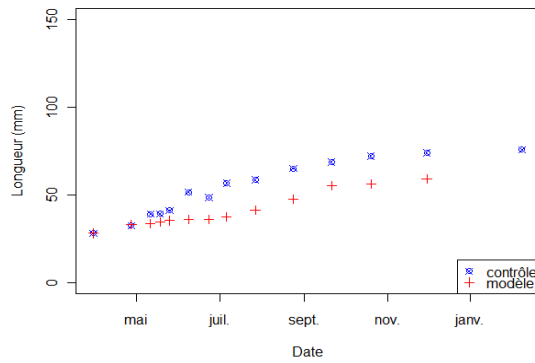


Figure 9 : Contrôle des résultats de simulation avec calibrage du paramètre $X_k=7$ par rapport à des données biométriques 2009 (ADECOM), Naissain de taille initiale 28 mm.

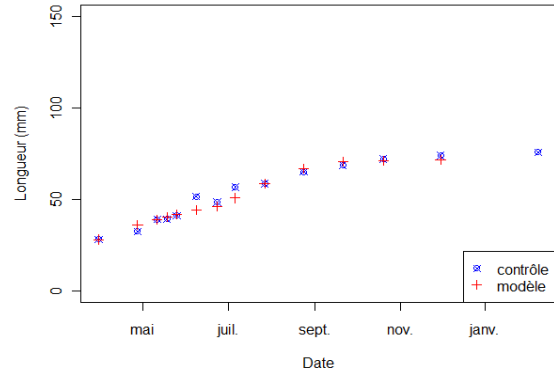


Figure 10 : Contrôle des résultats de simulation avec un paramètre X_k variable ($X_k=3$ du 30/03/2009 au 27/07/09 ; $X_k=7$ du 28/07/09 au 30/11/2009) vs données 2009 (ADECOM).

Cette proposition assez inédite d'amélioration passe par l'adaptation d'un paramètre X_k variable en fonction de la taille des coquillages. Toutefois, la discontinuité du X_k n'est pas satisfaisante tel que simulé dans ce test (utilisation de 2 jeux de données simulés différents). Dans la suite du présent travail, la valeur optimisée de $X_k=7 \mu\text{g l}^{-1}$ est conservée durant tout le cycle d'élevage. Le modèle DEB n'est donc pas juste en l'état pour faire des estimations de stocks justes. Pour le moment, un intérêt pour le modèle de production réside dans la comparaison de scénarios en relatif.

5.2. Etalonnage et calibrage de la variabilité intra-cohorte

Les lots de *Crassostrea gigas* mis en élevage sont rarement strictement homogènes au niveau de la longueur des coquillages (Figure 11). Cette variabilité simulée au sein des cohortes est prise en compte dans le modèle en considérant une variabilité de 10 % autour de la moyenne des longueurs d'huîtres des 3 cohortes ensemencées mensuellement et complété par un tirage aléatoire du X_k selon une loi normale de moyenne $7 \mu\text{g l}^{-1}$ et d'écart type à définir.

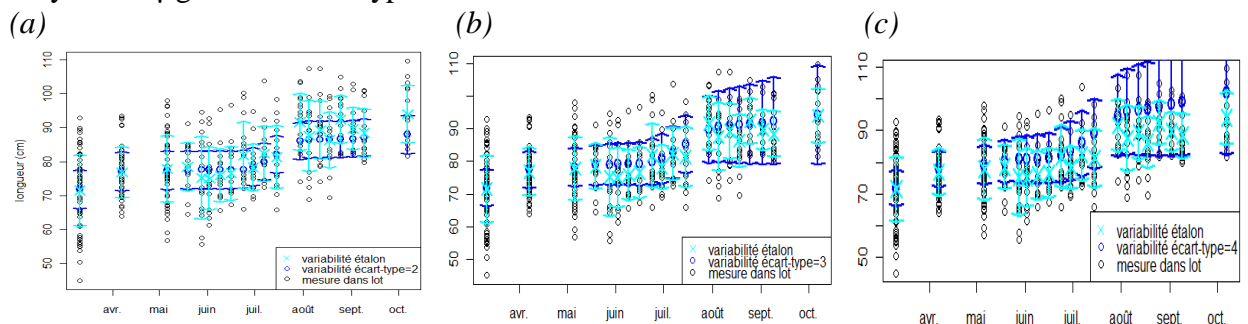


Figure 11 : Test des valeurs du paramètre « écart type » de la loi Normale pour le tirage aléatoire du X_k de moyenne = 7, (a) écart type = $2 \mu\text{g l}^{-1}$, (b) écart type = $3 \mu\text{g l}^{-1}$, (c) écart type = $4 \mu\text{g l}^{-1}$.

La comparaison des coefficients de variation des valeurs mesurées et simulées (Figure 12) illustre la variabilité générée par le modèle en référence à la variabilité des données

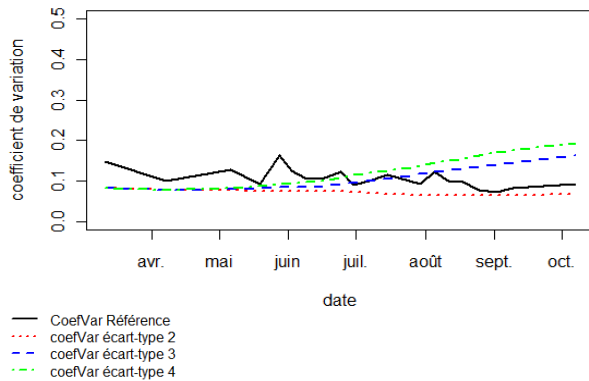


Figure 12 : Comparaison des coefficients de variation des mesures (CoefVar Référence) et des simulations dont l'écart type est fixé à $2 \mu\text{g l}^{-1}$ (CoefVar écart-type 2), à $3 \mu\text{g l}^{-1}$ (CoefVar écart-type 3), et à $4 \mu\text{g l}^{-1}$ (CoefVar écart-type 4).

biométriques des lots. Il apparaît que cette variabilité intra-cohorte croît avec la durée de la simulation. Cette tendance à l'accroissement de la variabilité ne se vérifie pas pour les données de terrain. Le coefficient de variation moyen de référence (mesure) sur l'année est de 0.10 comme le coefficient de variation moyen des simulations réalisées avec l'écart type de $3 \mu\text{g l}^{-1}$. Le coefficient de variation moyen des simulations réalisées avec l'écart type de $2 \mu\text{g l}^{-1}$ est de 0.07 et 0.12 pour l'écart type 4 $\mu\text{g l}^{-1}$.

Le choix d'une variabilité des tailles d'ensemencement de 10% associé à un X_k tiré d'une loi normale de moyenne $7 \mu\text{g l}^{-1}$ avec un écart type de $3 \mu\text{g l}^{-1}$, borné entre $3 \mu\text{g l}^{-1}$ et $17 \mu\text{g l}^{-1}$ constitue donc le paramètre le mieux adapté pour générer de la variabilité au sein des cohortes et sous-cohortes.

5.3. Tests de sensibilité du modèle de production

5.3.1. Indice de sensibilité du modèle au X_k

Compte tenu des résultats précédents concernant la variabilité du X_k ($X_k = 7 \pm 3 \mu\text{g l}^{-1}$), une analyse de sensibilité du modèle est réalisée pour caractériser l'impact de la variabilité du X_k sur les stocks totaux et stocks commercialisables. La valeur du X_k optimisé est $7 \mu\text{g l}^{-1}$ et les valeurs de X_k testés pour caractériser la sensibilité du modèle sont $4 \mu\text{g l}^{-1}$ et $10 \mu\text{g l}^{-1}$.

Les résultats des simulations sont fortement sensibles au paramètre X_k en particulier à partir de l'année 2004 (Figure 13). Une tendance à l'augmentation de l'indice de sensibilité au X_k au cours du temps est mise à jour également pour les deux variables Stock Total et Stock Commercialisable.

