

Projet BIOMIMÉTISME

« Étude d'opportunité d'une filière d'élevage biomimétique de l'huître creuse dans les bassins conchylicoles de la Nouvelle-Aquitaine »



Rapport d'expérimentation

Mai 2019

Rédaction : **Pierrick BARBIER**
Solène EUSTACHE, Killian RETAILLEAU, Johan VIEIRA
Paul BODIN, Gaël OUDOT

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier tous les partenaires du projet qui nous ont permis de réaliser la première phase du projet Biomimétisme de mars 2018 à février 2019, particulièrement les porteurs du projet, le CRC-AA et CRC-PC, et les partenaires financiers, la région Nouvelle-Aquitaine et les GALPAs-BARVAL et Marennes-Oléron.

Nous tenons également à remercier vivement tous les ostréiculteurs des Bassins d'Arcachon et de Marennes-Oléron pour leur participation et leur disponibilité pour la réalisation de l'enquête.

Sommaire

INTRODUCTION	9
MATERIELS ET METHODES	11
1. SITES D'ETUDE	11
2. MODALITES ZOOTECHNIQUES	12
a. Matériel biologique	12
b. Matériel d'élevage « biomimétique »	13
c. Préparation des lots	13
3. STRATEGIES D'ECHANTILLONNAGE	14
4. ACQUISITION DES DONNEES	15
a. Survie et croissance pondérale	15
b. Mesures biométriques	15
c. Calcul des indices	16
d. Estimation de la prédation et du captage d'huître creuse	16
e. Estimation du temps de traitement et des coûts	16
5. ANALYSE DES DONNEES	17
RESULTATS	18
1. MORTALITE CUMULEE	18
2. CROISSANCE PONDERALE	19
3. RENDEMENT D'ELEVAGE	21
4. INDICES BIOMETRIQUES	22
a. Indice de longueur	23
b. Indice de remplissage	24
c. Indice de qualité	25
d. Chambrage à <i>Polydora sp</i>	25
5. ESTIMATION DE LA PREDATION ET DU CAPTAGE D'HUITRE CREUSE	26
a. Prédation	26
b. Captage d'huître creuse	27
6. ESTIMATION DU TEMPS DE TRAITEMENT ET DES COUTS	28
a. Confection d'un cadre biomimétique	28
b. Récupération des huîtres biomimétiques	29
c. Coûts matériel de l'élevage biomimétique	30
7. OBSERVATIONS DIVERSES ASSOCIEES A LA CULTURE BIOMIMETIQUE	31
a. Forme du naissain	31
b. Colonisation	31
c. Envasement	32
DISCUSSION	33
1. CONTRAINTES ZOOTECHNIQUES	33
a. Fixation sur cadre et récupération des huîtres	33
b. Envasement	34
c. Captage et colonisation	34
d. Prédation	35
2. PERFORMANCES D'ELEVAGE	35
a. Origine du naissain	35
b. Mortalité, croissance et rendements d'élevage	36
c. Qualité de la production	38
d. Homogénéité de la production	40

3.	ADAPTATION PROFESSIONNELLE DE L'ELEVAGE BIOMIMETIQUE	40
a.	Choix de la méthode biomimétique	40
b.	Optimisation par mécanisation	41
c.	Entretien des cadres et choix des sites	41
d.	Rentabilité et valorisation du produit	42
	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	43
	BIBLIOGRAPHIE	44
	ANNEXES	47

Liste des figures

FIGURE 1 : LOCALISATION DES SITES EXPERIMENTAUX DU BASSIN D'ARCACHON	11
FIGURE 2 : LOCALISATION DES SITES EXPERIMENTAUX DU BASSIN DE MARENNES-OLERON	12
FIGURE 3 : PREPARATION DES CADRES D'ELEVAGE "BIOMIMETIQUE". MODALITE A. « BIOMIMETISME HORIZONTAL » ; B. « BIOMIMETISME VERTICAL » DES 18 ET 30 MOIS ; C. « BIOMIMETISME VERTICAL » DU NAISSAIN ; D. DISPOSITION DES CADRES SUR PARC A PROXIMITE DES TEMOINS « POCHE ».	14
FIGURE 4 : ECHEANCIER D'ECHANTILLONNAGE	15
FIGURE 5 : MORTALITE CUMULEE (%), MESUREE EN AOUT ET DECEMBRE 2018, DES HUITRES DES 3 CLASSES D'AGE EN FONCTION DU TYPE D'ELEVAGE ET DU BASSIN OSTREICOLE. VALEUR MOYENNE ± ECART-TYPE.	19
FIGURE 6 : CROISSANCE INDIVIDUELLE (G), MESUREE EN AOUT ET DECEMBRE 2018, DES HUITRES DES 3 CLASSES D'AGE EN FONCTION DE LA METHODE D'ELEVAGE ET DU BASSIN OSTREICOLE. VALEUR MOYENNE ± ECART-TYPE.	20
FIGURE 7 : RENDEMENT D'ELEVAGE (KG/1000 HUITRES) A LA FIN DE L'EXPERIMENTATION POUR LES TROIS CLASSES D'AGE EN FONCTION DU BASSIN OSTREICOLE ET DE LA METHODE D'ELEVAGE. LES LIGNES POINTILLEES REPRESENTENT LA VALEUR 0. VALEUR MOYENNE ± ECART-TYPE.	22
FIGURE 8 : INDICE DE LONGUEUR DES INDIVIDUS DES TROIS CLASSES D'AGE AU DEBUT (EN NOIR) ET EN FIN D'EXPERIMENTATION EN FONCTION DU BASSIN OSTREICOLE ET DE LA METHODE D'ELEVAGE (VERT ET BLEU). LES LIGNES POINTILLEES REPRESENTENT LA VALEUR SEUIL DE 3. VALEUR MOYENNE ± ECART-TYPE.	24
FIGURE 9 : A. INDICE DE REMPLISSAGE (IQ) ET B. INDICE DE QUALITE (IQ) DES HUITRES DE 30 MOIS EN FONCTION DU BASSIN OSTREICOLE ET DE LA METHODE D'ELEVAGE. LES LIGNES POINTILLEES REPRESENTENT LA VALEUR SEUIL DE DIFFERENCIATION DES HUITRES FINES ET SPECIALES 10,5. VALEURS MOYENNES ± ECART-TYPE.	25
FIGURE 10 : A. PROPORTION D'INDIVIDUS POUR CHAQUE NIVEAU D'INDICE DE CHAMBRAGE A POLYDORA SP ; B. VALEURS MOYENNES ± ECART-TYPE DE L'INDICE DE CHAMBRAGE, DES HUITRES DE 30 MOIS EN DECEMBRE 2018 EN FONCTION DU BASSIN OSTREICOLE ET DE LA METHODE D'ELEVAGE. LES VALEURS INDIQUEES AU-DESSUS DE CHAQUE BARRE CORRESPONDENT AU NOMBRE D'INDIVIDUS IDENTIFIES. LA LIGNE ROUGE CORRESPOND A LA VALEUR MOYENNE DE L'INDICE DE CHAMBRAGE POUR CHAQUE BASSIN OSTREICOLE.	26
FIGURE 11 : A. TROUS DE BIGORNEAUX PERCEURS SUR LA VALVE SUPERIEUR D'UNE COQUILLE D'HUITRES ELEVEE EN BIOMIMETIQUE ; B. NAISSAIN CAPTE SUR UNE HUITRE DE 18 MOIS ELEVEE EN BIOMIMETIQUE	27
FIGURE 12 : NOMBRE DE RECRUES D'HUITRE CREUSE CAPTEES EN 2018 SUR LES INDIVIDUS ELEVES EN FONCTION DE LA METHODE D'ELEVAGE ET DE LA CLASSE D'AGE. LE DENOMBREMENT EST EFFECTUE EN DECEMBRE 2018, SUR LES ECHANTILLONS DU BASSIN D'ARCACHON ET UNIQUEMENT SUR LES INDIVIDUS RETROUVES VIVANTS. VALEURS MOYENNES ± ECART-TYPE	28
FIGURE 13 : ETAPES DE CONFECTION D'UN CADRE BIOMIMETIQUE A. DEPOT DES PLOTS DE CIMENT ; B. POSITIONNEMENT DES HUITRES SUR LES PLOTS ; C. STOCKAGE DES CADRES POUR LE SECHAGE ; D. STOCKAGE DES CADRES LORS DU TRANSPORT EN MER	29
FIGURE 14 : A. NAISSAIN BIOMIMETIQUE AVEC UN ARRACHEMENT PARTIEL DE LA COQUILLE (FLECHE NOIRE) ; B. NAISSAIN BIOMIMETIQUE EN FORME D'ARCHE ; C. NAISSAIN BIOMIMETIQUE ACCROCHE AU CADRE AVEC UNE EXCROISSANCE COQUILLAIRE (FLECHE NOIRE) ; D. HUITRES DE 18 MOIS EN BIOMIMETISME VERTICAL COLONISEE PAR DES ŒUFS DE BIGORNEAUX (FLECHE NOIRE) ; E. COQUILLE D'HUITRE BIOMIMETIQUE COLONISEE PAR UNE CREPIDULE (FLECHE BLANCHE)	31
FIGURE 15 : A. CADRE BIOMIMETIQUE DU BASSIN DE MARENNES-OLERON (SITE MORTANE) RECOUVERT DE MOULE COMMUNE ; B. CADRE BIOMIMETIQUE DU BASSIN D'ARCACHON COLONISE PAR DES ALGUES VERTES ET ROUGES ; C. CADRE BIOMIMETIQUE DU BASSIN DE MARENNES-OLERON (SITE VIANDET) ENSEVELI SOUS LE SEDIMENT, OBSERVE EN JANVIER 2019. LES CADRES BIOMIMETIQUES SONT DELIMITES PAR LES LIGNES POINTILLEES ROUGE.	32

Liste des tableaux

TABEAU 1: POIDS TOTAL INDIVIDUEL (G) DES HUITRES LORS DE LA MISE A L'EAU EN FONCTION DE LEUR CLASSE D'AGE ET DU BASSIN OSTREICOLE	13
TABEAU 2 : POIDS TOTAL INDIVIDUEL (G) INITIAL ET FINAL DES HUITRES EN FONCTION DU BASSIN, DE L'AGE ET DE LA METHODE D'ELEVAGE	21
TABEAU 3 : A. TEMPS AFFECTES A LA CONFECTION DES CADRES BIOMIMETIQUES (SECONDE ; 56 HUITRES PAR CADRE) ET EQUIVALENT POUR 100 HUITRES COLEES (MINUTE) ; B. TEMPS AFFECTES A LA RECUPERATION DES HUITRES LORS DU BILAN FINAL POUR LE TRAITEMENT COMPLET D'UN CADRE (MINUTE), RAPPORTES A UNE HUITRE VIVANTE (SECONDE) ET EQUIVALENT POUR 100 HUITRES VIVANTES (MINUTES), EN FONCTION DE LA METHODE D'ELEVAGE ET DU BASSIN OSTREICOLE. VALEURS MOYENNES AJUSTE AU TRAVAIL D'UNE PERSONNE.	30
TABEAU 4 : NOTATION DES PERFORMANCES D'ELEVAGE OBTENUES POUR LES ZOOTECHNIQUES BIOMIMETIQUES ET AU SOL EN COMPARAISON AVEC L'ELEVAGE EN POCHE SURELEVEE, POUR CHAQUE CLASSES D'AGE ETUDIEE. LES CRITERES DE NOTATION SONT LA CROISSANCE, LA SURVIE, LE RENDEMENT, L'INDICE DE LONGUEUR (IL) ET L'INDICE DE QUALITE (IQ ; UNIQUEMENT SUR LES 30 MOIS). UNE NOTE DE 0 CORRESPOND A AUCUNE DIFFERENCE SIGNIFICATIVE AVEC L'ELEVAGE EN POCHE ; UNE NOTE DE 1 ET -1 CORRESPONDENT, RESPECTIVEMENT, A UNE DIFFERENCE SIGNIFICATIVE SUPERIEURE ET INFERIEURE A L'ELEVAGE EN POCHE ; UNE NOTE DE 2 CORRESPOND A UNE DIFFERENCE SIGNIFICATIVE ENTRE DEUX METHODES BIOMIMETIQUES ET L'ELEVAGE EN POCHE.	41

Introduction

Les pratiques ostréicoles ont subi, au fur et à mesure des années, de profonds changements dans les techniques d'élevage et les matériels employés. Les ostréiculteurs se sont adaptés aux contraintes environnementales et économiques suite aux différents épisodes d'épizooties qui ont touché le milieu et à l'évolution du secteur commercial. Précédemment élevées à même le sol, les années 1960 ont vu apparaître la poche ostréicole qui permettait une production plus importante tout en limitant l'impact des conditions météorologiques et des prédateurs sur les huîtres élevées. Cela diminuait également les besoins en entretien tout en proposant des individus de meilleure qualité à la vente. Enfin, cela a permis d'étendre les surfaces d'élevage sur le domaine maritime (Labrid C., 1969).

Aujourd'hui, d'un point de vue spatial, les cultures se sont concentrées sur les secteurs les plus productifs, délaissant les zones de moindre intérêt. La production c'est intensifiée (Labrid 1969 ; Blanchet 2004), influençant fortement le milieu naturel. De nombreux inconvénients liés à ce mode d'élevage ont été mis en évidence. On peut, par exemple, évoquer l'augmentation des problèmes de risques zosanitaires liés à une trop grande concentration d'animaux ou encore la compétition trophique qui en découd et qui limite la croissance non seulement des individus élevés mais aussi de tous les autres organismes vivants d'un bassin (Diederich et al. 2005 ; Rice 2001). Au niveau visuel et morphologique, l'intensification des pratiques et le manque de contrôle sur l'espèce a induit l'apparition de friches ostréicoles, supports d'organismes compétiteurs et/ou prédateurs de *Crassostrea gigas*. Ces sites abandonnés et les structures d'élevage posent également problème dans la gestion de l'envasement du milieu.

Ainsi, au regard des investissements humains, des coûts de production actuels très importants et des performances d'élevage en baisse, le recours massif à l'élevage en surélevé n'apparaît donc pas complètement satisfaisant et durable.

Ce projet a pour objectif de proposer une technique alternative de culture à plat, utilisable par l'ensemble des professionnels, qui soit économiquement et environnementalement viable sur le long terme. Soutenu par les CRC Bassin d'Arcachon (CRC-AA) et Poitou-Charentes (CRC-PC), ce projet émergent d'un enjeu collectif pour l'amélioration des pratiques est nécessaire pour pérenniser la filière ostréicole. Pour cela, les moyens de production, qu'ils soient humains ou matériels, doivent être orientés vers un élevage extensif permettant de conserver un environnement en bonne santé pour les années futures. Une meilleure répartition des élevages au sein des Bassins en réhabilitant certains secteurs et en multipliant les techniques d'élevage semble aujourd'hui être la meilleure orientation à suivre.

L'objectif étant de conserver ou d'améliorer la qualité des produits proposés à la vente, la multiplicité des pratiques apporterait des produits différents pouvant être intéressants d'un point de vue commercial.

Dans ce contexte, le « biomimétisme » paraît être une des solutions les plus appropriées pour l'adaptation de nouvelles méthodes d'élevage. Il est défini comme « l'imitation technique des processus mis en œuvre par la nature » et consiste à reproduire artificiellement une ou plusieurs propriétés d'un organisme vivant (Benyus 2002). La fixation de l'huître à un support rigide sera la caractéristique spécifique exploitée dans cette étude. Déjà en partie explorée en Méditerranée avec le collage sur cordes, ce mode d'élevage suspendu a montré sa performance en termes de croissance. Les mêmes observations peuvent également être faites sur les individus sauvages qui semblent bénéficier de conditions plus propices à leur croissance. Pour autant, cette technique doit être adaptée à son secteur d'utilisation.

L'objectif majeur de cette étude est d'initier le développement d'une nouvelle méthode d'élevage « biomimétique » de l'huître creuse, en recherchant les conditions zootechniques idéales à l'obtention de performances d'élevage optimales. Cette méthode doit être reproductible par la profession et économiquement intéressante pour se développer. L'ensemble des nouvelles techniques employées devra être compétitif par rapport aux pratiques traditionnellement utilisées aujourd'hui dans les principaux bassins ostréicoles.

Ainsi, le but de cette étude est d'expérimenter une nouvelle zootechnie « biomimétique » de façon à valider une méthode adaptable à la profession. Les problématiques de disposition des huîtres sur le support, les classes d'âges utilisées et le nombre d'individus seront les paramètres testés de cette expérimentation. Les résultats obtenus en termes de mortalité et de croissance permettront entre autres de définir les catégories d'huîtres les plus intéressantes à élever selon cette méthode. La multiplicité des sites d'étude et l'analyse de certains facteurs environnementaux permettront ensuite d'orienter les choix vers les zones les plus propices à ce type d'élevage. Enfin, les coûts de production en termes de matériel, de temps d'intervention et de rendement final discutés à l'échelle de cette étude, apportant une première piste de réflexion quant à l'application à une échelle professionnelle.

Matériels et méthodes

1. Sites d'étude

L'expérimentation a été réalisée sur les bassins conchylicoles d'Arcachon (BA) et de Marennes-Oléron (BMO). Au total, 10 parcs ont servi de site d'études avec 7 sites pour le BA (Figure 1) et 3 pour le BMO (Figure 2). Le CRC-AA, étant à l'origine du projet, et le stage de Master 2^{ème} année de Killian Retailleau, ayant été réalisé à l'antenne du CREEA à Gujan-Mestras, ont permis la mise en place des expérimentations à plus grande échelle dans le Bassin d'Arcachon. Trois types de parcs ont été sélectionnés dans le BA :

- Des parcs d'élevage traditionnel au sol : *Canelon 2, Reousse 2, Humeyre* ;
- Des parcs d'élevage en surélevé en poche (sur table) : *Belisaire, Canelon 1, Reousse 1* ;
- Un parc réhabilité depuis 2015 : *Mapouchet*.

Ces parcs sont découvrant à un coefficient de 55 et leur localisation est représentative des différents secteurs ostréicoles du BA. Ces 3 types d'environnement constituent l'ensemble des zones aujourd'hui exploitées sur le BA.

Dans le Bassin de Marennes-Oléron, les expérimentations ont été de moins grande ampleur puisqu'elles ont été réalisées sur 3 sites (découvrant à un coefficient de 70) déjà utilisés dans le cadre de l'Observatoire ostréicole du CREEA. Il s'agit des sites de *Mortane, Viandet* et *Chevalier*. Ces sites sont représentatifs des parcs de demi-élevage utilisés dans un cycle d'élevage du BMO. Ces parcs sont exclusivement dédiés à l'élevage surélevé en poche.

