

Les espèces phytoplanctoniques majeures des côtes atlantiques françaises sont-elles équivalentes pour l'ingestion et la croissance de l'huître creuse (*Crassostrea gigas*) ?
Réponse par le biais d'une approche expérimentale

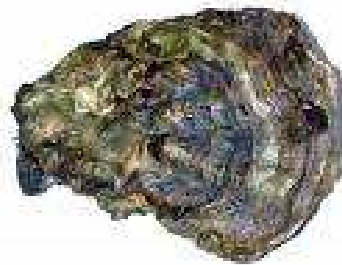
BOGLINO Anaïs

Master 2 **Sciences De l'Univers Environnement Ecologie**

Mention **Océanographie et Environnements Marins**

Université **Pierre et Marie Curie** – Paris 6

Année universitaire 2007/2008



Stage effectué

du 7 janvier au 20 juin 2008

au Département de **Physiologie Fonctionnelle des Organismes Marins**

IFREMER

Station expérimentale d'Argenton-en-Landunvez

Encadrement scientifique :

ALUNNO-BRUSCIA Marianne

et

POUVREAU Stéphane

REMERCIEMENTS

Merci à toutes celles et ceux qui ont rendu ces 6 mois de stage et même ses 2 années de master si riches en découvertes à tous niveaux

Merci à toute la Station expérimentale Ifremer d'Argenton pour leur accueil si chaleureux et surtout pour l'apéro du vendredi midi:

Merci Marianne et Stéphane pour votre encadrement et à René et Marc pour tous vos conseils

Merci Marianne pour ta boîte à chocolat (jamais vu une boîte aussi intéressante)

Merci Pierrick pour ton gros coup de main dans ma salle « écophy 2 », pour le temps que tu as passé à faire et refaire la tuyauterie, nettoyer les bacs, trier des huîtres mortes qui puent et peser des centaines de bébé huîtres et aussi pour tous ces covoiturages au labo

Merci Bruno pour m'avoir attendue 3 minutes tous les matins et tous les soirs...

Merci Christian pour ta bonne humeur et ton naissain élevé avec *T-iso*, amour et *Chaeto*

Merci Isa et Luc pour votre sens de l'humour inqualifiable et les quelques 10 932,7 L d'algues que vous m'avez fourni pendant mon stage !

Merci Yves et Ismaël la ptite fée clochette pour tous ces bons conseils de modélisateurs que vous avez toujours pris le temps de me donner et aussi pour ces bonnes soirées au Tara Inn

Merci à Ricardo et à Laure d'être toujours prêts à m'aider

Merci à mes amis (Clém, Indra, Aurélia, Jeanne, mes 2 chtoukettes...) et à Elsa d'être là pour moi et pour tous ces bons moments passés ensemble. Sans vous, ça n'aurait pas été pareil

Merci à Véro pour ton vélo, sans toi, j'aurais jamais pu faire mes courses au Super U parce qu'y a des côtes à Saint-Renan et c'est dur

Merci à Joseph, Yvette, Babou et leur tête de sanglier pour leur chaleureux accueil (humour breton) dans leur maison décorée avec beaucoup de bon goût (humour breton bis)

Et enfin merci à ma grande Lisandre de m'avoir supportée matin midi et soir, merci de ton dynamisme communicatif et de ta générosité.

SOMMAIRE

| | |
|---|-----------|
| LISTE DES FIGURES | 4 |
| INTRODUCTION | 5 |
| MATERIELS & METHODES | 7 |
| 1. Matériel biologique et plan expérimental | 7 |
| 1.1. <i>Microalgues</i> | 7 |
| 1.2. <i>Huîtres</i> | 9 |
| 1.3. <i>Plan expérimental</i> | 9 |
| 2. Suivi de la croissance et de la mortalité | 11 |
| 3. Ecophysiologie et bilan énergétique | 12 |
| 3.1. <i>Mesure de l'ingestion des huîtres</i> | 12 |
| 3.2. <i>Récolte des bio-dépôts et estimation de l'efficacité d'absorption (AE, %)</i> | 12 |
| 4. Traitement des données | 14 |
| 4.1. <i>Données d'ingestion et de croissance des huîtres</i> | 14 |
| 4.2. <i>Modèle DEB et données de croissance des huîtres</i> | 15 |
| RESULTATS | 18 |
| 1. Ingestion des huîtres | 18 |
| 1.1 <i>Ingestion individuelle des huîtres</i> | 18 |
| 1.2 <i>Efficacité d'absorption des huîtres</i> | 22 |
| 2. Croissance des huîtres et simulation du modèle DEB | 22 |
| 2.1. <i>Suivi des paramètres biométriques</i> | 22 |
| 2.2. <i>Simulations du modèle DEB</i> | 27 |
| 3. Mortalité des huîtres de France Turbot et contamination bactérienne | 29 |
| 3.1. <i>Mortalité du naissain de France Turbot</i> | 29 |
| 3.2. <i>Evolution du nombre de colonies bactériennes du genre Vibrio</i> | 31 |
| DISCUSSION | 32 |
| 1. Ingestion et efficacité d'absorption du naissain de <i>C. gigas</i> en fonction du régime d'algue | 32 |
| 2. Performances de croissance du naissain de <i>C. gigas</i> comparées entre régimes d'algues 35 | |
| 2.1. <i>Données mesurées</i> | 35 |
| 2.2. <i>Explication par le modèle DEB</i> | 36 |
| 3. Bilan et analyses des mortalités observées sur le naissain de France Turbot | 37 |
| CONCLUSION ET PERSPECTIVES | 38 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE | 39 |
| ANNEXES | 43 |

LISTE DES FIGURES

- Figure 1 : Photographie de la salle de culture d'algues en cylindre à la station expérimentale IFREMER d'Argenton
- Figure 2 : Photographies en microscopies optique et électronique des microalgues
- Figure 3 : Photographies de la salle expérimentale
- Figure 4 : Schéma en vue ventrale d'une huître creuse.
- Figure 5 : Schéma du modèle énergétique (DEB) de croissance pour l'huître du Pacifique (*Crassostrea gigas*), développé par Kooijman (2000), d'après Pouvreau et al. (2006).
- Figure 6 : Evolution temporelle de l'ingestion individuelle moyenne (en $\mu\text{m}^3 \cdot \text{j}^{-1} \cdot \text{ind}^{-1}$) des huîtres des naissains de France Turbot (en haut) et d'Argenton (en bas) pour les 4 conditions d'algue
- Figure 7 : Evolution temporelle de la longueur moyenne (en mm, fig.7a), de la masse totale moyenne (en g, fig.7b), de la masse de coquille moyenne (en g, fig.7c) et de la masse de chair humide moyenne (en g, fig.7d) des huîtres de France Turbot
- Figure 8 : Evolution temporelle de la longueur moyenne (en mm, fig.8a), de la masse totale moyenne (en g, fig.8b), de la masse de coquille moyenne (en g, fig.8c) et de la masse de chair humide moyenne (en g, fig.8d) des huîtres d'Argenton
- Figure 9 : Evolution temporelle de la masse de chair humide moyenne (en g) des naissains de France Turbot (en haut) et d'Argenton (en bas)
- Figure 10 : Evolution temporelle de la masse de chair sèche moyenne (en g) des huîtres de France Turbot mesurée (points et intervalle de confiance) et simulée (lignes) des naissains de France Turbot (en haut) et d'Argenton (en bas)
- Figure 11 : Nombre d'huîtres survivantes du naissain de France Turbot du 12 mars au 25 avril
- Figure 12 : Pourcentage de mortalité des huîtres du naissain de France Turbot : a) sur toute la durée de l'expérience du 12 mars au 25 avril ; b) avant le traitement antibiotique du 12 au 26 mars ; c) après le traitement antibiotique du 27 mars au 25 avril
- Figure 13 : Nombre moyen de colonies bactériennes de *Vibrio* détecté dans les bacs d'huîtres le 31 mars

INTRODUCTION

Naturellement présente dans l'Océan Pacifique, l'huître creuse *Crassostrea gigas* a été importée en France entre 1966 et 1974, de Colombie Britannique (géniteurs) et du Japon (naissain) pour remplacer l'huître creuse portugaise *Crassostrea angulata* éradiquée des côtes françaises par une épizootie.

La conchyliculture, et principalement l'élevage de l'huître creuse *C. gigas*, constitue la principale activité aquacole française. En 2001, la production annuelle d'huîtres représentait 109 000 tonnes, soit 60 % de la production conchylicole française (huîtres et moules confondues : 182 000 tonnes, chiffres Ministère de l'agriculture et de la pêche). En 2005, la commercialisation de *C. gigas* en France s'élevait à près de 98,4 % de la production globale de toutes les espèces d'huîtres cultivées en 2005 (chiffres FAO), soit 118 200 tonnes d'huîtres creuses produites (recensement Agreste¹), ce qui place la France au quatrième rang mondial. Depuis 2006, la production se situe autour de 128 000 tonnes/an (estimations Comité National de la Conchyliculture²). Les trois grandes régions productrices sont la Bretagne, la région de Poitou-Charentes et la Basse-Normandie, situées sur le littoral atlantique.

Depuis 1993, les suivis de croissance, de survie et de qualité de deux lots d'huîtres creuses (juvéniles et 18 mois) répartis dans 45 stations des principales régions ostréicoles françaises par le réseau REMORA (Réseau Mollusques des Rendements Aquacoles³) montrent une variabilité dans les rendements entre les différents bassins ostréicoles. Ces fluctuations sont associées à une variabilité dans les performances de croissance (Fleury *et al.* 2001, Brown & Hartwick 1988, Almeida & *al.*, 1999, Degremont *et al.*, 2007). Afin d'optimiser la production d'huîtres creuses, il est important de comprendre et d'expliquer cette variabilité de croissance. Selon de nombreux auteurs (Bayne & Newell 1983, Brown 1988, Pouvreau *et al.* 2006, Flores-Vergara *et al.* 2004, Brown & Hartwick 1988), les deux principaux facteurs contrôlant la croissance de l'huître creuse sont la température et la nourriture. Dans le cadre de cette étude, c'est essentiellement l'effet de la nourriture qui sera abordé.

L'huître creuse est un mollusque bivalve filtreur de la famille des Ostréidés, qui se nourrit des particules en suspension dans la colonne d'eau (seston), essentiellement des cellules phytoplanctoniques de taille comprise entre 5 et 100 µm de diamètre. Une vingtaine d'espèces phytoplanctoniques dominantes composent le bol alimentaire de *C. gigas* sur le littoral atlantique (Karentz *et al.* 1984). La composition et la concentration de ces espèces phytoplanctoniques présentent une grande variabilité dans l'espace et dans le temps, avec des

¹ www.agreste.agriculture.gouv.fr/

² www.cnc-france.com/

³ www.ifremer.fr/remora/

espèces qui développent d'importantes efflorescences à certaines périodes de l'année. On est donc en droit de se demander si ces différentes microalgues, lorsqu'elles sont dominantes par rapport à d'autres espèces, sont ingérées préférentiellement par *C. gigas* et/ou lui apportent une part d'énergie similaire ou différente en terme de croissance.

Parmi les algues sélectionnées dans cette étude, trois sont présentes sur le littoral atlantique français à des concentrations atteignant ponctuellement plusieurs millions de cellules.L⁻¹: *Tetraselmis suecica*, *Skeletonema marinoi* et *Thalassiosira weissflogii*. Il a été montré que *T. suecica* ne permettait pas d'obtenir une croissance significative de *C. gigas* en conditions expérimentales (Robert *et al.* 2002), et qu'en milieu naturel, elle n'était pas ingérée par l'huître (Bourlès *et al.* en prép.). *S. marinoi* et *T. weissflogii* semblent par contre contribuer significativement au budget énergétique de *C. gigas* (Pouvreau *et al.* en prép.). *Isochrysis aff. galbana (t-iso)*, la quatrième algue sélectionnée dans cette étude est une algue fréquemment utilisée en éclosion, qui sert souvent d'algue de référence (Brown *et al.* 1998) pour comparer les réponses physiologiques de différents bivalves.

Des travaux axés sur la bioénergétique de *C. gigas* ont testé l'effet de quelques unes de ces espèces phytoplanctoniques sur la croissance de l'huître (Pouvreau *et al.* 2006 ; Pouvreau *et al.*, en prép., Bourlès *et al.* en prép.). Ces travaux ont montré que la croissance de *C. gigas* en milieu naturel était bien simulée par le modèle de budget d'énergie dynamique (modèle DEB, Kooijman 2000), à condition de supprimer certaines espèces phytoplanctoniques des sources de nourriture potentielle des huîtres, lors de certaines efflorescences algales. En d'autres termes, le modèle DEB appliqué à l'huître a révélé que certaines algues (*T. suecica*, *Asterionella glacialis*... (Pouvreau *et al.*, en prép., Bernard, 2006)) étaient probablement faiblement absorbées ou très peu ingérées par *C. gigas*. Dans ce contexte, il a semblé intéressant de vérifier expérimentalement en conditions contrôlées, ces observations du milieu naturel, afin de mieux comprendre le comportement alimentaire de *C. gigas* et de valider le modèle DEB.

L'objectif de cette étude a donc été de déterminer s'il existe un effet de l'espèce phytoplanctonique sur l'ingestion et la croissance de l'huître creuse et si oui, de le quantifier, et d'autre part, d'affiner le modèle DEB de croissance de l'huître creuse juvénile en y intégrant les valeurs d'efficacité d'assimilation et d'ingestion acquises expérimentalement.

MATERIELS & METHODES

1. Matériel biologique et plan expérimental

1.1. Microalgues



Figure 1: Photographie de la salle de culture d'algues en cylindre à la station expérimentale IFREMER d'Argenton

Quatre microalgues sont utilisées dans cette expérience pour nourrir les huîtres :

Tetraselmis suecica (Butcher, 1959) est une microalgue de la classe des Prasinophyceae (fig. 2a). Les cellules de la souche repiquée à Argenton ont une taille de $8,56 (\pm 0,98) \mu\text{m}$, un volume de $330 \mu\text{m}^3$ et une masse sèche de 298 pg. Les cellules sont ovoïdes, avec quatre flagelles. Le plaste à deux ou quatre lobes est vert, ce qui confère une couleur bien verte aux cylindres concentrés en algues. Le taux maximum de croissance en culture est estimé à $1,38 \text{ cellules.j}^{-1}$ (Robert *et al.*, 2004). Les algues cultivées à Argenton atteignent des concentrations moyennes de $2 \cdot 10^6 \text{ cellules.mL}^{-1}$. Dans l'environnement naturel, le genre *Tetraselmis* prolifère facilement sur le littoral atlantique français, notamment dans les claires ostréicoles.

Skeletonema marinoi (Sarno & Zingone), de la classe des Bacillariophyceae (fig. 2b), a une taille estimée à $10 \mu\text{m}$, un volume de $85 \mu\text{m}^3$ (Helm & Bourne, FAO 2006) et une masse sèche de 51 pg pour la souche repiquée à Argenton. Les cellules centriques forment de longues chaînes coloniales incurvées, grâce aux longs et fins processus de silice emboîtées les uns dans les autres. Elles contiennent chacune un à deux chloroplastes bruns, ce qui procure une couleur marron foncé aux algues concentrées en cylindre. Les concentrations moyennes de *S. marinoi* sont de $3 \cdot 10^6 \text{ cellules.mL}^{-1}$ à Argenton. L'espèce est la plus courante du genre en milieu naturel, cosmopolite et généralement marine, supportant de très larges variations de salinité et présentant des efflorescences en hiver. Elle est observée chaque année à Marennes-Oléron où elle constitue le bloom majoritaire de printemps ($3 \text{ 000 cellules.mL}^{-1}$).

Thalassiosira weissflogii (Grunow), de la classe des Bacillariophyceae (fig. 2c) est une grosse diatomée centrique pélagique (6-20 μm x 8-15 μm), dont la masse sèche est de 250 pg et la biomasse représente 3 fois celle de *Tetraselmis sp.* Elle forme habituellement des colonies. Cette algue est utilisée en éclosion, car elle est considérée comme de haute valeur nutritionnelle pour les larves de crevettes et de bivalves¹. La couleur de *T. weissflogii* varie du brun au vert-jaune, selon la teneur en chlorophylle des cellules, ce qui n'affecte en aucun cas la qualité de l'algue. Les concentrations moyennes de la souche repiquée à Argenton sont de 300 000 cellules.mL⁻¹. Dans l'environnement naturel du littoral atlantique, on peut observer les diatomées du genre *Thalassiosira* à des concentrations de 130 cellules.mL⁻¹ (comme à Arcachon en mars 2005). Cependant, l'identification jusqu'à l'espèce est récente et souvent complexe.

Isochrysis aff. *galbana* (Parke, 1949) ou *t-iso*, de la classe des Prymnesiophyceae (fig. 2d) est une cellule de petite taille (4,29 (\pm 0,48) μm pour la souche repiquée à Argenton), avec un volume de 40 μm^3 et une masse sèche de 14 pg. Les cellules mobiles et solitaires sont de couleur brune, ovoïdes avec deux flagelles lisses et un haptonème très court, dit « vestigial ». Les cellules sont habituellement recouvertes de minuscules écailles organiques souvent enveloppées de mucus. Le taux maximum de croissance en culture est estimé à 1,71 cellules.j⁻¹ (Robert *et al.* 2004) et les concentrations moyennes à Argenton sont de 12.10⁶ cellules.mL⁻¹. C'est une algue habituellement utilisée en éclosion, car de haute valeur nutritionnelle pour les larves et les post-larves de mollusques bivalves. Elle est cependant présente sur le littoral français, car elle est d'origine tropicale.