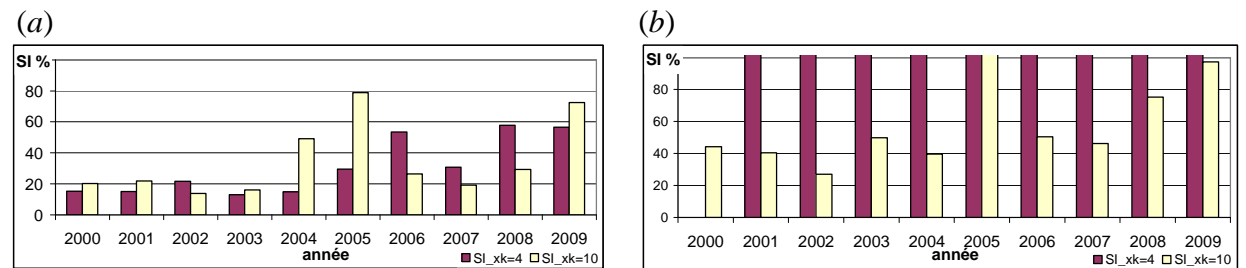


Figure 13 : Indice de sensibilité (SI) du modèle sur la variable «Stock Total» (a) et «Stock Commercialisable» (b), moyenne annuelle du SI sur 10 ans de simulations (2000-2009).

La très forte sensibilité du stock commercialisable au X_k illustre que la variabilité sur la croissance individuelle induit des modifications notables dans la répartition de la biomasse entre les catégories en sous taille et les catégories commercialisables.

Une analyse fine des variables « Stock Total » et « Stock Commercialisable » sur la période étudiée (2000 => 2009) est nécessaire pour comprendre cette sensibilité et le phénomène de l'année 2005.

5.3.2. Caractérisation du stock total et du stock commercialisable selon le paramètre X_k pour deux dates d'initialisation

La caractérisation des variables « Stock Total », « Stock Commercialisable », « Récolte » et « Stock en Sous Taille » en fonction du paramètre X_k permet de mieux comprendre la sensibilité du modèle de production à ce paramètre sur la période étudiée. Une certaine périodicité se retrouve à l'échelle des 4 premières années alors qu'une rupture apparaît en 2005 sur les résultats de simulations avec $X_k=7 \mu\text{g l}^{-1}$ et $X_k=10 \mu\text{g l}^{-1}$ (**Figure 14**). Ainsi, des transferts dynamiques de biomasse sont réalisés entre les différents stades d'élevage. On remarque en particulier que les trajectoires de la grandeur Stock Sous Taille et de la grandeur Stock Commercialisable sur la période 2005 – 2009 ont les mêmes tendances pour les $X_k=7 \mu\text{g l}^{-1}$ et $10 \mu\text{g l}^{-1}$. Plus le X_k augmente, moins les huîtres ont de capacité à grandir à quantité de chlorophylle identique. Le cheptel du stock sous-taille ne passe pas dans le stock commercialisable et il y a moins de récolte que pour un $X_k=4 \mu\text{g l}^{-1}$.

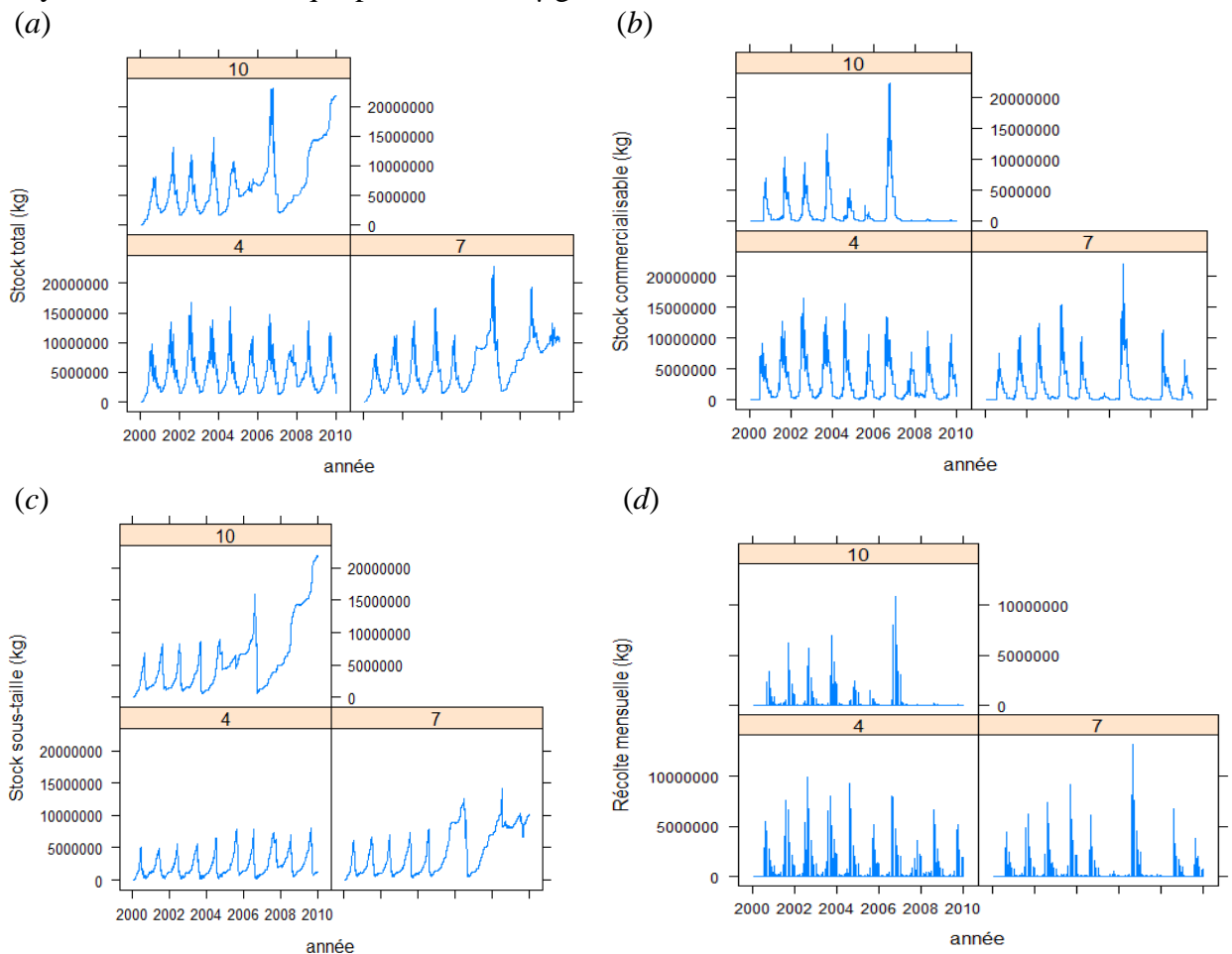


Figure 14 : Résultats de simulations du modèle de production, (a) variable « Stock Total » et (b) variable « Stock Commercialisable », (c) variable « stock sous taille », (d) variable « récolte mensuelle » selon différents X_k $4 \mu\text{g l}^{-1}$, $7 \mu\text{g l}^{-1}$, $10 \mu\text{g l}^{-1}$.

Pour comprendre si cette rupture dans la stationnarité des variables est induite par la durée de simulation et/ou par la dérive due à un cumul d'erreur ou à un autre facteur, une série de 30 simulations est faite sur une période plus courte (2004-2009). La date d'initialisation des simulations n'a pas d'effet majeur sur la variabilité de la variable Stock Total (Figure 15). La régularité des cycles a lieu également sur les simulations initialisées en 2004 et tient donc aux forçages environnementaux de l'année 2005.