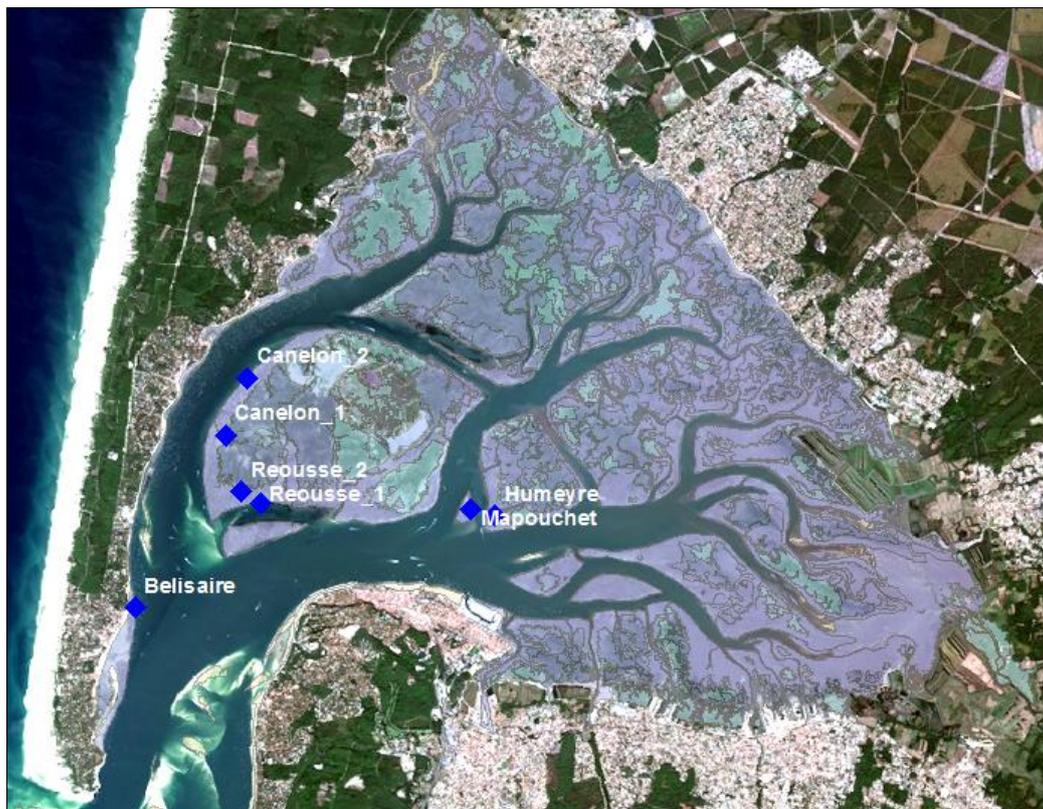


Figure 1 : Localisation des sites expérimentaux du Bassin d'Arcachon

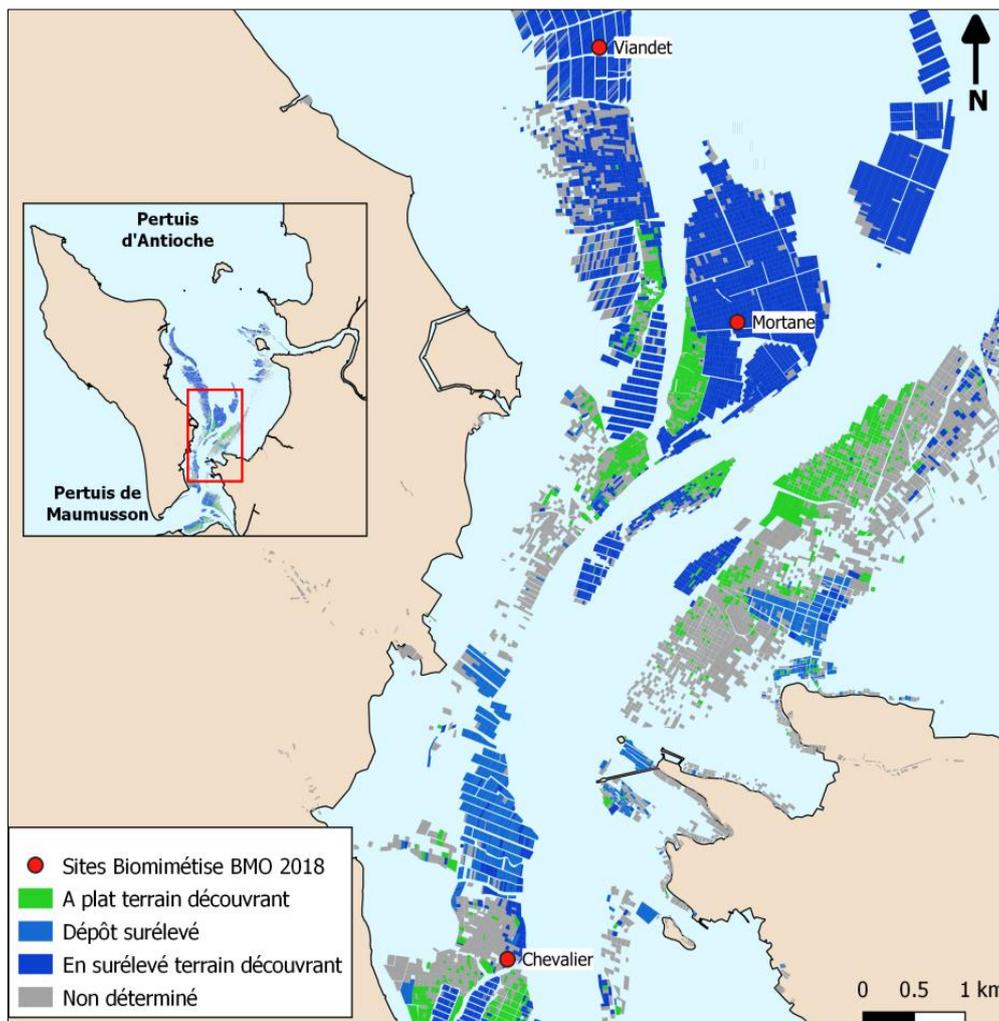


Figure 2 : Localisation des sites expérimentaux du Bassin de Marennes-Oléron

2. Modalités zootechniques

L'expérimentation a pour but d'évaluer les performances d'élevage d'huîtres selon une méthode « biomimétique » en les comparant avec celles obtenues par les méthodes d'élevage traditionnelles. Ces dernières concernent principalement l'élevage surélevé en poche et, dans une moindre mesure, l'élevage au sol. Ainsi, les modalités d'élevage « poche » et « sol » correspondent aux témoins de l'expérimentation.

Les modalités « biomimétiques » sont de deux types : « Biomimétisme horizontal » (Figure 3a) et « Biomimétisme vertical » (Figure 3bc).

a. Matériel biologique

Pour chacun des bassins, les huîtres utilisées sont issues de leur propre production de façon à inhiber un biais lié au changement d'environnement tout en favorisant la production locale. De ce fait, aucun lot n'est commun entre les deux bassins, se traduisant par des différences entre les poids totaux à la mise à l'eau pour une classe d'âge (Tableau 1). Des huîtres de trois classes d'âge ont été mises en élevage simultanément dans les deux secteurs d'étude :

- « Naissain » de 2017. Dans le BA, ce naissain provient de deux origines, l'une issue d'un captage sur coupelles et l'autre sur tuiles. Ainsi, de façon à explorer les conditions d'élevage employées par la profession, l'origine du naissain est un facteur testé ;
- Huîtres de « 18 mois », effectuant leur 2nd année d'élevage ;

- Huîtres de « 30 mois », dites « boudeuses » par les professionnels car elles correspondent à un retour de calibre 5 à « 6 » après leur 3^{ème} année d'élevage sur parc, leur taille et qualité n'étant pas satisfaisante pour leur commercialisation. Cette technique pourrait représenter une opportunité pour relancer la croissance de ces individus car le changement d'environnement et la proximité du sol peut leur faire bénéficier de ressources alimentaires peu exploitées.

Tableau 1: Poids total individuel (g) des huîtres lors de la mise à l'eau en fonction de leur classe d'âge et du bassin ostréicole

	Bassin d'Arcachon	Bassin de Marennes-Oléron
Naissain	1,5	2,1
18 mois	15,8	14,8
30 mois	25,7	32,3

b. Matériel d'élevage « biomimétique »

Une structure d'élevage de la modalité « Biomimétisme » est nommée « cadre » dans le reste de cette étude. Il est composé d'un support sur lequel des plots de ciment gris (mélange avec de l'eau) sont disposés à égale distance les uns des autres. Il y a 56 plots, répartis en 7 colonnes et 8 lignes, pour le « Biomimétisme horizontal » et 40 plots, répartis en 5 colonnes et 8 lignes, pour le « Biomimétisme vertical » (Figure 3).

Deux supports sont réalisés à partir d'une poche ostréicole de maille 9 mm. Celle-ci, une fois coupée dans sa longueur en deux parties égales, donne deux surfaces planes de 0,5 m de large et 1 m de longueur chacune. Ce support a été privilégié car il permet le recyclage de matériel usagé et ne nécessite donc pas d'achat spécifique. La présence d'un maillage permet au ciment d'adhérer au support. Le choix d'interstices de 9mm a été opté suite à des essais préalables. Les mailles plus petites permettent une plus grande surface de contact entre le support et le ciment mais ce dernier pénètre moins facilement à travers les mailles, limitant ainsi l'emprisonnement du plastique. Les mailles plus grosses permettent une bonne répartition du ciment des deux cotés du support mais fournissent moins de surface de contact, limitant la stabilité du collage. De ce fait, cette taille moyenne semble la mieux adaptée.

c. Préparation des lots

Pour les huîtres témoins élevées en « poche », le naissain est élevé en maille de 5 mm avec une densité de 500 ind./poche, le 18 mois est en maille de 9 mm avec 250 ind./poche et le 30 mois est en maille 14 mm à 180 ind./poche. Ces densités sont celles pratiquées pour les différents suivis effectués par le CREEA et elles permettent le meilleur rendement possible des structures sans dédoublement au cours de l'année.

Le témoin « élevage à plat » ne concerne que les huîtres de 18 mois, afin de correspondre aux pratiques professionnelles, et n'a été testé que dans le BA. Des enclos carrés de 2 m² ont été fabriqués à partir d'un grillage de maille 9 mm et de piquets en bois. Ces enclos sont placés de façon à empêcher les déplacements d'huîtres liés aux conditions météorologiques et courantologiques. Cela permet de déterminer la mortalité effective sans perte d'individus. A l'intérieur des enclos, 500 huîtres ont été semées permettant d'obtenir une densité d'élevage au sol de 250 ind./m².

Les deux types de modalités « biomimétiques » ont été testés pour chaque classe d'âge et origines du naissain. Ces modalités diffèrent par la méthode de collage et la densité d'huître sur chaque structure :

- « Biomimétisme horizontal » : collage à plat des huîtres, un individu par plot de ciment, pour une densité de 56 ind./cadre (Figure 3a);

- « Biomimétisme vertical » : collage de deux huîtres par plot de ciment pour les 18 et 30 mois, menant à une densité de 80 ind./cadre (Figure 3b). Le naissain est collé par trois sur un plot de ciment, soit 120 ind./cadre (Figure 3c).

Les densités et la disposition des huîtres permettent d'éviter le contact entre ces dernières. Il est recommandé de coller minutieusement les huîtres sur le ciment en s'assurant de ne pas trop enfoncer la valve inférieure (collage horizontal) ou de ne pas empêcher l'ouverture des valves (collage vertical). Sur site, les cadres sont déposés à même le sol, côte à côte et à proximité des modalités d'élevage témoins (Figure 3d). Ils sont fixés à l'aide de sardines métalliques (Bassin d'Arcachon) ou de piquets en métal aux 4 coins (Bassin de Marennes-Oléron).



Figure 3 : Préparation des cadres d'élevage "biomimétique". Modalité **a.** « Biomimétisme horizontal » ; **b.** « Biomimétisme vertical » des 18 et 30 mois ; **c.** « Biomimétisme vertical » du naissain ; **d.** Disposition des cadres sur parc à proximité des témoins « poche ».

3. Stratégies d'échantillonnage

Pour chacune des modalités, 4 réplicats ont été mis en place sur chaque site ainsi qu'une des deux modalités témoins, représentative des pratiques de la zone (*i.e.* « poche » ou « élevage à plat »). Les huîtres de 18 et 30 mois ont été positionnées sur sites entre le 16 et le 21 mai et entre le 23 et 29 mai 2018, respectivement. La mise sur parc du naissain a été effectuée entre le 25 juin et le 6 juillet 2018, après le pic de mortalité estivale. A la mi-juillet, des sorties sur le terrain ont été effectuées pour observer les mortalités sur les cadres suite à leur mise à l'eau.

En août 2018, un point d'échantillonnage intermédiaire est réalisé afin d'analyser les performances d'élevage comparé des différentes modalités. Pour se faire, sur chaque site, un cadre de chaque modalité biomimétique est retiré et une poche de modalité témoin de chaque classe d'âge est analysée. Concernant la modalité témoins « sol », un échantillonnage non sélectif est réalisé dans chaque enclos pour déterminer la mortalité effective. Pour chacun de ces témoins (poche et sol), 30 huîtres sont retirées pour analyse en laboratoire. En décembre 2018 (Figure 4), le bilan final de cette expérimentation est réalisé, de manière identique à l'échantillonnage du mois d'août.

Ainsi, l'unité d'échantillonnage utilisée dans cette expérimentation est une structure de chaque modalité d'élevage (i.e. le cadre, la poche et l'enclos).

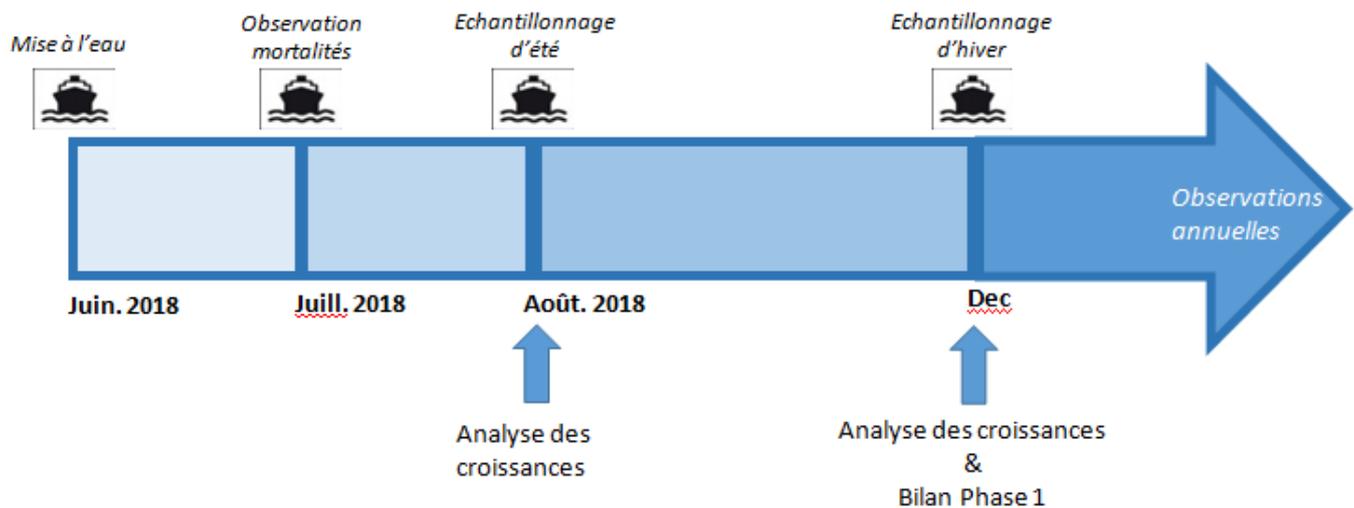


Figure 4 : Echancier d'échantillonnage

4. Acquisition des données

a. Survie et croissance pondérale

Les variables mesurées sont le nombre d'individus vivants, permettant d'obtenir le pourcentage de mortalité (ou de survie ; %), et le poids total de ces derniers (g), permettant d'estimer le poids total individuel et la croissance pondérale ($\text{poids}_{\text{final}} - \text{poids}_{\text{initial}} = \text{gain de poids}$), pour chacune des classes d'âge et modalités d'élevage. Les pesées s'effectuent sur des individus propres (lavage à la brosse, captage de l'année en cours détrouqué).

Modalité « poche » : Le contenu de la poche est vidé, les huîtres vivantes et mortes (uniquement la valve inférieure lorsque les deux valves sont détachées) sont comptées et les huîtres vivantes sont pesées. 30 huîtres sont retirées d'une poche de prélèvement pour les analyses en laboratoire

Modalités « Biomimétisme » : les huîtres vivantes, mortes (au moins une valve sur le plot en ciment) et disparues (plot en ciment sans coquille) sont dénombrées directement sur le cadre. Les huîtres vivantes sont détachées du support et/ou du ciment pour être pesées.

Modalité « élevage à plat » : Dans chacun des enclos témoins (3 par site), 60 huîtres sont prélevées au hasard et le nombre de mortes/vivantes compté (nombre de vivantes / 180 huîtres). 30 huîtres (10 de chaque structure) sont retirées pour analyse au laboratoire.

b. Mesures biométriques

Les mesures individuelles de longueur (mm), largeur (mm), épaisseur (mm) et poids total (g) sont réalisées sur 30 individus de chaque lot (modalité d'élevage, classe d'âge, site). Concernant les 30 mois, des indices de qualité (IQ) et de chambrage à *Polydora sp* sont effectués. Pour ce faire, 30 individus sont disséqués, le poids de coquille et le poids de chaire égoutté mesurés (AFNOR - NF V45-056, 1985) et l'intensité du chambrage à *Polydora sp* estimée visuellement.

c. Calcul des indices

- L'indice de qualité (IQ) correspond au pourcentage du poids de chair par rapport au poids total de l'individu avant ouverture. Les huîtres « fines » sont définies par un IQ entre 6,5 et 10,5 exclus et les « spéciales » par un IQ supérieur à 10,5. La formule de l'IQ est la suivante :

$$\frac{\text{Poids chair}_{\text{égouttée}}}{\text{Poids total}} \times 100$$

- L'indice de remplissage (IR), utilisable comme proxy de la proportion d'eau intervalvaire, sa formule est la suivante :

$$\frac{\text{Poids chair}_{\text{égouttée}}}{\text{Poids total} - \text{Poids coquille}} \times 100$$

- L'indice de longueur (IL) permet de qualifier une huître « longue » s'il est supérieur à 3, et il est défini comme suit :

$$\frac{\text{Longueur} + \text{Epaisseur}}{\text{Largeur}}$$

- L'indice de chambrage à *Polydora sp* est évalué qualitativement par l'examen macroscopique de la valve la plus infestée. Il se répartit en 5 classes d'infestation croissante (de 0 à 4), définies par le protocole Ifremer du réseau REMORA (1993).
- Le rendement est calculé selon la formule du rendement biologique (Rdt_{bio}). Il définit le gain de biomasse obtenu au temps t par rapport à la biomasse initiale à t_0 , prenant ainsi en compte les paramètres de survie et de croissance. Cette valeur est en kilogramme (kg) pour 1000 individus utilisés au temps t_0 . Il se calcule de la manière suivante :

$$\frac{(\text{Biomasse}_{\text{finale}} - \text{Biomasse}_{\text{initiale}})}{\text{Nombre d'individus}_{\text{initial}}}$$

d. Estimation de la prédation et du captage d'huître creuse

En décembre, le comptage du nombre de trous recensés sur les huîtres mortes a été réalisé pour chaque classe d'âge et modalité d'élevage afin d'estimer l'intensité de la prédation par les bigorneaux perceurs (Figure 11a).

L'année 2018 dans le Bassin d'Arcachon a été marquée par une année de fort captage d'huître creuse, se traduisant par la seconde meilleure année depuis 10 ans (Béchade et al. 2018). Ainsi, les recrues d'huîtres creuses captées pendant l'été 2018 sur les huîtres en élevage (Figure 11b), ont été détachées pour ne pas fausser le poids total des individus de l'expérimentation. Sur une dizaine d'échantillons de chaque classe d'âge, le nombre total de recrues a été compté et le poids mesuré. Pour les autres échantillons, uniquement le poids total des recrues a été mesuré, permettant d'estimer leur nombre.

e. Estimation du temps de traitement et des coûts

Lors de la mise en place des cadres biomimétiques en mai et juin 2018 et de l'échantillonnage final en décembre 2018, le temps de traitement des cadres biomimétiques a été chronométré. Les étapes de ce traitement correspondent, dans un premier temps, au positionnement des plots de ciment sur les cadres et le collage des huîtres, puis, dans un second temps, au lavage du cadre, décollage des huîtres « supposées » vivantes (deux valves fermées et intactes) et à l'enlèvement du reste de ciment accroché à l'huître décollée.

5. Analyse des données

L'ensemble des données est présenté dans le texte sous forme de moyenne en fonction du type d'élevage et de la classe d'âge. Lorsque cela sera jugé pertinent, la variabilité des résultats sera présentée sous la forme d'écart-type. Les tests de comparaison de moyennes utilisés sont une ANOVA à un facteur suivi d'un test post-hoc de Tukey HSD. Les conditions d'application de ces tests paramétriques sont vérifiées par l'utilisation d'un test de Shapiro-Wilk (normalité) sur les résidus de l'ANOVA à un facteur et un test de Bartlett (homoscédasticité). En cas de non-normalité ou d'hétéroscédasticité des données, le test non-paramétrique de comparaison de moyenne de Kruskal-Wallis est réalisé. Le seuil de significativité utilisé pour les tests de normalité, d'homoscédasticité et de comparaisons de moyennes est $\alpha < 0,05$. L'ensemble des données sont traitées avec les logiciels R et RStudio® (version 1.1.453).

Résultats

1. Mortalité cumulée

Bassin d'Arcachon

Avant tout, les résultats des mortalités concernant le naissain capté sur coupelles et sur tuiles ne montrent aucune différence significative en fonction des modalités d'élevage et de la date d'échantillonnage. Ainsi, les données issues de ces deux origines de naissain seront traitées ensemble sous le terme « Naissain » dans le reste de cette partie.