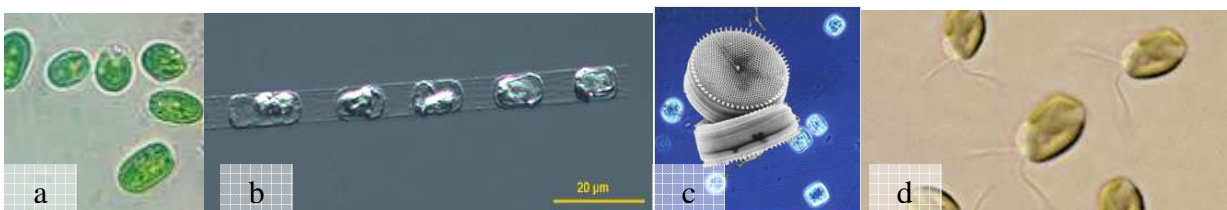


Figure 2 : Photographies en microscopies optiques et électroniques des microalgues. De gauche à droite : *Tetraselmis suecica* (fig. a), *Skeletonema marinoi* (fig. b), *Thalassiosira weissflogii* (fig. c) et *Isochrysis* aff. *galbana* (fig. d)

Ces quatre algues sont cultivées à la Station Expérimentale d'Argenton à 22°C pour les diatomées *S. marinoi* et *T. weissflogii* et à 24°C *Tetraselmis suecica* et *t-iso*, en milieu nutritif Conway (avec silice pour les diatomées), avec un pH de 7,5 et en lumière blanc industrie 24 : 24. Elles sont mélangées à de l'eau de mer pompée dans le vivier situé devant la station, et qui est filtrée sur 1 μm puis traitée aux rayonnements U.V.

¹ www.reed-mariculture.com/microalgae/tw.asp

1.2. Huîtres

Un lot homogène de 4000 huîtres creuses juvéniles diploïdes (pontes de janvier et mars 2007), provenant de l'écloserie France Turbot (Noirmoutier) est arrivé à la Station expérimentale d'Argenton le 31 janvier 2008 (longueur moyenne initiale = $37,7 \pm 7,6$ mm ; masse totale moyenne initiale = $3,6 \pm 0,9$ g). Ce lot a été placé en quarantaine pendant un mois à 20°C et dans des conditions de ressources trophique (50 % *T-iso* + 50 % *Chaetoceros gracilis*) ajusté à un ratio de 6 % masse sèche d'algue / masse sèche d'huître. Les huîtres ont été traitées au chloramphénicol (antibiotique utilisé pour lutter contre les infections bactériennes de type *Vibrio sp.*) lors de leur arrivée en quarantaine : du 1^{er} au 5 février. Les mortalités observées à leur arrivée se sont alors stabilisées pendant 4 semaines, avant de reprendre à la fin du mois de février, juste avant le début théorique de l'expérience. Il a donc fallu traiter à nouveau les huîtres en quarantaine du 3 au 7 mars, avant de les introduire dans la salle expérimentale. Quatre groupes de 860 individus chacun, destinés à un conditionnement expérimental différent (régime d'algue), ont alors été constitués aléatoirement, puis chaque groupe a ensuite été subdivisé en deux à trois bacs répliqués.

Un second naissain issu d'une fécondation déclenchée le 29 janvier 2008 à la Station expérimentale d'Argenton (longueur initiale 5 fois plus faible que France Turbot) à partir de géniteurs élevés à la Station, est également soumis aux quatre conditions d'algues différentes, avec deux bacs répliqués par condition. Le nombre d'individus dans chaque bac est initialement et grossièrement estimé à 1500, en effectuant le rapport de la masse totale de chaque naissain répliqué égoutté par la masse totale moyenne d'une huître. En considérant l'eau, la brisure de coquilles et les huîtres mortes dans chaque naissain répliqué et la masse de ce que cela représente, le nombre moyen d'individus par bac pendant toute la durée de l'expérience a plutôt été ré-estimé à 800.

1.3. Plan expérimental



Figure 3 : Photographie de la salle expérimentale

Le plan expérimental repose principalement sur le contrôle d'un facteur : l'espèce phytoplanctonique, dont l'effet sur la croissance, l'ingestion et l'efficacité d'assimilation des huîtres a été testé selon quatre modalités (condition d'algues): *T. suecica*, *S. marinoi*, *T. weissflogii* et *t-iso*, avec deux ou trois niveaux de réplication par régime d'algues.

Cette expérience a été menée en conditions contrôlées de température (20°C) pour les quatre différentes conditions d'algues. Pendant toute la durée du suivi de croissance des huîtres, la quantité d'algues fournie a été calculée et distribuée de façon à ce que les huîtres aient un environnement phytoplanctonique constant autour d'elles, équivalent à $1000 \mu\text{m}^3 \cdot \mu\text{L}^{-1}$. La quantité d'algues distribuée est maintenue à $20\,000 \mu\text{m}^3 \cdot \mu\text{L}^{-1}$ en entrée de bac pour chacune des quatre algues distribuées du 17 au 25 mars au matin. Puis, suite à une chute des effectifs dans les bacs expérimentaux (épisode de mortalité), le volume d'algues en entrée de bac est abaissé à $15\,000 \mu\text{m}^3 \cdot \mu\text{L}^{-1}$ du 25 mars après-midi au 5 mai. Pour chaque régime algal, une pompe péristaltique permet de contrôler la quantité d'algues distribuées dans les bacs expérimentaux. Les pompes sont ajustées quotidiennement, juste après la distribution des rations journalières d'algue, en réponse aux fluctuations de la concentration des algues cultivées (fig. 3).

Quatre bacs expérimentaux par condition d'algue vont permettre de réaliser des réplicats, afin d'estimer si la variabilité de la croissance pour une même condition d'algues est plus ou moins forte que la variabilité de la croissance entre les différentes conditions, ce qui fait un total de 16 bacs de 25-30L chacun. Une seule pompe péristaltique pour 4 bacs réplicats répartit la même quantité d'algues en entrée (en $\mu\text{m}^3 \cdot \mu\text{L}^{-1}$). Les débitmètres à l'entrée de chaque bac expérimental sont réglés sur $100 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, ce qui correspond à un renouvellement d'eau dans chaque bac tous les 4-5 heures, nécessaire pour le réapprovisionnement régulier en oxygène.

L'expérience a duré 7 semaines au total, du 17 mars au 28 avril et peut se décomposer en 3 phases : 1) du 17 mars (t_0 pour le naissain de France Turbot) au 26 mars matin, chacun des 4 groupes du naissain originaire de France Turbot constitués aléatoirement est réparti dans 3 bacs réplicats par condition d'algues ; 2) du 26 mars après-midi au 31 mars matin, la totalité des bacs sont placés sous traitement antibiotique (chloramphénicol), après avoir observé une très forte mortalité des huîtres, ainsi qu'un développement bactérien très rapide du genre *Vibrio*. Les huîtres survivantes de chaque triplicat d'une même condition d'algue sont mélangées et redistribuées dans 2 bacs réplicats seulement, de façon à ménager 2 bacs expérimentaux pour y placer un duplicat du naissain originaire d'Argenton ; 3) du 31 mars (t_0 pour le naissain d'Argenton) au 28 avril, le naissain de France Turbot et le naissain

d'Argenton sont chacun répartis en 2 réplicats par condition d'algues. La fin de l'expérience survient 24 avril pour le naissain de France Turbot et le 28 avril pour le naissain d'Argenton.

2. Suivi de la croissance et de la mortalité

Un suivi de la croissance des huîtres est réalisé par condition d'algues, en début d'expérience puis tous les 10-15 jours. Pour cela, un sous-échantillon de 30 individus par bac choisis aléatoirement est prélevé. Les paramètres biométriques mesurés sont les suivants : longueur de la coquille, masse totale, masse de coquille, masse de chair humide et masse de chair sèche. Au total, quatre biométries sont réalisées pour chacun des deux naissains : 1) les 17 mars, 31 mars, 14 avril et 24 avril 2008 (pour le naissain de France Turbot) et 2) les 31 mars, 14 avril, 28 avril et 5 mai 2008 (pour le naissain d'Argenton). Cependant, cette dernière biométrie ne sera pas prise en compte dans les résultats à cause de la forte mortalité observée en fin d'expérience qui vient fausser les données de croissance.

Chaque huître est égouttée, mesurée (axe dorso-ventral) à l'aide d'un pied à coulisse avec une précision de 1 mm, puis pesée avec une précision de 10^{-1} g, à l'aide d'une balance Mettler. Ensuite, l'huître est ouverte et les tissus mous sont détachés de la coquille. La coquille vide et les tissus mous égouttés sont pesés indépendamment, ce qui permet d'obtenir les masses de coquille et les masses de chair humide respectivement. La masse de coquille est obtenue à l'aide d'une balance Mettler, (précision 10^{-1} g), tandis que la masse de chair humide est obtenue grâce à une balance Sartorius (précision 10^{-3} g). Enfin, les tissus sont congelés pendant 4h à -20°C , la glace formée est sublimée au lyophilisateur à -50°C pendant 24h, puis la masse de chair sèche est pesée avec la balance Sartorius (précision 10^{-3} g).

Les huîtres du naissain d'Argenton ont une masse de coquille et de chair si petit qu'il est impossible de stabiliser la balance pour le lire avec précision. Aussi, les masses de coquille, de chair humide et de chair sèche sont moyennées sur les 30 individus échantillonnés avec la balance Sartorius (précision 10^{-3} g).

Les bacs d'élevage sont vidés et lavés à l'eau douce trois fois par semaine (lundi, mercredi et vendredi). Une inspection visuelle est alors réalisée sur tous les animaux et le nombre d'individus morts par bac d'élevage est relevé et permet d'estimer la mortalité par condition d'élevage, sur toute la période d'étude.

3. Ecophysiologie et bilan énergétique

3.1. Mesure de l'ingestion des huîtres

Sur le modèle de la méthode « flow through chamber » (Filgueira *et al.*, 2006), le calcul de la consommation est effectué pour chacune des conditions d'algues et par réplicat. Des prélèvements d'eau à l'entrée et à la sortie de chacun des bacs sont réalisés deux fois par jour : le matin avant vidange des algues distribuées la veille et l'après-midi, lorsque la concentration phytoplanctonique dans le bac est stabilisée.

La concentration en cellules phytoplanctoniques est mesurée à l'aide du compteur de particules *Multisizer*. Les cellules contenues dans l'échantillon d'eau sont aspirées par une électrode et dénombrées ; leur taille est évaluée et exprimée en volume équivalent. L'amplitude du flux de liquide aspiré étant proportionnel au volume, l'appareil fournit donc une mesure du nombre de cellules par unité de volume et par classe de taille.

Les différences de concentrations phytoplanctoniques entre l'entrée (C_E , $10^9 \mu\text{m}^3 \cdot \mu\text{L}^{-1}$) et la sortie (C_S , $10^9 \mu\text{m}^3 \cdot \mu\text{L}^{-1}$) d'un même bac permettent de calculer directement la consommation moyenne individuelle en algues (C , $10^9 \mu\text{m}^3 \cdot \text{j}^{-1} \cdot \text{ind}^{-1}$) des huîtres, en y retranchant la concentration phytoplanctonique résiduelle dans l'eau de mer alimentant la salle (C_B , $10^9 \mu\text{m}^3 \cdot \mu\text{L}^{-1}$), et en y intégrant le débit (D , $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$) et le nombre d'individus (n), selon l'équation suivante :

$$C = [(C_E - C_S - C_B) \times D] / n$$

3.2. Récolte des bio-dépôts et estimation de l'efficacité d'absorption (EA, %)

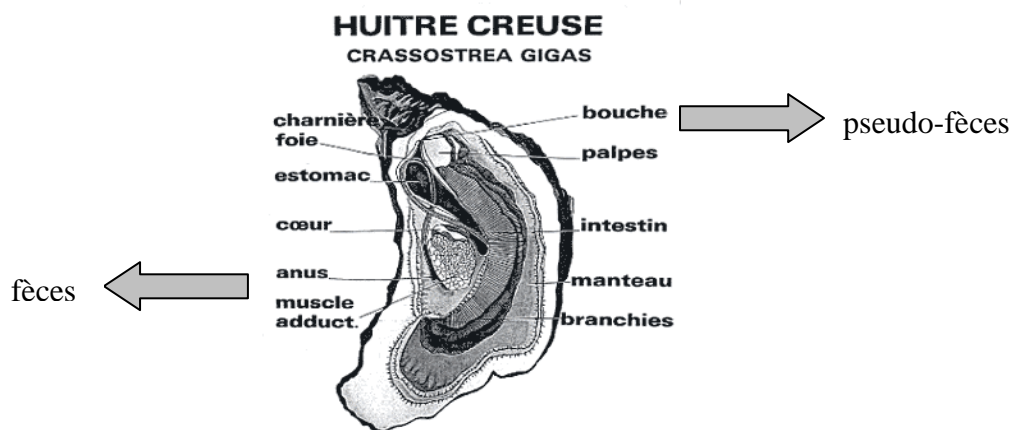


Figure 4 : Schéma en vue ventrale d'une huître creuse.

Les mollusques bivalves filtreurs se nourrissent des particules en suspension dans la colonne d'eau. Les palpes labiaux situés en avant de la bouche permettent un premier tri sélectif des particules alimentaires retenues par les branchies avant l'ingestion, discriminant

ainsi toutes les particules sans valeur énergétique pour l'animal, qui sont rejetées sous forme de pseudo-fèces (**PF**) (fig. 4). Ces PF contiennent des particules inorganiques indigestes, mais aussi de la matière organique en excès, engluées dans des agrégats muqueux. Cette sélection pré-ingestive varie selon la teneur en matières organique et inorganique dans le milieu, la qualité et la quantité de la matière en suspension filtrée, le poids de l'animal, la température... (Fegley *et al.* 1992, Newell & Jordan 1983, Iglesias *et al.* 1992). Dans nos conditions expérimentales, les huîtres vivent dans un milieu où la matière en suspension est essentiellement constituée de matière organique (apport d'un mélange algal dans une eau filtrée à 1 µm). Néanmoins, la quantité d'algues fournie aux huîtres étant assez forte, cela pourrait favoriser la production de PF. C'est le cas pour les huîtres nourries avec *t-iso* et *T. weissflogii* pour lesquelles l'efficacité d'absorption n'a donc pas pu être calculée.

Une fois les particules ingérées, elles sont digérées et une partie de la matière est absorbée, tandis que l'autre partie du bol alimentaire non absorbé est rejetée sous forme de fèces (**F**) (figure 5). Afin de mesurer l'efficacité d'absorption de chaque algue (**EA**, %), les bio-dépôts produits dans les bacs expérimentaux des conditions *T. suecica* et *S. marinoi* ont été récoltés à deux reprises, pour tester la répétitivité de la mesure. Selon la méthodologie de Bourlès (2004), une fois récoltés, ces bio-dépôts sont d'abord centrifugés à 3000 t.min⁻¹ pendant 10 minutes. Chaque culot est ensuite rincé avec du formiate d'ammonium et re-centrifugé à 3000 t.min⁻¹ pendant 10 minutes, trois fois de suite, afin d'extraire les sels présents dans les échantillons. En parallèle, un volume de 700 mL du mélange algal subit le même protocole. Ensuite, les culots de bio-dépôts et d'algues sont desséchés 48h à 65°C, pesés une première fois pour obtenir la matière sèche (**MS**, g), puis brûlés 4h à 450°C pour mesurer la masse de cendre (**MC**, g). Le pourcentage de matière organique (**OC**, %) est alors calculé par la formule suivante :

$$\mathbf{OC} = ((\mathbf{MS} - \mathbf{MC})/\mathbf{MS}) * 100$$

L'efficacité d'absorption (**EA**, %), *i.e.* la fraction du bol alimentaire qui est absorbée, est alors obtenue selon l'équation de Conover (1966) par le rapport du pourcentage de matière organique de chaque échantillon sur le pourcentage de matière organique des algues apportées, en considérant la matière minérale présente comme un traceur conservatif, non absorbé:

$$\mathbf{EA} = (\mathbf{OC}_{\text{algue}} - \mathbf{OC}_{\text{fèces}}) / [(1 - \mathbf{OC}_{\text{fèces}}) \times \mathbf{OC}_{\text{fèces}}]$$

4. Traitement des données

4.1. Données d'ingestion et de croissance des huîtres

Afin de comparer l'ingestion dans le temps des quatre différentes algues par les huîtres, une analyse de variance à mesures répétées (MANOVA) a été réalisée sous le logiciel SAS. Les analyses ont été faites en considérant une dépendance dans les données prises dans le temps de la forme autorégressive. Cela veut dire que la dépendance est plus forte lorsque les mesures sont rapprochées dans le temps et moins forte au fur et à mesure que les observations sont éloignées dans le temps. L'hypothèse autorégressive d'ordre I est celle qui convenait le mieux aux données, selon le test d'Akaike où le plus faible AIC (Akaike Index Critérium) a été choisi. Le postulat de normalité n'était pas vérifié sur ces données mais plusieurs transformations ont conduit exactement à la même interprétation sans améliorer la normalité pour autant. Les analyses retenues ont donc été effectuées sur les données brutes. Selon Underwood (1997), « l'analyse de variance est un test suffisamment robuste pour que les résultats et les interprétations ne soient pas affectés par des séries de données non normales ».