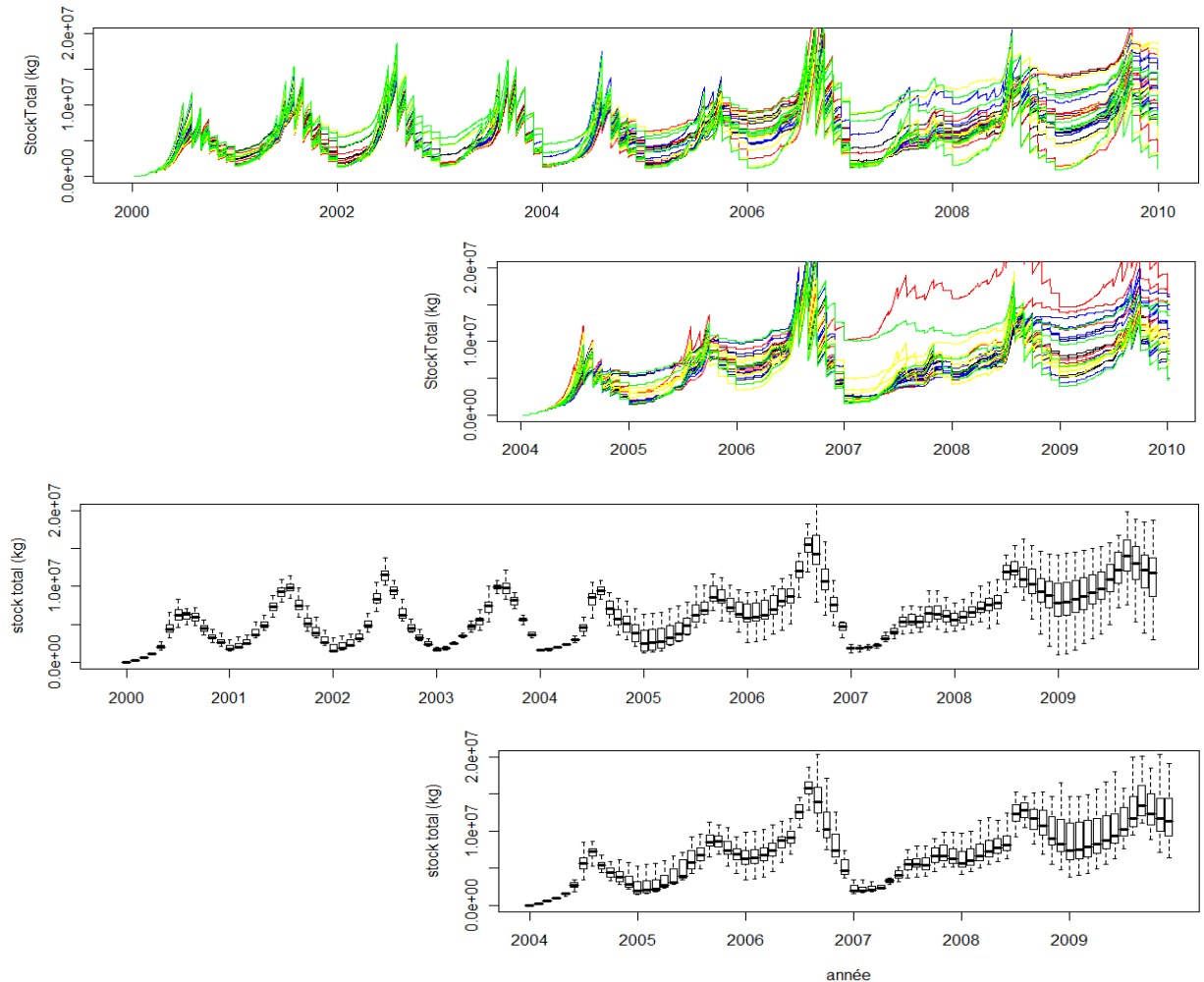


Figure 15 : Comparaison graphique de la variabilité de la variable « Stock Total » des trajectoires de simulations par rapport à leur date d'initialisation 2000 et 2004

La déstabilisation observée en 2005 se manifeste tout autrement sur les stocks commercialisables (**Figure 16**). La variabilité des résultats sur le stock commercial est moindre et là encore, la date d'initialisation n'a pas d'influence sur le phénomène observé. L'effet « 2005 » impacte la grandeur Stock Commercialisable en la diminuant de manière générale.

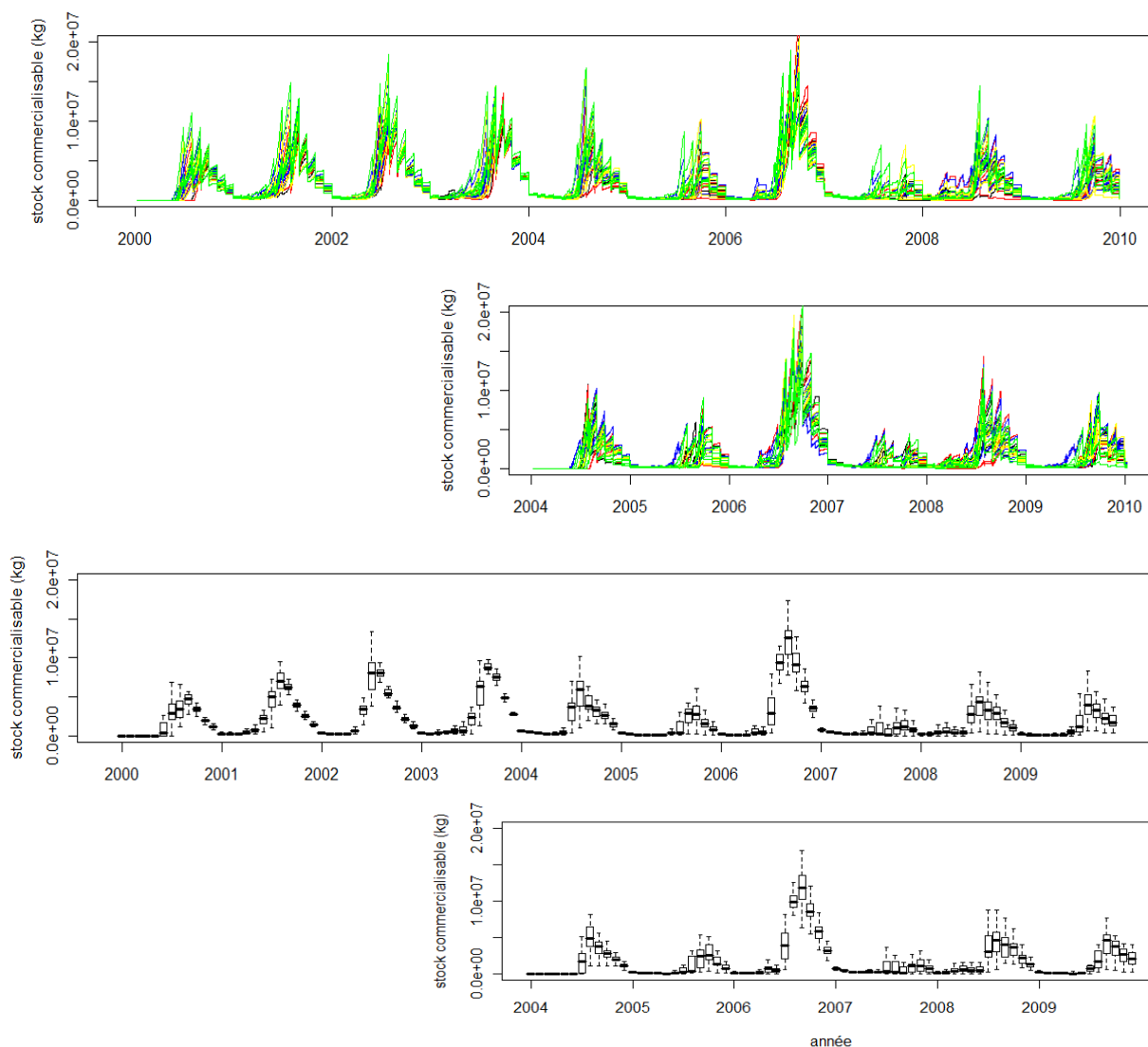


Figure 16 : Comparaison graphique de la variabilité de la variable « Stock Commercialisable » des simulations par rapport à leur date d'initialisation 2000 et 2004

Ces résultats permettent de mieux caractériser la source de variabilité des trajectoires des variables Stock Total et Stock Commercialisable. Ainsi, les conditions initiales et les durées de simulation ne sont pas à l'origine de la rupture observée pour des $X_k \geq 7 \mu\text{g l}^{-1}$. L'origine de cette déstabilisation peut être trouvée au niveau des forçages environnementaux et tout particulièrement la chlorophylle.