En août 2018, la mortalité observée pour le naissain en poche est de 11 %, significativement plus faible que celles des naissains biomimétiques s'élevant à 33 % (Figure 5). En décembre, les mortalités du naissain en poche et du naissain collé horizontalement ne diffèrent pas statistiquement et sont de 31 % et 41 %, respectivement. Cependant le naissain collé verticalement montre une mortalité significativement supérieure à celle des autres, à hauteur de 52 % (Figure 5).

Lors du bilan final, les huîtres de 18 mois des 4 modalités d'élevage ont subi des mortalités de même ampleur, à savoir 31 %. Néanmoins, il est à noter que ces différences non significatives sont dues à la grande variabilité des résultats obtenus pour les deux types d'élevage biomimétiques et pour l'élevage traditionnel à plat. En effet, alors que la mortalité mesurée dans les poches est de 23 % ($\pm 0,6$), celles des autres modalités d'élevage varient de ± 30 % à ± 37 % (Figure 5).

Concernant les huîtres de 30 mois, alors que la survie semble similaire en août entre les huîtres des différentes modalités d'élevage, l'évolution des mortalités a tendance à différencier l'élevage en poche de l'élevage biomimétique en décembre 2018. Bien que les différences ne soient pas significatives, la mortalité des huîtres en poche, de 24 %, tend à être inférieure à celles des huîtres en biomimétisme vertical et horizontal, 43 % et 45 % respectivement (Figure 5).

Bassin de Marennes-Oléron

Lors du bilan final de décembre 2018, les huîtres de toutes les classes d'âge élevées selon une méthode biomimétique ont subi des mortalités significativement supérieures, de 2 à 6 fois, à celles élevées traditionnellement en poche (Figure 5). Il est à noter que ces différences significatives s'observaient dès le mois d'août pour le naissain et les huîtres de 30 mois. De plus, pour chaque classe d'âge, les valeurs de mortalité ne sont pas différentes entre les deux modalités biomimétiques. Ainsi les mortalités cumulées pour le naissain, après 5 mois d'expérimentation, sont de 19 % en poche, 74 % et 80 % en élevage biomimétique horizontal et vertical, respectivement. De plus, les mortalités varient grandement entre les échantillons biomimétiques, se traduisant par une étendue de 45 % à 96 % (Figure 5). Pour les huîtres de 18 mois, les mortalités cumulées après 7 mois d'expérimentation s'élèvent à 41 % en poche, 83 % en biomimétisme horizontal et 95 % en biomimétisme vertical. Concernant les huîtres de 30 mois, 11 % des huîtres sont mortes contre 66 % et 69 % des huîtres collées à l'horizontal et verticalement, respectivement, après 7 mois d'expérimentation (Figure 5).

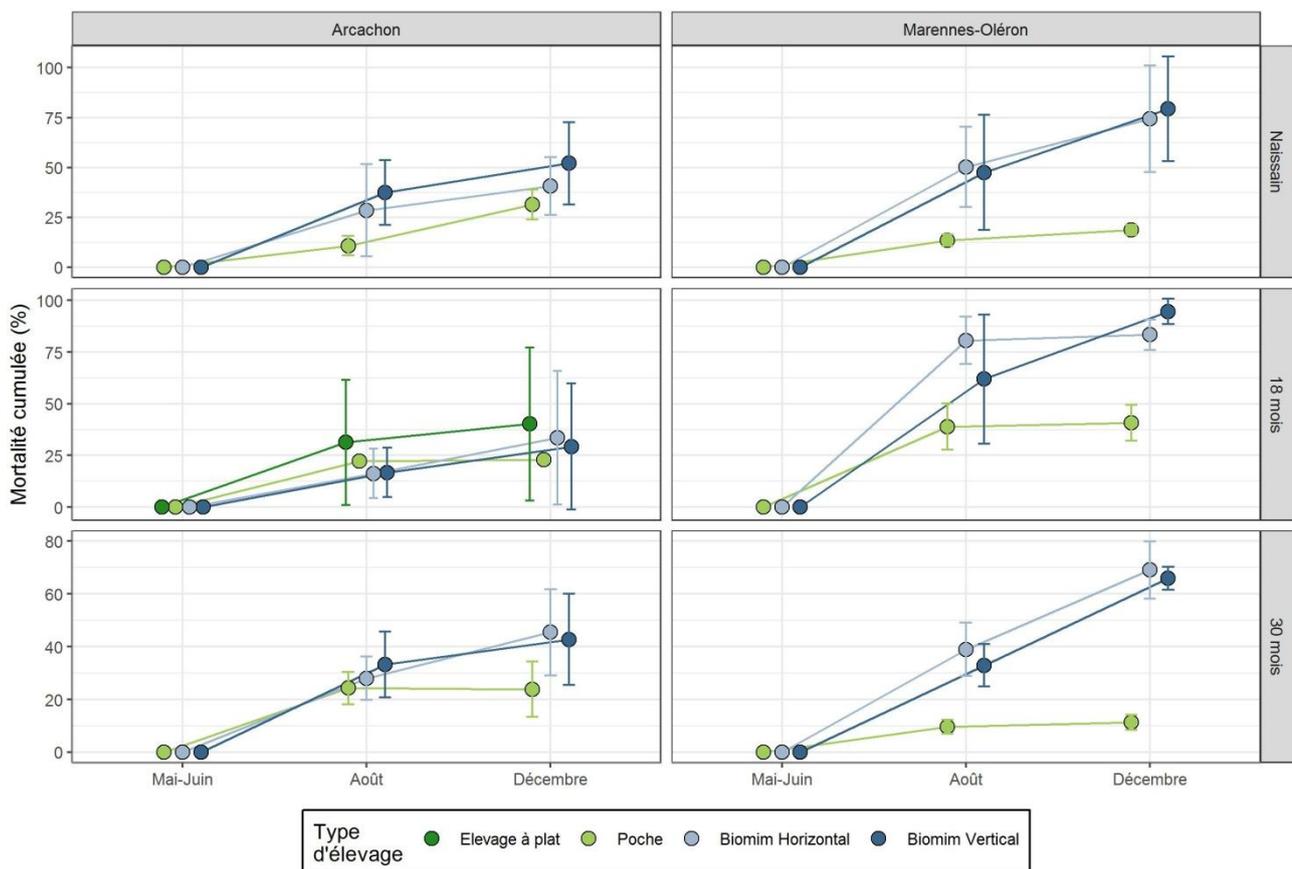


Figure 5 : Mortalité cumulée (%), mesurée en août et décembre 2018, des huîtres des 3 classes d'âge en fonction du type d'élevage et du bassin ostréicole. Valeur moyenne ± écart-type.

2. Croissance pondérale

Bassin d'Arcachon

Les poids individuels et croissances pondérale à la fin de l'expérimentation des deux types de naissain (*i.e.* origine coupelles ou tuiles) sont statistiquement identiques, ne permettant pas de dissocier ces deux origines. Ainsi, comme pour les résultats de mortalité, l'ensemble des données traitant du naissain prendra en compte à la fois celui issu de tuiles et de coupelles.

Alors que le gain de poids du naissain en août était similaire entre tout les types d'élevage (+2,6 g), le naissain biomimétique montre une croissance deux fois supérieure à celui de poche en décembre (Figure 6). En effet, la croissance du naissain de poche a atteint +7 g contre +16 g pour le naissain biomimétique, après 6 mois d'élevage. Ainsi, le taux de croissance du naissain en poche est resté à 0,04 g/j tout au long de l'expérience, alors que celui du naissain biomimétique a atteint les 0,1 g/j d'août à décembre. Malgré la grande variabilité des croissances observées sur les cadres biomimétiques, ces différences observées avec le naissain en poche demeurent significatives. Finalement, le poids du naissain biomimétique à la fin de l'expérimentation (18,1 g et 16,2 g, pour le biomimétisme horizontal et vertical, respectivement) est approximativement deux fois plus important que celui du naissain élevé en poche (8,4 g ; Tableau 2)

Concernant les huîtres de 18 mois, on observe une croissance linéaire pour tous les types d'élevage au cours de l'expérimentation (Figure 6). Néanmoins, le taux de croissance (*i.e.* pente de la droite) diffère significativement entre les huîtres élevées à plat et en poche, respectivement de 0,13 g/j et 0,07 g/j. Les huîtres biomimétiques présentent des valeurs intermédiaires de 0,11 g/j. Ainsi, à la fin de l'expérimentation, les huîtres au sol ont obtenu une croissance de +26,5 g, supérieure à celle des huîtres en poche, qui est de +15,1 g. Les huîtres

biomimétiques ont obtenu des valeurs de croissance intermédiaires à celles élevées de manière traditionnelle, avec un gain de +22,3 g en fin d'expérimentation. Le poids total des différentes huîtres mesurées en fin d'expérimentation étant très variable, il n'est pas possible de le différencier significativement entre les huîtres biomimétiques et celles élevées traditionnellement (*i.e.* en poche et à plat). Néanmoins, le poids final des huîtres élevées à plat est de 42,3 g et celui des huîtres en poche est de 30,9 g, significativement plus faible. Les huîtres élevées en biomimétisme horizontal et vertical présentent des valeurs intermédiaires de poids final (38,8 g et 37,4 g, respectivement ; Tableau 2)

Les huîtres de 30 mois ont gagné autant de poids au cours de l'expérimentation quelle que soit la méthode d'élevage. Ainsi, le gain de poids final après 8 mois sur parc est de +12,7 g, à hauteur de 0,06 g/j en moyenne, permettant l'obtention d'huîtres de 38,4 g (Tableau 2).

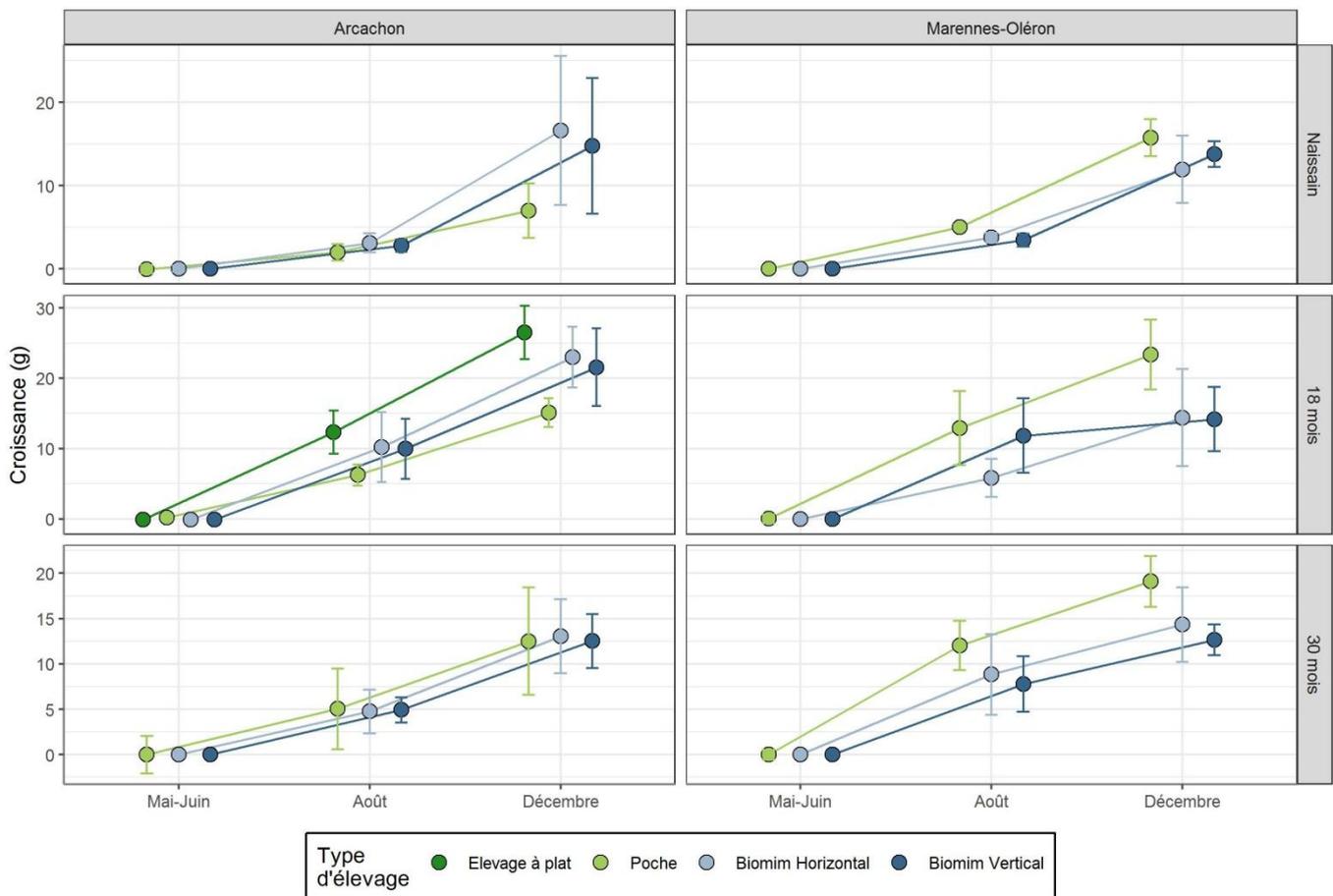


Figure 6 : Croissance individuelle (g), mesurée en août et décembre 2018, des huîtres des 3 classes d'âge en fonction de la méthode d'élevage et du bassin ostréicole. Valeur moyenne ± écart-type.

Bassin de Marennes-Oléron

Pour les trois classes d'âge (*i.e.* Naissain, 18 mois et 30 mois) d'huîtres élevées dans le Bassin de Marennes-Oléron, aucune différence significative n'a été mise en évidence lors de l'analyse des poids totaux et des croissances pondérales en fin d'expérimentation. Cette absence de significativité des résultats provient des différences de variabilité entre les méthodes d'élevage. En effet, les résultats obtenus sur les huîtres en poche et en biomimétisme vertical sont plus homogènes contrairement à ceux des huîtres en biomimétisme horizontal, où la variabilité autour de la valeur moyenne est importante (Figure 6). Ainsi, les résultats abordés dans cette partie ne sont traités qu'en termes de tendances, les croissances pondérales et poids finaux entre modalités d'élevages ne pouvant être statistiquement différenciés.

Dans le Bassin de Marennes-Oléron, le naissain élevé en poche a gagné +15,8 g, +12,0 g pour celui élevé en biomimétisme horizontal et +13,8 g pour celui en biomimétisme vertical (Figure 6). A la fin de l'expérimentation, l'ensemble du naissain a atteint un poids total individuel de 15,9 g en moyenne. La dynamique de croissance a été similaire entre les 3 méthodes d'élevage, c'est-à-dire avec un taux de croissance moyen de 0,09 g/j.

Les huîtres de 18 mois élevées en poche ont connu une croissance pondérale de +23,3 g durant l'expérimentation, les menant à un poids total individuel de 38,1 g. Les huîtres biomimétiques ont gagné +14,3 g sur l'ensemble de l'expérimentation, atteignant un poids total de 29,1 g. Un ralentissement de la croissance a été observé pour les huîtres en poche et en biomimétisme vertical entre les deux périodes, commençant avec un taux de croissance de 0,14 g/j pour terminer à 0,09 et 0,02 g/j, respectivement. Les huîtres en biomimétisme horizontal ont conservé un taux de croissance de 0,08 g/j tout au long de l'expérimentation.

Les huîtres de 30 mois élevées en poche ont connu une croissance pondérale de +19,1 g durant l'expérimentation, les menant à un poids total individuel de 51,4 g. Les huîtres biomimétiques ont gagné +14,3 g lorsqu'elles étaient collées à l'horizontale et +12,6 g pour celles positionnées à la verticale, pour atteindre un poids total de 46,6 g et 44,9 g à la fin de l'expérimentation, respectivement (Figure 6 ; Tableau 2). La dynamique de croissance a été similaire entre les différents traitements.

Tableau 2 : Poids total individuel (g) initial et final des huîtres en fonction du bassin, de l'âge et de la méthode d'élevage

Bassin	Age	Poids initial	Poids final			
			Poche	Biomimétisme Horizontal	Biomimétisme Vertical	Elevage à plat
Arcachon	Naissain	1,5	8,4	18,1	16,2	
	18 mois	15,8	30,9	38,8	37,4	42,3
	30 mois	25,7	38,2	38,8	38,3	
Marennes-Oléron	Naissain	2,1	17,8	14,1	15,9	
	18 mois	14,8	38,1	29,2	29,0	
	30 mois	32,3	51,4	46,6	44,9	

3. Rendement d'élevage

Bassin d'Arcachon

A la fin de l'expérimentation, les rendements étaient en moyenne de 6,7 kg/1000 naissains, 9,5 kg/1000 huîtres de 18 mois et -1,5 kg/1000 huîtres de 30 mois. Pour chaque classe d'âge, les rendements d'élevage ne peuvent être différenciés statistiquement entre les différentes méthodes d'élevage. De la même manière que les résultats des croissances pondérales, les rendements sont très hétérogènes pour les élevages biomimétiques et au sol, comparativement à l'élevage en poche (faible variabilité entre les échantillons ; Figure 7). Par exemple, le rendement d'élevage d'huîtres de 18 mois élevées en biomimétisme vertical s'étend de -12,3 kg/1000 huîtres à 25,9 kg/1000 huîtres, alors que celui des huîtres de même âge élevées en poche varie de 6,1 à 9,6 kg/1000 naissains. Néanmoins, les résultats tendent à montrer des rendements d'élevage supérieurs en biomimétisme qu'en poche pour le naissain. Pour les huîtres de 30 mois les rendements sont principalement négatifs pour les huîtres biomimétiques alors qu'ils sont toujours positifs lors de l'élevage en poche (Figure 7).

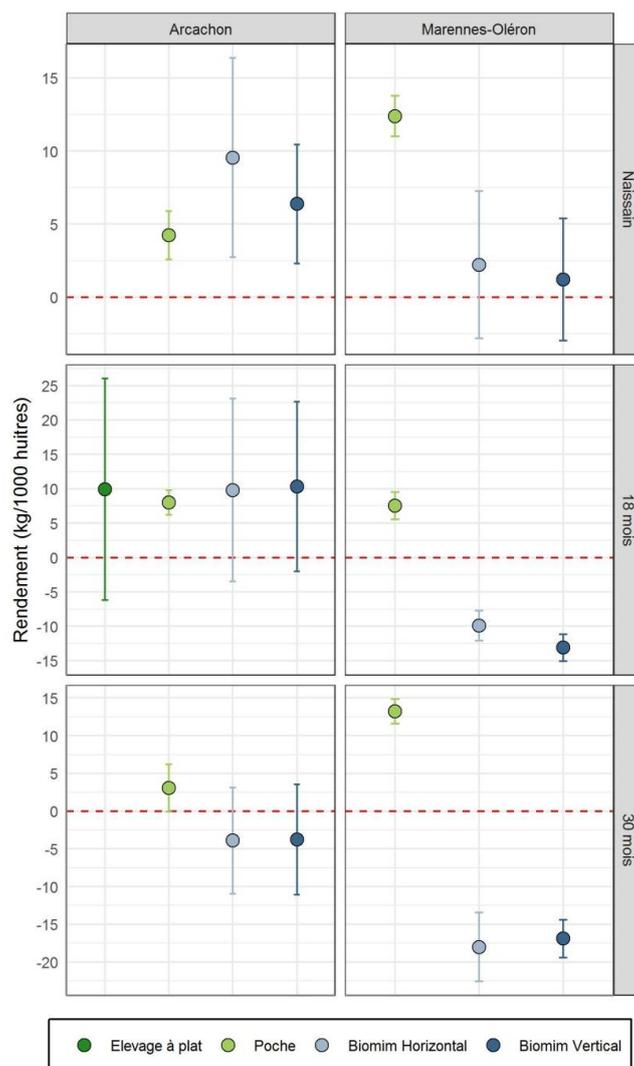


Figure 7 : Rendement d'élevage (kg/1000 huîtres) à la fin de l'expérimentation pour les trois classes d'âge en fonction du bassin ostréicole et de la méthode d'élevage. Les lignes pointillées représentent la valeur 0. Valeur moyenne ± écart-type.