Pour aider à l'interprétation, deux analyses ont été effectuées, et ce, pour chaque naissain : le naissain d'Argenton, le naissain de France Turbot pour la période du 18 au 26 mars (triplicats par condition) et le naissain de France Turbot pour la période du 27 mars au 24 avril (duplicats par condition). La première analyse a considéré à la fois algue et temps comme des facteurs, avec 4 modalités pour l'algue et « x » pour le temps. Cela a donc fait 4x moyennes à comparer, ce qui est beaucoup. Pour faciliter la comparaison entre les conditions d'algues, une seconde analyse a été effectuée en considérant l'algue comme un facteur et le temps comme une variable continue. Cela a permis de comparer les tendances d'ingestion dans le temps entre conditions d'algues. Une pente et une ordonnée à l'origine pour chaque condition d'algue ont été calculées par une régression multiple. La pente représente la progression temporelle de l'ingestion et l'ordonnée à l'origine représente l'ingestion de départ. Un test de comparaison des pentes et des ordonnées à l'origine a été effectué lorsqu'une différence significative (p -value < 0,05) est détectée pour l'effet combiné temps*algue, l'effet temps seul ou l'effet algue seul. Puis, si la comparaison des pentes indique des différences significatives entre au moins deux conditions d'algues, alors les pentes (puis les origines) sont comparées deux à deux, afin de déterminer entre quelles condition d'algues la différence d'ingestion est significative.

Pour comparer la croissance des huîtres entre les différentes conditions d'algue, des analyses de variances (ANOVAs) ont été réalisées sur chaque paramètre biométrique pour la

dernière biométrie de chacun des deux naissains. Les données ne suivant pas une loi de distribution normale, un test non paramétrique de Kruskal-Wallis est effectué.

4.2. Modèle DEB et données de croissance des huîtres

Un modèle mécaniste de physiologie permettant d'expliquer, puis de prédire les performances de croissance de l'huître creuse en fonction de la variation des facteurs expérimentaux de son milieu d'élevage a été utilisé. Basé sur la bio-énergétique de cet animal, ce modèle repose sur la théorie du budget d'énergie dynamique (DEB Theory) développée par Kooijman (2000) et appliquée à l'huître creuse par Pouvreau *et al.* (2006). Cette théorie DEB décrit les grandes lois d'allocation de l'énergie et permet de comprendre comment les variables du milieu (température, nourriture) agissent sur les performances physiologiques (nutrition, croissance, reproduction, survie) de l'huître creuse. Elle est basée sur un ensemble d'hypothèses dont la formulation mathématique permet de décrire et de quantifier, au cours du cycle de vie d'un individu, les flux entrants et sortants de matière et d'énergie, en respectant les lois fondamentales de la thermodynamique (Kooijman, 2000).

Un individu est représenté par trois entités (variables d'état) : la structure (\mathbf{V}), la réserve (\mathbf{E}) et le compartiment reproduction (\mathbf{E}_R). La réserve désigne l'ensemble des constituants de l'organisme disponibles pour un usage métabolique. La structure désigne l'ensemble des constituants de l'organisme qui sont nécessaires au fonctionnement de l'organisme et nécessitent un entretien (dégradation-synthèse des protéines par exemple). La théorie DEB suppose qu'il n'y a pas de maintenance associée à la réserve. Trois stades de vie sont distingués : *i*) l'embryon, qui ne se nourrit ni ne se reproduit, *ii*) le juvénile, qui se nourrit mais ne se reproduit pas et *iii*) l'adulte qui se nourrit et se reproduit. Les transitions entre deux stades sont des événements ponctuels (V_b , le volume de l'embryon devenant juvénile et V_p , le volume à maturité du juvénile devenant adulte). Aux stades embryon et juvénile, la structure et la réserve participent au poids de l'individu tandis que la maturité correspond à une énergie dissipée, investie par l'individu pour se complexifier jusqu'à acquérir la capacité de se reproduire au stade adulte. Au stade adulte, l'individu stocke ensuite cette l'énergie dans le compartiment reproduction, afin de constituer ces gamètes

La théorie DEB propose un modèle de croissance basé sur des règles de prise de nourriture et d'utilisation de l'énergie assimilée en fonction des conditions de nourriture et de température vécues par un individu. Les processus clés de la théorie DEB sont l'ingestion, la digestion, la mise en réserve de l'énergie assimilée, la maintenance, la croissance, le développement et la reproduction. La théorie DEB définit la notion de « produit » comme

toute matière qui n'est pas variable d'état du modèle mais qui entre dans le bilan des flux de matière, comme l'oxygène respiré, les fèces et les structures calcifiées (coquille...). La théorie DEB suppose que la formation d'un produit est une somme pondérée des trois flux caractéristiques de la théorie : l'assimilation (conversion de la nourriture en réserve), la dissipation (maintenance, développement et coûts de conversion pour les œufs chez les adultes) et la croissance (conversion de la réserve en structure). Les coefficients de pondération de ces flux sont spécifiques d'un produit. Pour les fèces, par exemple, seule la contribution associée au flux d'assimilation est à considérer. La respiration n'est pas considérée comme une variable explicative dans le modèle DEB.

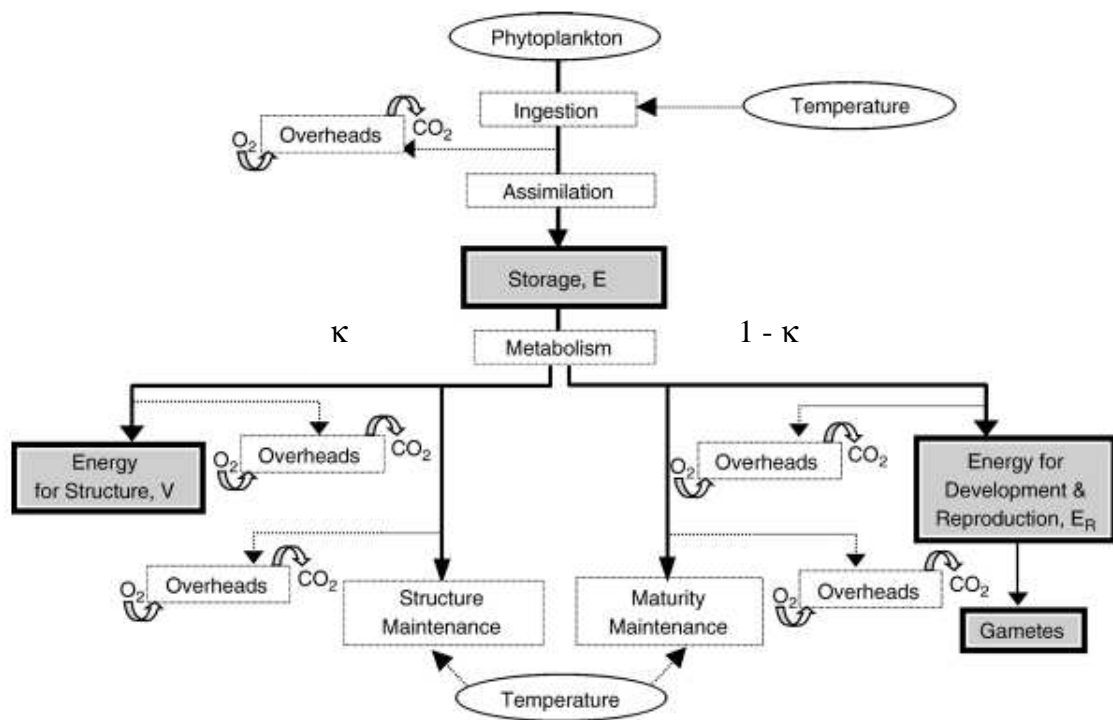


Figure 5 : Schéma du modèle énergétique (DEB) de croissance pour l'huître creuse *C. gigas*, développé par Kooijman (2000), d'après Pouvreau *et al.* (2006).

Légende : Les variables d'état sont en gris et les variables forçantes encadrées. Les coûts comprennent les flux de minéraux, de produits et de chaleur. Ils incluent par exemple la production de dioxyde de carbone et la consommation d'oxygène.

L'individu ingère puis assimile une énergie qui entre dans le compartiment réserve (fig.5). Cette énergie dépend des conditions de nourriture du milieu et de la surface d'assimilation de l'individu. Une partie de l'énergie contenue dans la réserve est mobilisée. Une part fixe (κ) de cette énergie est allouée à la maintenance somatique et à la croissance, avec une priorité pour la maintenance somatique. L'autre part ($1-\kappa$) est allouée vers la maturité et la maintenance de cette maturité aux stades embryon et juvéniles. La transition

entre deux stades intervient lorsque la variable maturité atteint son stade le plus élevé, et l'énergie qui était investie pour se complexifier est alors stockée en vue de la première reproduction. L'individu continue d'allouer cependant de l'énergie pour maintenir son niveau de complexité. Les règles d'utilisation du compartiment reproduction sont spécifiques de chaque espèce.

Le modèle DEB s'appuie sur des principes physiologiques communs à toutes les espèces, traduits en équations différentielles sur la base de 11 paramètres seulement, qui intègrent à la fois l'effet de l'environnement et du génotype sur le développement de l'animal. Les paramètres associés aux différents flux sont constants tout au long du cycle de l'individu. La différence entre les espèces réside dans la valeur que prennent ces paramètres, obtenues à partir de différentes expériences d'écophysiologie en laboratoire. Cette théorie permet donc une comparaison de la gestion d'énergie entre les espèces. Les deux variables forçantes considérées dans le modèle DEB sont la température et la densité de nourriture.

Pour cette étude, le code du modèle est celui de Pouvreau *et al.* (2006), développé pour l'huître creuse et les simulations sont effectuées sous le logiciel STELLA, version 8.1. (High Performance Systems, Hannover, NH, USA). Le détail des principaux paramètres et équations du modèle DEB est donné dans le numéro spécial du *Journal of Shellfish Research* intitulé « DEBIB Dynamic Energy Budgets in Bivalves » (2006). Par rapport au code initial (Van der Veer *et al.* 2006, Pouvreau *et al.* 2006), les paramètres liés à l'effet de la température sur les fonctions physiologiques ont été modifiés (Bourlès *et al.*, en prép.). La température est fixée à 20°C comme dans l'expérience menée ici.

La valeur initiale de la variable d'état E (energy storage) est fixée à 5 J pour le naissain d'Argenton et à 200 J pour le naissain de France Turbot et la valeur initiale de E_V (energy fixed in structural growth) est fixée à 18 J pour le naissain d'Argenton et à 400 J pour le naissain de France Turbot, afin de débiter la simulation de croissance à la valeur de masse de chair sèche mesurée.

La valeur du volume à maturité V_P est estimée à 0,1. En effet, $V_P = (\delta * L_P)^3$ avec δ le coefficient de forme (shape), estimé à 0,175 pour les huîtres creuses adultes et L_P la longueur des huîtres à maturité, estimée à 2,363 cm (d'après Cannuel, 2005). Cette valeur est d'autant plus justifiée que des pontes sont observées en fin d'expérience dans un des bacs d'huîtres juvéniles du naissain de France Turbot, nourries avec *T. weissflogii* dont la longueur est supérieure à 2,363 cm.

La valeur de μ_X (facteur de conversion du volume d'algues ingéré en énergie) a été fixée à $4.10^{-9} \text{ J}^3.\text{j}^{-1}$ lors de la calibration du modèle. Cette valeur est calculée conformément à

Brown (1991) qui fournit une valeur énergétique moyenne de 14 J.mg^{-1} (masse sèche) pour les microalgues fourrages les plus communes, en tenant compte de Philippon (2007, com. pers.) qui établit une relation linéaire entre le volume et la masse de ces microalgues ($V_{(\mu\text{m}^3)} = 3,07 * DW_{(\text{pg})} - 11,69$).

Les valeurs de l'efficacité d'absorption (en %) sont les mêmes pour les deux naissains étudiés : 0% pour *T. suecica* ; 75% pour *S. marinoï* et *T. weissflogii* ; 60% pour *t-iso*. Elles sont issues de l'expérimentation ou de la littérature et servent à calibrer le modèle. C'est la seule différence dans les valeurs des paramètres du modèle entre les conditions d'algues avec l'ingestion, exprimée en $10^9 \mu\text{m}^3.\text{j}^{-1}$ et qui décrit la consommation en algues des huîtres pendant l'expérience pour les différentes conditions d'algues.

Le modèle a tourné du 17 mars au 24 avril 2008 (39 jours) pour le naissain de France Turbot et du 31 mars au 5 mai 2008 (36 jours) pour le naissain d'Argenton, avec un pas de temps de 0,25 jours pour les deux naissains.

RESULTATS

1. Ingestion des huîtres

1.1 Ingestion individuelle des huîtres

L'ingestion des huîtres est mesurée en milliards de $\mu\text{m}^3.\text{j}^{-1}.\text{ind}^{-1}$ pour chacune des quatre conditions d'algues testées, pour le naissain d'Argenton et le naissain de France Turbot, et les résultats sont présentés dans la figure 6.

Pour le naissain de France Turbot, les ingestions moyennes des huîtres sont de $5,49 (\pm 2,31).10^9 \mu\text{m}^3.\text{j}^{-1}.\text{ind}^{-1}$ (intervalle de confiance), $8,60 (\pm 1,93).10^9 \mu\text{m}^3.\text{j}^{-1}.\text{ind}^{-1}$, $8,68 (\pm 5,28).10^9 \mu\text{m}^3.\text{j}^{-1}.\text{ind}^{-1}$ et $7,76 (\pm 2,45).10^9 \mu\text{m}^3.\text{j}^{-1}.\text{ind}^{-1}$ pour les algues *T. suecica*, *T. weissflogii*, *t-iso* et *S. marinoï* respectivement (fig.6 en haut).

Pour le naissain de France Turbot durant la période du 18 au 26 mars (triplicats), l'ANOVA à mesures répétées considérant algue et temps comme des facteurs (annexe 1a) a révélé que l'ingestion moyenne des huîtres dans le temps différait significativement entre les quatre conditions d'algues, ou tout au moins entre deux des conditions (effet d'interaction algue*temps significatif, $p < 0,0001$). Par ailleurs, l'ingestion moyenne des huîtres n'évolue pas de la même façon dans le temps (effet temps significatif, $p < 0,0001$) ni entre les conditions d'algues (effet algue significatif, $p < 0,0001$). La comparaison des pentes issues de

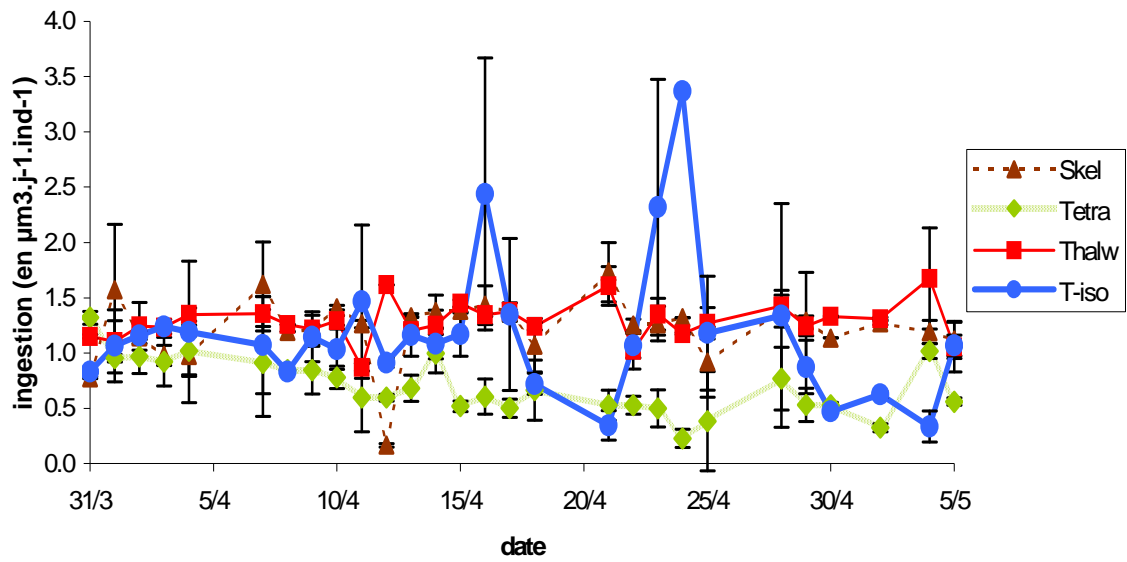
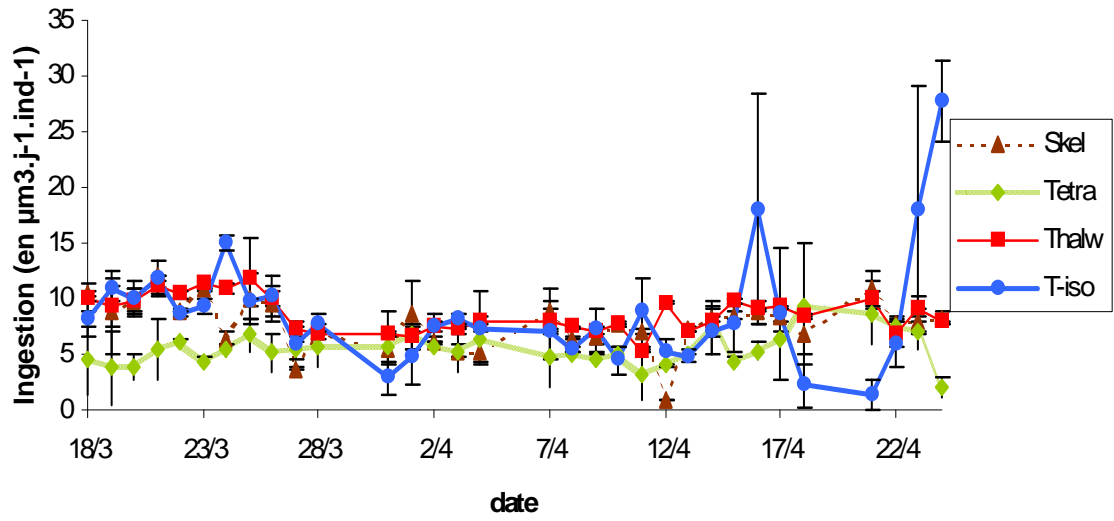


Figure 6 : Evolution temporelle de l'ingestion individuelle moyenne des huîtres des naissains d'Argenton (en haut) et de France Turbot (en bas) pour chacune des 4 conditions d'algues *S. marinoï*, *T. suecica*, *T. weissflogii* et *t-iso*

la régression linéaire entre les quatre conditions d'algues (annexe 2a) ne présente pas de différence significative (effet d'interaction t*algue non significatif, $p = 0,2916$), ce qui signifie que la progression de l'ingestion est comparable entre les conditions. Les pentes estimées diffèrent significativement de zéro (annexe 2a, effet t significatif, $p = 0,0064$) et l'estimation de la pente commune (annexe 3a) donne une valeur positive (0,0069), indiquant que l'ingestion est significativement différente de zéro et qu'elle augmente légèrement au cours du temps. Enfin, les ordonnées à l'origine sont significativement différentes entre les conditions (annexe 2a, effet algue significatif, $p = 0,0001$ et annexe 3a) et les comparaisons deux à deux des origines entre conditions d'algues (annexe 4a) révèlent que les différences significatives proviennent de *T. suecica* qui diffère de toutes les autres algues.