5.4. Scénarios testés

5.4.1. Confrontation des résultats du modèle de production ostréicole

Bien que le modèle d'écophysiologie sous-estime les biomasses de coquillage de taille inférieure à 60mm, une simulation du modèle de production ostréicole est réalisée (**Figure 17**) pour comparer en l'état les estimations des cumuls de récoltes annuels

simulés entre 2000 et 2009 aux données de production récoltée issues de la bibliographie et de la profession (c.f. § Conchyliculture dans l'étang de Thau). Cet exercice permet d'être critique par rapport aux données, qu'elles soient issues des simulations ou de la bibliographie. Les conditions initiales « tailles de coquillage à l'ensemencement » tirées de la bibliographie (Gangnery 2003) et « taux d'ensemencement » (448 096 000 d'individus) sont théoriques. Une enquête socio-économique de l'activité ostréicole en Méditerranée portant sur la vulnérabilité des entreprises dans le contexte actuel difficile (Université de Montpellier I-LAMETA, Cevalmar, Ifremer) va permettre de disposer d'informations actualisées, entre autre, par rapport aux pratiques culturelles actuelles. Les résultats de cette enquête devraient fournir des conditions initiales plus réalistes.

La **Figure 17** permet de voir que les données sont cohérentes entre estimation de production de la bibliographie et résultats de simulation de production récoltée en 2000, 2001 et 2004.

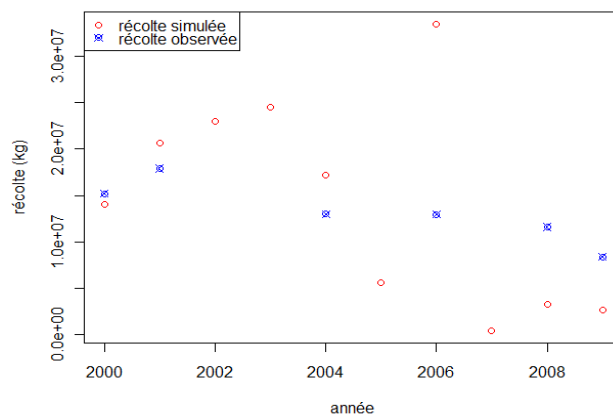


Figure 17 : Comparaison de résultats de simulation de production ostréicole (Xk fixe= 7) et données bibliographiques

Pour les deux années 2000 et 2001, les données prises en référence sont issues de modèles, respectivement 15 200 tonnes et 17900 tonnes (Gangnery *et al.* 2001) alors que les résultats de la simulation du modèle de production sont de 14028 tonnes et 20658 tonnes. Le chiffre de référence de 2004 (SRCM 2004) annonce une récolte de 13 000 tonnes alors que le modèle donne une récolte à 17 172 tonnes. En ce qui concerne l'année 2006, il apparaît une incohérence entre le chiffre annoncé par les affaires maritimes (DRAM Languedoc-

Roussillon 2006) et les résultats du modèle 33 424 tonnes ; l'atypicité de l'année 2006 déjà décrite dans les paragraphes précédents se retrouve (*cf.* § Discussion). Les années 2008 et 2009 illustrent une différence des résultats de récolte du modèle (3301 tonnes et 2629 tonnes) par rapport aux données de référence (11600 tonnes et 8400 tonnes) (SRCM *Com. pers.*) qui peut s'expliquer de 2 façons :

1. le modèle de production induit par le DEB une sous-estimation des croissances de coquillages dont la taille est inférieure à 60 mm (*cf.* § Résultats),
2. à dire d'expert, une augmentation des taux annuels d'ensemencement des professionnels de l'ostréiculture a lieu en réaction aux surmortalités depuis 2007.

5.4.2. Fermeture sanitaire de commercialisation

La fermeture sanitaire de septembre 2006 est une période à taux de récolte modéré (46% du stock commercialisable (Gangnery *et al.* 2003)). D'après la simulation, les conséquences de cette fermeture porte sur un décalage des ventes du 30 septembre 2006 de 5930 tonnes (pour un stock commercialisable de 12182 tonnes) à 6278 tonnes au 11 octobre 2006 (sur 12853 tonnes de stock commercialisable). Elle induit un différentiel de récolte de 6% en plus soit 368 tonnes. Dans le cadre de la simulation décrite, cette fermeture a donc peu de conséquences sur la production d'huîtres creuses.

5.4.3. Scénario de surmortalité

L'année 2006 permet la mise en charge de l'étang générant un stock total de 1964 tonnes d'huîtres creuses au 31 décembre 2006 (**Tableau 4**). La condition *a* (situation sans évènement néfaste à la production, ni changement de pratique de 2006 à 2009) permet de caractériser la dynamique du stock total sans autre contrainte que les forçages environnementaux et les pratiques d'élevage dite traditionnelles (Figure 18). La

Tableau 4 : Résultats de simulation Stock Total, condition *a*.

condition <i>a</i>	Stock Total (tonnes)
2006	1 964
2007	6 959
2008	6 722
2009	8 765

condition *a*, induit une progression de la biomasse du stock total allant de 6959 tonnes en 2007 pour atteindre 8765 tonnes au 31 décembre 2009.

La condition *b* (effet des surmortalités) a un impact fort sur la production, on observe une diminution de la variable Stock Total de 57% en 2007, 56% en 2008, et 53% en 2009, par rapport à la condition *a* de base (**Figure 19**).

Concernant les années 2008 et 2009, la condition *c* diminue les pertes sur le stock total d'environ 30% par rapport à la condition *b*. Les conditions *d* et *e* ont les meilleures performances par rapport au stock total. Toujours par rapport à la condition de base *a*, la condition *d* regroupe les forçages générant le moins de perte en 2008 (-10%) et 2009 (-7%) alors que la condition *e* offre un gain par rapport à la condition *a* avec un taux de variation de +40% en 2008 et + 59% en 2009 sur le stock total.

La condition *f* (condition qui, d'une certaine manière, pourrait rappeler le contexte de l'ostréiculture actuelle) provoque, en 2008 et 2009, une diminution des stocks totaux de 58% et 66%.

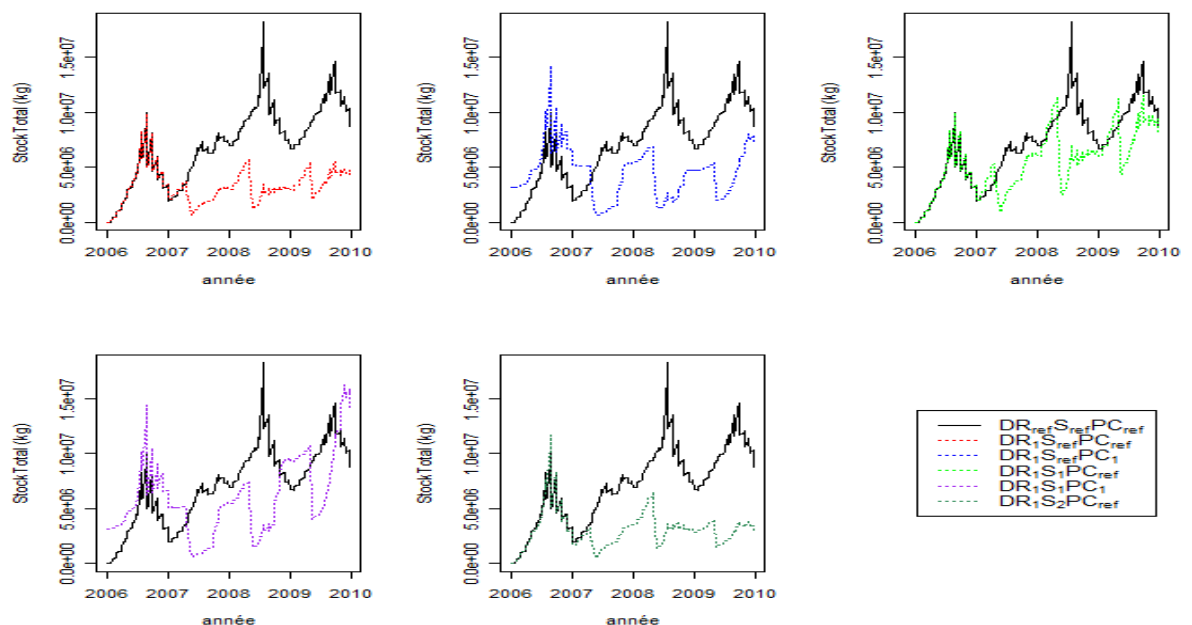


Figure 18 : Représentations graphiques des trajectoires de la variable Stock Total pour les conditions de simulation *a* ($DR_{ref} S_{ref} PC_{ref}$), *b* ($DR_1 S_{ref} PC_1$), *c* ($DR_1 S_{ref} PC_1$), *d* ($DR_1 S_1 PC_{ref}$), *e* ($DR_1 S_1 PC_1$), et *f* ($DR_1 S_2 PC_{ref}$).