Bassin de Marennes-Oléron

De manière générale à la fin de l'expérimentation et pour toutes les classes d'âge, les rendements d'élevage des zootecnies biomimétiques sont significativement inférieurs à ceux obtenus avec l'élevage surélevé en poche. Ainsi, le rendement d'élevage est de 12,4 kg/1000 naissains élevés en poche et celui des élevages biomimétiques est de 1,7 kg/1000 naissains. Concernant les huîtres de 18 mois, le rendement d'élevage en poche est de 7,6 kg/1000 huîtres, contre -11,5 kg/1000 huîtres élevées selon une méthode biomimétique. Pour les huîtres de 30 mois, le rendement d'élevage en poche est de 13,2 kg/1000 huîtres, alors que celui des lots élevés en biomimétisme est de -17,5 kg/1000 huîtres (Figure 7).

4. Indices biométriques

Les données de longueur, largeur et d'épaisseur des individus sont représentées par l'indice de longueur (IL), symbolisant la forme générale de l'huître. L'ensemble des données biométriques sont accessible dans les annexes 2 à 5.

a. Indice de longueur

Bassin d'Arcachon

Après 6 mois d'expérimentation, les IL des naissains ont évolué différemment en fonction de la modalité d'élevage utilisée. Initialement à 2,2 pour l'ensemble du naissain arcachonnais, l'IL du naissain élevé en poche a augmenté et est devenu significativement supérieur (2,4) à celui du naissain biomimétique (2,1 ; Figure 8). Ce résultat témoigne d'un pourcentage d'huîtres longues plus élevés en poche (8 %) contrairement à celles sur les cadres biomimétiques (<1 %).

Concernant les huîtres de 18 et 30 mois, aucune évolution et différence significative n'ont été observées à la fin de l'expérimentation, les valeurs d'IL étant de 2,5 pour ces deux classes d'âge (Figure 8). En effet, le pourcentage d'huîtres longues était sensiblement identique entre les modalités d'élevage, à hauteur de 3% pour les 18 mois et 9% pour les 30 mois.

Bassin de Marennes-Oléron

La valeur initiale de l'IL du naissain était de 2,0 en début d'expérimentation et est restée inchangée pour le naissain élevé en biomimétisme horizontal. Cependant, en fin d'expérimentation, les valeurs d'IL diffèrent significativement entre les trois modalités d'élevage, avec un indice de 2,2 pour le naissain en biomimétisme vertical et 2,3 pour le naissain en poche (Figure 8). Il est à noter que les naissains avec un IL > 3 provenaient tous de l'élevage en poche (4 %) et qu'aucun naissain biomimétique n'a été caractérisé comme « long ».

L'IL des huîtres de 18 mois en fin d'expérimentation est de 2,3 et aucune différence significative n'a été observée entre les modalités d'élevage (Figure 8). Néanmoins, 7 % des 18 mois élevées en biomimétisme horizontal sont des huîtres longues, contre 0% pour les autres zootechnies. Pour les huîtres de 30 mois, aucune différence de l'IL (2,3) n'est observable entre les modalités d'élevage (Figure 8).

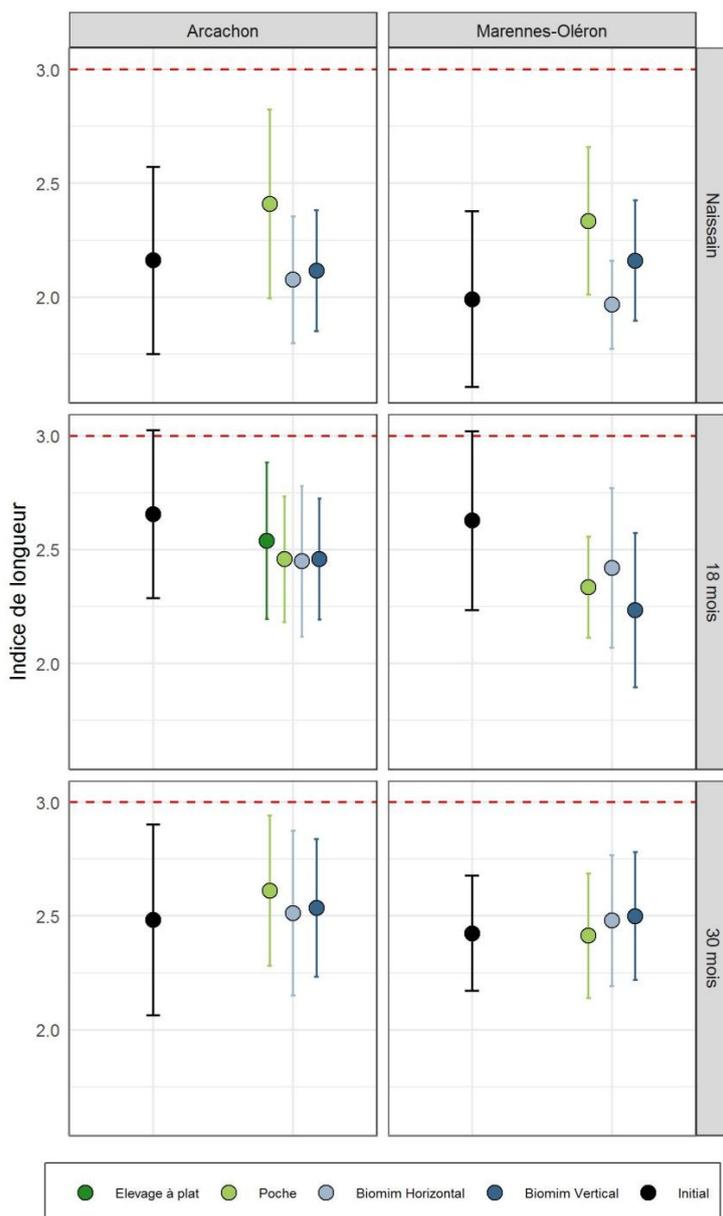


Figure 8 : Indice de longueur des individus des trois classes d'âge au début (en noir) et en fin d'expérimentation en fonction du bassin ostréicole et de la méthode d'élevage (vert et bleu). Les lignes pointillées représentent la valeur seuil de 3. Valeur moyenne \pm écart-type.

b. Indice de remplissage

Bassin d'Arcachon

Les huîtres de 30 mois élevées en poche présentent un IR de 28,0 % qui est légèrement mais significativement plus faible que celui des huîtres biomimétiques, avec 30,9 % (Figure 9a). Ainsi, il y avait potentiellement une différence de 2% de quantité d'eau intervalvaire entre les huîtres élevées en poche et en biomimétisme.

Bassin de Marennes-Oléron

Aucune différence significative n'est observée entre les IR des huîtres élevées selon les 3 modalités (Figure 9a). Ainsi, dans le BMO, l'IR des huîtres de 30 mois était de 27,0 %.

c. Indice de qualité

Bassin d'Arcachon

Après 7 mois de déploiement sur parc, les huîtres de 30 mois avaient un IQ de 8,6 pour l'élevage en poche, 9,2 pour le biomimétisme vertical et 9,6 pour le biomimétisme horizontal. Ces trois valeurs diffèrent significativement les unes des autres (Figure 9b). Ces différences d'IQ témoignent de proportions différentes d'huîtres spéciales et fines de chaque lot. En effet, la proportion d'huîtres spéciales comptait pour 16 %, 24 % et 32 %, selon l'élevage en poche, en biomimétisme vertical et en biomimétisme horizontal, respectivement.

Bassin de Marennes-Oléron

A la fin de l'expérimentation, l'IQ des individus élevés en poche était de 9,3 et significativement supérieur à celui des individus élevés en biomimétisme horizontal, qui était de 8,5 (Figure 9b). Les huîtres en biomimétisme vertical ont eu une valeur d'IQ de 8,9, intermédiaire aux deux autres méthodes d'élevage (Figure 9b). En termes de proportion, les huîtres spéciales représentaient 17 % du lot biomimétisme horizontal, 21 % du lot biomimétisme vertical et 23 % du lot élevé en poche.

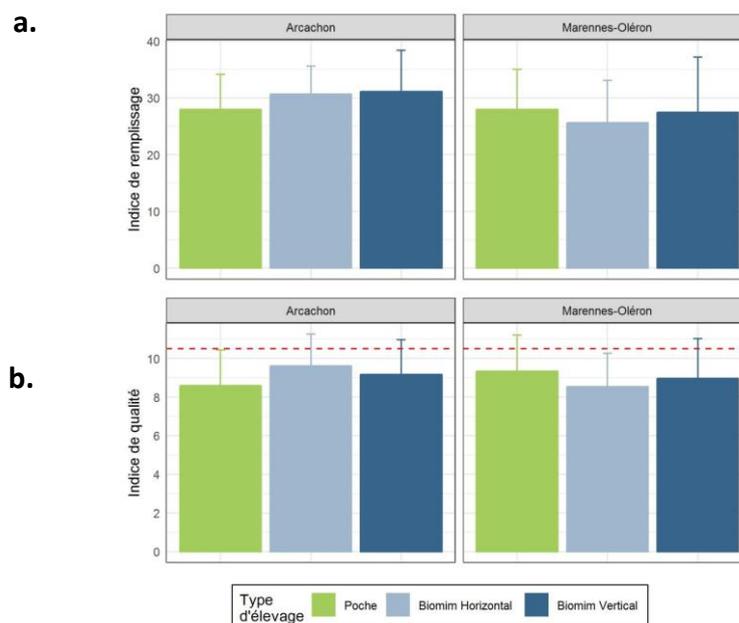


Figure 9 : **a.** Indice de remplissage (IQ) et **b.** Indice de qualité (IQ) des huîtres de 30 mois en fonction du bassin ostréicole et de la méthode d'élevage. Les lignes pointillées représentent la valeur seuil de différenciation des huîtres fines et spéciales 10,5. Valeurs moyennes \pm écart-type.

d. Chambrage à *Polydora sp*

D'un point de vue général sur l'infection des huîtres de 30 mois par *Polydora sp*, la valeur moyenne du chambrage était significativement plus grande pour les individus élevés dans le Bassin de Marennes-Oléron que ceux du Bassin d'Arcachon, avec un indice moyen de 0,62 contre 0,46, respectivement (Figure 10b).

Bassin d'Arcachon

Aucune différence significative n'a été observée entre les différentes méthodes d'élevage en termes d'indice de chambrage moyen, ni en terme de proportion pour chaque niveau d'indice. De manière générale, 67 % des individus ne présentaient aucune chambre, 24 % ont eu un indice de 1, 5 % ont eu un indice de 2 et 4 % ont eu un indice de 3 (Figure 10a). Ainsi, il apparaît que l'infection par *Polydora sp* s'effectue de manière homogène dans le Bassin d'Arcachon, quelle que soit la méthode de culture.

Bassin de Marennes-Oléron

Les huîtres élevées selon les 3 zootecnies présentent des moyennes de chambrage significativement différentes les unes des autres. Les huîtres élevées en poche ont un indice de chambrage de 0,2, celles en biomimétisme vertical de 0,6 et celle en biomimétisme horizontal de 1,2 (Figure 10b). Ces résultats se traduisent par l'absence de chambre pour 81 % des huîtres en poche, alors qu'uniquement 31 % des huîtres en biomimétisme horizontal n'étaient pas touchées (Figure 10a). A l'inverse, la proportion d'huîtres avec un indice de chambrage strictement supérieur à 1 représentait 1,1 % de celles en poche contre 36 % de celles en biomimétisme horizontal (Figure 10a). Ainsi, les résultats suggèrent que l'infection par *Polydora sp* est très hétérogène entre les méthodes d'élevage au regard des sites expérimentaux suivis dans le Bassin de Marennes Oléron.

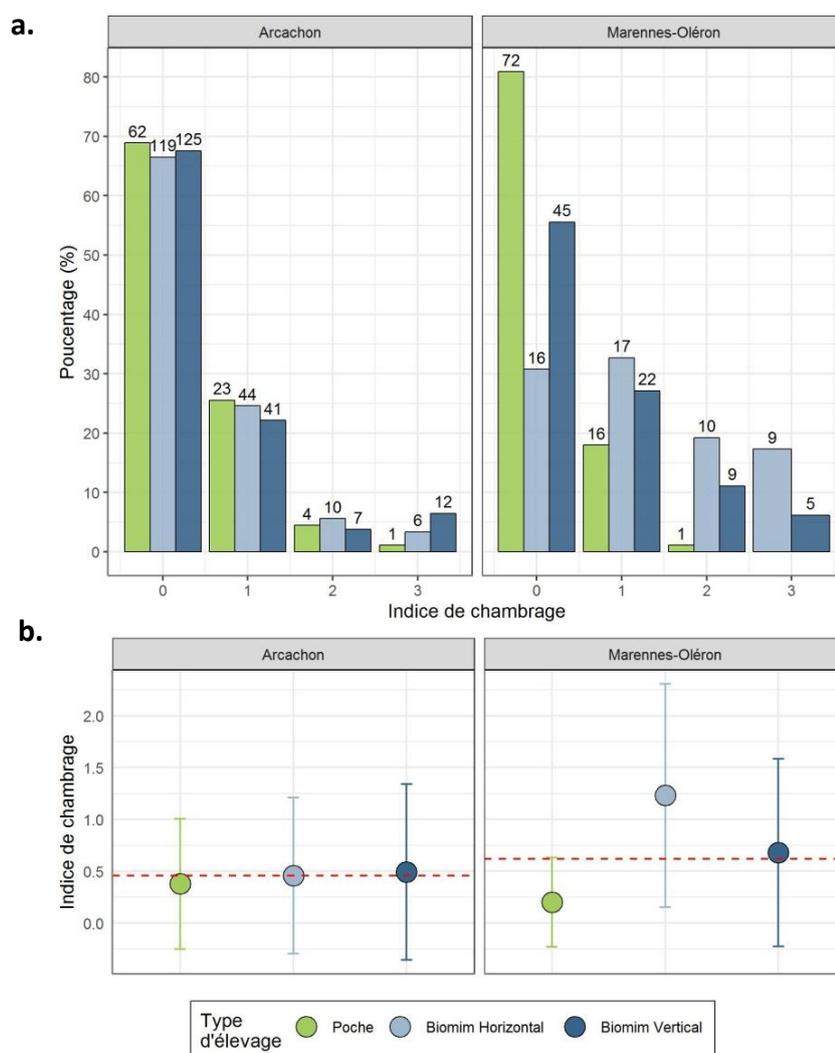


Figure 10 : **a.** Proportion d'individus pour chaque niveau d'indice de chambrage à *Polydora sp* ; **b.** Valeurs moyennes \pm écart-type de l'indice de chambrage, des huîtres de 30 mois en décembre 2018 en fonction du bassin ostréicole et de la méthode d'élevage. Les valeurs indiquées au-dessus de chaque barre correspondent au nombre d'individus identifiés. La ligne rouge correspond à la valeur moyenne de l'indice de chambrage pour chaque bassin ostréicole.

5. Estimation de la prédation et du captage d'huître creuse

a. Prédation

Lors du bilan final en décembre 2018, le nombre de trous de bigorneaux perceurs a été dénombré sur les individus morts élevés selon les deux méthodes biomimétiques (Figure 11a). Les résultats permettent d'estimer que 5,4 % des coquilles d'huîtres mortes du Bassin d'Arcachon et 16,8 % de celles du bassin de Marennes-Oléron,

comportaient la présence de trous de bigorneaux perceurs. Cette différence de pression de prédation est significative entre les deux bassins ostréicoles. D'une manière plus précise, aucune différence n'est observée entre le biomimétisme horizontal et le biomimétisme vertical à l'échelle d'un seul bassin et d'une classe d'âge. Ainsi, dans le Bassin d'Arcachon, des marques de prédation ont été observées sur 2,5 %, 8,7% et 7,3 % des coquilles vides de naissain, d'huîtres de 18 mois et 30 mois, respectivement. De la même manière dans le Bassin de Marennes Oléron, les coquilles vides de naissain, 18 mois et 30 mois présentaient un trou de bigorneau perceur dans 11,9 %, 13,8 % et 24,6 % des cas, respectivement.

Par ailleurs, il a été observé que certaines huîtres élevées selon la méthode traditionnelle à plat ont été victimes de prédateurs broyeur, tels que les raies et les dorades (Annexe 6). Cependant, ce type de marque n'a pas été observé sur les huîtres en élevage biomimétique.

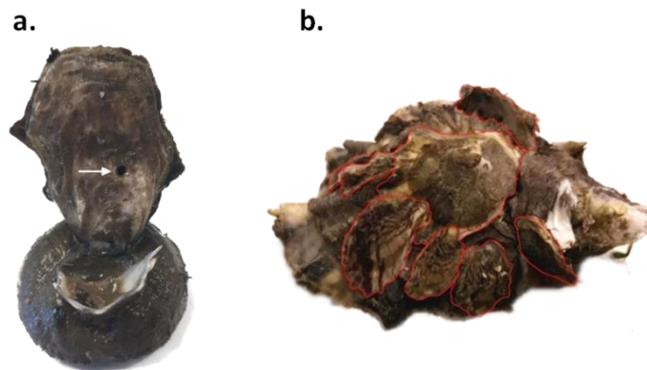


Figure 11 : **a.** Trous de bigorneaux perceurs sur la valve supérieure d'une coquille d'huîtres élevée en biomimétique ; **b.** Naissain capté sur une huître de 18 mois élevée en biomimétique

b. Captage d'huître creuse

Le nombre moyen de recrues fixées (Figure 11b) sur un naissain vivant était inférieur à 0,5 pour les individus élevés en poche, 1,2 recrue par individu en biomimétisme horizontal et 1,7 par individu en biomimétisme vertical (Figure 12). Concernant les huîtres de 18 mois, le nombre de recrues par huître vivante était de 2,8 ; 2,15 et 3,88 pour les modalités d'élevage en poche, en biomimétisme horizontal et biomimétisme vertical, respectivement (Figure 12). Pour les huîtres de 30 mois, le nombre de recrues par individu vivant élevé en poche, biomimétisme horizontal et biomimétisme vertical, était respectivement de 3,3 ; 1,3 et 2,7 (Figure 12). Du fait d'une grande variabilité du nombre de recrues entre deux individus, ces valeurs ne peuvent être différenciées statistiquement.

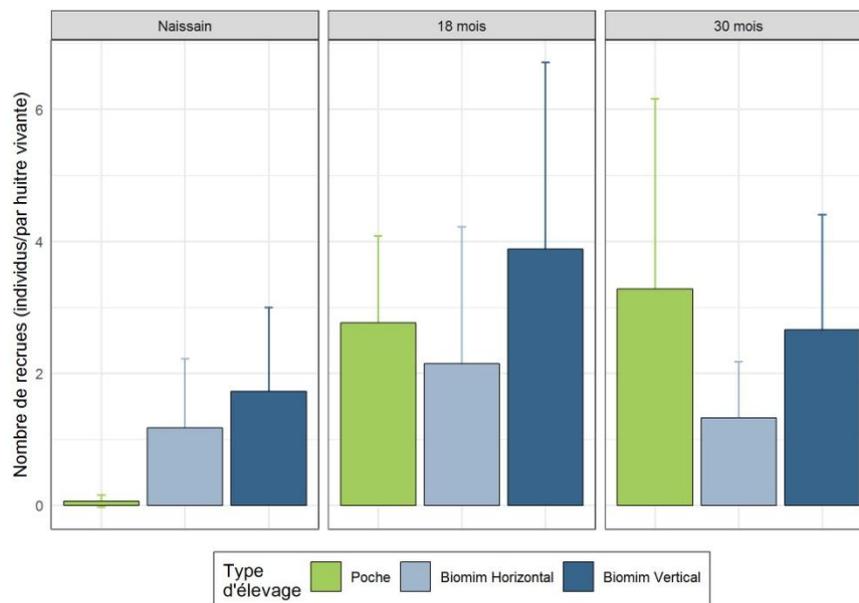


Figure 12 : Nombre de recrues d'huître creuse captées en 2018 sur les individus élevés en fonction de la méthode d'élevage et de la classe d'âge. Le dénombrement est effectué en décembre 2018, sur les échantillons du Bassin d'Arcachon et uniquement sur les individus retrouvés vivants. Valeurs moyennes \pm écart-type

6. Estimation du temps de traitement et des coûts

L'ensemble des données estimées dans cette partie provient de l'expérimentation présentée dans ce document. Ces données de temps de travail et de coût matériel ont été obtenues dans un cadre expérimental en laboratoire et ne rendent pas compte d'une activité professionnelle réalisée dans l'établissement ostréicole par plusieurs employés d'expérience.

a. Confection d'un cadre biomimétique

La confection d'un cadre biomimétique prend en compte plusieurs étapes :

- 1) Préparation des cadres plastiques = découpage d'une poche plate ostréicole dans la longueur ;
- 2) Préparation du ciment, remplissage de la douille ;
- 3) Dépôt des plots en ciment sur le cadre (Figure 13a) ;
- 4) Positionnement des individus sur les plots (1 ou plusieurs individus/plot en fonction de la méthode) (Figure 13b) ;
- 5) Stockage des cadres pour le séchage (Figure 13c) ;
- 6) Transport (Figure 13d)

Le temps de réalisation d'un cadre biomimétique a été mesuré pour les étapes 2 à 4, citées précédemment. En moyenne, un cadre de 56 huîtres est réalisé en 6 minutes, ce qui équivaut à 10 minutes de préparation pour le collage de 100 huîtres (Tableau 3a).