Pour le naissain de France Turbot pendant la période du 27 mars au 24 avril (duplicats), l'ingestion moyenne des huîtres dans le temps (annexe 1b) diffère significativement entre les quatre conditions d'algues, (effet d'interaction algue*temps significatif, $p < 0,0001$) et n'évolue pas de la même façon dans le temps (effet temps significatif, $p < 0,0001$) ni entre les conditions d'algues (effet algue significatif, $p < 0,0001$). La comparaison des pentes issues de la régression linéaire entre les quatre conditions d'algues (annexe 2b) ne présente pas de différence significative (effet d'interaction t*algue non significatif, $p = 0,0827$), donc la progression de l'ingestion est comparable entre les conditions. Les pentes estimées diffèrent significativement de zéro (annexe 2b, effet t significatif, $p < 0,0001$) et l'estimation de la pente commune (annexe 3b) donne une valeur positive (0,0041), indiquant que l'ingestion augmente légèrement mais significativement au cours du temps. Enfin, les ordonnées à l'origine ne sont pas significativement différentes entre les conditions (annexe 2b, effet algue non significatif, $p = 0,3747$).

Ainsi, pour le naissain de France Turbot, l'ingestion moyenne des huîtres augmente légèrement pendant toute la durée de l'expérience et sa progression dans le temps est similaire entre les quatre conditions d'algues. Cependant, l'ingestion de départ pour *T. suecica* est plus faible que l'ingestion des trois autres algues lorsque les huîtres sont réparties en triplicats, mais plus lorsque les huîtres sont réparties en duplicats.

Pour le naissain d'Argenton, les ingestions moyennes des huîtres sont de : $0,70 (\pm 0,29).10^9 \mu\text{m}^3.j^{-1}.ind^{-1}$, $1,29 (\pm 0,20).10^9 \mu\text{m}^3.j^{-1}.ind^{-1}$, $1,17 (\pm 0,72).10^9 \mu\text{m}^3.j^{-1}.ind^{-1}$ et $1,22 (\pm 0,33).10^9 \mu\text{m}^3.j^{-1}.ind^{-1}$ pour les algues *T. suecica*, *T. weissflogii*, *t-iso* et *S. marinoi* respectivement (fig.6 en bas). L'ingestion moyenne des huîtres dans le temps (annexe 1c) diffère significativement entre les quatre conditions d'algues (effet d'interaction algue*temps

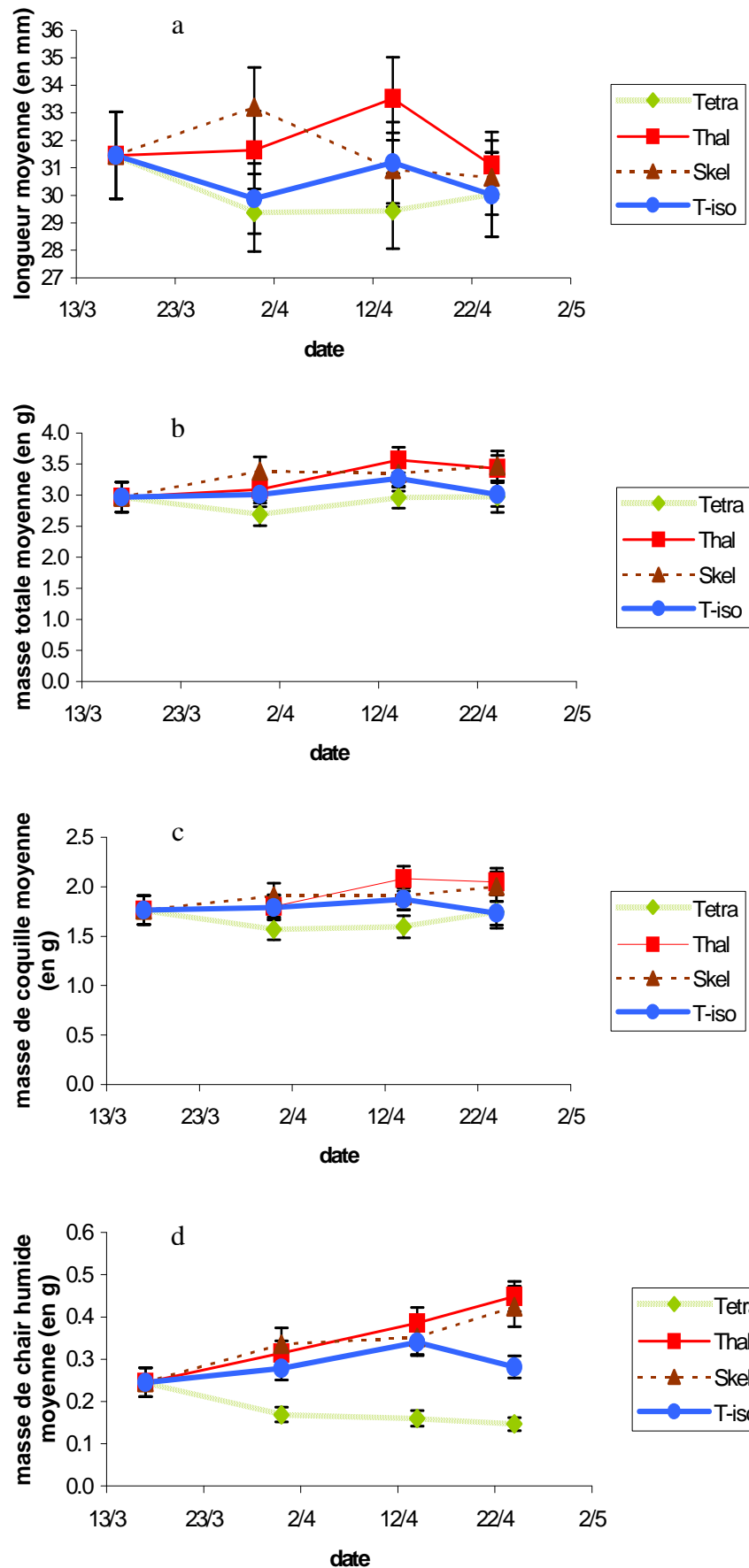


Figure 7 : Evolution temporelle de la longueur moyenne (en mm, fig.7a), de la masse totale moyenne (en g, fig.7b), de la masse de coquille moyenne (en g, fig.7c) et de la masse de chair humide moyenne (en g, fig.7d) des huîtres de France Turbot

significatif, $p < 0,0001$) et n'évolue pas de la même façon dans le temps (effet temps significatif, $p < 0,0001$) ni entre les conditions d'algues (effet algue significatif, $p < 0,0001$). La comparaison des pentes issues de la régression linéaire entre les quatre conditions d'algues (annexe 2c) montre une différence significative entre au moins deux des quatre conditions (effet d'interaction t*algue, $p = 0,0077$). Les pentes estimées ne diffèrent pas significativement de zéro (annexe 2c, effet t, $p = 0,2244$), pour les conditions *S. marinoï*, *t-iso* et *T. weissflogii* (annexe 3c, $p = 0,6543$; $p = 0,8621$; $p = 0,3990$ respectivement), indiquant que pour ces trois algues, l'ingestion des huîtres a été constante pendant toute la durée de l'expérience. En revanche, une pente légèrement négative pour *T. suecica* (annexe 3c, $-0,0007$, $p = 0,0004$) semble indiquer une légère décroissance de l'ingestion moyenne des huîtres dans le temps pour cette condition. Enfin, les comparaisons deux à deux des pentes entre conditions d'algues (annexe 4b) révèlent que les différences significatives proviennent de *T. suecica* qui diffère de toutes les autres algues.

1.2 Efficacité d'absorption des huîtres

Deux prélèvements de fèces dans les bacs d'huîtres nourries avec *T. suecica* et *S. marinoï* sont réalisés à une semaine d'intervalle (le 1^{er} et le 8 avril 2008), afin de tester la répétitivité des mesures. Les efficacités d'absorption sont de 0 % (le 1^{er} avril) et de 8,57 % (le 8 avril) pour *T. suecica* et de 62,67 % (le 1^{er} avril) et de 69,01 % (le 8 avril) pour *S. marinoï*. En revanche, les fèces des huîtres nourries avec *T-iso* et *T. weissflogii* n'ont pu être collectés, car un mélange de fèces et de pseudo-fèces a été observé du début à la fin de l'expérience, bien que la concentration phytoplanctonique en entrée des bacs ($20\ 000\ \mu\text{m}^3 \cdot \mu\text{L}^{-1}$), ait été la même pour toutes les conditions expérimentales.

2. Croissance des huîtres et simulation du modèle DEB

2.1. Suivi des paramètres biométriques

La tendance générale observée entre le début et la fin de l'expérience pour chaque paramètre biométrique mesuré et pour chacun des deux naissains est un amaigrissement pour les huîtres nourries avec *T. suecica* et une croissance pour *t-iso*, *T. weissflogii* et *S. marinoï*.

a) Longueur moyenne des huîtres

Pour le naissain de France Turbot (fig. 7a), la longueur moyenne initiale des huîtres est de $31 (\pm 2)$ mm (intervalle de confiance) le 17 mars. Les longueurs moyennes des huîtres en fin

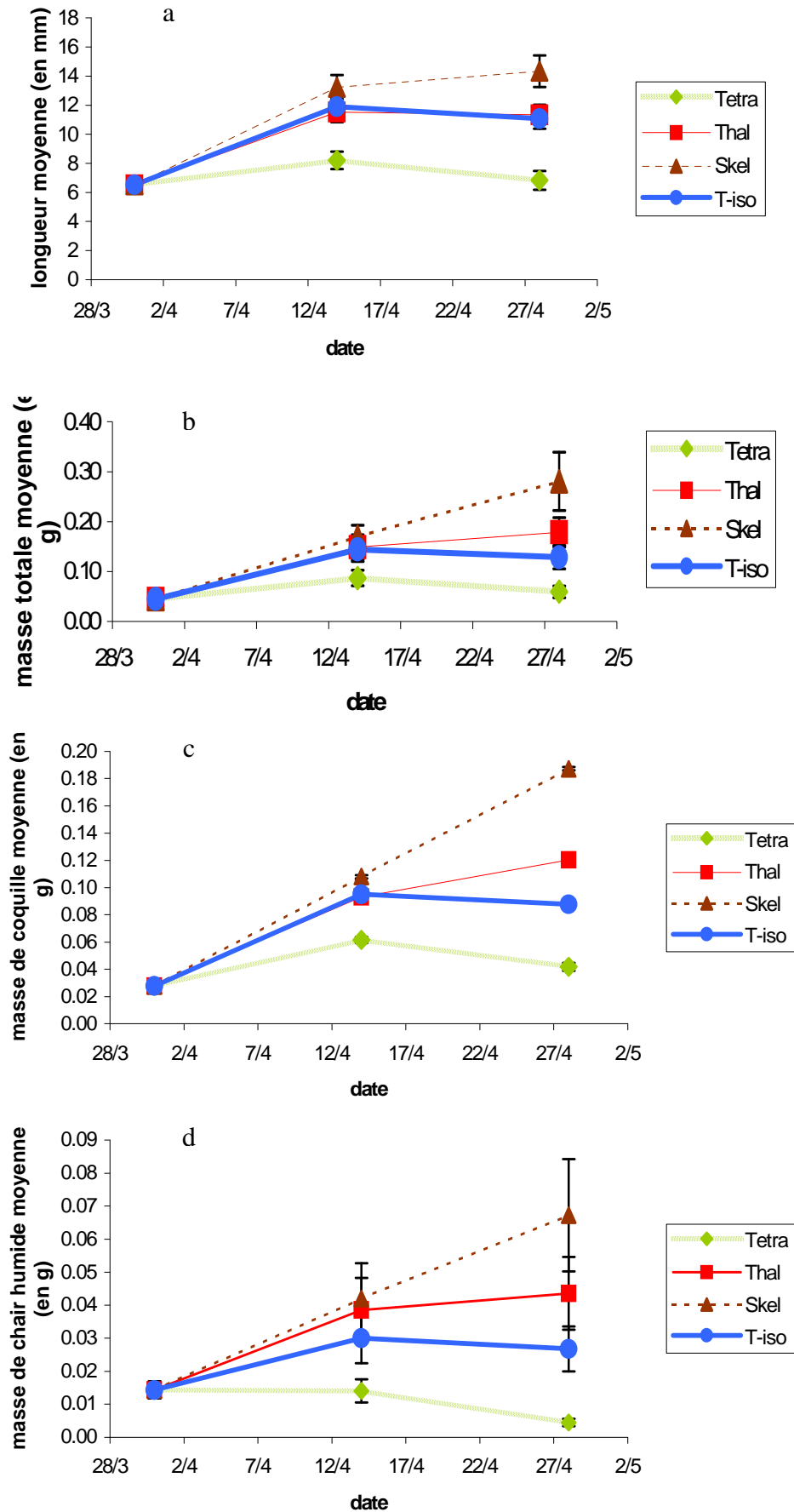


Figure 8 : Evolution temporelle de la longueur moyenne (en mm, fig.8a), de la masse totale moyenne (en g, fig.8b), de la masse de coquille moyenne (en g, fig.8c) et de la masse de chair humide moyenne (en g, fig.8d) du naissain d'Argenton

d'expérience (dernière biométrie le 24 avril) sont de $30 (\pm 2)$ mm, de $31 (\pm 1)$ mm, de $30 (\pm 2)$ mm et de 31 ± 1 mm pour les huîtres nourries avec *T. suecica*, *T. weissflogii*, *t-iso* et *S. marinoi* respectivement. La longueur moyenne des huîtres en fin d'expérience ne varie pas significativement entre les conditions d'algues (annexe 5 à gauche).

Pour le naissain d'Argenton (fig. 8a), la longueur moyenne initiale des huîtres est de $7 (\pm 0)$ mm le 31 mars. La longueur moyenne des huîtres en fin d'expérience (dernière biométrie le 28 avril) est de $7 (\pm 1)$ mm, de $11 (\pm 1)$ mm, de $11 (\pm 1)$ mm et de $14 (\pm 1)$ mm pour les huîtres nourries avec *T. suecica*, *T. weissflogii*, *t-iso* et *S. marinoi* respectivement. Les longueurs moyennes des huîtres entre les conditions d'algues sont toutes significativement différentes à la fin de l'expérience, excepté entre *t-iso* et *T. weissflogii* (annexe 5 à droite).

b) Masse totale moyenne des huîtres

Pour le naissain de France Turbot (fig. 7b), la masse totale moyenne initiale des huîtres est de $3,0 (\pm 0,2)$ g le 17 mars. Les masses totales moyennes des huîtres en fin d'expérience sont de $3,0 (\pm 0,3)$ g, de $3,4 (\pm 0,2)$ g, de $3,0 (\pm 0,2)$ g et de $3,5 (\pm 0,2)$ g pour les huîtres nourries avec *T. suecica*, *T. weissflogii*, *t-iso* et *S. marinoi* respectivement. Les masses totales moyennes en fin d'expérience sont significativement différentes entre les huîtres nourries avec *T. suecica* et les huîtres nourries avec *T. weissflogii* ou *S. marinoi* (annexe 6 à gauche).