On remarque que les conditions *c*, *d* et *f* génèrent des pertes (**Figure 19**) alors que la condition *e* apporte un gain (+59% en 2009) au niveau du stock total.

L'effet des surmortalités sur la Récolte à partir de 2007 est sévère. Dans le cadre des simulations réalisées, les surmortalités (condition *b*) engendrent une perte sur la récolte annuelle par rapport à la condition *a* de 67% en 2007, 79% en 2008 et 60% en 2009.

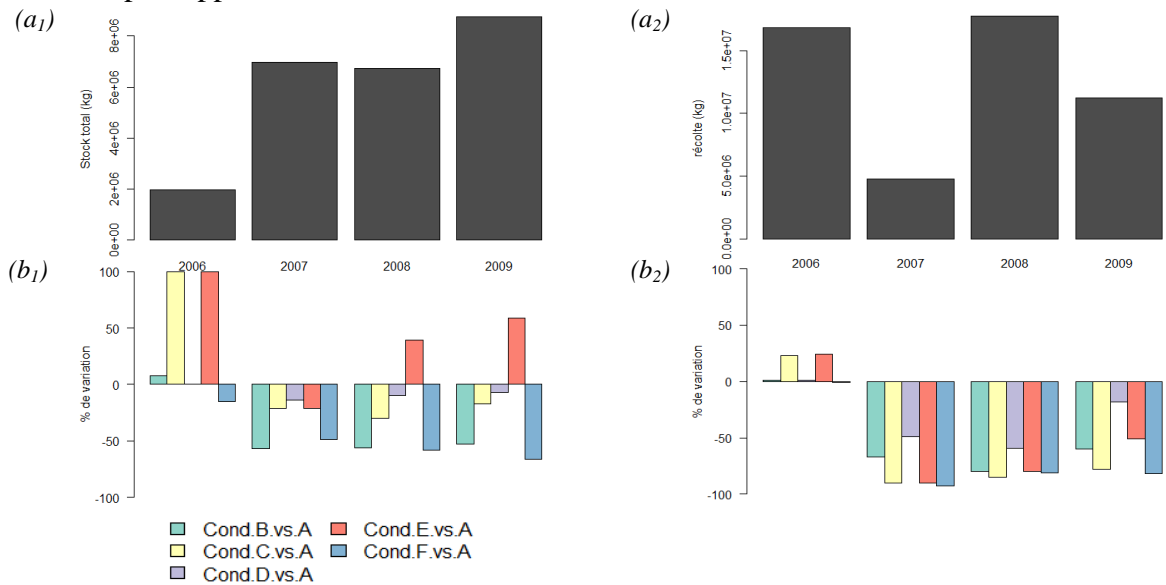


Figure 19 : Représentation graphique de la simulation Condition *a* pour les variables (*a*₁) Stock Total, (*a*₂) récolte et représentation graphique des taux de variation entre les conditions *b,c,d,e,f* par rapport à la condition *a* pour (*b*₁) Stock Total et (*b*₂) Récolte.

La condition *c* n'offre pas de gain réel sur la récolte alors que la conditions *d* permet de limiter les pertes par rapport à la condition *a* de 18% en 2009. La condition *f* révèle une perte de 82% de la récolte en 2009.

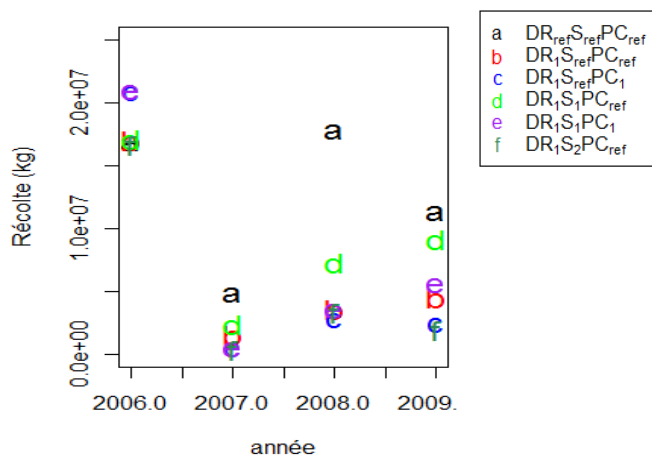


Figure 20 : Evolution du cumul annuel des récoltes simulées selon les différentes conditions *a, b, c, d, e, f* testées sur la période 2004-2009.

Les résultats de la **Figure 20** viennent confirmer que les scénarios *d* et *e* sont les plus adaptés pour limiter les pertes. Le scénario *c* n'apporte pas d'amélioration de productivité ostréicole dans le cadre de l'application du modèle de production actuelle. Selon les différentes conditions simulées, l'année 2007, frappée par les surmortalités, fait chuter la récolte entre 335 tonnes et 2428 tonnes, soit entre 49% et 92% de perte. L'année 2009 permet de faire ressortir les

effets de chaque condition après trois années successives de surmortalités sur la variable Récolte. La condition *d* permet de produire une récolte de 9184 tonnes en 2009.

La **Figure 21** permet de voir la dynamique de l'évolution du stock commercialisable d'huîtres creuses selon les différentes conditions du scénario surmortalité. Les années 2006 et 2007 des simulations sont atypiques, on retrouve, comme décrit précédemment dans l'étude de la sensibilité du modèle, le pic de stock commercialisable de 2006 et la

chute de production en 2007. L'année 2007 est marquée par une perte de productivité dont l'effet est décuplé par les surmortalités. En 2009, le stock commercialisable tend à se refaire avec le scénario *d*.

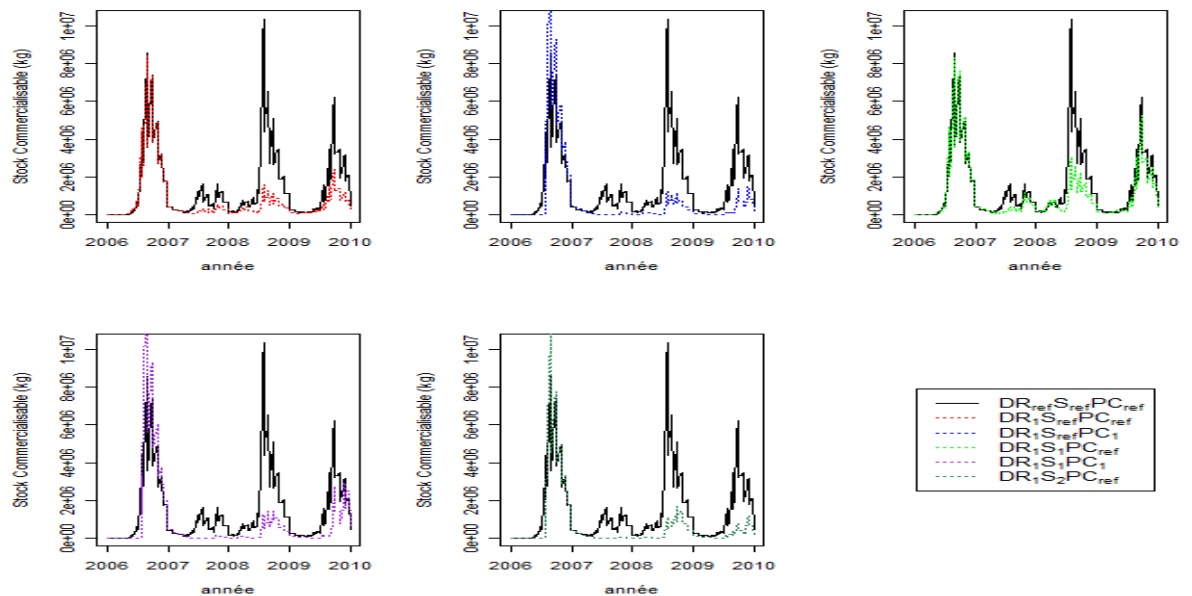


Figure 21 : Représentations graphiques des trajectoires de la variable Stock Commercialisable pour les conditions de simulation *a* ($DR_{ref} S_{ref} PC_{ref}$), *b* ($DR_1 S_{ref} PC_{ref}$), *c* ($DR_1 S_{ref} PC_1$), *d* ($DR_1 S_1 PC_{ref}$), *e* ($DR_1 S_1 PC_1$), et *f* ($DR_1 S_2 PC_{ref}$).