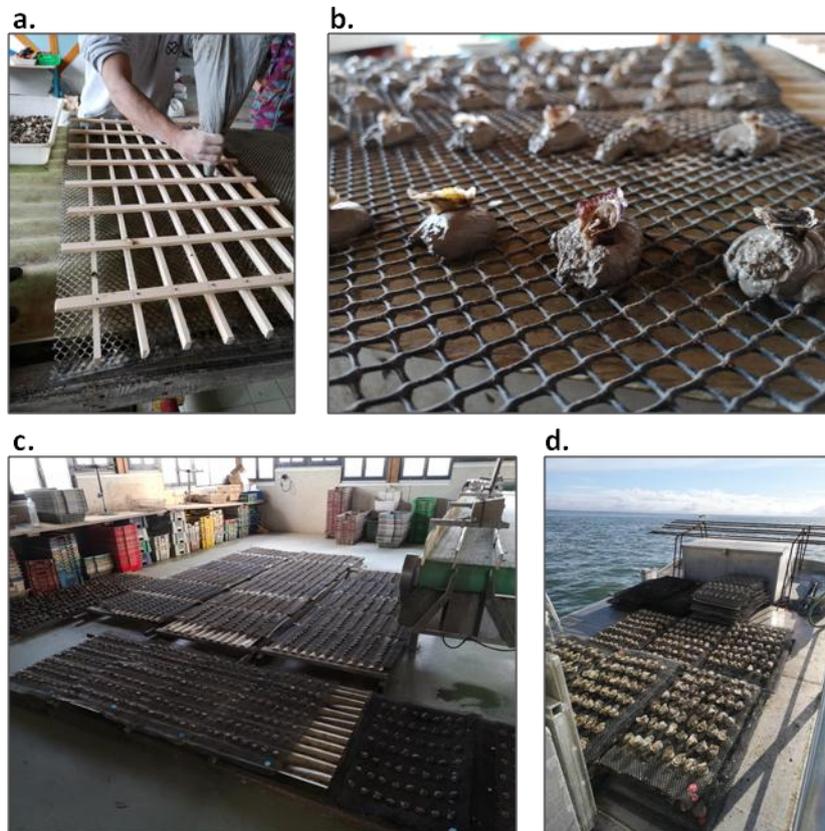


Figure 13 : Etapes de confection d'un cadre biomimétique **a.** Dépôt des plots de ciment ; **b.** Positionnement des huîtres sur les plots ; **c.** Stockage des cadres pour le séchage ; **d.** Stockage des cadres lors du transport en mer

b. Récupération des huîtres biomimétiques

Le temps de traitement d'une poche est considéré comme étant un temps témoin de comparaison à la zootechnie biomimétisme. Il a été estimé qu'une poche est traitée en 7,5 minutes, c'est-à-dire que les huîtres sont vidées de la poche, triées une à une (vivant/mort) et les individus vivants sont comptés.

La récupération des huîtres élevées sur cadre biomimétique comprend plusieurs étapes :

- 1) Repérer les individus vivants/morts (deux valves fermées ou non) ;
- 2) Séparer du cadre les huîtres, ou l'ensemble « huître + plot de ciment », identifiées comme vivantes;
- 3) Enlever le plot de ciment et les résidus restant attachés à l'huître ;
- 4) Vérifier l'état de l'individu récupéré = vivant/mort, coquille arrachée lors du décrochage...

Le temps de traitement d'un cadre (étapes 1 à 3) a été mesuré et rapporté au nombre d'huîtres réellement vivantes identifiées à la fin du traitement. Cette variable permet de prendre en compte le temps non-négligeable nécessaire à la réalisation de l'étape 4). En effet, une huître estimée vivante lors de l'étape 1) peut s'avérer morte (deux valves collées entre elles par du ciment ou du sédiment intervalvaire) ou endommagée (coquille cassée au point d'accroche avec le ciment) à la fin du traitement. Ainsi, il est nécessaire de pondérer le temps de travail par le nombre d'huîtres vivantes effectif pour rendre compte de la perte de temps émergeant du traitement d'individus morts (arrachage du cadre et du nettoyage du ciment).

De manière générale, le temps de traitement d'un cadre biomimétique est de 5 minutes 51 secondes pour les deux zootechnies biomimétiques et dans les deux bassins ostréicoles (Tableau 3b). Cependant, le temps de traitement effectif pour la récupération d'un individu vivant diffère grandement entre les deux bassins ostréicoles. Alors qu'il suffit de 16 minutes pour obtenir 100 huîtres vivantes de cadres biomimétiques dans le

Bassin d'Arcachon, il faut 4 à 11 fois plus de temps pour la même quantité d'huîtres élevées en biomimétisme horizontal (58 min/100 huîtres vivantes) et vertical (178 min/100 huîtres vivantes) dans le Bassin de Marennes-Oléron, respectivement (Tableau 3b). Cette différence peut s'expliquer par le temps perdu à décrocher et nettoyer des huîtres mortes élevées dans le Bassin de Marennes-Oléron. Le nombre supérieur d'huîtres mortes dans ce bassin et la quantité de vase accumulée ont engendré des confusions lors de l'identification d'huîtres vivantes (deux valves fermées et remplies de vase).

Tableau 3 : **a.** Temps affectés à la confection des cadres biomimétiques (seconde ; 56 huîtres par cadre) et équivalent pour 100 huîtres collées (minute) ; **b.** Temps affectés à la récupération des huîtres lors du bilan final pour le traitement complet d'un cadre (minute), rapportés à une huître vivante (seconde) et équivalent pour 100 huîtres vivantes (minutes), en fonction de la méthode d'élevage et du bassin ostréicole. Valeurs moyennes ajusté au travail d'une personne.

a. Préparation des cadres

Temps total (min) par cadre	Temps (s) par huître	Temps (min) pour 100 huîtres collées
6	5,9	10

b. Récupération des huîtres

Bassin	Type d'élevage	Temps total (min) par cadre	Temps estimé (s) par huître vivante	Temps (min) pour 100 huîtres vivantes
Bassin d'Arcachon	Poche	7,5	2,3	4
	Biomim. horizontal	5,5	9,2	15
	Biomim. vertical	5,9	9,7	16
Bassin de Marennes-Oléron	Poche	7,5	2,3	4
	Biomim. horizontal	5,3	34,7	58
	Biomim. vertical	6,7	106,8	178

c. Coûts matériel de l'élevage biomimétique

Le coût en matériel nécessaire à la mise en place d'un élevage biomimétique peut être qualifié de modeste. Le support étant réalisé à partir de poches recyclées, seul le ciment et les sardines de fixation nécessitent un achat. En ce qui concerne ces dernières, une paire a été utilisée pour chaque cadre, d'un montant de 1,2 euros (soit 60 centimes par sardine). Pour autant, l'aménagement des cadres au sol peut permettre de diminuer ce nombre d'accroche (1,5 sardines par cadre).

Pour la fixation des huîtres, le collage une à une ou deux à deux induit des différences en terme de quantité et de coût :

- Biomimétisme horizontal : Une consommation de 1,36 kg (poids sec) de ciment par cadre a été estimée en faisant des plots d'environ 25 g (poids sec) chacun pour celles collées en une à une à plat. Pour la fixation de 1000 huîtres, cela représente approximativement 25 kg de ciment (poids sec) soit 1 sac d'environ 5,30 euros.
- Biomimétisme vertical : Concernant celles deux à deux, une quantité estimée de 30 g de ciment pour chaque plot a été employée. A raison de 40 plots par structure, chacune nécessite 1,2 kg de ciment. Au final, pour 1000 huîtres, 15 kg de ciment a été nécessaires pour un prix de 3,2 euros.

Le coût matériel pour la mise en élevage de 1000 huîtres équivaut donc, en prenant en compte les chiffres précédents, à 26,7 euros pour les huîtres en biomimétisme horizontal et 18,2 euros pour celles en biomimétisme vertical.

En cas de problème lié à l'humidité de l'air lors des collages (comme en période hivernale/début du printemps), il peut s'avérer essentiel de rajouter un accélérateur de durcissement (500ml pour 25 kg de ciment) estimé à 9,40 euros le litre. Cela porterait le prix à 31,40 euros et 21 euros pour le collage de 1000 huîtres à l'horizontal et à la verticale, respectivement.

A titre de comparaison, le matériel nécessaire pour l'élevage en poche sur un cycle complet de 1000 naissains reviendrait à 24,3 euros, en prenant en compte une poche de 1000 individus à la mise à l'eau, les dédoublements et changement de poches, une table, les élastiques, crochets et agrafes.

7. Observations diverses associées à la culture biomimétique

a. Forme du naissain

Dès le mois d'août, des naissains biomimétiques à l'horizontale ont montré des formes particulières, témoignant de déformations liées au collage des individus sur le plot en ciment. Le positionnement de l'huître lors de sa mise en place sur le ciment doit être précis et semble primordial pour que la croissance coquillière soit effectuée de manière harmonieuse. Certains individus ont poussé sous la forme d'une arche, la coquille décrivant un arc de cercle dans l'axe longitudinal (de la charnière à la marge postérieure ; Figure 14b). D'autres individus ont montré des excroissances coquillières le long du plot en ciment se traduisant par de la dentelle se maillant dans le support d'élevage (Figure 14c). Même si ces déformations ont été observées de manières anecdotiques, elles sont apparues au cours d'une période d'élevage relativement restreinte (7 mois) et uniquement sur le naissain.

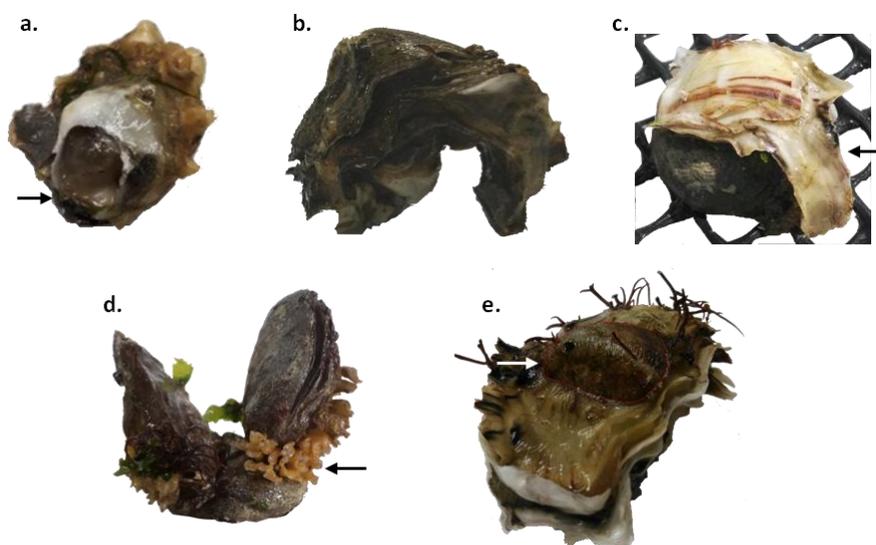


Figure 14 : **a.** Naissain biomimétique avec un arrachement partiel de la coquille (flèche noire) ; **b.** Naissain biomimétique en forme d'arche ; **c.** Naissain biomimétique accroché au cadre avec une excroissance coquillière (flèche noire) ; **d.** Huîtres de 18 mois en biomimétisme verticale colonisée par des œufs de bigorneaux (flèche noire) ; **e.** Coquille d'huître biomimétique colonisée par une crépidule (flèche blanche)

b. Colonisation

Différents organismes ont utilisé les supports d'élevage et les individus biomimétiques comme substrat pour leur fixation. Bien que ces observations restent en marge, des pontes de gastéropodes associées aux espèces *Ocenebra erinaceus* ou *Ocinebrellus inornatus*, deux bigorneaux perceurs prédateurs de l'huître, ont été

retrouvées fixés sur des plots de ciment et des huîtres biomimétiques (Figure 14d). De plus, des crépidules (*Crepidula fornicata*) ont également été observées sur les coquilles des huîtres biomimétiques (Figure 14e). Dans le Bassin de Marennes-Oléron, la majorité des cadres biomimétiques des trois sites expérimentaux ont été colonisés par des moules (*Mytilus edulis*). Captées au printemps et au début de l'été 2018, elles se sont développées sur les cadres d'élevage jusqu'à recouvrir complètement certains cadres lors de l'échantillonnage final de décembre 2018 (Figure 15a). Dans les deux bassins ostréicoles, plusieurs espèces de macroalgues ont colonisé une partie des cadres biomimétiques (Figure 15b). La majorité des macroalgues retrouvées sur les cadres sont des algues vertes du genre *Ulva* (*Ulva lactuca* et *Ulva sp.* anciennement *Enteromorpha sp.*) et une minorité d'algues rouges (*Polysiphonia sp.* et *Gigartina pistillata*).

c. Envasement

Un phénomène remarquable a été observé dans le Bassin de Marennes-Oléron, il s'agit de l'envasement des sites utilisés dans le cadre de ce suivi. Bien que l'envasement naturel du Bassin de Marennes-Oléron, amplifié par les activités conchylicoles, soit connu, l'accumulation de sédiment sur les cadres biomimétiques a été sous-estimée. La sédimentation de particules sédimentaires (vase et sable fin) a eu pour effet de recouvrir partiellement certains cadres et complètement une partie d'entre eux (Figure 15c). Ainsi, il est clairement envisageable qu'une partie de la mortalité des huîtres biomimétiques du bassin soit attribuable à l'enfouissement des individus, de même qu'un retard de croissance pour les individus vivants échantillonnés.



Figure 15 : **a.** Cadre biomimétique du Bassin de Marennes-Oléron (site Mortane) recouvert de moule commune ; **b.** Cadre biomimétique du Bassin d'Arcachon colonisé par des algues vertes et rouges ; **c.** Cadre biomimétique du Bassin de Marennes-Oléron (site Viandet) enseveli sous le sédiment, observé en janvier 2019. Les cadres biomimétiques sont délimités par les lignes pointillées rouge.

Discussion

1. Contraintes zootechniques

a. Fixation sur cadre et récupération des huîtres

Les supports d'élevage biomimétiques du Bassin d'Arcachon ont été réalisés à partir de poches recyclées, c'est-à-dire avec des poches dont les professionnels ne souhaitaient plus se servir à cause de mailles déchirées déjà réparées. Lorsque les deux faces des poches étaient trop endommagées, ces dernières n'ont pas été utilisées pour cette expérimentation. La réalisation du ciment, sa mise en place en douille et la pose sur les cadres sont des étapes facilement réalisables, ne posant pas de contraintes particulières. Néanmoins, pour une répartition uniforme des huîtres sur cadres, il est important d'utiliser un guide pour répartir de manière homogène les plots de ciment sur le support (Figure 13a). Par ailleurs, il est important d'utiliser suffisamment de ciment à chaque plot, pour que la matière englobe plusieurs mailles de la poche et que l'ensemble « ciment + huître » reste fixé tout au long du déploiement sur estran. A l'instar du collage sur corde réalisé dans l'étang de Thau, le collage des huîtres a été réalisé de façon manuelle, pour toutes les classes d'âges. Le collage en vertical nécessite l'utilisation de tuteur pour permettre aux huîtres de rester dressées le temps du séchage du ciment (Figure 3b). Dans le cadre de cette expérimentation, Deux contraintes majeures ont été relevées lors du collage des huîtres :

- Il est important de ne pas enfoncer trop profondément l'huître dans le ciment pour ne coller qu'une seule des deux valves, sinon cela contraindrait l'huître à ne pas pouvoir filtrer et donc mourir. D'un autre côté, il semble nécessaire que l'huître soit en contact minimum avec le plot en ciment pour qu'elle réalise une croissance cohérente avec les standard de production. Cela évitera d'obtenir des huîtres de formes non-conventionnelles telles qu'observées dans la partie 7.a. Ainsi, lors du collage de plusieurs centaines d'huîtres, et particulièrement de naissain, il est important de rester vigilant tout au long de cette étape pour juger au mieux de l'orientation et de l'enfoncement optimal de l'animal dans le ciment.
- En fonction de la période de collage des huîtres, le temps de séchage du ciment fluctue de plusieurs heures. En effet, la cinétique de la réaction chimique correspondant au durcissement du ciment est dépendante de la température ambiante. Au regard de cette expérimentation, le collage au mois de juin permettait une mise à l'eau au minimum 18h plus tard. A l'inverse, des tests réalisés en fin de période hivernale ont montré que le temps de durcissement du ciment était supérieur à 30h. Il va sans dire que les huîtres sont susceptibles de subir un stress si elles restent trop longtemps émergées le temps du durcissement du ciment. Il est donc indispensable d'utiliser un accélérateur de prise pour ciment lors de périodes froides où pour diminuer le temps d'attente avant le déploiement des cadres sur parcs.

Le facteur critique de la méthode biomimétique, du point de vue de la production, réside dans le temps de manutention important lors de la phase de mise en place, comprenant la préparation des poches et du ciment, le positionnement manuel des plots de ciment et des huîtres collées. Dans le cadre d'une production complètement manuelle, il est nécessaire d'optimiser le travail du personnel pour un système de fonctionnement à la chaîne. De plus, l'emprise au sol des cadres étant importante, il est nécessaire de définir une méthode de stockage verticale pour superposer les cadres lors de la phase de séchage (e.g. calles en bois, cage...).

Lors des bilans du mois d'août et de décembre 2018, la récupération des huîtres sur les cadres a été réalisée de manière manuelle. Plusieurs cas de figures ont été observés lors du décrochage des individus. Idéalement, des huîtres se décrochaient « proprement » du ciment (aucun résidu de ciment sur la coquille) sans appliquer une grande pression sur l'organisme. Dans la majorité des cas, c'est l'ensemble « huître + ciment » qui se décollait du support plastique, en embarquant quelques fois une partie de la maille englobée dans le plot. Dans cette situation, un temps, très variable selon les cas, est consacré au décrochage du plot sur la coquille en utilisant un bout de bois frappé directement sur le ciment, ou un démanchoir. Enfin, dans une proportion minoritaire mais

non-négligeable, certains naissains ont vu leur coquille endommagée lors du décrochage, vouant ces individus à une mort certaine (Figure 14a). Bien que dans le cadre d'un cycle d'élevage complet il ne soit pas envisagé de décrocher des individus de petite taille, une attention particulière devrait être appliquée à cette phase de décrochage pour éviter d'accroître la mortalité à l'issue de l'élevage. Finalement, il est important d'identifier les huîtres vivantes avant le décrochage pour ne pas perdre de temps et d'énergie au décollage et au nettoyage des résidus de ciment sur des huîtres mortes. L'identification de ces huîtres est parfois difficile, tant les deux valves sont présentes et « collées » entre elles par du sédiment intervalvaire et qu'il est impossible de manipuler l'individu sur le cadre pour se rendre compte qu'il n'est pas rempli.

b. Envasement

Un résultat majeur obtenu dans le Bassin de Marennes-Oléron est l'envasement important des cadres biomimétiques installés sur les parcs de Viandet, Mortane et Chevalier. Les dépôts de particules sédimentaires sur les cadres biomimétiques ont rapidement recouvert ces derniers, limitant ainsi les huîtres à l'accès à l'eau sus-jacente. Bien que l'envasement du Bassin de Marennes-Oléron soit naturel de par les apports terrigènes de la Seudre et de La Charente et des conditions hydrodynamiques « calmes », ce phénomène est accéléré par la pratique des activités conchylicoles (Kervella 2010). En effet, depuis l'intensification des pratiques, notamment liées à l'apparition de l'élevage en poche sur table, la sédimentation des particules fines sur le fond augmente. Plus précisément, l'envasement résulte de *i.* l'action des tables ostréicoles constituant des obstacles artificiels perturbant l'écoulement des courants de marée modifiant le transport sédimentaire et *ii.* la biodéposition de fèces et pseudo-fèces par les huîtres cultivées et *iii.* la protection contre l'érosion que les tables ostréicoles offrent au sédiment fin déposé en surface (Kervella 2010 ; Sornin 1981).