Pour le naissain d'Argenton (fig. 8b), la masse totale moyenne initiale des huîtres est de $0,045 (\pm 0,006)$ g le 31 mars. Les masses totales moyennes des huîtres en fin d'expérience sont de $0,060 (\pm 0,012)$ g pour les huîtres nourries avec *T. suecica*, de $0,179 (\pm 0,030)$ g, de $0,129 (\pm 0,024)$ g et de $0,280 (\pm 0,058)$ g pour les huîtres nourries avec *T. suecica*, *T. weissflogii*, *t-iso* et *S. marinoi* respectivement. Les masses totales moyennes en fin d'expérience sont significativement différentes entre les huîtres nourries avec *T. suecica* et les huîtres nourries avec toutes les autres algues et entre les huîtres nourries avec *S. marinoi* et les huîtres nourries avec *t-iso* (annexe 6 à droite).

c) Masse de coquille moyenne des huîtres

Pour le naissain de France Turbot (fig. 7c), la masse de coquille moyenne initiale des huîtres est de $1,8 (\pm 0,1)$ g le 17 mars. Les masses de coquille moyennes des huîtres en fin d'expérience sont de $1,7 (\pm 0,2)$ g, de $2,1 (\pm 0,1)$ g, de $1,7 (\pm 0,1)$ g et de $2,0 (\pm 0,1)$ g pour les huîtres nourries avec *T. suecica*, *T. weissflogii*, *t-iso* et *S. marinoi* respectivement. Les masses de coquille moyennes en fin d'expérience sont significativement différentes entre les huîtres

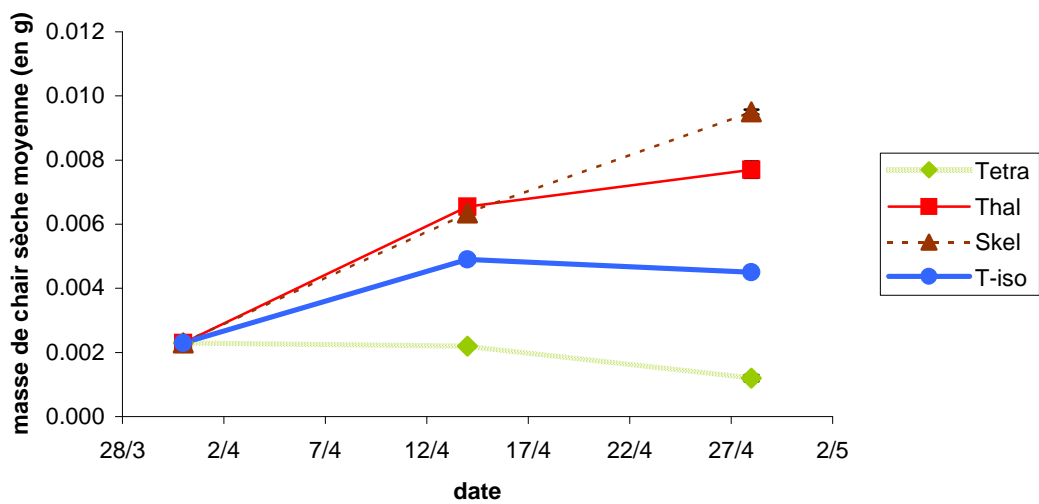
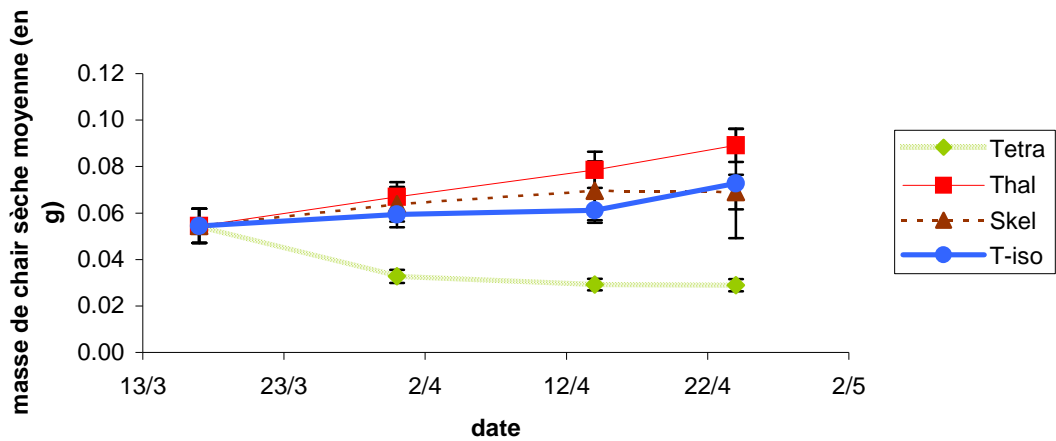


Figure 9: Evolution temporelle de la masse de chair humide moyenne (en g) des naissains de France Turbot (en haut) et d'Argenton (en bas)

nourries avec *T. suecica* et les huîtres nourries avec toutes les autres algues (annexe 7 à gauche).

Pour le naissain d'Argenton (fig. 8c), la masse de coquille moyenne initiale des huîtres est de 0,028 (\pm 0,004) g le 31 mars. Les masses de coquille moyennes des huîtres en fin d'expérience sont de 0,042 (\pm 0,003) g, de 0,120 (\pm 0,004) g, de 0,088 (\pm 0,002) g et de 0,187 (\pm 0,001) g pour les huîtres nourries avec *T. suecica*, *T. weissflogii*, *t-iso* et *S. marinoi* respectivement. Les masses de coquille moyennes en fin d'expérience sont significativement différentes entre toutes les conditions d'algues (annexe 7 à droite).

d) Masse de chair humide moyenne des huîtres

Pour le naissain de France Turbot (fig. 7d), la masse de chair humide moyenne initiale des huîtres est de 0,246 (\pm 0,034) g le 17 mars. Les masses de chair humide moyennes des huîtres en fin d'expérience sont de 0,146 (\pm 0,016) g, de 0,448 (\pm 0,036) g, de 0,282 (\pm 0,026) g et de 0,424 (\pm 0,048) g pour les huîtres nourries avec *T. suecica*, *T. weissflogii*, *t-iso* et *S. marinoi* respectivement. Les masses de chair humide moyennes en fin d'expérience sont toutes significativement différentes entre les conditions d'algues, excepté entre *S. marinoi* et *T. weissflogii* (annexe 8 à gauche).

Pour le naissain d'Argenton (fig. 8d), la masse de chair humide moyenne initiale des huîtres est de 0,014 (\pm 0,003) g le 31 mars. Les masses de chair humide moyennes des huîtres en fin d'expérience sont de 0,005 (\pm 0,001) g, de 0,044 (\pm 0,011) g, de 0,027 (\pm 0,007) g et de 0,037 (\pm 0,017) g pour les huîtres nourries avec *T. suecica*, *T. weissflogii*, *t-iso* et *S. marinoi* respectivement. Les masses de chair humide moyennes sont significativement différentes entre toutes les conditions d'algues (annexe 8 à droite).

e) Masse de chair sèche moyenne des huîtres

Pour le naissain de France Turbot (fig. 9 en haut), la masse de chair sèche moyenne initiale des huîtres est de 0,055 (\pm 0,007) g le 17 mars. Les masses de chair sèche moyennes des huîtres en fin d'expérience sont de 0,029 (\pm 0,003) g, de 0,089 (\pm 0,007) g, de 0,073 (\pm 0,024) g et de 0,069 (\pm 0,008) g pour les huîtres nourries avec *T. suecica*, *T. weissflogii*, *t-iso* et *S. marinoi* respectivement. Les masses de chair sèche moyennes sont toutes significativement différentes entre les conditions d'algues, excepté entre *S. marinoi* et *T. weissflogii* (annexe 9 à gauche).

Pour le naissain d'Argenton (fig. 9 en bas), la masse de chair sèche moyenne initiale des huîtres est de 0,002 (\pm 0,000) g le 31 mars. Les masses de chair sèche moyennes des huîtres en fin d'expérience sont de 0,001 (\pm 0,000) g, de 0,008 (\pm 0,000) g, de 0,005 (\pm 0,000) g et de 0,010 (\pm 0,000) g pour les huîtres nourries avec *T. suecica*, *T. weissflogii*, *t-iso* et *S. marinoï* respectivement. Les masses de chair sèche moyennes sont significativement différentes entre toutes les conditions d'algues (annexe 9 à droite).

2.2. Simulations du modèle DEB :

Les simulations de croissance en masse de chair sèche des huîtres de chaque naissain ont été effectuées en utilisant l'ingestion mesurée expérimentalement pour chaque algue et les efficacités d'absorption mesurées pendant l'expérience et extraites de la littérature. Elles ont été comparées aux données de masse de chair sèche obtenues avec les biométries (données mesurées) dans la figure 10.

De façon générale, les simulations de l'évolution temporelle de la masse de chair sèche par le modèle DEB sont bien corrélées avec les masses de chair sèche mesurées pour chacune des conditions d'algues, ce qui valide le modèle DEB développé pour *C. gigas*. L'ingestion et l'efficacité d'absorption, seuls paramètres du modèle qui prennent des valeurs différentes entre les conditions d'algues, permettent donc de bien expliquer les différences de croissance observées entre les conditions d'algues.

Une tendance à l'amaigrissement des huîtres nourries avec *T. suecica* est observée, ce qui distingue ce groupe d'huîtres de ceux nourris avec les trois autres algues et pour lesquels une croissance est constatée. Une distinction peut également être faite entre les huîtres nourries avec *t-iso* et celles nourries avec *T. weissflogii* ou *S. marinoï*. En effet, la croissance des huîtres nourries avec *t-iso* est légèrement plus faible qu'avec *T. weissflogii* ou *S. marinoï*, pour chacun des deux naissains.

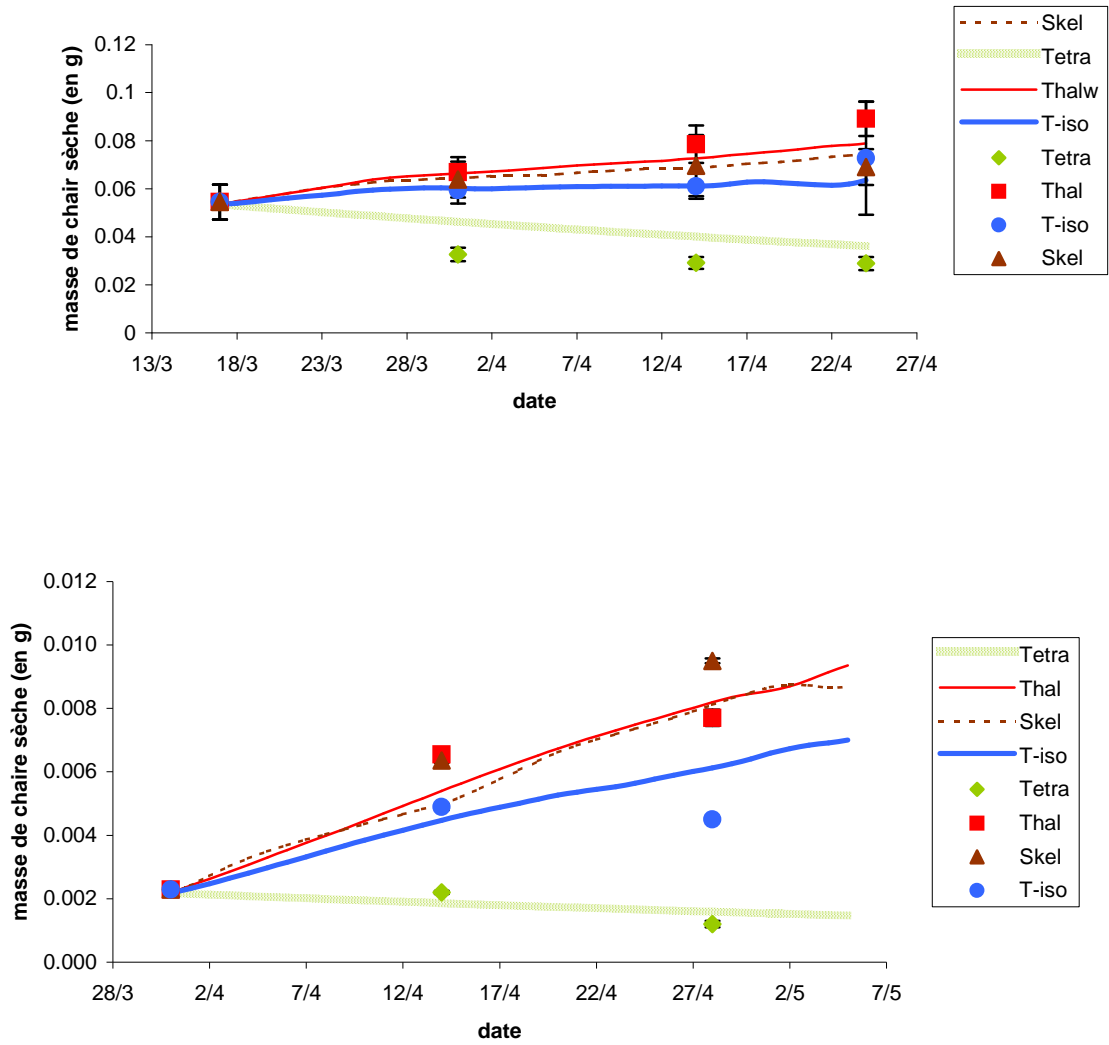


Figure 10 : Evolution temporelle de la masse de chair sèche moyenne (en g) des huîtres mesurées (points et intervalle de confiance) et simulées (lignes) des naissains de France Turbot (en haut) et d'Argenton (en bas)

3. Mortalité des huîtres de France Turbot et de la contamination bactérienne des bacs expérimentaux

3.1. Mortalité du naissain de France Turbot

Au cours de l'expérience, il a fallu faire face à un épisode de mortalité prononcé sur le naissain de France Turbot. Au total, 18,1 % du lot initial de 4200 individus environ ont été perdus en quarantaine avant même le début de l'expérience. Sur toute la durée de l'expérience, du 12 mars au 25 avril, le taux de mortalité des huîtres de France Turbot s'élève à 45,7 % (fig.11). Ces huîtres ont subi des mortalités différentes selon le régime d'algues fourni : 68,6 % pour le groupe nourri avec *T. suecica*, 35,1 % pour le groupe nourri avec *T. weissflogii*, 48,0 % pour le groupe nourri avec *t-iso* et 31,5 % pour le groupe nourri avec *S. marinoi* (fig.12a). La tendance observée distingue la mortalité des huîtres nourries avec *T. suecica* de celle des huîtres nourries avec *S. marinoi*, *t-iso* ou *T. weissflogii*.

Du 12 au 26 mars 2008, un nouvel épisode de mortalité a touché les quatre groupes d'huîtres correspondant chacun à une condition expérimentale (surtout à partir du 19 mars, voir figure 14), qui a décimé 48,1 ($\pm 4,4$) % des huîtres nourries avec *T. suecica*, 32,2 ($\pm 3,8$) % des huîtres nourries avec *T. weissflogii*, 42,5 ($\pm 3,3$) % des huîtres nourries avec *t-iso* et 28,2 ($\pm 1,6$) % des huîtres nourries avec *S. marinoi* (fig.12b). Il a donc été mis en place un nouveau traitement antibiotique avec du chloramphénicol, du 26 au 30 mars 2008, cette fois-ci, directement dans la salle expérimentale en flux continu. Suite aux fortes pertes du naissain de France Turbot, les effectifs réduits permettent de passer de triplicats à des duplicats, au sein d'une même condition d'algue.

Pourtant, à partir du 11 avril 2008, un autre épisode de mortalité reprend (fig.11). Pour la période du 27 mars au 25 avril 2008, la mortalité est de 40,9 ($\pm 0,8$) % pour les huîtres nourries avec *T. suecica*, 2,1 ($\pm 0,5$) % pour les huîtres nourries avec *T. weissflogii*, 10,7 ($\pm 6,6$) % pour les huîtres nourries avec *t-iso* et 5,5 ($\pm 4,6$) % pour les huîtres nourries avec *S. marinoi* (fig.12c).