6. Discussion

6.1. Contrôle, étalonnage et calibrage du modèle DEB

La grande sensibilité du modèle de production au X_k demande une attention particulière à l'ajustement de ce paramètre (Bacher & Gangnery 2006, Pouvreau *et al.* 2006, Bourles *et al.* 2009). Les conditions hydrobiologiques de la lagune méritent que l'on s'attarde sur la qualité trophique de ce milieu d'autant que les mollusques-bivalves répondent aux variations du milieu en adaptant leurs fonctions physiologiques (nutrition) (Dupuy *et al.* 1999, Dupuy *et al.* 2000, Pouvreau 2006). La lagune de Thau est connue pour ses faibles concentrations en chlorophylle *a* et teneurs en matière organique particulaire. Elle héberge une large gamme d'organismes photosynthétiques unicellulaires procaryotiques et eucaryotiques dont l'espèce endémique *Ostreococcus taurii* (classe de taille : 0.2- 2 μm) (Bec *et al.* 2005) et des flagellées prymnésiophytes (PNEC 2008). La communauté picoplanctonique photosynthétique est représentée dans la production primaire (Bec *et al.* 2005). L'abondance cellulaire moyenne est importante (3.4×10^7 cellule l^{-1}) au niveau de la lagune de Thau (Vaquer *et al.* 1996). Cette espèce met à disposition du carbone organique dans l'écosystème en alimentant des prédateurs (protistes ciliés) et par l'intermédiaire de la boucle microbienne (Dupuy *et al.* 2000). Par sa petite taille, *Ostreococcus taurii* échappe à la prédation directe de *Crassostrea gigas* mais il représente un apport de carbone organique important pour les maillons supérieurs de la chaîne trophique (Bec *et al.* 2005) par le phénomène de cascade trophique. Les bactéries et organismes unicellulaires photosynthétiques picoplanctoniques présents dans

l'écosystème Thau sont consommés par les organismes planctoniques hétérotrophes de classe de taille 2-200 μm (contrôle top down du picoplancton) et constituent une ressource alimentaire pour les bivalves filtreurs suspensivores *Crassostrea gigas* adultes (Dupuy *et al.* 2000, PNEC 2008). Cependant, il est possible que le bol alimentaire du naissain soit différent de celui des adultes. Sur la base du spectre de taille et de la qualité du régime alimentaire potentiel, l'alimentation des coquillages, ou plus particulièrement leur capacité de rétention particulaire change aux travers d'adaptation de la filtration, de la rétention, de la sélection en fonction de la taille des coquillages (Pouvreau 2006). Il serait donc intéressant de connaître, en particulier, la composition qualitative et quantitative du bol alimentaire du naissainensemencé à Thau. Cette connaissance permettrait de choisir le meilleur forçage alimentaire pour les modèles écophysiologiques (remise en question du forçage chlorophyllien). Des pistes sont explorées dans ce sens au travers de la prise en compte de forçage alimentaire par sélection floristique dans le modèle écophysiologique DEB Bivalve (Pouvreau 2006) mais un complément spécifique doit peut être est fait pour la lagune de Thau par rapport au compartiment trophique des organismes pélagiques planctoniques hétérotrophes de classe de taille 2-2000 μm . A défaut, une solution alternative est de paramétrer le X_k selon la taille des coquillages.

6.2. Scénarios testés

6.2.1. Simulation du modèle de production ostréicole

L'année 2005 est caractérisée par une teneur en chlorophylle *a* plus faible que les années précédentes (Figure 22) induisant une diminution de la croissance des huîtres.

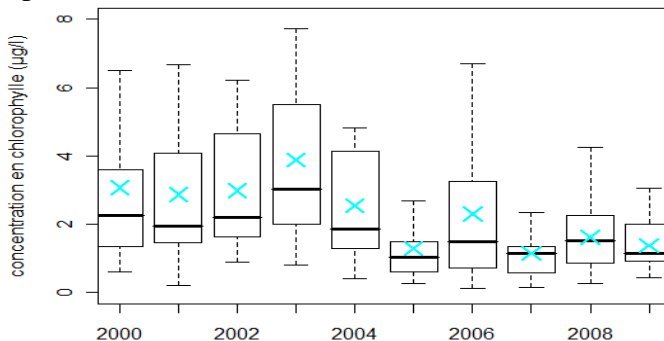


Figure 22 : Boîte à moustache et moyenne (x) des concentrations annuelles de chlorophylle *a* par année de 2000 à 2009 (données REPHY, Ifremer)

très faible. Au niveau hydroclimatologique, la température est identique aux normales saisonnières mais un déficit de précipitation conduisant à un déficit hydrique des cours d'eau alimentant les lagunes (Ifremer 2006). Cette situation a pour conséquence la diminution de la concentration en chlorophylle *a* observée dans la lagune de Thau et induit une perte de productivité de l'ostréiculture au niveau du modèle.

L'année 2006 est une année à forte production primaire due à un été caniculaire, avec développement d'un phénomène de malaïgue ayant pour conséquence une reminéralisation de la matière organique dans les zones touchées par le phénomène et une remise à disposition dans la colonne d'eau d'éléments nutritifs (Ifremer 2007).

Cette diminution du taux de croissance provoque une diminution des transferts dynamiques des cohortes du stock sous taille vers le stock commercialisable de 2005 à 2006. L'étude de la sensibilité du modèle de production ostréicole au paramètre X_k révèle que l'année 2005 est déstabilisante au niveau de la variable Stock Total. L'année 2005 est caractérisée par une moyenne de chlorophylle *a*

Dans le modèle, le stock sous taille de 2005 s'ajoute à la production récoltée de 2006. Il ressort de cet effet un pic de production en 2006 cumulant les élevages 2005 et 2006. La non prise en compte dans le modèle des mortalités induit par les malaïgues aboutit à une mauvaise estimation de la récolte. En 2006, les pertes ont été estimées à 7 500 tonnes de coquillages en élevage (SRCM *Com. pers.*).

En 2007, La production récoltée est moins importante pour deux raisons :

1. le phénomène de surmortalité fait son apparition d'où la diminution de la production de référence.
2. des températures estivales plus fraîches que la normale et un cumul de précipitations (487 mm) inférieur à la normale (600mm), ont pour conséquence une diminution de la moyenne annuelle de chlorophylle *a* par rapport aux moyennes annuelles depuis l'année 2000 (Ifremer 2008).

Le modèle de production d'huîtres est sensible aux conditions environnementales, en particulier, aux niveaux des forçages alimentaires. Le forçage chlorophyllien n'apparaît pas être toujours suffisant dans le cadre de son utilisation au sein du modèle de production sur la lagune de Thau. Il apparaît utile d'améliorer la prise en compte de la nourriture. La solution d'adapter des modèles incluant le réseau trophique pélagique planctonique en relation avec le régime alimentaire des coquillages en élevage est choisie depuis plusieurs années pour la gestion des cultures marines (Chapelle *et al.* 2000, Ferreira *et al.* 2007, Ferreira *et al.* 2008, Ferreira *et al.* 2009, Ren *et al.* 2009).

6.2.2. Fermeture sanitaire de commercialisation

Le scénario de fermeture sanitaire de commercialisation des huîtres creuses tel qu'il est décrit dans le modèle de production ostréicole pour l'année 2006 génère un décalage des ventes et un différentiel de récolte de 6% en plus soit 368 025 kg. Cet effet n'est pas important au niveau de la production mais il peut avoir des répercussions au niveau micro-économique, en impactant la trésorerie mensuelle de certaines entreprises.