Les sites d'études du Bassin de Marennes-Oléron ont été choisis parce qu'ils se trouvent dans des parcs conchylicoles exploités par les professionnels et sont représentatifs de l'activité ostréicole du bassin. Par ailleurs, c'est pour les mêmes raisons que ces sites sont utilisés dans le cadre de différents programmes du CREAA, comme l'Observatoire Ostréicole. Ainsi, les survies médiocres des huîtres biomimétiques dans ce bassin mettent en exergue l'incompatibilité de la méthode d'élevage biomimétique avec des conditions hydrodynamiques favorables aux processus de sédimentation. Par conséquent, la couverture spatiale des sites potentiellement exploitables en biomimétisme semble plus restreinte que pour la pratique de l'élevage surélevé en poche. Cette démonstration met en évidence l'importance du choix des sites de déploiement des cadres biomimétiques, dont la caractéristique principale devrait être la vitesse des courants. Il paraît donc judicieux de choisir des zones exposées aux courants de marées, dont l'écoulement des masses d'eau ne serait pas bloqué par des obstacles naturels (*e.g.* enrochement) ou anthropiques (*e.g.* pieds de bouchots, tables ostréicoles...). Ces zones battues sont habituellement composées de sables, graviers et débris coquillers, qui témoignent de l'absence de sédimentation de particules fines (*i.e.* vase).

c. Captage et colonisation

Deux des freins majeurs sont envisagés *a priori* avec la méthode d'élevage biomimétique. Il s'agit de l'incapacité de travailler les huîtres individuellement une fois qu'elles sont fixées sur le support et le fait de laisser les cadres biomimétiques en place sur l'estran jusqu'à l'obtention d'huîtres marchandes. Ces aspects se traduisent par la colonisation d'organismes épibiontes, comme des congénères (captage de naissain), ou *via* des pontes d'autres organismes.

Concernant le captage de naissain d'huître creuse dans le Bassin d'Arcachon, les résultats semblent montrer une fixation préférentielle des recrues de la cohorte 2018 sur les huîtres biomimétiques de la plus jeune classe d'âge. Ce schéma n'est pas répété pour les huîtres de 18 et 30 mois, pour lesquelles le captage de naissain est tantôt

plus important sur les huîtres en poche et tantôt sur les huîtres collées à la verticale. Il est important de modérer les conclusions tirées de ces résultats au regard de deux biais :

- Le captage d'huître creuse a été particulièrement intense, faisant de 2018 la seconde année où le captage a été le plus important depuis une décennie (Béchade et *al.* 2018). Ce captage de grande ampleur n'a peut être pas permis de distinguer un signal de fixation préférentielle des recrues sur un type de support plutôt qu'un autre.
- La disparité des résultats peut être liée à un nombre d'échantillons trop faible et à la variabilité du dénombrement des naissains entre les expérimentateurs.

Même si les résultats ne permettent pas de dégager des tendances claires, cet aspect de captage différentiel entre les huîtres au sol et surélevé doit être pris en compte. En effet, l'hypothèse d'un captage préférentiel au sol est justifiée par le fait que des congénères (support préférentiel) soient disponibles au niveau de la couche limite benthique, partie de la colonne d'eau hydro-dynamiquement optimale pour la fixation des post-larves d'invertébrés marins (*e.g.* huître, moule, crépidule, *Polydora sp* ; Barbier 2016). Ainsi, il est nécessaire d'anticiper ces problèmes de captage d'huître et de moules en trouvant des solutions pour diminuer leur impact.

Par ailleurs, il a été observé sur certains sites des deux bassins ostréicoles, une colonisation des cadres par les macroalgues. A l'instar de la colonisation sur des poches ostréicoles, les macroalgues sont susceptibles d'influencer les performances d'élevage des huîtres au sol, en diminuant la circulation de l'eau autour des huîtres et donc en limitant l'accès à la nourriture (Marteil 1976). Cependant, les cadres biomimétiques ne peuvent être retournés comme il est d'usage sur les poches surélevées. Le retournement des poches permet de détruire les macroalgues qui se sont développées sur la partie supérieure, là où les algues bénéficient des rayons du soleil pour croître.

d. Prédation

De manière anecdotique mais bien réelle, des pontes de bigorneaux, vraisemblablement d'espèces prédatrices de l'huître (*i.e.* « bigorneaux perceurs »), ont été retrouvées sur des huîtres biomimétiques. En termes de prédation par ces organismes, aucune différence n'a été observée entre les deux méthodes biomimétiques et les classes d'âge à l'échelle d'un bassin ostréicole. Ces résultats suggèrent que la pression de prédation par les bigorneaux perceurs est propre au bassin ostréicole donné, et que cette zootechnie pourrait être utilisée comme un nouveau support de fixation pour ces organismes. Il est à noter que l'identification des trous de bigorneau perceur a été réalisée sur les valves retrouvées encore accrochées sur les cadres biomimétiques. Une partie de valves supérieures des huîtres ayant disparue, le dénombrement n'a pu être exhaustif. Par ailleurs, aucun autre type de prédation n'a été observé sur les huîtres biomimétiques. Des cas de broyages par des poissons (*e.g.* dorade) ont été observés sur les huîtres de 18 mois élevés traditionnellement à plat. Même si l'accès aux huîtres à plat et biomimétiques est identiques, ces organismes semblent préférentiellement s'attaquer aux huîtres mobiles, de manière à les consommer librement dans la colonne d'eau.

2. Performances d'élevage

a. Origine du naissain

Les résultats de cette étude ne permettent pas de différencier les deux origines de naissain au regard de leur performances d'élevage à l'issue de la période d'expérimentation. En effet, quelle que soit la méthode d'élevage, les taux de mortalité et de croissance, ainsi que la forme des individus captés sur tuiles chaulées et sur coupelles plastique ne semblent pas différentes. La coupelle plastique est largement utilisée dans l'ensemble des bassins naisseurs français, tandis que la tuile chaulée se retrouve quasiment exclusivement dans le Bassin d'Arcachon. L'intensité du captage de ces deux supports diffère au regard de la superficie disponible et des pratiques

professionnelles, pour lesquelles le choix d'un type de collecteur est à la discrétion de l'ostréiculteur. Différentes stratégies de captage sont déployées par les ostréiculteurs et sont en partie dues à des différences de contraintes d'ordre technique, environnemental et socioculturel ; contraintes variables selon la localisation des exploitations ostréicoles et l'année considérée (Toulhoat 2008). Ainsi, il apparaît que les seuls effets observables de l'utilisation de ces deux types de collecteurs n'apparaissent qu'au moment de la phase de recrutement des huîtres creuses, sans avoir d'incidences sur la première année d'élevage.

b. Mortalité, croissance et rendements d'élevage

Afin de rendre compte au mieux des performances de survie et de croissance des huîtres biomimétiques, il est nécessaire de dissocier les résultats des deux bassins ostréicoles. En effet, les mortalités et les croissances observées dans le Bassin de Marennes-Oléron sont principalement inféodées aux conditions d'envasement des sites d'études. Ainsi, la comparaison des performances de survie et de croissance des huîtres biomimétiques avec celles de poche n'est réalisable qu'à l'échelle du Bassin d'Arcachon. De manière générale, les performances de survie entre les huîtres des 3 classes d'âges ne diffèrent pas selon la méthode d'élevage après 5 ou 7 mois sur l'estran, hormis pour le naissain élevé en biomimétisme vertical qui connaît le plus de mortalité. Néanmoins, même si les résultats entre les méthodes d'élevage ne se différencient pas statistiquement, ils tendent à montrer que les mortalités sont légèrement, mais toujours, plus élevées en biomimétisme qu'en poche.

Mortalité

A la fin de l'expérimentation, le naissain arcachonnais élevé en poche présentait au moins 10 % de survie en plus que le naissain biomimétique horizontal. De même, les huîtres de 18 mois en poche ont survécu d'au moins 6% de plus que celles en biomimétisme et 19 % des huîtres de 30 mois en poche ont mieux survécus que celles collées sur un support. Ainsi, les résultats de cette étude suggèrent que les huîtres élevées à plat en biomimétisme sont plus susceptibles de mourir que celles surélevées sur tables ostréicoles. Ces résultats réaffirment les hypothèses concernant les risques de mortalité des huîtres creuses en lien direct avec le sédiment. En effet, outre les contraintes de pénibilité du travail lors de l'élevage traditionnel à plat (Eustache et al. 2019), la diminution progressive de cette pratique en faveur de l'élevage surélevé est en partie due aux faibles survies des huîtres au sol comparativement à celles sur table. Des études menées avant les phénomènes de surmortalité estivale ont permis de comparer les performances zootechniques de l'huître creuse (mortalité et croissance) selon l'élevage à plat et surélevé (Remoué 2000 ; Soletchnik et al. 1998 ; Soletchnik et al. 1999 ; Soletchnik et al. 2000 ; Soletchnik et al. 2005 ; Soletchnik et al. 2007). Au cours de ces travaux réalisés sur les bancs de Ronce et Perquis entre 1997 et 1998, la mortalité des huîtres élevées à plat était de 40% supérieure à celle de l'élevage surélevé (Soletchnik et al. 2007). Les différences de taux de mortalité semblent être fonction de l'éloignement des individus avec le sédiment. La capacité de stockage de matière organique par le sédiment et les processus de dégradation bactérienne associés entraînent un stress chronique et aigu des individus au sol. Ces stress agissent notamment de manière indirecte en diminuant la quantité de ressource trophique benthique par dégradation du phytoplancton sous les effets du relargage de polluants chimiques (e.g. Pesticides) et de composés ammoniacaux riche en NH₃ (Soletchnik et al. 2005).

Croissance

De manière générale concernant la croissance, les huîtres élevées à plat souffrent aussi de cette proximité avec le sol. Outre une possible déplétion de nourriture provenant du compartiment benthique, la concentration de particules fines (i.e. vase) à l'interface eau sédiment augmente la turbidité au voisinage des huîtres au sol, diminuant ainsi leur capacité de filtration. De ce fait, les performances de croissance diffèrent entre des sites avec un substrat sableux ou vaseux et semblent évoluer selon un gradient d'éloignement du sédiment. Par ailleurs, ces différences de croissance, et donc probablement d'accessibilité à la ressource trophique, influence les capacités de reproduction des huîtres au sol, pour lesquelles le sédiment vaseux est associé à un effet défavorable sur la

maturation au cours de la période printanière et estivale (Soletchnik et al. 2000). Ces hypothèses se confirment à l'échelle du Bassin de Marennes-Oléron, où les huîtres biomimétiques (au sol) ont systématiquement des croissances moindres que celle en surélevé. Ces résultats témoignent de la prédominance de l'effet de l'envasement sur la croissance et la mortalité, plutôt qu'un effet zootechnique.

Les conclusions de cette étude, appuyée par celles de Soletchnik et al. (2000), ne semblent pas s'appliquer aux performances de croissance des huîtres biomimétiques du Bassin d'Arcachon. En effet, les croissances mesurées sur les huîtres biomimétiques, au sol, sont égales (pour les 30 mois) ou supérieures (naissain et 18 mois) à celles des huîtres en poche. Hormis pour les huîtres de 30 mois, les tendances montrent des croissances supérieures au sol qu'en surélevé sur la période d'août à décembre 2018 dans le Bassin d'Arcachon. L'absence de différence entre les huitres de 30 mois pourrait être allouée à un temps d'expérimentation trop court. En effet, ces huîtres qualifiées de « boudeuse » montrent, par définition, des taux de croissance faibles. On peut donc supposer que 6 mois d'élevage ne sont pas suffisants pour relancer la croissance des huîtres au sol et montrer de réelles différences de performances d'élevage. Concernant le naissain et les huîtres de 18 mois, trois hypothèses peuvent expliquer ces résultats : la ressource trophique, la stabilité du substrat et la densité-dépendance.

Le facteur extrinsèque agissant principalement sur la croissance des bivalves marins, filtreurs suspensivores et/ou déposivores de surface, est la qualité et la quantité de la ressource trophique disponible pour ces organismes. Les sources de nourriture sont originaires de deux compartiments, la colonne d'eau *via* le phytoplancton et le sédiment *via* le microphytobenthos. En effet, il a été montré que les bivalves des zones intertidales se nourrissent principalement de phytoplancton pélagique mais qu'une part non négligeable de leur alimentation provient du compartiment benthique lié au microphytobenthos (Barbier et al. 2016 ; Moynihan et al. 2016). Lors du flot, une partie du microphytobenthos est remis en suspension sous l'action des forces de cisaillement liées aux courants de marées. Il devient donc disponible pour les organismes filtreurs (Blanchard et al. 1998). Ainsi, dans des conditions hydrodynamiques normales au niveau de l'interface eau-sédiment, il est probable que les huîtres élevées sur le sol disposent d'une plus grande proportion de microalgues benthiques que celles surélevées sur table. Par ailleurs, à partir d'août, le naissain biomimétique a montré une accélération de son taux de croissance contrairement à celui en poche. Ces dynamiques différentes des taux de croissance entre les naissains pourraient aussi résulter de l'influence différentielle de la ressource benthique. D'une part, le naissain est dans une phase de croissance somatique régie par l'apport en nourriture et, d'autre part, la période automnale est marquée par une forte production microalgale représentée par des blooms phytoplanctoniques et microphytobenthiques (Barbier 2016). Ainsi, les huîtres au sol auraient accès à encore plus de nourriture leur permettant de croître plus rapidement.

Les huîtres biomimétiques sont fixées au sol de manière artificielle, par le biais d'un cadre en plastique et d'un plot de ciment, et à l'inverse, les huîtres surélevées sont « libres » à l'intérieur de la poche d'élevage. Les huîtres collées ne sont pas en contact avec les autres et évoluent dans un environnement stable pour lequel l'énergie nécessaire à l'ouverture des valves est minimisée. Ces circonstances sont identiques à celles observées pour d'autres bivalves filtreurs appartenant à des habitats benthiques structurées par des espèces ingénieurs (e.g. herbiers à *Zostera marina*, fonds à *Crepidula fornicata* ; Barbier et al. 2016). A l'inverse, les huîtres en élevage surélevé, en particulier le naissain, sont susceptibles d'être déplacées à l'intérieur de la poche au gré des courants et des manipulations humaines (brassage et retournement des poches sur parcs). Ces mouvements peuvent être à l'origine de stress nécessitant des allocations énergétiques particulières (i.e. reformation de coquille), ou d'une répartition hétérogène des individus dans la poche (entassement d'individus d'un côté de la poche) ne leur permettant pas d'être dans une disposition optimale pour effectuer la filtration.

Enfin, la comparaison de l'élevage en poche et en biomimétisme amène à la réflexion sur les effets de densité-dépendance. En ostréiculture, les effets de densité-dépendance à l'échelle d'une poche (nombre

d'individus/poche) se traduisent de deux manières principales : une augmentation du risque de mortalité et une diminution du taux croissance, associés à une augmentation de la densité d'élevage. Dans le cadre de notre étude, la densité des huîtres biomimétique par support d'élevage est largement inférieure comparativement à la densité en poche. Chaque huître biomimétique est individualisée, dispose de tout l'espace nécessaire pour se développer, et l'accès à la ressource trophique semble homogène à l'échelle d'un cadre biomimétique. A l'inverse, les huîtres en poche sont susceptibles d'interagir entre elles, pouvant se traduire par une limitation de l'ouverture des valves et une compétition trophique plus importante au sein d'une poche. Bien que peu d'expériences soient spécifiquement dédiées à ce facteur, l'effet de la densité est décrit de manière empirique dans le monde ostréicole. Concernant l'effet de la densité sur la croissance de l'huître creuse, Honkoop et *al.* (2002) confirme la relation négative, faible mais significative, entre la croissance somatique et la densité d'élevage. D'autres études ont également suggéré des relations anti-corrélées entre la croissance et la densité d'huîtres élevées sur l'estran ou sur filière du Bassin de Marennes-Oléron (Carpentier 2015 ; Mille 2008), en baie de Cancale (Mazurié et *al.* 2004) ou encore dans l'étang de Thau avec la culture sur corde (Alunno-Bruscia et *al.* 2001). Dans ces derniers travaux, cette relation est expliquée par une compétition trophique accrue, diminuant l'accès à la ressource, au niveau des élevages les plus denses. Finalement, la relation négative entre la densité et la croissance semble être prédominante pour les jeunes individus, notamment dans le contexte d'écloserie au niveau des premiers stades de vie post-larvaires (Fakhrina et *al.* 2018).

Rendement d'élevage

Les rendements d'élevage calculés dans cette étude ne sont pas représentatifs d'une production professionnelle puisqu'ils ne prennent en compte qu'une courte période d'élevage. Néanmoins, il s'avère qu'une tendance émerge pour le naissain et les huîtres de 30 mois dans le Bassin d'Arcachon. En effet, le naissain a tendance à montrer de meilleurs rendements après 5 mois d'expérimentation lorsqu'il est élevé en biomimétisme contrairement à la poche. Avec des taux de mortalité relativement similaires entre les modalités d'élevage, c'est la croissance supérieure du naissain biomimétique qui permet d'obtenir de meilleurs rendements qu'en poche. Il est à noter que le plan d'échantillonnage ne permettait pas de prendre en compte le phénomène de surmortalité du naissain, de ce fait, ces valeurs de mortalité ne sont valables que pour la période considérée. Concernant les huîtres de 30 mois, après 7 mois de mise à l'eau, les rendements biomimétiques sont inférieurs à ceux en poche, à cause de survie inférieures sur cadre, non compensées par des croissances supérieures. Concernant les huîtres de 18 mois, tous les rendements semblent similaires puisque les performances de survie et de croissance le sont également. Dans le Bassin de Marennes-Oléron, tous les rendements d'élevage biomimétiques sont largement inférieurs à ceux de l'élevage surélevé et sont en majorité inférieurs à 0. Ces résultats sont logiques au regard des faibles performances obtenues sur des sites envasés.

c. Qualité de la production

Forme des huîtres

L'analyse des indices de longueur a montré, dans les deux bassins ostréicoles, que le naissain élevé en biomimétisme (particulièrement à l'horizontal) avait une forme plus « ronde », contrairement à ceux élevés en poche qui paraissent plus « longs ». Les résultats montrent par ailleurs que les proportions de la coquille du naissain biomimétique ne changent pas après 5 mois d'élevage, mais que c'est le naissain en poche qui s'allonge au cours de l'élevage. Aucune différence de forme n'apparaît pour les classes de tailles supérieures. Ces comportements différents entre les classes d'âge sont représentatif de la dynamique de croissance de l'huître creuse. En effet, au cours de la première année d'élevage le taux de croissance est le plus fort du cycle de vie, permettant d'atteindre quasiment la moitié de la taille finale d'un individu élevé pendant 4 années (Berthome et *al.* 1986). Ainsi, il est envisageable que ces tendances s'accroissent sur un pas de temps plus important et qu'une forme particulièrement ronde d'huître biomimétique puisse émerger si cette zootechnie est utilisée à partir du naissain.

Cependant, l'élevage biomimétique laisse émerger certains développements non conventionnels de la coquille, qui ne sont pas valorisables par la profession. Même si ce sont des cas marginaux, des formes incurvées et des excroissances de la coquille sont apparues chez des individus. La forme d'arc de cercle (Figure 14b) pourrait être évitée en fonction du positionnement de l'huître sur le plot en ciment lors du collage. Il est supposable que la meilleure manière serait de coller l'huître au plus proche de la charnière avec le moins de contact possible avec le ciment (tout en assurant une emprise minimum pour assurer la solidité du collage). A l'inverse, une huître trop enfoncée dans le ciment aurait tendance à suivre la forme du support sur laquelle elle est en contact et à adopter cette forme d'arche. Par ailleurs, certains individus ont eu tendance à « se mailler » dans le support en plastique au cours de l'élevage. Ce maillage de la coquille dans l'ossature de la poche ostréicole pourrait être contré par un positionnement optimisé de l'huître sur un plot en ciment plus grand.

Indice de qualité

Pour les mêmes raisons évoquées dans le paragraphe sur les mortalités et les croissances (2.b.), les résultats du Bassin de Marennes-Oléron ne permettent pas de discuter d'un effet potentiel de la zootechnie employée, mais traduisent des effets délétères de l'envasement des parcs sur un élevage au sol.