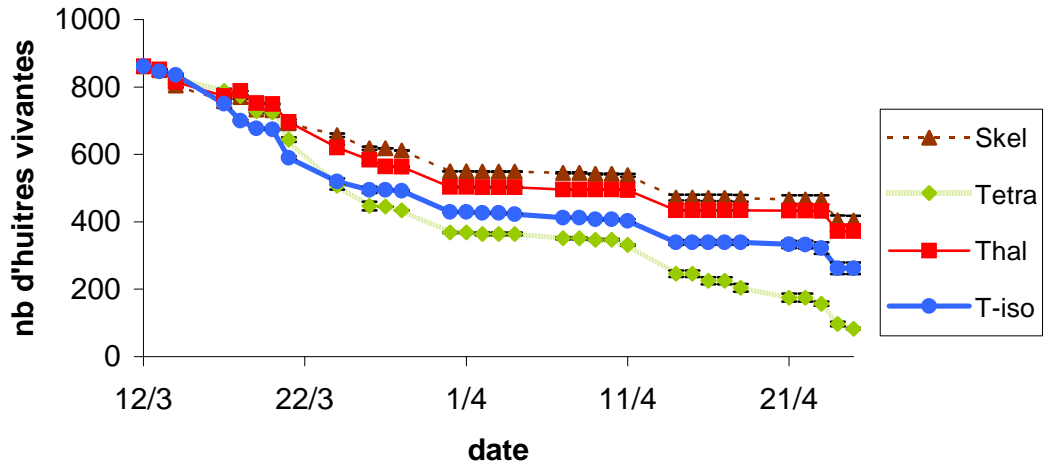


Figure 11 : Nombre d'huîtres survivantes du naissain de France Turbot du 12 mars au 25 avril 2008

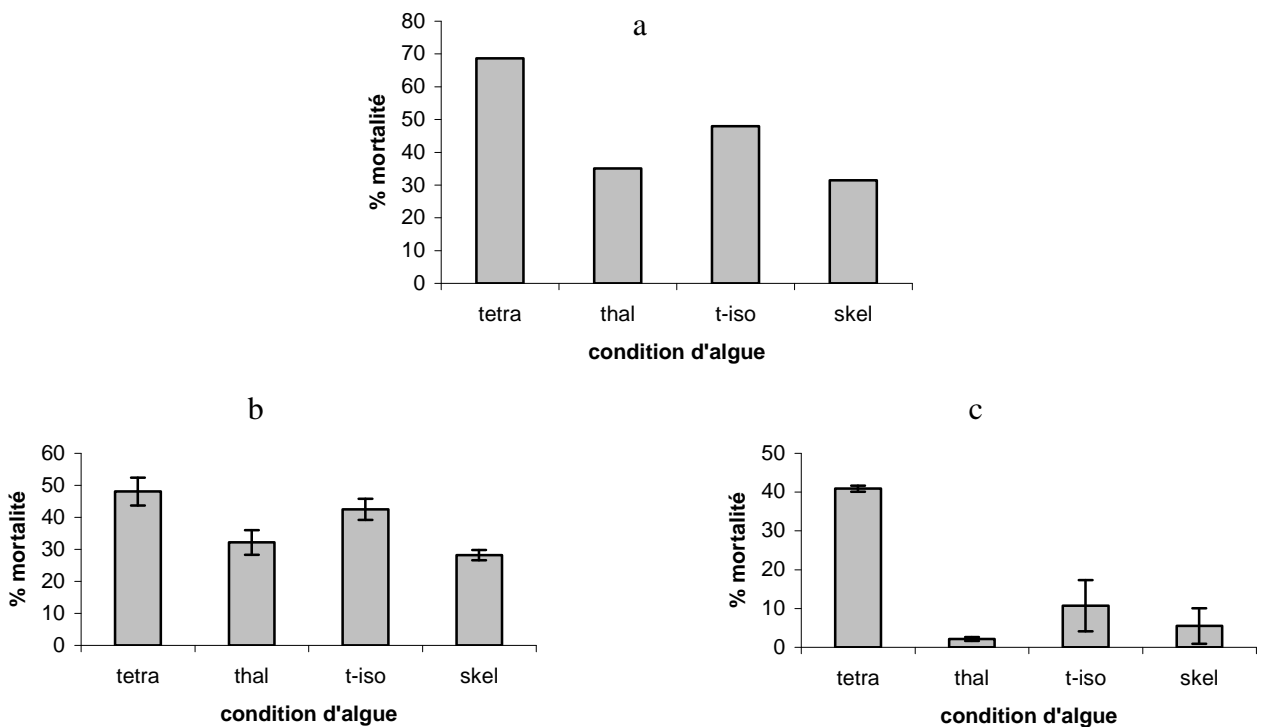


Figure 12 : Pourcentage de mortalité des huîtres du naissain de France Turbot : a) sur toute la durée de l'expérience : du 12 mars au 25 avril 2008 ; b) avant le traitement antibiotique : du 12 au 26 mars 2008 ; c) après le traitement antibiotique : du 27 mars au 25 avril 2008

3.2. Evolution du nombre de colonies bactériennes du genre *Vibrio*

Parallèlement aux observations de mortalité des huîtres, un suivi bactérien est réalisé dans la salle expérimentale (eau des bacs et aérosols dans l'air). La présence de bactéries du genre *Vibrio* est ici suspectée, car très souvent associée à des mortalités dans le milieu naturel (Waechter *et al.*, 2002). Les prélèvements sont effectués dans l'eau des bacs expérimentaux et dans des « mouchards » avant, pendant et après le traitement antibiotique au chloramphénicol (du 26 au 30 mars 2006) : les 26 et 31 mars et les 7, 14, 16, 21 et 24 avril. Ils sont dilués au dixième puis étalés sur un milieu sélectif du genre bactérien *Vibrio* : le milieu T.C.B.S. (Thiosulfate Citrate Bile Saccharose). Les colonies bactériennes qui se sont développées après 48h sur ce milieu sont ensuite dénombrées.

L'étalement des prélèvements d'eau des « mouchards » révèle une absence de *Vibrio sp.* dans les aérosols. En revanche, les étalements des prélèvements d'eau des bacs expérimentaux sont souvent positifs au *Vibrio sp.* Cependant, la variabilité inter-bac au sein d'une même condition d'algue est souvent plus élevée que celle entre les conditions d'algues et empêche l'interprétation des résultats. Seules les données du 31 mars sont cohérentes et sont présentées dans la figure 13.

La corrélation entre le pourcentage de mortalité des huîtres pour la période du 12 au 26 mars et le nombre moyen de colonies bactériennes du genre *Vibrio* pour les prélèvements du 26 mars 2008 donnent un R^2 de 83,8. La corrélation entre le pourcentage de mortalité des huîtres pour la période du 27 mars au 25 avril et le nombre moyen de colonies bactériennes du genre *Vibrio* pour les prélèvements du 21 avril 008 donnent un R^2 de 97,1.

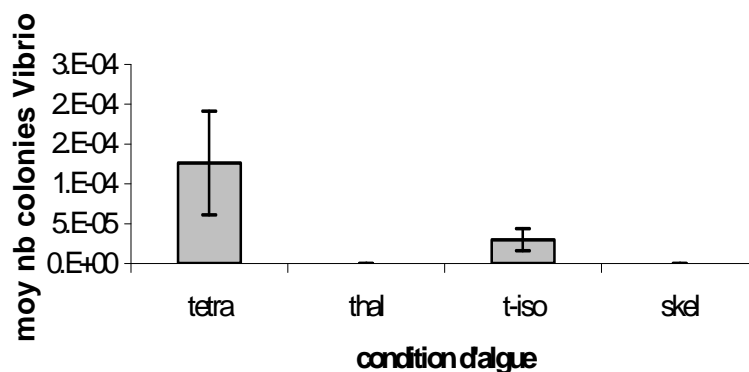


Figure 13 : Nombre moyen de colonies bactériennes de *Vibrio sp.* détecté dans les bacs d'huîtres le 31 mars 2008

DISCUSSION

Que ce soit pour les données d'ingestion, d'efficacité d'absorption, de croissance ou de mortalité, tous les résultats concordent pour montrer qu'il existe une différence entre les quatre conditions d'algues. Quel que soit le naissain (France Turbot ou Argenton), les huîtres nourries avec *T. suecica* se distinguent de celles nourries avec les trois autres conditions algues, de part une faible ingestion, une efficacité d'absorption quasiment nulle, un amaigrissement des huîtres en fait de croissance et une forte mortalité.

1. Ingestion et efficacité d'absorption du naissain de *C. gigas* en fonction du régime d'algue

Pour les naissains d'Argenton et de France Turbot, sur toute la durée de l'expérience, l'ingestion individuelle moyenne des huîtres est significativement plus faible pour l'algue *T. suecica* ($5,49 (\pm 2,31) \cdot 10^9 \mu\text{m}^3 \cdot \text{j}^{-1} \cdot \text{ind}^{-1}$ et $0,70 (\pm 0,29) \cdot 10^9 \mu\text{m}^3 \cdot \text{j}^{-1} \cdot \text{ind}^{-1}$, pour les naissains de France Turbot et d'Argenton respectivement) que pour les trois autres conditions d'algues, sur toute la durée de l'expérience. Cela concorde avec les résultats de Numaguchi (2002), qui a estimé, sur des juvéniles d'huître perlière japonaise *Pinctada fucata martensii*, une ingestion de $6,6 \text{ cellules} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{ind}^{-1}$ pour l'espèce de *Tetraselmis tetrahele*, plus faible que l'ingestion mesurée avec *t-iso* ($10,0$ - $10,6 \text{ cellules} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{ind}^{-1}$, soit $(9,60$ - $10,2) \cdot 10^9 \mu\text{m}^3 \cdot \text{j}^{-1} \cdot \text{ind}^{-1}$ si on considère qu'une cellule de *t-iso* a un volume de $40 \mu\text{m}^3$). Ces valeurs d'ingestion pour *t-iso* semblent de plus coïncider avec les valeurs obtenues ici, soit $8,68 (\pm 5,28) \cdot 10^9 \mu\text{m}^3 \cdot \text{j}^{-1} \cdot \text{ind}^{-1}$. De même, l'étude de Martinez-Fernandez *et al.* (2004) sur des larves de l'huître perlière *Pteria sterna*, montre que l'algue *T. tetrahele* n'est pas du tout ingérée à l'inverse de l'algue *t-iso* qui est non seulement ingérée mais également digérée. Martinez-Fernandez *et al.* (2004) montrent également que l'algue *T. weissflogii* n'est pas du tout ingérée par les larves d'huître perlière. Or, notre étude montre que non seulement *C. gigas* est capable d'ingérer l'algue *T. weissflogii*, mais aussi que l'ingestion du naissain (France Turbot) est statistiquement similaire entre *T. weissflogii*, *t-iso* et *S. marinoi* ($8,60 (\pm 1,93) \cdot 10^9 \mu\text{m}^3 \cdot \text{j}^{-1} \cdot \text{ind}^{-1}$, $8,68 (\pm 5,28) \cdot 10^9 \mu\text{m}^3 \cdot \text{j}^{-1} \cdot \text{ind}^{-1}$ et $7,76 (\pm 2,45) \cdot 10^9 \mu\text{m}^3 \cdot \text{j}^{-1} \cdot \text{ind}^{-1}$ respectivement). Tenore & Dunstan (1973) montrent que le taux de nutrition de l'huître américaine *Crassostrea virginica* est légèrement plus élevé avec *Thalassiosira pseudonana* qu'avec *Skeltonema costatum* (= *S. marinoi*), ces deux taux de nutrition étant toutefois supérieurs à ceux d'autres diatomées. La taille de la bouche des petites huîtres doit être supérieure à la taille minimum de *Thalassiosira sp.*, qui est une grosse diatomée ($\geq 1000 \mu\text{m}^3$), pour qu'il y ait effectivement ingestion.

Une expérience similaire à la notre, réalisée à la même période sur l'huître plate *Ostrea edulis* adulte présente des résultats identiques quant à la mauvaise ingestion de *T. suecica* par *O. edulis* (David, 2008). En revanche, dans cette étude, l'ingestion de l'algue *t-iso* par les huîtres plates est faible et proche de celle de *T. suecica*, ce qui n'est pas le cas pour le naissain de *C. gigas*.

La faible valeur alimentaire de *T. suecica* est documentée par Langdon & Waldock (1981) et s'explique par l'absence d'acides gras poly-insaturés à 22C, particulièrement 22 : 6 ω 3, contrairement à *S. costatum* qui contient cet acide gras (Waldock & Nascimento, 1979). Cependant, cette hypothèse est controversée par Walne (1970) et Webb & Chu (1983), qui attribuent une faible valeur alimentaire à *S. costatum*, en raison de la possible absence d'un nutriment essentiel présent dans *T. suecica*, telle la tyrosine. Toutefois, le but de ce stage n'était pas de déterminer la valeur alimentaire de ces microalgues en terme de composés biochimiques, mais de quantifier la part d'énergie qu'elles apportent à l'huître en terme de croissance. Néanmoins, rien ne prouve que la valeur énergétique des algues cultivées en éclosion soit identique à celle de ces mêmes algues en milieu naturel. En effet, il est fort probable que les conditions expérimentales de culture des algues à la Station expérimentale en vue d'une production de masse (lumière 24h/24, avec une intensité constante) aient modifié la nature chimique et la physiologie de ces algues par rapport à ce qu'elles étaient dans le milieu naturel. Cela a pu altérer jusqu'à leur valeur énergétique pour l'huître creuse (Thompson *et al.*, 1993). Selon Robert (com. pers 2008), les différences de croissance, d'ingestion et d'efficacité d'assimilation entre les huîtres creuses juvéniles nourries avec *T. suecica* et les huîtres nourries avec les autres algues est tellement forte que même en milieu naturel, cet écart a très peu de chance d'être réduit. Ce qu'il faut également prendre en compte, c'est que dans le milieu naturel, l'huître ne va certainement pas se nourrir uniquement d'une seule algue, mais d'un mélange d'algues. Cette remarque est écartée par Chauvaud (2001), qui explique que lorsqu'une microalgue est dominante dans le milieu, l'huître l'ingère préférentiellement et elle constitue ainsi sa source majeure d'énergie.

D'un point de vue méthodologique, l'ingestion a été exprimée ici en volume phytoplanctonique. Pourtant, la chlorophylle *a* est l'estimateur le plus couramment utilisé pour caractériser la concentration phytoplanctonique. Cet estimateur est à utiliser avec précaution car, il intègre également les cellules de taille inférieure et supérieure à celle que peut ingérer l'huître (Barillé *et al.* 1993) et de plus, il ne tient pas compte des autres sources de nourriture de l'huître. En effet, l'huître ne se nourrit pas exclusivement de microalgues, mais aussi de cellules hétérotrophes, tels des protistes ciliés et nanoflagellés de taille

supérieure à 4 μm , qui contribuent également probablement au budget énergétique de l'huître en milieu naturel (claire), et ne sont pas pris en compte dans nos conditions expérimentales (De Crignis, 2007 ; Dupuy *et al.* 2000 ; Pouvreau *et al.*, 2007 ; Bourlès et al., en prép). Il est donc essentiel d'identifier et de dénombrer au mieux les algues ingérées par l'huître, susceptibles de contribuer à sa croissance.

L'utilisation du compteur de particules Multisizer pour estimer la concentration phytoplanctonique est, dans le cas des conditions monoalgales, l'outil le plus approprié pour estimer l'ingestion des huîtres ou des bivalves en général, en conditions contrôlées. Cependant, cet appareil ne permet pas de faire la distinction entre différents types de cellules, ce qui peut poser problème en milieu naturel où plusieurs taxons sont souvent mélangés, pour mesurer la concentration d'une microalgue spécifique. Or, dans notre expérience, la nourriture fournie aux huîtres est contrôlée et la concentration phytoplanctonique mesurée correspond à un type d'algue clairement identifié.

Pour les huîtres nourries avec *T. suecica*, leur efficacité d'absorption est quasiment nulle ce qui signifie que cette algue déjà peu ingérée par rapport aux autres algues n'est presque pas absorbée. Cette valeur concorde avec celle de 6,5 % obtenue par Romberger & Epifanio (1981) sur les juvéniles de *C. virginica* pour *T. suecica*, mais diffère totalement des efficacités d'absorption estimées à 63 % pour *Ostrea edulis* (Walne & Spencer, 1974) et à plus de 80 % pour *Mytilus edulis* (Thompson & Bayne, 1974) pour *T. suecica*.

D'après Meleder *et al.* (2001), l'ingestion des huîtres creuses adultes est régulée par la production de pseudo-fèces. Dans la présente étude, les huîtres nourries avec *t-iso* et *T. weissflogii* ont produit des pseudo-fèces tout au long de l'expérimentation, ce qui n'a pas permis la mesure de l'efficacité d'absorption. Romberger & Epifanio (1981) trouvent des valeurs d'efficacité d'absorption de *t-iso* et *Thalassiosira pseudonana* pour des juvéniles de l'huître américaine *C. virginica* équivalentes à 73,6 % et 72,5 % respectivement. Cette valeur d'efficacité d'absorption de *t-iso* concorde avec celle de 79 % estimée pour *C. gigas* (Bourlès, 2008, com. pers.), mais celle de *T. pseudonana* est supérieure à la valeur de 55 % obtenue par Ren *et al.* (2006) pour *Thalassiosira sp.* dans une étude sur la moule *Perna canaliculus*. L'efficacité d'absorption des huîtres nourries avec *S. marinoi* est d'environ 65 % dans cette expérience, ce qui est légèrement plus faible que la valeur de 82 % mesurée chez *C. gigas* par Barillé *et al.* (2003) pour *S. costatum*. Finalement, l'efficacité d'absorption de *C. gigas* habituellement moyennée à 75 % dans le modèle DEB est assez similaire à celles trouvées ici expérimentalement et lors de la calibration du modèle. Ces valeurs expérimentales d'efficacité

d'absorption utilisées dans le modèle permettent d'améliorer la corrélation entre la croissance simulée et mesurée de la masse de chair sèche des huîtres. Avec l'ingestion, ce sont les seules valeurs qui varient entre les conditions d'algues et permettent ainsi de mieux différencier la croissance entre ces quatre conditions.

2. Performances de croissance du naissain de *C. gigas* comparées entre régimes d'algues

2.1. Données mesurées

En ce qui concerne la croissance, les huîtres nourries avec *T. suecica* se distinguent significativement des huîtres nourries avec les autres algues, pour la plupart des paramètres biométriques mesurés et pour chacun des deux naissains. Un réel amaigrissement des huîtres nourries avec *T. suecica* est constaté, en accord avec les observations de Robert *et al.* (2002) sur du naissain de *C. gigas*, de Rivero-Rodriguez (2007) sur des juvéniles de *Crassostrea corteziensis* et de Romberger & Epifanio (1981) sur des juvéniles de *C. virginica*. Par opposition aux huîtres nourries avec *T. suecica* qui se démarquent visiblement, les huîtres nourries *T. weissflogii*, *t-iso* ou *S. marinoï* présentent une croissance du même ordre de grandeur, ce qui concorde avec des taux de croissance de naissain de *O. edulis* de 85,7 %, 78,9 % et 67,6 % pour *t-iso*, *S. costatum* et *T. suecica* respectivement, après quatre à cinq semaines de régime monospécifique, mesurés par Laing & Millican (1986).