Gangnery (2004) fait mention d'un processus de décalage de récolte de 1 000 tonnes de coquillages de 1998 vers 1999 par rapport à une fermeture de commercialisation entre le 5 novembre 1998 et le 29 décembre 1998 dont la cause est le développement de bloom d'*Alexandrium sp.* Cette fermeture porte plus à conséquence en terme économique puisqu'elle a lieu aux périodes de fins d'années, période de très forte commercialisation des produits de la mer.

6.2.3. Scénario de surmortalité

Il est avéré que le forçage chlorophyllien associé au paramètre X_k du modèle a un impact majeur sur le modèle de production et en particulier sur la variable longueur de coquille. La condition *a* du scénario de surmortalité montre une augmentation progressive du stock total entre les années 2007 et 2009 (Tableau 3). Cette augmentation du stock total est en lien avec la diminution de la productivité primaire de l'étang : les huîtres ont une croissance moins rapide, donc atteignent une taille commercialisable plus tard, le stock commercialisable diminue au profit du stock d'huîtres en sous taille (qui font partie intégrante du stock total).

Concernant le modèle de production, les conditions *a* et *b* d'ensemencement (Tableau 2) sont les mêmes, les variations sur la variable Stock Total mesurées en 2006 (*ca.* 7%) sont dues à la variabilité intra-cohorte du modèle (tirage aléatoire de 3 valeurs de X_k sur 30 simulations). Idem pour la condition *f* ou la variabilité générée est de 14%.

La condition d apparaît comme limitant les pertes liées au surmortalité. Effectivement, les conditions d et e semblent être les plus efficaces pour limiter les pertes engendrées par les surmortalités mais il est nécessaire de savoir si, du point de vue de l'économie, la surcharge des coûts engendrée par le doublement de l'ensemencement de naissain serait viable pour une entreprise. En outre, un point sensible de ce genre d'usage réside dans l'augmentation des risques de transmissions virales par les hautes densités dans les élevages lors d'épisodes épizootiques (Arzul *et al.* 2001, Renault 2008).

7. Conclusions et perspectives

Le cadre d'approche systémique de SPICOSA offre une ligne directrice pour la construction de modèles dynamiques en vue d'améliorer la compréhension des processus et des interactions propres aux usages de la zone côtière.

L'adaptation du modèle de production ostréicole (Bacher & Gangnery 2006) sous ExtendSim[®] permet de dresser un état des lieux des connaissances de la biologie et de la dynamique des populations de *Crassostrea gigas*.

L'étape d'étalonnage, calibrage du modèle DEB permet l'ajustage du paramètre libre X_k (coefficient de demi-saturation de la réponse fonctionnelle de Holling) dans le contexte de la lagune de Thau en lien avec les forçages environnementaux issus de la série historique du REPHY. Cependant, l'ajustage du paramètre X_k pour une gamme donnée de tailles d'huîtres (fin de prégrossissement) s'avère être mal adapté pour une gamme de tailles inférieures (naissains) et induit une sous-estimation des croissances de naissains.

Ce biais a un impact sur le modèle de production et induit une sous estimation des stocks dans leur globalité. La poursuite du développement doit passer par une amélioration du forçage alimentaire en tenant compte des spécificités de la zone de production de la lagune de Thau (chaîne trophique longue du fait d'organismes photosynthétiques picoplanctoniques non directement assimilables par les coquillages et utilisation de maillons trophiques intermédiaires pour avoir accès à cette biomasse). Des travaux sous presse ont montré l'intérêt de remplacer le forçage chlorophylle par un forçage avec sélection floristique (Pouvreau 2006) et une extension du forçage alimentaire au compartiment microzooplanctonique (organismes pélagiques planctoniques hétérotrophes de classe de taille 2-200 μm) n'est pas à exclure.

Le modèle de dynamique des populations apparaît cohérent mais sa validation est délicate dans la mesure où les données des conditions initiales dépendent des pratiques culturelles de l'ostréiculture lagunaire méditerranéenne. Les dernières études sur le sujet ont été réalisées dix ans en arrière alors que les pratiques culturelles de cette profession ont été modifiées par la généralisation de l'approvisionnement de naissain en éclosérie. L'utilisation des résultats de l'enquête socio-économique en cours pour la monographie 2010 de la conchyliculture (étude Université de Montpellier I-Cepralmar-Ifremer) devrait être d'un grand intérêt pour la mise à jour des connaissances des pratiques culturelles.

Pas utilisable en l'état pour faire de la quantification ou de la prévision de stocks, le modèle est utilisé ici pour une étude quantitative sur la base de scénarios (fermeture sanitaire de commercialisation, effet des surmortalités) ayant un impact potentiel sur des élevages. Ainsi, l'étude de l'effet de la fermeture sanitaire de commercialisation telle que celle de septembre 2006 (faisant suite à des précipitations ayant entraîné des contaminations bactériologiques au niveau des zones conchylicoles) révèle un impact limité sur la production avec un décalage des récoltes (de 11 jours équivalent à la durée

de fermeture) et un différentiel de production de 6% en plus par rapport à la date de récolte initiale (soit, dans le cadre de la simulation, 360 tonnes d'huîtres creuses en plus).

D'autre part, le scénario « Surmortalité » testé nous a permis d'étudier quantitativement les impacts subis par les stocks de *Crassostrea gigas* en élevage. On retient que le modèle annonce une diminution des récoltes entre 67 et 79% entre les années 2007-2009 et que des changements de pratiques culturales diminuent les pertes, en particulier, le doublement de la quantité de naissainsensemencés annuellement. Cependant, ce genre de résultat numérique théorique doit être pris avec beaucoup de recul pour deux raisons : i) compte tenu de l'origine virale des surmortalités et de l'effet densité-dépendant de ce genre d'épidémie, il n'est pas évident que le doublement de l'ensemencement n'augmente pas de manière significative les taux de surmortalité ; ii) l'approvisionnement en naissain génère une charge économique pour les entreprises et il est probable que le doublement de cette charge ait un effet important sur leur trésorerie. D'autant que le phénomène de surmortalité est national et que les écloséries ainsi que les bassins de captage ont leur capacité limite à approvisionner.

Les intérêts de l'utilisation d'un modèle de production ostréicole sont nombreux au sein d'un laboratoire Environnement Ressources. Afin d'optimiser son usage, les perspectives d'amélioration de cet outil doivent s'orienter vers la substitution du forçage chlorophylle à un autre forçage peut être plus adapté à la nutrition des huîtres creuses sur l'étang de Thau. La prise en compte des mortalités liées aux malaïgues s'avère nécessaire pour gagner en justesse sur les aspects « estimations de stocks ». En outre, les entreprises conchylicoles ont des pratiques culturales propres à leur typologie. La prise en compte des variations de pratiques culturales selon les typologies d'entreprises doit permettre d'améliorer en précision et l'étude socio-économique devrait apporter des éléments dans ce sens. Une expertise d'estimation de stocks sur le terrain serait utile pour faire un état des lieux des cheptels après trois années successives de surmortalités et faire un état des lieux des cultures marines dans leur ensemble.

La perspective de la prise en compte de la dimension spatiale de la production ostréicole au niveau de la lagune de Thau en couplant le logiciel ExtendSim® avec un système d'information géographique agrémenté de couplage bio-économique demande un effort de développement intéressant qui pourrait peut être entrer dans le cadre de travaux de thèse à venir. Ce genre d'outil finalisé existe déjà sur certaines zones de production conchylicole pour améliorer les connaissances autour d'écosystèmes exploités, venir en aide à la gestion et à la décision de la filière conchylicole (programme OGIVE, Outils d'aide à la Gestion Intégrée et à la Valorisation des Ecosystèmes conchylicoles de Normandie).