En ce qui concerne le Bassin d'Arcachon, toutes les valeurs d'indice de qualité diffèrent entre les modalités d'élevage. Les huîtres de 30 mois élevées selon le biomimétisme horizontal présentent le meilleur IQ, suivies du lot biomimétique vertical puis du lot en poche. Etant donné que le même lot d'huître de 30 mois a été utilisé en début d'expérimentation et que la période de reproduction était terminée lors de l'échantillonnage (décembre 2018), ces différentes qualités d'huîtres semblent être le reflet de la méthode d'élevage employée. Ces huîtres « boudeuses » étaient de 26 g en moyenne au début de l'expérimentation (calibre < 5) et ont toutes atteint le calibre 5 avec 38 g en moyenne. L'intérêt de l'élevage biomimétique pour des huîtres de 3^{ème} année réside dans sa capacité à augmenter le taux de chair intervalvaire, c'est-à-dire à améliorer la qualité des individus. Ainsi cette méthode pourrait intervenir à la fin d'un cycle de production, dans le processus d'affinage, pour accroître leur qualité. En effet, près d'1/3 des individus en biomimétisme horizontal pouvaient être qualifiés d'huîtres spéciales alors qu'uniquement 1/6 des individus élevés en poche l'étaient.

Chambrage

Les résultats obtenus dans le Bassin d'Arcachon montrent une infestation homogène de *Polydora sp* entre les modalités d'élevage. Cette infestation peut être qualifiée de faible, puisque près de 70 % des individus ne présentaient aucune chambre, ne permettant pas de mettre en évidence de différence entre les modalités d'élevage.

Concernant le Bassin de Marennes-Oléron, les indices de chambrage au ver diffèrent largement entre les huîtres élevées en biomimétisme et en poche. En effet, les huîtres au sol ont été entre 3 et 5 fois plus infestées que celles surélevées. Ces résultats confirment le ressenti des ostréiculteurs quant au risque accru d'infection lors de l'élevage traditionnel sur parc à plat. Le chambrage à *Polydora sp* plus important des huîtres à proximité du sédiment n'est qu'une conséquence du cycle de vie de cet Annélides polychète. L'environnement sédimentaire propice au développement du *Polydora sp* est principalement défini par la présence de vase (Gagnon 1999 ; Lagadeuc 1991), largement retrouvée dans notre expérimentation. Par ailleurs, le cycle de vie benthopélagique de ces organismes implique la présence d'une phase larvaire et d'une phase de fixation/métamorphose sur le substrat. C'est aux alentours de l'interface eau/sédiment, dans la couche limite benthique (« *benthic boundary layer* »), que la circulation des individus se réalise et, par la même occasion, que leur fixation s'effectue (Olivier et al. 1998).

d. Homogénéité de la production

La présentation d'une partie des résultats sous la forme de tendances résulte de la grande variabilité des mesures entre les échantillons biomimétiques. Ce phénomène démontre la grande hétérogénéité des performances d'élevage entre deux cadres biomimétiques. A l'inverse, l'élevage surélevé montre une vraie homogénéité des performances de survie et de croissance entre les poches. D'une part, ces observations suggèrent que le nombre de répliquions par unité d'échantillonnage utilisées dans le cadre de cette étude est certainement trop faible. En effet, il est probable qu'en augmentant le nombre de cadres biomimétiques analysés à chaque date d'échantillonnage et pour chaque site, la variance autour des moyennes des résultats de mortalité et de croissance soit diminuée, permettant l'analyse des données via des tests statistiques paramétriques, plus robustes. D'autre part, du point de vue d'une production professionnelle, ces résultats mettent en exergue l'incapacité d'un professionnel à « travailler » le stock d'huîtres biomimétiques. L'intérêt de pouvoir intervenir sur le stock d'huître au cours d'un cycle d'élevage est de pouvoir maîtriser certaines parties de sa production, comme en assurant un tri régulier des individus morts et vivants, en brassant les poches pour agir sur la croissance des huîtres, ou en calibrant les huîtres pour gérer le stock par classe de taille. Ces aspects ne sont pas applicables à la zootechnie biomimétisme employée dans le cadre de cette étude.

3. Adaptation professionnelle de l'élevage biomimétique

a. Choix de la méthode biomimétique

Dans le contexte de cette étude, les résultats des performances d'élevages obtenus permettent d'identifier les premières caractéristiques optimales de la zootechnie biomimétique. Du point de vue des résultats obtenus dans le Bassin d'Arcachon concernant la croissance, la survie, le rendement et les indices de longueur et de qualité, la zootechnie biomimétique horizontale semble pertinente pour l'élevage à partir du naissain et des huîtres de 30 mois (Tableau 4). De manière globale, aucune zootechnie biomimétique ne paraît moins performante que l'élevage en poche. Les rendements et la majorité des survies obtenus en décembre ne diffèrent pas entre les méthodes d'élevage pour une classe d'âge donnée. Néanmoins, pour le naissain, un intérêt particulier en termes de croissance et de forme émerge pour le biomimétisme horizontal. Pour les huîtres de 30 mois, cette même zootechnie se distingue de l'élevage en poche de par la qualité des huîtres produites. Le meilleur indice de qualité obtenu en décembre était celui des huîtres collées horizontalement, puis celui des huîtres collées verticalement et enfin celui des huîtres en poche (*c.f.* note de 2 dans la colonne IQ du Tableau 4). Il est à noter que les performances d'élevage obtenues dans le Bassin de Marennes-Oléron ne sont pas prises en compte dans cette notation, étant donné l'importance du facteur « envasement » ne permettant pas de mettre en évidence des différences uniquement liées à la zootechnie. Ainsi, au regard des performances obtenues dans un environnement adapté (*i.e.* parcs utilisés dans le Bassin d'Arcachon), la méthode d'élevage en biomimétisme horizontal pour le naissain et les huîtres de 30 mois paraît la meilleure solution pour une application professionnelle.

Tableau 4 : Notation des performances d'élevage obtenues pour les zootechnies biomimétiques et au sol en comparaison avec l'élevage en poche surélevée, pour chaque classes d'âge étudiée. Les critères de notation sont la croissance, la survie, le rendement, l'indice de longueur (IL) et l'indice de qualité (IQ ; uniquement sur les 30 mois). Une note de 0 correspond à aucune différence significative avec l'élevage en poche ; une note de 1 et -1 correspondent, respectivement, à une différence significative supérieure et inférieure à l'élevage en poche ; une note de 2 correspond à une différence significative entre deux méthodes biomimétiques et l'élevage en poche.

Modalité d'élevage	Classe d'âge	Critères de notation					TOTAL
		Croissance	Survie	Rendement	IL	IQ	
Biomimétisme Horizontal	Naissain	1	0	0	1		2
	18 mois	0	0	0	0		0
	30 mois	0	0	0	0	2	2
Biomimétisme Vertical	Naissain	1	-1	0	1		1
	18 mois	0	0	0	0		0
	30 mois	0	0	0	0	1	1
Sol	18 mois	1	0	0	0		1

b. Optimisation par mécanisation

Au regard des différentes contraintes zootechniques évoquées précédemment, il est pertinent d'envisager une mécanisation des différentes étapes de manutention, notamment lors de la préparation des plots de ciment et de la mise en place des huîtres sur ces derniers. Il est envisageable d'utiliser un système de tapis roulant associé à un distributeur de ciment automatisé. L'intérêt serait de pouvoir déposer un nombre défini de plot, d'une quantité identique de ciment, sur la surface d'un cadre en une seule fois. Après l'étape de pose du ciment, le personnel positionne les huîtres sur chaque plot et stocke le cadre avec les autres pour le séchage. Idéalement, la méthode de stockage permet le séchage des cadres (évitant qu'ils ne se touchent). Ces cadres devraient être placés sur une palette (muni d'un arceau métallique) pour faciliter le déplacement de tous les cadres et le dépôt sur le bateau.

L'étape du décrochage des huîtres sur les cadres devrait être optimisée. Un test de séparation des plots et des huîtres du cadre a été réalisé en utilisant les vibrations d'une cribreuse. Aucun résultat satisfaisant n'a été observé, les vibrations n'étant pas assez fortes. Bien que le décrochage manuel ait été le plus efficace dans le cadre de cette étude, l'emploi de personnel devrait être nécessaire uniquement pour le nettoyage méticuleux des résidus de ciment sur les coquilles. Idéalement, la séparation grossière du cadre, des plots de ciment et des huîtres devrait être réalisée en amont par voie mécanique. Il est supposé que les mouvements de vibrations seraient les mieux adaptés pour détruire la structure du ciment et ainsi libérer les huîtres. Ces pistes de mécanisation sont à envisager dans le cadre d'une production biomimétique de grande ampleur.

c. Entretien des cadres et choix des sites

Avec des contraintes environnementales identiques de celles de l'élevage en poche, mais sans la capacité de mobiliser les huîtres ou les structures porteuses des huîtres, il est indispensable d'adapter des techniques et stratégies à l'entretien des cadres biomimétiques pour la gestion de captage de naissain d'huîtres et de moules et la colonisation par les algues. Ainsi, il n'est pas possible de retourner les cadres pour faire mourir les macroalgues, à l'instar du travail avec les poches. Par contre il est tout à fait imaginable d'adapter les techniques de brulage au gaz, d'échaudage et de saumurage des cadres pour lutter contre le captage de moules, d'huîtres et l'infestation par *Polydora sp.* Parallèlement à une intervention directe sur les cadres d'élevage, une gestion cohérente du déploiement des structures sur certains parcs en fonction de la saison est indispensable (e.g. parc plus haut pour éviter le captage de moules pendant la période de reproduction). Finalement, les substances antifouling d'origine

naturelle, qui font l'objet de recherches importantes depuis une décennie (Viano 2010), pourraient être également appliquées dans la cadre de telles zootecnies.

d. Rentabilité et valorisation du produit

Les coûts de production d'une entreprise ostréicole, dans le cas d'une entreprise effectuant le cycle complet de son propre naissain naturel (naisseur-éleveur), peuvent être différenciés selon 3 principaux domaines : le matériel ostréicole, la logistique, la masse salariale. Les coûts matériels de mise en place des cadres biomimétiques, qui ont été estimés dans un cadre expérimental, semblent relativement équivalents à ceux de l'élevage surélevé en prenant en compte l'ensemble d'un cycle d'élevage (22,5 euros en moyenne pour le biomimétisme contre 24,3 euros pour l'élevage en poche). Les coûts logistiques (carburant, entretien du bateau, gestion des concessions) semblent en majorité identiques entre l'élevage biomimétique et l'élevage en poche. La plus grosse source de coûts d'une entreprise peut résider dans la masse salariale. En effet, le travail traditionnel en poche surélevé nécessite la réalisation d'un nombre conséquent de marées par le personnel pour entretenir et travailler les huîtres sur tables. Outre les marées liées à la pose et la sortie des lots en poche, un effort important est porté sur le retournement et le brassage des poches sur l'estran, ainsi que le criblage et calibrage des huîtres à terre. De son côté, la méthode d'élevage biomimétique est largement plus chronophage lors de la mise en place des cadres et la récupération des huîtres par rapport à l'élevage en poche. Cependant, une fois que ces cadres sont disposés sur l'estran, aucun coût de main d'œuvre ne leur serait affecté, jusqu'à l'obtention d'huîtres marchandes. Ainsi, on peut émettre l'hypothèse que l'utilisation de la masse salariale différerait largement entre les deux méthodes d'élevage au cours d'un cycle complet et que la méthode d'élevage biomimétique pourrait être une activité supplémentaire bénéfique à une entreprise. Cependant, une étude économique approfondie et adaptée au contexte professionnel permettrait d'affiner cette hypothèse en calculant précisément les temps de manutention d'ouvrier ostréicole qualifié lors des phases de mise en place et de récupération des huîtres biomimétiques.

À l'origine des réflexions, un des buts de la zootecnie biomimétique était de promouvoir une voie de valorisation pour des huîtres qui ne rentreraient plus dans le stock de production ; sont désignés par là le naissain surnuméraire et les huîtres « boudeuses ». Les résultats de ces travaux montrent que deux classes d'âges pourraient potentiellement bénéficier d'une plus-value liée à la zootecnie biomimétique. D'une part le naissain, après 5 mois d'élevage biomimétique, se présente sous une forme plus ronde et plus épaisse, contrairement au naissain en poche dont le pourcentage « d'huîtres longues » était plus important. Ainsi, la « rondeur » du naissain biomimétique, s'il est conservé jusqu'à l'huître adulte, pourrait être un argument de valorisation supplémentaire sur le marché. D'autre part, les huîtres de 30 mois (« boudeuses ») biomimétiques ont obtenu, lors de la période hivernale, des indices de qualité supérieurs que celles élevées en poche. Même si le but premier d'utiliser des huîtres « boudeuses » était d'initier une reprise de croissance avec la proximité au sol, c'est une amélioration de la qualité des individus qui a été observée. C'est au cours de la période des fêtes de fin d'année que la grande partie des stocks des entreprises sont commercialisés, la qualité des produits joue un rôle important lors de cette période de vente. Ainsi, si la culture biomimétique permet d'augmenter la qualité du produit, d'autant plus en période de vente, il semble pertinent d'utiliser cette nouvelle zootecnie pour l'affinage des huîtres. Cependant, comme évoqué précédemment, le coût de main d'œuvre sur une courte période étant important, il semble nécessaire de valoriser ces huîtres « affinées selon la méthode biomimétique » en compensant par une augmentation du prix de vente.

Conclusions et perspectives

Dans le cadre de cette étude, la méthode d'élevage biomimétique de l'huître creuse montre, lorsqu'elle est utilisée dans des circonstances adéquates, des performances zootechniques concurrentielles à l'élevage en poche. De plus, pour certaines classes d'âge, une potentielle valorisation des produits semble possible. Cette nouvelle zootechnie se révèle infructueuse lorsque l'hydrodynamisme des parcs favorise leur envasement et lors de phénomènes intenses de captage (huître et moule).

Il est important de définir le contexte d'utilisation de cette zootechnie. Le but n'étant pas de remplacer l'élevage en poche surélevé, la méthode d'élevage biomimétique pourrait être utilisée en entreprise comme un supplément de la culture traditionnelle pour :

- Valoriser le stock de naissain naturel surnuméraire issu d'un captage annuel trop abondant et des huîtres « boudeuses » non-commercialisables ;
- A partir du naissain, obtenir une huitre « biomimétique » reconnaissable de par sa forme et sa qualité ;
- Augmenter la qualité des huîtres de 3^{ème} année lors d'une phase d'affinage en période hivernale ;
- Occuper des sites sous-exploités par la profession dont l'accessibilité est limitée.

Néanmoins, d'autres expérimentations doivent être menées pour évaluer les performances zootechniques de cette méthode au cours d'un cycle d'élevage complet. En parallèle, une étude approfondie des coûts de production sur un cycle complet est nécessaire, afin d'estimer au mieux la rentabilité de cette méthode comparativement à l'élevage surélevé.

Bibliographie

- Alunno-Bruscia M, Vercelli C, Chabirand JM, Oheix J, Buestel D (2001) Influence de la densité d'élevage sur la croissance et la qualité de l'huître creuse *Crassostrea gigas* dans l'étang de Thau. Rapport IFREMER LCM
- Barbier P (2016) Déterminisme du recrutement des bivalves sous contraintes environnementales et anthropiques. Thèse d'état du Muséum National d'Histoire Naturelle, 271p
- Barbier P, Meziane T, Forêt M, Tremblay R, Robert R, Olivier F (2016) Nursery function of coastal temperate benthic habitats: New insight from the bivalve recruitment perspective. *Journal of Sea Research*, 121:11-23
- Béchade M, Vieira J, Ortega G (2018) Evaluation précoce du captage de l'huître creuse sur le bassin d'Arcachon en 2018. Synthèse CREAA, 4p
- Berthome JP, Prou J, Bodoy A (1986) Performances de croissance de l'huître creuse, *Crassostrea gigas* (Thunberg) dans le bassin d'élevage de Marennes-Oléron entre 1979 & 1982. *Haliotis*, 15:183-192
- Benyus JM (2002) *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*. Editions: HarperCollins, New York, USA, 320p
- Blanchard G, Guarini JM, Bacher C, huet V (1998) Control of the short-term dynamics of intertidal microphytobenthos by the exondation-submersion cycle. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series III - Sciences de la Vie*, 321(6):501-508
- Blanchet H (2004) Structure et fonctionnement des peuplements benthiques du Bassin d'Arcachon. Thèse d'état de l'Université de Bordeaux, 331p
- Carpentier C (2015) Evolution des systèmes d'élevage ostréicole traditionnels sur parcs : essais expérimentaux de systèmes d'élevage sur filière, dans le cadre d'une démarche participative des acteurs de la filière. Mémoire Vetagro Sup, 137p
- Diederich S, Nehls GJEE, Beusekom JV, Reise K (2005) Introduced Pacific oysters (*Crassostrea gigas*) in the northern Wadden Sea: invasion accelerated by warm summers? *Helgoland Marine Research*, 59(2): 97
- Eustache S, Barbier P, Vieira J (2019) Projet Biomimétisme : Rapport bibliographique des techniques et expériences de l'élevage de l'huître à plat dans les Bassins d'Arcachon et de Marennes-Oléron. Rapport CREAA, 90p
- Fakhrina MN, Christianus A, Ehteshamei F (2018) Production of tropical oyster seed in hatchery. *Journal of Survey in Fisheries Sciences* 5(1):7-19
- Gagnon S (1999) Etude Qualitative et quantitative de l'infestation des huîtres creuses, *Crassostrea gigas*, par le ver *Polydora* (annélide polychète). Mémoire de DESS Laboratoire Conchylicole de Bretagne, IFREMER La Trinité Sur Mer, 46 p.
- Honkoop PJC, Bayne BL (2002) Stocking density and growth of the Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) and the Sydney rock oyster (*Saccostrea glomerata*) in Port Stephens, Australia. *Aquaculture* 213(1-4): 171-186
- Kervalla Y (2010) Impact des installations ostréicoles sur l'hydrodynamique et la dynamique sédimentaire. Mesures *in-situ*, modélisation expérimentale et modélisation numérique. Thèse d'état Université de Caen, 326p

- Labrid C (1969) L'ostréiculture et le Bassin d'Arcachon. Edition Feret et Fils Bordeaux, 90p
- Lagadeuc Y (1991) La vase à *Polydora ciliata* (Johnson, 1828) annélide polychète : origine et influence sur la fixation des larves. Cah. Biol. Mar, 32(4): 439-450
- Marteil L (1976) La conchyliculture française, 2° Partie, Biologie de l'huître et de la moule. Revues des Travaux de l'Institut des Pêches Maritimes 40 (2):149-346
- Mazurié J, Bouget JF (2004) Estimation du stock d'huîtres creuses *Crassostrea gigas*, en élevage en Baie de Cancale en octobre 2002. Rapport IFREMER LCB
- Mille D (2008) Étude de faisabilité de l'élevage d'huîtres en eau profonde dans la baie de La Malconche. Rapport CREAA, 96p
- Moynihan M, Barbier P, Olivier F, Toupoint N, Meziane T (2016) Spatial and temporal dynamics of nano- and pico-size particulate organic matter (POM) in a coastal megatidal marine system. Limnology and Oceanography, 61:1087-1100
- Olivier F, Retière C (1998) The role of physical-biological coupling in the benthic boundary layer under megatidal conditions: the case of the dominant species of the *Abra alba* community in the eastern Baie de Seine (English Channel). Estuaries and Coasts 21(4):571-584
- Remoué S (2000) Mortalité printanière et estivale de l'huître creuse *Crassostrea gigas* dans le Bassin de Marennes-Oléron (Banc de Ronce-Perquis). Mémoire de DESS, IFREMER LER-PC, 55p
- Rice MA (2001) Environmental impacts of shellfish aquaculture: filter feeding to control eutrophication. In Marine aquaculture and the environment: a meeting for stakeholders in the Northeast. Cape Cod Press, Falmouth, MA, USA:77-86
- Soletchnik P, Le Moine O, Faury N, Razet D, Geairon P, Gouletquer P, Forest G, (1998) Spring and summer mortalities of the Pacific cupped oyster *Crassostrea gigas* in the Marennes Oleron Bay: Pilot study from Ronce and Perquis leasing grounds. Rapport IFREMER LER-PC
- Soletchnik P, Le Moine O, Faury N, Razet D, Geairon P, Gouletquer P (1999) Mortalité et croissance de l'huître creuse *C. gigas* dans le Bassin de Marennes Oléron : étude de la variabilité spatiale de son environnement et de sa biologie par un système d'informations géographiques (SIG). Aquatic Living Resources, 12(2):131-143
- Soletchnik P, Le Moine O, Faury N, Razet D, Geairon P, Robert S, Gouletquer P, Taillade S. (2000) Mortalité de l'huître creuse *C. gigas* dans le Bassin de Marennes Oléron. Résultats obtenus sur le site atelier de Ronce-Perquis en 1997-1998. Rapport IFREMER LER-PC, 87p
- Soletchnik P, Bouchet V, Malestroit P, Seugnet JL, Blouin F, Radford-Knoery J, Burgeot T, Sauriau PG (2005) Mortalité de *Crassostrea gigas* dans le Bassin de Marennes Oléron. Etude physico chimique du sédiment. Rapport IFREMER LER-PC, 29p
- Soletchnik P, Le Moine O, Faury N, Razet D, Geairon P, Robert S, Gouletquer P (2007) Mortalité de l'huître creuse *C. gigas* dans le Bassin de Marennes Oléron. Résultats obtenus sur le site atelier de Ronce-Perquis en 1997-1998. Rapport IFREMER LER-PC, 81p
- Sornin JM (1981) Processus sédimentaires et biodéposition liés à différents modes de conchyliculture. Institut des Sciences de la Nature de l'Université de Nantes, 188p