Toutefois, bien que la principale distinction entre les quatre algues se fasse entre *T. suecica* et les trois autres microalgues, une légère différence de croissance peut être observée entre les huîtres nourries avec *t-iso* d'une part et celles nourries avec *S. marinoï* ou *T. weissflogii* d'autre part. En effet, seules les masses moyennes de chair humide et de chair sèche des huîtres nourries avec *S. marinoï* et *T. weissflogii* du naissain de France Turbot ne diffèrent pas significativement. De même, la simulation de la croissance du naissain d'Argenton par le modèle DEB distingue les huîtres nourries avec *t-iso*, dont la croissance est légèrement plus faible des huîtres nourries avec *S. marinoï* ou *T. weissflogii*. Ces observations ne correspondent pas à la forte croissance des huîtres nourries avec *t-iso* à laquelle on pourrait s'attendre, sachant que cette microalgue est fréquemment utilisée en éclosérie de bivalves. En effet, administrée en régime monospécifique, l'algue *t-iso* ne permet pas une croissance efficace du naissain, contrairement aux régimes d'éclosérie où elle est associée à d'autres microalgues, tels *Chaetoceros sp.* ou même *T. suecica* (Rivara & Patricio, 2004). Les algues *T. weissflogii* et *S. marinoï* donnent, elles, de bons résultats quant à l'ingestion et la croissance de *C. gigas*. Selon Bacher et Baud (1992), le régime algal le plus adapté en aquaculture

expérimentale est le même que pour les juvéniles de *C. gigas*, élevés dans un système d'upwelling et nourris avec *S. costatum*. Enfin, *Thalassiosira sp.* est une diatomée peu utilisée en éclosion mais de haute valeur nutritionnelle reconnue.

On peut enfin remarquer qualitativement que, pour chacun des paramètres biométriques mesurés, la plus forte croissance est observée avec *T. weissflogii* pour le naissain de France Turbot, mais avec *S. marinoï* pour le naissain d'Argenton. Ceci peut être expliqué par la taille de la bouche des huîtres qui doit être supérieure à la taille de *T. weissflogii* (grosse diatomée) pour que l'ingestion soit efficace (Tenore & Dunstan, 1973). Le naissain d'Argenton étant plus petit que celui de France Turbot, il est possible que l'ingestion soit plus faible pour les huîtres d'Argenton nourries avec *T. weissflogii* plutôt qu'avec *S. marinoï* et que la croissance résultante soit plus faible. De la même façon, Enright (1986) constate une croissance plus forte avec *S. costatum* qu'avec *Thalassiosira pseudonana* chez des juvéniles d'huître plate.

2.2. Explication par le modèle DEB

Les données expérimentales acquises lors de cette expérience ont permis de valider le modèle DEB appliqué à l'huître creuse par Pouvreau *et al.* (2006). En effet, les simulations de l'évolution temporelle de la masse de chair sèche par le modèle DEB sont bien corrélées avec les masses de chair sèche mesurées pour chacune des conditions d'algues. L'ingestion et l'efficacité d'absorption sont les seuls paramètres du modèle qui prennent des valeurs différentes entre les conditions d'algues. Elles permettent donc d'expliquer correctement les différences de croissance observées entre les conditions d'algues. Toutefois, les masses de chair sèches mesurées et simulées ne sont pas parfaitement superposées, ce qui signifie que l'ingestion et l'efficacité d'absorption ne décrivent pas intégralement les différences d'évolution de la masse de chair sèche entre les conditions d'algues. Il existe un léger biais lié soit, à l'estimation expérimentale de ces deux paramètres, soit au fait que d'autres paramètres non pris en compte ici pour modéliser la croissance de *C. gigas* auraient permis de mieux affiner le modèle en les y intégrant. Toutefois, le modèle a été sensiblement amélioré. De précédentes simulations du modèle DEB donnaient des résultats de croissance des huîtres très éloignés de ceux qui avaient été observés en milieu naturel (Arcachon) lors d'une efflorescence de *T. suecica*. En évaluant expérimentalement l'ingestion et l'efficacité d'absorption spécifique de cette algue, mais aussi des trois autres microalgues par *C. gigas* et en intégrant ces données dans le modèle DEB, la croissance simulée de *C. gigas* est bien mieux corrélée avec les données expérimentales de croissance. Cette étude expérimentale a permis la validation et l'affinage du modèle DEB de croissance de *C. gigas*.

De même que pour les données biométriques mesurées, une tendance à l'amaigrissement des huîtres nourries avec *T. suecica* distingue cette condition des trois autres pour lesquels une croissance est constatée. Un distinguo peut également être effectué entre la condition *t-iso* et les conditions *T. weissflogii* ou *S. marinoi*. En effet, pour chacun des deux naissains, la croissance des huîtres nourries avec *t-iso* est légèrement plus faible qu'avec *T. weissflogii* ou *S. marinoi*.

Lors des simulations de la croissance en masse de chair sèche des huîtres, les mêmes valeurs des paramètres « efficacité d'absorption » et « μ_X » (facteur de conversion du volume d'algues ingéré en énergie) ont été maintenues entre les deux naissains, et ne doivent *a priori* pas évoluer durant la vie de l'animal, du stade larvaire au stade adulte. En effet, la valeur de $4.10^9 \text{J}^3 \cdot \text{j}^{-1}$ pour μ_X rejoint celle trouvée par Rico-Villa *et al.* (en prép.) pour la modélisation de la croissance de larves de *C. gigas* nourries avec *t-iso* et *Chaetoceros gracilis*, qui est de $4,5.10^9 \text{J}^3 \cdot \text{j}^{-1}$. Aucune valeur de μ_X chez des adultes de *C. gigas* n'a encore été déterminée.

En revanche, la constance du coefficient de forme δ (shape) au cours de la vie de l'huître creuse, estimée à 0,175 pour *C. gigas* du stade post-larve au stade adulte peut être remise en question. En effet, elle est plus forte pour les larves sphériques de *C. gigas* (0,386 chez Bos *et al.*, 2006 et 0,64 chez Rico-Villa *et al.*, en prép.). De plus, les petites huîtres du naissain d'Argenton, plus rondes que les huîtres juvéniles du naissain de France Turbot ou que des huîtres creuses adultes ont donc contraint à augmenter la valeur du shape pour calculer la valeur initiale des variables d'état E et E_V .

3. Bilan et analyses des mortalités observées sur le naissain de France Turbot

Concernant le naissain de France Turbot, bien qu'aucun test statistique n'ait été réalisé, la mortalité du groupe d'huîtres nourri avec *T. suecica* est toujours sensiblement plus forte que celle des groupes d'huîtres appartenant aux trois autres conditions d'algues, que ce soit avant ou après le traitement. Associé à cette forte mortalité, l'abondance des colonies bactériennes de *Vibrio sp.* dénombrées dans les bacs d'huîtres nourries avec *T. suecica* est plus forte que celle dans les bacs des autres conditions d'algues. Par ailleurs, pour certaines dates de prélèvement, l'abondance de *Vibrio sp.* est assez bien corrélée avec la mortalité observée des huîtres. Les groupes d'huîtres nourris avec les 3 autres algues présentent eux aussi une contamination au *Vibrio*, mais avec une mortalité moindre. Une hypothèse pour expliquer ces mortalités brusques et massives serait que les huîtres nourries avec *Tetraselmis suecica* ingèreraient peu ou mal cette algue et seraient donc affaiblies face à la contamination bactérienne, leurs faibles réserves énergétiques ne leur permettant pas d'être suffisamment

résistantes au *Vibrio*. Peut-on parler de nocivité du régime monoalgal de *Tetraselmis suecica* pour des huîtres déjà contaminées au *Vibrio*? Cependant, la cause des mortalités n'a pas été clairement identifiée et cette hypothèse demande à être approfondie par de prochaines études. De plus, il est fort probable que la médiocre qualité physiologique du naissain de France Turbot dès son arrivée à la station expérimentale soit à l'origine de ces mortalités observées.

Les importants épisodes de mortalité observés sur le naissain de France Turbot ne devraient pas avoir lieu en écloséries commerciales où le but est de produire un maximum de naissain viable et en bonne santé. L'écloserie expérimentale d'Argenton doit donc chercher à améliorer l'assainissement de la salle expérimentale (air et eau).

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Tous les résultats de cette étude viennent confirmer le fait qu'il existe des différences d'ingestion, d'efficacité d'absorption et de croissance de *C. gigas* en fonction de l'espèce phytoplanctonique qui domine dans le milieu. *T. suecica* se distingue des 3 autres microalgues fournies de par sa faible valeur énergétique. En effet, lorsqu'elle est la seule source de nourriture de l'huître, elle est la cause d'une faible ingestion, d'une efficacité d'absorption quasiment nulle, d'une faible croissance et d'une plus forte mortalité chez les juvéniles, comme chez les larves de *C. gigas* (Robert *et al.* 2001).

L'évaluation expérimentale de l'ingestion et de l'efficacité d'absorption spécifique de chacune des quatre microalgues par *C. gigas* et l'intégration de ces données dans le modèle DEB a permis de mieux corréliser la croissance simulée de *C. gigas* avec les données expérimentales. Cette étude expérimentale a permis la validation et l'affinage du modèle DEB de croissance de *C. gigas*, qui évaluera d'autant mieux la variabilité des performances de croissance de l'huître creuse dans son environnement naturel, en y intégrant la succession des communautés phytoplanctoniques.

Il pourrait être intéressant de tester l'effet d'autres algues sur l'ingestion et la croissance des huîtres en condition contrôlées, tels *Lepidodinium chlorophorum* (dinoflagellé), *Asterionella glacialis* (diatomée) ou *Leptocylindrus minimus*, trois algues qui présentent des efflorescences en milieu naturel (Arcachon) et dont on a montré qu'elles semblaient ne pas convenir du tout à l'huître comme source de nourriture potentielle (Bernard, 2006 ; Shumway, 1992).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Almeida, M.J., Machado, J., Coimbra, J., 1999. Growth and biochemical composition of *Crassostrea gigas* and *Cerastodema edulis* in two estuaries from the North of Portugal. J. Shellfish Res. 18, 139-146
- Bacher, C. & Baud, J.P., 1992. Intensive rearing of juvenile oysters *Crassostrea gigas* in an upwelling system: Optimization of biological production. Aquat. Living Resour. 5(2), 89-98
- Barillé, L., Haure, J., Pales-Espinosa, E., Morancais, M., 2003. Finding new diatoms for intensive rearing of the Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) : energy budget as a selective tool. Aquaculture 217, 501-514
- Barillé, L., Prou, J., Héral, M., Bougrier, S., 1993. No influence of food quality but ration dependant retention efficiencies in the Japanese oyster *Crassostrea gigas*. J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 171, 91-106
- Bayne, B.L. & Newell, R.C., 1983. Physiological energetics of marine molluscs, In: Saleuddin, A.S.M. & Wilbur, K.M. (éds.). The Mollusca 4, Academic Press, London, 407-515
- Bernard, I., 2006. Application d'un modèle DEB de croissance et de reproduction de l'huître creuse *Crassostrea gigas* dans le bassin d'Arcachon : identification des sources de nourriture potentielle, Rapport de Master 1
- Bos, G.O., Hendriks, I.E., Strasser, M., Dolmer, P., Kamermans, P., 2006. Estimation of food limitation of bivalve larvae in coastal waters of north-western Europe. J. Sea Res. 55, 191-206
- Bourlès, Y., Alunno-Bruscia, M., Pouvreau, S., Tollu, G., Leguay, D., Arnaud, C., Gouletquer, P., Kooijman, S.A.L.M., en prép. Modelling growth and reproduction of the Pacific oyster *Crassostrea gigas*: Application of the oyster-DEB model in a coastal pond
- Bourles, Y., 2004. Ecophysiologie de l'huître creuse *Crassostrea gigas* : analyse bioénergétique de la gamétogénèse sous trois conditions trophiques distinctes. Rapport de D.E.A., Université de Rennes 1
- Brown, M.R., McCausland, M.A., Kowalski, K., 1998. The nutritional value of four Australian microalgal strains fed to Pacific oyster *Crassostrea gigas* spat. Aquaculture 165, 281-293
- Brown, M.R., 1991. The amino-acid and sugar composition of 16 species of microalgae used in mariculture. J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 14, 79-99
- Brown, J.R., 1988. Multivariate analyses of the role of environmental factors in seasonal and site-related growth variations in the pacific oyster *Crassostrea gigas*. Mar. Ecol. Prog. Ser. 45, 225-236
- Brown, J.R. & Hartwick, B., 1988. Influences of temperature, salinity and available food upon suspended culture of the Pacific oyster *Crassostrea gigas*. I. Absolute and allometric growth. Aquaculture 70, 231-251
- Cannuel, R., 2005. Reproduction et développement de deux Mollusques d'intérêt économique : *Crassostrea gigas* et *Megathura crenulata*. Thèse de doctorat, Université de Nantes, pp. 163
- Chauvaud, L., Donval, A., Thouzeau, G., Paulet, Y.M., Nezan, E., 2001. Variations in food intake of *Pecten maximus* (L.) from the Bay of Brest (France): Influence of environmental factors and phytoplankton species composition. Life Sci. 324, 743-755

- Conover, R.J., 1996. Assimilation of organic matter zooplankton. *Limnol. Oceanogr.* 11(3), 338-345
- David, L., 2008. Ingestion, efficacité d'assimilation et absorption de quatre microalgues pour le conditionnement des géniteurs d'*Ostrea edulis* (L.). Rapport de master 2, Université de Bretagne occidentale
- De Crignis, M., 2007. Sources de nourriture et bio-énergétique de l'huître creuse (*C. gigas*) : les nanoflagellés et les ciliés jouent-ils un rôle dans le budget d'énergie dynamique d'huîtres élevées en claire ? Rapport de master 2
- Dupuy, C., Vaquer, A., Lam-Hôai, 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. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 205, 171-184
- Degremont, L., Ernande, B., Bedier, E., Boudry, P., 2007. Summer mortality of hatchery-produced Pacific oyster spat (*Crassostrea gigas*). I. Estimation of genetic parameters for survival and growth. *Aquaculture* 262(1), 41-53
- Enright, C.T., Newkirk, G.F., Craigie, J.S., Castell, J.D., 1986. Evaluation of phytoplankton as diets for juvenile *Ostrea edulis* L. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 96(1), 1-13
- Fegley, S.R., McDonald, B.A., Jacobsen, T.R., 1992. Short-term variations in the quantity and quality of seston available to benthic suspension feeders. *Estuar. Coast. Shelf. Sci.* 34, 393-412
- Filgueira, R., Labarta, U., Fernandez-Reiriz, M.J., 2006. Flow-through chamber method for clearance rate measurements in bivalves: design and validation of individual chambers and mesocosm. *Limnol. oceanogr. methods* 4, 284-292
- Fleury, P.G., Goyard, E., Mazurié, J., Claude, S., Bouget, J.F., Langlade, A., Le Coguc, Y., 2001. The assessing of Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) rearing performances by the IFREMER/REMORA network : method and first results (1993-98) in Brittany (France). *Hydrobiologia* 465, 195-208
- Flores-Vergara, C., Cordero-Esquivel, B., Ceron-Ortiz, A.N., O Arredondo-Vega, B., 2004. Combined effects of temperature and diet on growth and biochemical composition of the Pacific oyster *Crassostrea gigas* (Thunberg) spat. *Aquaculture Res.* 35, 1131-1140
- Helm, M.M. & Bourne, N., 2004. Hatchery culture of bivalves. A practical manual. FAO fisheries technical paper 471, 177 pp
- Iglesias, J.I.P., Navarro, E., Jorna, P.A., Aementia, I., 1992. Feeding, particle selection and absorption in cockle *Cerastodema edule* exposed to variable conditions of food concentration and quality, *J. exp. Mar. Biol. Ecol.* 162, 177-198
- Karentz, D. & Smayda, T.J., 1984. Temperature and seasonal occurrence patterns of 30 dominant phytoplankton species in Narragansett Bay over a 22-year period (1959-1980). *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 18, 277-293
- Kooijman, S.A.L.M., 2000. Dynamic energy and mass budgets in biological Systems. Cambridge University Press, Cambridge 424 pp
- Laing, I. & Millican, P.F., 1986. Relative growth and growth efficiency of *Ostrea edulis* fed various algal diets. *Aquaculture* 54, 245-262

- Langdon, C.J. & Waldock, M.J., 1981. The effect of algal and artificial diets on the growth and fatty acid composition of *Crassostrea gigas* spat. J. Mar. Biol. Assoc. UK 61, 448-453
- Martinez-Fernandez, E., Acosta-Salmon, H., Rangel-Davalos, C., 2004. Ingestion and digestion of 10 species of microalgae by winged pearl oyster *Pteria sterna* (Gould, 1851) larvae. Aquaculture 230(1-4), 417-423
- Meleder, V., Barillé-Boyer, A.L., Baud, J.P., Barillé, L., Cognie, B., Rosa, P., 2001. Modélisation de l'affinage de l'huître *Crassostrea gigas* alimentée avec la diatomée *Skeletonema costatum*. Aquat. Living Resour. 14, 49-64
- Newell, R.I.E. & Jordan, S.J., 1983. Preferential ingestion of organic material by the American oyster *Crassostrea virginica*. Mar. Ecol. Prog. Ser. 13, 47-53
- Numaguchi, K., 2002. Comparison of the ingestion rate, digestion rate and phyto-pigment content in the digestive diverticula of Japanese pearl oyster, *Pinctada fucata martensii*, juveniles grazing six different micro-algae. Bull. Jap. Soc. Sci. Fish. 68(4), 534-537
- Pouvreau, S., Bernard, I., Masson-Neaud, M., Rumèbe, M., Bourles, Y., Le Dantec, W., Alunno-Bruscia, M., Maurer, D., en prép. Modélisation bioénergétique de la croissance et de la reproduction de l'huître creuse (*Crassostrea gigas*) sur les côtes françaises : Application au cas du Bassin d'Arcachon sur la période 1988-2005, Rapport Ifremer
- 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. J. Sea Res. 56, 156-167
- Ren, J.S., Ross, A.H., Hayden, B.J., 2006. Comparaison of assimilation efficiency on diets of nine phytoplankton species of the greenshell mussel *Perna Canaliculus*. J. of Shellfish Res. 25(3), 887-892
- Rico-Villa, B., Bernard, I., Pouvreau, S., Robert, R., en prép. Pour J. Sea Res. N° special AquaDEB avril 2009. Growth dynamic Energy Budget (DEB) model for larvae of Pacific oyster *Crassostrea gigas*
- Rivara, G. & Patricio, R.M., 2004. Lipid enrichment of eastern oyster broodstock for increased larval settlement. J. Shellfish Res. 23(2), 641p.
- Rivero-Rodriguez, S., Beaumont, A.R., Lora-Vilchis, M.C., 2007. The effect of microalgal diets on growth, biochemical composition, and fatty acid profile of *Crassostrea cortiziensis* (Hertlein) juveniles. Aquaculture 263(4), 199-210
- Robert, R., Chretiennot-Dinet, M.-J., Kaas, R., Martin-Jezequel, V., Moal, J., Le Coz, J.-R., Nicolas, J.-L., Bernard, E., Connan, J.-P., Le Dean, L., Le Gourrierec, G., Leroy, B., Quere, C., 2004. Amélioration des productions phytoplanctoniques en éclosérie de mollusques : caractérisation des microalgues fourrage. Rapport Ifremer
- Robert, R., Parisi, G., Pastorelli, R., Poli, B.M., Tredici, M., 2002. The food quality of *Tetraselmis suecica* slurry for *Crassostrea gigas* spat. Haliotis 31, 53-56
- Robert, R., Parisi, G., Rodolfi, L., Poli, B.M., Tredici, M., 2001. Use of fresh and preserved *Tetraselmis suecica* for feeding *Crassostrea gigas* larvae. Aquaculture 192, 333-346