Références

- Arzul I, Renault T, Lipart C (2001) Experimental herpes-like viral infections in marine bivalves : Demonstration of interspecies transmission. *Diseases of Aquatic Organisms* 46:p 1-6
- Bacher C, Gangnery A (2006) Use of dynamic energy budget and individual based models to simulate the dynamics of cultivated oyster populations. *Journal of Sea Research* 56:140-155
- Bec B, Husseini-Ratrema J, Collos Y, Souchu P, Vaquer A (2005) Phytoplankton seasonal dynamics in a mediterranean coastal lagoon: Emphasis on the picoeukaryote community. *Journal of Plankton Research* 27:881-894
- Bourles Y, Alunno-Bruscia M, Pouvreau S, Tollu G, Leguay D, Arnaud C, Gouletquer P, Kooijman S (2009) Modelling growth and reproduction of the pacific oyster *crassostrea gigas*: Advances in the oyster-deb model through application to a coastal pond. *Journal of Sea Research* 62:62-71
- Brocard G, Derolez V, Serais O, Fiandrino A, Lequette C, Lescoulier C, Benedetti M, Couton P, Marty D (2010) Omega thau : Outil de management environnemental et de gestion de l'avertissement des pollutions microbiologiques du bassin de thau. sous presse NOVATECH 2010:10 pages
- Cepralmar (2008) Guide de l'exploitation conchylicole en languedoc-roussillon
- Chapelle A, Ménesguen A, Deslous-Paoli LM, Souchu P, Mazouni N, Vaquer A, Millet B (2000) Modelling nitrogen, primary production and oxygen in a mediterranean lagoon. Impact of oysters farming and inputs fom the watershed. *Ecological Modelling* 127:161-181
- Deslous-Paoli JM, Souchu P, Mazouni N, Juge C, Dagault F (1998) Relations milieu-ressources : Impact de la conchyliculture sur un environnement lagunaire méditerranéen (thau). *Oceanologica Acta* 21:831-843
- DRAM Languedoc-Roussillon (2006) Les activités maritimes en région languedoc-roussillon, année 2006, p 34
- Dupuy C, Le Gall S, Hartmann HJ, Bréret M (1999) Retention of ciliates and flagellates by the oyster *crassostrea gigas* in french atlantic coastal ponds: Protists as a trophic link between bacterioplankton and benthic suspension-feeders. *Marine Ecology Progress Series* 177:165-175
- Dupuy C, Vaquer A, Lam-Höai T, Rougier C, Mazouni N, Lautier J, Collos Y, Le Gall S (2000) Feeding rate of the oyster *crassostrea gigas* in a natural planktonic community of the mediterranean thau lagoon. *Marine Ecology Progress Series* 205:171-184
- Ferreira JG, Hawkins AJS, Bricker SB (2007) Management of productivity, environmental effects and profitability of shellfish aquaculture - the farm aquaculture resource management (farm) model. *Aquaculture* 264:160-174
- Ferreira JG, Hawkins AJS, Monteiro P, Moore H, Service M, Pascoe PL, Ramos L, Sequeira A (2008) Integrated assessment of ecosystem-scale carrying capacity in shellfish growing areas. *Aquaculture* 275:138-151
- Ferreira JG, Sequeira A, Hawkins AJS, Newton A, Nickell TD, Pastres R, Forte J, Boday A, Bricker SB (2009) Analysis of coastal and offshore aquaculture: Application of the farm model to multiple systems and shellfish species. *Aquaculture* 289:32-41
- Gangnery A (1998) Estimation des stocks de bivalves en élevage et des épibiontes dans la lagune de thau en 1998. Evolution depuis 1980. ENSAR/IFREMER, Palavas Les Flots, p 81

- Gangnery A (1999) Estimation des stocks de bivalves en élevage et des épibiontes dans la lagune de thau et modélisation de la dynamique des populations d'huitres creuses (*crassostrea gigas*, thunberg), Université Paris VI/IFREMER/CREMA, Palavas Les Flots, p 38
- Gangnery A, Bacher C, Buestel D (2001) Assessing the production and the impact of the cultivated oysters in the thau lagoon (mediterranean, france) with a population dynamics model. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 58:1012-1020
- Gangnery A, Bacher C, Buestel D (2004) Modelling oyster population dynamics in a mediterranean coastal lagoon (thau, france): Sensitivity of marketable production to environmental conditions. Aquaculture 230:323-347
- Gangnery A, Chabirand JM, Lagarde F, Le Gall P, Oheix J, Bacher C, Buestel D (2003) Growth model of the pacific oyster, *crassostrea gigas*, cultured in thau lagoon (mediterranean, france). Aquaculture 215:267-290
- Gouletquer P, Heral M (2007) Management of shellfish ecosystems: The case of the pertuis charentais. Conférence, Académie d'Agriculture de France, 2007-10-10, <http://archimer.ifremer.fr/doc/2007/acte-3515pdf>
- Ifremer (2006) Réseau de suivi lagunaire du languedoc-roussillon : Bilan des résultats 2005. Rapport rsl-06/2006, p 450
- Ifremer (2007) Réseau de suivi lagunaire du languedoc-roussillon : Bilan des résultats 2006. Rapport rsl-07/2007, p 482
- Ifremer (2008) Réseau de suivi lagunaire du languedoc-roussillon : Bilan des résultats 2007. Rapport rsl-08/2008, p 363
- Kooijman SALM (1986) Energy budgets can explain body size relations. J Theor Biol 121:269-282
- Kooijman SALM (2000) Dynamic energy and mass budgets in biological systems. Cambridge University Press, Cambridge: p 424
- Kristensen P (2004) The dpsir framework. Workshop (27-29 september 2004) on a comprehensive / detailed assesment of the vulnerability of water resources to environmental change in Africa using river basin approach. UNEP Headquarters, Nairobi, Kenya.
- Laugier T, Ballé Béganton J, Derolez V, Fiandrino A, Mongruel R, Perez Agundez J, Roussel S, Valette F (2010) Report for appraisal step, short version, ssa13 thau lagoon, p 24
- Pernet F (2010) Mortalité printanière du naissain d'huitre creuse *crassostrea gigas* dans l'étang de thau en 2009, Ifremer, p 81
- Pernet F, Barret J, Marty C, Moal J, Le Gall P, Boudry P (2010) Environmental anomalies, energetic reserves and fatty acid modifications in oysters coincide with an exceptional mortality event. Marine Ecology-Progress Series 401:129-146
- PNEC (2008) Programme national environnement côtier (pniec). Rapport d'activité du chantier "Lagunes méditerranéennes" (2002-2007), p 148
- Pouvreau S (2006) Support de formation. Ecophysiologie des mollusques marins. Première partie : Écophysiologie de la nutrition, de la croissance et de la reproduction ; <http://wwz.ifremer.fr/argenton/enseignement>
- Pouvreau S, Bourles Y, Lefebvre S, Gangnery A, Alunno-Bruscia M (2006) Application of a dynamic energy budget model to the pacific oyster, *crassostrea gigas*, reared under various environmental conditions. Journal of Sea Research 56:156-167

Prou J, Bacher C, Ballé Béganton J, Mongruel R, Perez Agundez J, Vernier *And others* (2010) Short version, report for appraisal step, ssa10 pertuis charentais version 1.4, p 39

Ren JS, Ross AH, Hadfield MG, Hayden BJ (2009) An ecosystem model for estimating potential shellfish culture production in sheltered coastal waters. *Ecological Modelling* 221:527-539

Renault T (2008) Shellfish viruses *Encyclopedia of Virology* (B W J Mahy and M H V Van Regenmortel, Editors) vol : 5 p 560-567

Sauvage C, Pepin JF, Lapegue S, Boudry P, Renault T (2009) Ostreid herpes virus 1 infection in families of the pacific oyster, *crassostrea gigas*, during a summer mortality outbreak: Differences in viral DNA detection and quantification using real-time pcr. *Virus Research* 142:181-187

SPICOSA (2007) Integrated project - annex 1 "Description of work", sixth framework programme, priority 1.1.6.3, global change and ecosystems.p 215

SRC Méditerranée (2004) *La conchyliculture en méditerranée*, monographie, p 32

van der Meer J (2006) An introduction to dynamic energy budget (deb) models with special emphasis on parameter estimation. *Journal of Sea Research* 56:85-102

Vaquier A, Troussellier M, Courties C, Bibent B (1996) Standing stock and dynamics of picophytoplankton in the thau lagoon (northwest mediterranean coast). *Limnology and Oceanography* 41:1821-1828