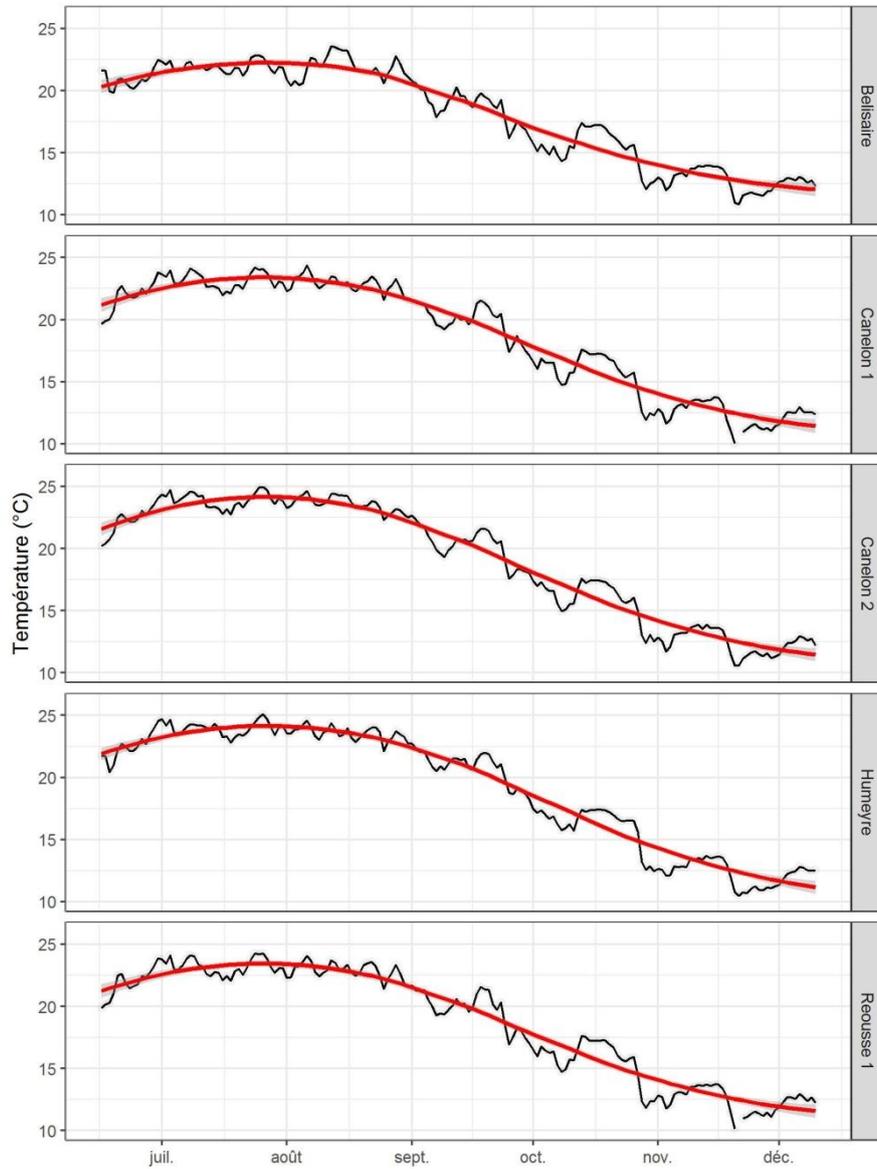
Toulhoat L (2008) Eléments de compréhension des stratégies de captage naturel de l'huître creuse (*Crassostrea gigas*) des ostréiculteurs de Charente-Maritime. Rapport IFREMER LER-PC, 152p

Viano Y (2010) Recherche de molécules non-toxiques actives en antifouling à partir d'organismes marins de Méditerranée. Thèse d'état de l'Université du Sud Toulon Var, 264p

Annexes

Annexe 1

Températures (°C) de l'eau de mer mesurées sur les sites du Bassin d'Arcachon de juin à décembre 2018



Annexe 2

Tableau récapitulatif des valeurs moyennes de **a.** Longueur (mm), **b.** Largeur (mm), **c.** Epaisseur (mm) initiales et finales des huîtres en fonction du bassin, de l'âge et de la méthode d'élevage

a.

Bassin	Age	Longueur				
		Initiale	Poche	Biomimétisme Horizontal	Biomimétisme Vertical	Elevage à plat
Arcachon	Naissain	26,0	50,0	51,1	50,7	80,5
	18 mois	58,6	72,7	73,3	73,2	
	30 mois	63,9	72,2	70,7	70,2	
Marennes-Oléron	Naissain	30,9	56,6	46,1	48,6	
	18 mois	55,4	71,4	63,2	61,1	
	30 mois	67,0	78,2	74,9	74,4	

b.

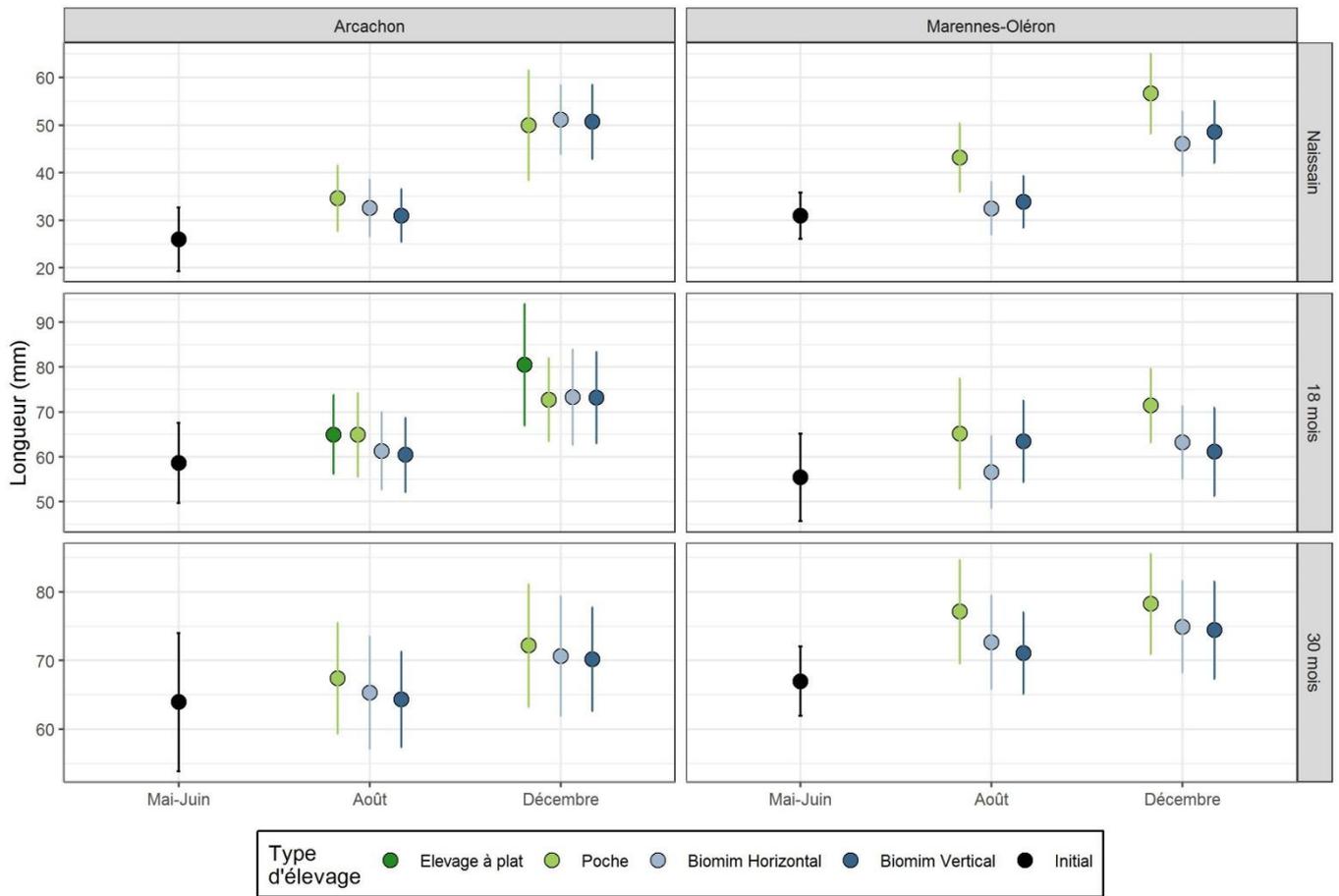
Bassin	Age	Largeur				
		Initiale	Poche	Biomimétisme Horizontal	Biomimétisme Vertical	Elevage à plat
Arcachon	Naissain	15,8	26,6	33,4	32,3	41,1
	18 mois	28,2	38,2	39,9	39,0	
	30 mois	34,0	36,7	38,1	37,5	
Marennes-Oléron	Naissain	21,2	32,3	33,4	31,9	
	18 mois	28,2	40,1	35,2	36,7	
	30 mois	37,5	43,4	40,5	39,9	

c.

Bassin	Age	Epaisseur				
		Initiale	Poche	Biomimétisme Horizontal	Biomimétisme Vertical	Elevage à plat
Arcachon	Naissain	8,1	13,6	17,4	17,2	23,2
	18 mois	15,6	20,6	23,4	22,1	
	30 mois	19,8	22,6	23,8	24,0	
Marennes-Oléron	Naissain	10,2	18,2	19,2	19,7	
	18 mois	18,2	21,7	21,1	20,2	
	30 mois	23,3	25,5	24,6	24,4	

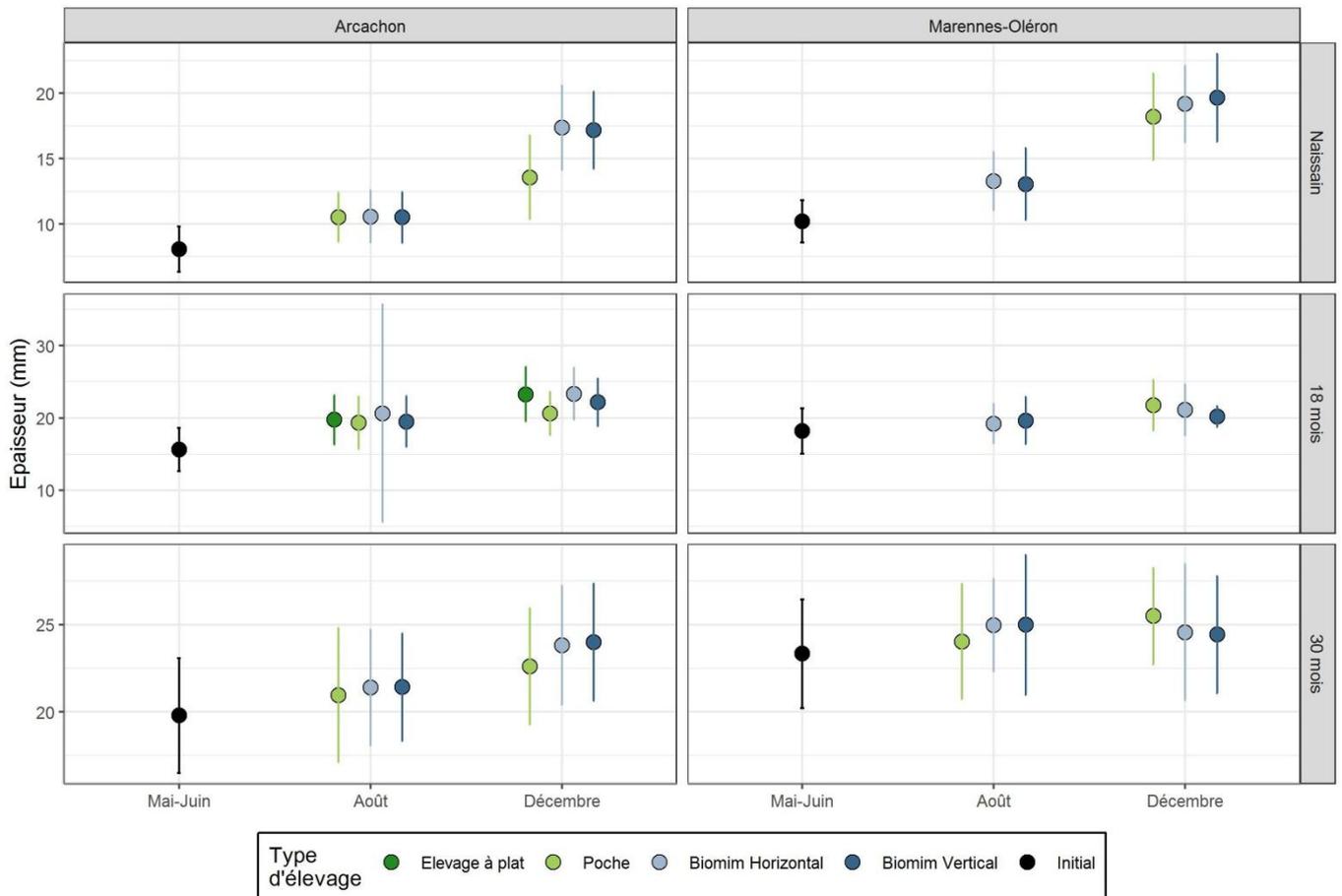
Annexe 3

Longueur totale individuelle (mm), mesurée en août et décembre 2018, des huîtres des 3 classes d'âge en fonction de la méthode d'élevage et du bassin ostréicole. Valeur moyenne \pm écart-type.



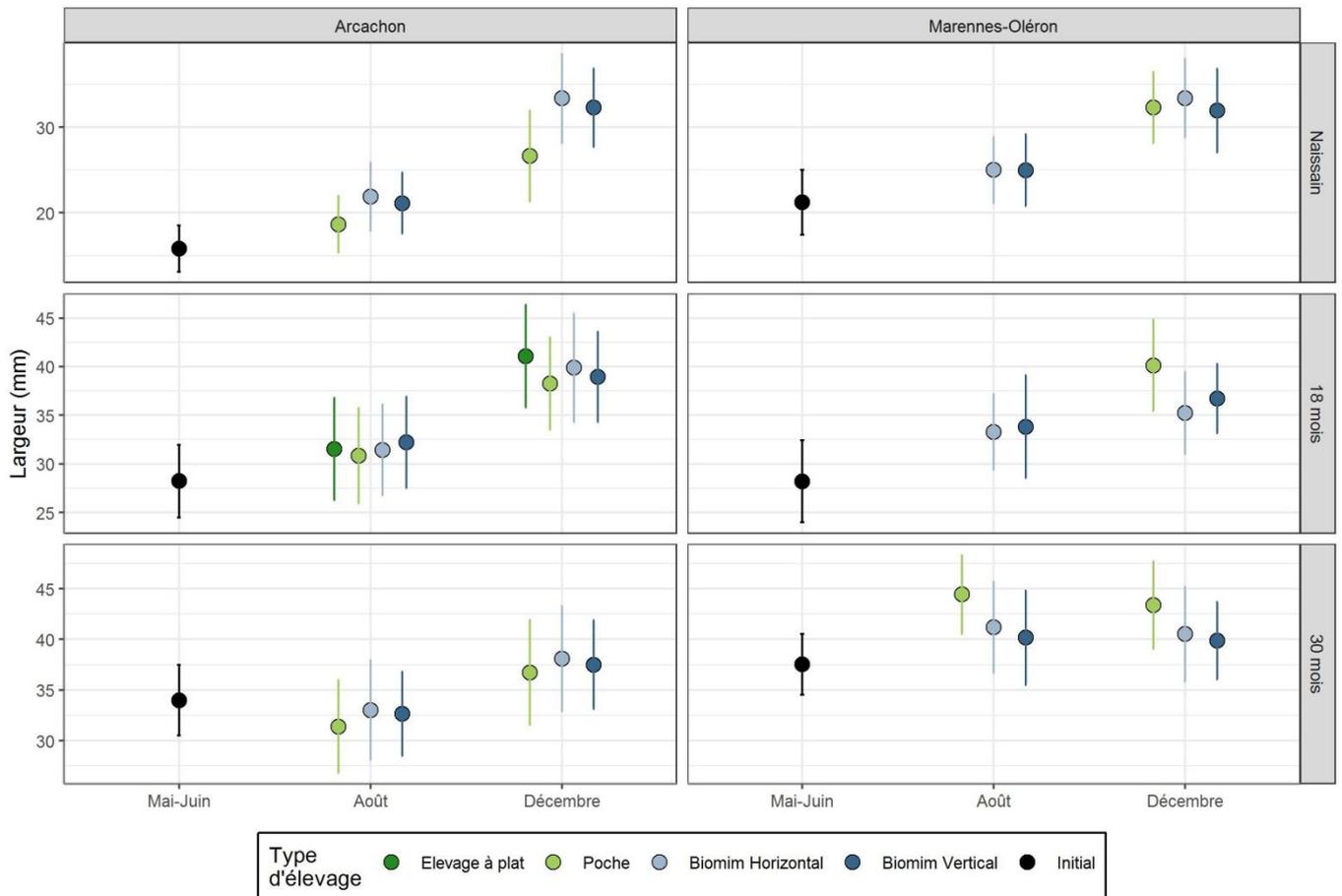
Annexe 4

Épaisseur totale individuelle (mm), mesurée en août et décembre 2018, des huîtres des 3 classes d'âge en fonction de la méthode d'élevage et du bassin ostréicole. Valeur moyenne ± écart-type.



Annexe 5

Largeur totale individuelle (mm), mesurée en août et décembre 2018, des huîtres des 3 classes d'âge en fonction de la méthode d'élevage et du bassin ostréicole. Valeur moyenne \pm écart-type.



Annexe 6

Photographie montrant des huîtres d'élevage à plat broyées par des prédateurs, tels que les raies et dorade.



Résumé

De nos jours, le secteur ostréicole est marqué par des coûts de production à la hausse et des performances d'élevage en baisse de l'huître creuse, remettant en cause l'usage massif de l'élevage en poche surélevée. Ce projet a pour objectif de proposer une technique alternative de culture à plat, utilisable par l'ensemble des professionnels, qui soit économiquement et environnementalement viable sur le long terme

Le biomimétisme consiste à reproduire artificiellement une ou plusieurs propriétés d'un organisme vivant. Dans le cadre de ce projet, des huîtres de 3 classes d'âges : Naissains, 18 mois et 30 mois « boudeuses », ont été collées par un plot de ciment sur un support fixé sur le sol. Deux méthodes de collage ont été testées : horizontalement une à une et verticalement par groupe de deux ou trois, sur un plot de ciment. Après 7 mois d'élevage sur l'estran des Bassins d'Arcachon et de Marennes-Oléron, les performances d'élevage de ces huîtres biomimétiques ont été comparées avec celles élevées en poche surélevée. Hormis sur les sites où le phénomène d'envasement était important, les performances zootechniques d'huîtres biomimétiques étaient équivalentes à celles en surélevé. En particulier, le naissain biomimétique présente une forme caractéristique, plus ronde que ces congénères élevés en poche. Les huîtres de 30 mois collées horizontalement au sol ont obtenu des indices de qualité supérieurs aux autres, suggérant un intérêt pour la méthode d'élevage biomimétique lors d'une phase de finition.

Le développement de l'élevage biomimétique devra être associé à la recherche de solutions de mécanisation et de valorisation des produits. A l'avenir, d'autres expérimentations devraient être menées pour évaluer les performances zootechniques de cette méthode au cours d'un cycle d'élevage complet. En parallèle, une étude approfondie des coûts de production est nécessaire, afin d'estimer au mieux la rentabilité de cette méthode comparativement à l'élevage surélevé.