- Romberger, H.P. & Epifanio, C.E., 1981. Comparative effects of diets consisting of one or two algal species upon assimilation efficiencies and growth of juvenile oyster *Crassostrea virginica*. *Aquaculture* 25, 77-87
- Shumway, S.E., 1992. A review of the effects of algal blooms on shellfish and aquaculture. *J. Shellfish Res.* 11(2), pp. 556
- Tenore, K.R., Dunstan, W.M., 1973. Comparison of rates of feeding and biodeposition of the American oyster, *Crassostrea virginica* Gmelin, fed different species of phytoplankton. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 12(1), 19-26
- Thompson, R.J., Bayne, B.L., 1974. Some relationships between growth, metabolism and food in the mussel *Mytilus edulis*. *Marine Biology* 27(4), 317-326
- Thompson, P.A., Guo, M., Harrison, P.J., 1993. The influence of irradiance on the biochemical composition of three phytoplankton species and their nutritional value for larvae of the Pacific oyster (*Crassostrea gigas*). *Mar. Biol.* 117, 259-268
- Underwood A.J., 1997. *Experiments in Ecology*. Ed. Cambridge University Press
- Van Der Veer, H.W., Cardoso, J.F.M.F., Van Der Meer, J., 2006. The estimation of DEB parameters for various Northeast Atlantic bivalve species. *J. Sea Res.* 56, 107-124
- Waechter, M., Le Roux, F., Nicolas, J.-L., Marissal, E., Berthe, F., 2002. Characterisation of *Crassostrea gigas* spat pathogenic bacteria. *Comptes Rendus Biologies* 325(3), 231-238
- Waldock, M.J., Nascimento, J.A., 1979. The triacylglycerol composition of *Crassostrea gigas* larvae fed on different algal diets. *Mar. Biol. Lett.* 1(2), 77-86
- Walne, P.R. & Spencer, B.E., 1974. Experiments on the growth and food conversion efficiency of the spat of *Ostrea edulis* L. in a recirculation system. *J. Cons. Int. Explor. Mer.* 35, 303-318
- Walne, P.R., 1970. Studies on the food value of nineteen genera of algae to juvenile bivalves of the genera *Ostrea*, *Mercenaria* & *Mytilus*. *Fish. Invest. Minist. Agric. Fish Food (G.B.), Ser. II*, 25, pp. 62
- Webb, K.L. & Chu, F.E., 1983. Phytoplankton as food source for bivalve larvae. In: Pruder, G.D., Langdon, C., Conklin, D., (Eds.), *Biochemical and Physiological Approaches to Shellfish Nutrition. Proceedings of the Second International Conference on Aquaculture Nutrition*. Louisiana State University, L.A., 272-291

ANNEXES

a

| Effect | Num DF | Den DF | F value | p value |
|-------------|--------|--------|---------|----------|
| algue | 3 | 8 | 449,63 | < 0,0001 |
| temps | 13 | 104 | 27,52 | < 0,0001 |
| algue*temps | 39 | 104 | 13,89 | < 0,0001 |

b

| Effect | Num DF | Den DF | F value | p value |
|-------------|--------|--------|---------|----------|
| algue | 3 | 4 | 43,82 | 0,0016 |
| temps | 42 | 168 | 19,46 | < 0,0001 |
| algue*temps | 126 | 168 | 27,29 | < 0,0001 |

c

| Effect | Num DF | Den DF | F value | p value |
|-------------|--------|--------|---------|----------|
| algue | 3 | 4 | 457,36 | < 0,0001 |
| temps | 46 | 184 | 91,38 | < 0,0001 |
| algue*temps | 138 | 184 | 154,74 | < 0,0001 |

Annexe 1: Résultats de l'ANOVA à mesures répétées sur l'ingestion en considérant algue et temps comme des facteurs : a) naissain France Turbot du 18 au 26 mars (triplicats) ; b) naissain de France Turbot du 27 mars au 24 avril (duplicats) ; c) naissain d'Argenton

a

| Effect | Num DF | Den DF | F value | p value |
|-------------|--------|--------|---------|---------|
| algue | 3 | 8 | 29,62 | 0,0001 |
| temps | 1 | 152 | 7,64 | 0,0064 |
| algue*temps | 3 | 152 | 1,26 | 0,2916 |

b

| Effect | Num DF | Den DF | F value | p value |
|-------------|--------|--------|---------|----------|
| algue | 3 | 4 | 1,36 | 0,3747 |
| temps | 1 | 332 | 18,14 | < 0,0001 |
| algue*temps | 3 | 332 | 2,25 | 0,0827 |

c

| Effect | Num DF | Den DF | F value | p value |
|-------------|--------|--------|---------|---------|
| algue | 3 | 4 | 2,48 | 0,2009 |
| temps | 1 | 364 | 1,48 | 0,2244 |
| algue*temps | 3 | 364 | 4,03 | 0,0077 |

Annexe 2 : Résultats de l'ANOVA à mesures répétées sur l'ingestion en considérant l'algue comme un facteur et le temps comme une variable continue : a) naissain France Turbot du 18 au 26 mars (triplicats) ; b) naissain de France Turbot du 27 mars au 24 avril (duplicats) ; c) naissain d'Argenton

a

| Label | Estimate | Standard Error | DF | t value | p value |
|---------------|----------|----------------|-----|---------|----------|
| origine Skel | 10,0260 | 0,5291 | 8 | 18,95 | < 0,0001 |
| origine T-iso | 9,5699 | 0,5291 | 8 | 18,09 | < 0,0001 |
| origine Tetra | 4,0197 | 0,5291 | 8 | 7,60 | < 0,0001 |
| origine Thalw | 9,7013 | 0,5291 | 8 | 18,34 | < 0,0001 |
| pente Skel | -0,0015 | 0,0050 | 152 | -0,30 | 0,7683 |
| pente T-iso | 0,0097 | 0,0050 | 152 | 1,94 | 0,0542 |
| pente Tetra | 0,0101 | 0,0050 | 152 | 2,04 | 0,0435 |
| pente Thalw | 0,0092 | 0,0050 | 152 | 1,85 | 0,0666 |
| pente commune | 0,0069 | 0,0025 | 152 | 2,76 | 0,0064 |

b

| Label | Estimate | Standard Error | DF | t value | p value |
|-----------------|----------|----------------|-----|---------|----------|
| origine Skel | 5,6358 | 0,7907 | 4 | 7,13 | 0,0020 |
| origine T-iso | 4,9015 | 0,7907 | 4 | 6,20 | 0,0034 |
| origine Tetra | 5,2621 | 0,7907 | 4 | 6,66 | 0,0026 |
| origine Thalw | 7,0106 | 0,7907 | 4 | 8,87 | 0,0009 |
| origine commune | 5,7025 | 0,3953 | 4 | 14,42 | 0,0001 |
| pente Skel | 0,0043 | 0,0019 | 332 | 2,22 | 0,0269 |
| pente T-iso | 0,0081 | 0,0019 | 332 | 4,20 | < 0,0001 |
| pente Tetra | 0,0016 | 0,0019 | 332 | 0,82 | 0,4110 |
| pente Thalw | 0,0025 | 0,0019 | 332 | 1,27 | 0,2046 |
| pente commune | 0,0041 | 0,0010 | 332 | 4,26 | < 0,0001 |

c

| Label | Estimate | Standard Error | DF | t value | p value |
|---------------|----------|----------------|-----|---------|---------|
| origine Skel | 1,2206 | 0,0831 | 4 | 14,69 | 0,0001 |
| origine T-iso | 1,2065 | 0,0831 | 4 | 14,52 | 0,0001 |
| origine Tetra | 0,9555 | 0,0831 | 4 | 11,50 | 0,0001 |
| origine Thalw | 1,2226 | 0,0831 | 4 | 14,71 | 0,0001 |
| pente Skel | 0,0001 | 0,0002 | 364 | 0,45 | 0,6543 |
| pente T-iso | -0,00003 | 0,0002 | 364 | -0,17 | 0,8621 |
| pente Tetra | -0,0007 | 0,0002 | 364 | -3,55 | 0,0004 |
| pente Thalw | 0,0002 | 0,0002 | 364 | 0,84 | 0,3990 |

Annexe 3 : Résultats de la régression multiple (pentes et ordonnées à l'origine) : a) naissain France Turbot du 18 au 26 mars (triplicats) ; b) naissain de France Turbot du 27 mars au 24 avril (duplicats) ; c) naissain d'Argenton

| Label | Num DF | Den DF | F value | p value |
|------------------------|--------|--------|---------|----------|
| origine Skel vs T-iso | 1 | 8 | 0,37 | 0.5591 |
| origine Skel vs Tetra | 1 | 8 | 64,43 | < 0.0001 |
| origine Skel vs Thalw | 1 | 8 | 0,19 | 0.6758 |
| origine T-iso vs Tetra | 1 | 8 | 55,02 | < 0.0001 |
| origine T-iso vs Thalw | 1 | 8 | 0,03 | 0.8650 |
| origine Tetra vs Thalw | 1 | 8 | 57,66 | < 0.0001 |

| Label | Num DF | Den DF | F value | p value |
|----------------------|--------|--------|---------|---------|
| pente Skel vs T-iso | 1 | 364 | 0,19 | 0.6603 |
| pente Skel vs Tetra | 1 | 364 | 8,00 | 0.0049 |
| pente Skel vs Thalw | 1 | 364 | 0,08 | 0.7794 |
| pente T-iso vs Tetra | 1 | 364 | 5,71 | 0.0174 |
| pente T-iso vs Thalw | 1 | 364 | 0,52 | 0.4720 |
| pente Tetra vs Thalw | 1 | 364 | 9,67 | 0.0020 |

Annexe 4: Résultats de la comparaison : a) des ordonnées à l'origine deux à deux pour le naissain de France Turbot du 18 au 26 mars (triplicats) ; b) des pentes deux à deux pour le naissain d'Argenton

LONGUEUR MOYENNE

France Turbot

| | Thal | t-iso | Skel |
|-------|-------|-------|-------|
| Tetra | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| Thal | - | 1,000 | 1,000 |
| t-iso | - | - | 1,000 |

Argenton

| | Thal | t-iso | Skel |
|-------|-------|-------|-------|
| Tetra | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Thal | - | 1,000 | 0,007 |
| t-iso | - | - | 0,001 |

MASSE TOTALE MOYENNE

France Turbot

| | Thal | t-iso | Skel |
|-------|-------|-------|-------|
| Tetra | 0,024 | 1,000 | 0,010 |
| Thal | - | 0,075 | 1,000 |
| t-iso | - | - | 0,032 |

Argenton

| | Thal | t-iso | Skel |
|-------|-------|-------|-------|
| Tetra | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Thal | - | 0,233 | 0,271 |
| t-iso | - | - | 0,000 |

MASSE COQUILLE MOYENNE

France Turbot

| | Thal | t-iso | Skel |
|-------|-------|-------|-------|
| Tetra | 0,007 | 1,000 | 0,018 |
| Thal | - | 0,034 | 1,000 |
| t-iso | - | - | 0,067 |

Argenton

| | Thal | t-iso | Skel |
|-------|-------|-------|-------|
| Tetra | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Thal | - | 0,000 | 0,000 |
| t-iso | - | - | 0,000 |

MASSE CHAIR HUMIDE MOYENNE

France Turbot

| | Thal | t-iso | Skel |
|-------|-------|-------|-------|
| Tetra | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Thal | - | 0,000 | 1,000 |
| t-iso | - | - | 0,001 |

Argenton

| | Thal | t-iso | Skel |
|-------|-------|-------|-------|
| Tetra | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Thal | - | 0,000 | 0,000 |
| t-iso | - | - | 0,000 |

MASSE CHAIR SECHE MOYENNE

France Turbot

| | Thal | t-iso | Skel |
|-------|-------|-------|-------|
| Tetra | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Thal | - | 0,000 | 0,019 |
| t-iso | - | - | 0,577 |

Argenton

| | Thal | t-iso | Skel |
|-------|-------|-------|-------|
| Tetra | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Thal | - | 0,000 | 0,000 |
| t-iso | - | - | 0,000 |

Annexe 5: Résultat des tests de Kruskal-Wallis entre les conditions d'algues pour les différents paramètres biométriques, pour les huîtres de France Turbot le 24 avril 2008 (à gauche) et d'Argenton le 28 avril 2008 (à droite).

Les espèces phytoplanctoniques majeures des côtes atlantiques françaises sont-elles équivalentes pour la l'ingestion et la croissance et de l'huître creuse (*Crassostrea gigas*)? Réponse par le biais d'une approche expérimentale

Mots-clefs : *Crassostrea gigas*, microalgues, ingestion, croissance, modèle DEB

Les variations spatiales et temporelles de composition et de concentration des espèces phytoplanctoniques, en particulier certaines efflorescences algales, combinées à l'effet de la température, peuvent influencer la prise de nourriture de l'huître creuse *Crassostrea gigas* et avoir des répercussions sur la croissance et la reproduction des individus. Cette étude a permis de préciser et de quantifier l'effet d'espèces de microalgues du littoral atlantique sur la prise de nourriture (ingestion, absorption) et la variabilité des performances de croissance d'huîtres juvéniles, en conditions contrôlées. Trois espèces phytoplanctoniques (*Tetraselmis suecica*, *Skeletonema marinoi*, *Thalassiosira weissflogii*) choisies parmi les espèces dominantes du littoral atlantique, ainsi qu'une espèce classiquement utilisée en écloserie (*t-iso*) ont servi à alimenter des huîtres pendant six semaines. Pour chaque condition d'algue, l'ingestion et l'efficacité d'absorption des huîtres ont été estimées à l'aide de mesures écophysiologicals, et la croissance des huîtres a été mesurée tous les quinze jours. *T. suecica* se distingue des trois autres microalgues, car elle est faiblement ingérée, très peu absorbée par les huîtres, et la croissance de *C. gigas* pour cette algue a été quasiment nulle. L'ensemble des données (croissance, ingestion, absorption des huîtres) ont servi à valider le modèle dynamique de bioénergétique (modèle DEB) actuellement testé sur *C. gigas*, modèle dont le caractère prédictif pourrait permettre de mieux comprendre et de quantifier les conséquences de changements climatiques et écologiques (en l'occurrence de modifications des cortèges phytoplanctoniques dans les écosystèmes littoraux) sur la croissance des huîtres.

Do major marine phytoplanktonic species of the Atlantic French coasts contribute in the same way to ingestion and growth of the Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) ? An experimental approach

Key-words : *Crassostrea gigas*, microalgae, ingestion, growth, Dynamic Energy Budget model

Spatial and temporal variations in the composition and the concentration of phytoplanktonic species, in particular some algal blooms, combined with the effect of the temperature can influence the feeding rate of the Pacific Oyster *Crassostrea gigas*, this factors are likely responsible for variations in growth and reproduction of *C. gigas*. The aim of this study is to specify and to quantify the effect of microalgal species of the Atlantic French coasts on the feeding rate (ingestion, absorption) and the variability in growth performances of oyster spat, under controlled laboratory conditions. Oysters were fed during six weeks with four phytoplankton species: three microalgae are chosen among the major phytoplankton species of the Atlantic coast (*Tetraselmis suecica*, *Skeletonema marinoi*, *Thalassiosira weissflogii*) and a fourth algae species is considered as a classic species used in hatcheries (*t-iso*). The ingestion and the absorption efficiency of oysters were estimated with ecophysiological measurements, for each phytoplankton regime and the oysters' growth was measured every fifteen days. *T. suecica* differed from the three other algae with a very low ingestion and absorption of oysters and nearly null growth. The resulting data (growth, ingestion, absorption) enable to validate the Dynamic Energy Budget model (DEB model), which is currently tested on *C. gigas*. The predictive property of this model could be very helpful to understand the consequences of climatic and ecological changes (specifically, modifications of successions of phytoplankton species in coastal ecosystems) on the oysters' growth.