

L'Institut Agro Rennes-Angers

Site d'Angers  Site de Rennes

Année universitaire : 2021 - 2022

Spécialité : Ingénieur Agronome

Spécialisation (et option éventuelle) :

Sciences Halieutiques et Aquacoles  
(Aquaculture)

### Mémoire de fin d'études

- d'ingénieur de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)
- de master de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)
- de l'Institut Agro Montpellier (étudiant arrivé en M2)
- d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2) : Vetagro Sup

# Mise en évidence et quantification des relations trophiques au sein d'un système d'Aquaculture Multi-Trophique Intégrée (AMTI) en milieu ouvert : application à l'estuaire du Trieux

(Côtes d'Armor, France)

Par : Iroise MATHONNET



**Soutenu à Rennes le 16/09/2022**

**Devant le jury composé de :**

Président et enseignant référent : Gregory RAYMOND

Maître de stage : Sarah BOUCHEMOUSSE avec la collaboration de Christophe JAEGER & Joël AUBIN (UMR SAS, INRAe Rennes) et Bastien SADOUL & Hervé LE BRIS (UMR Decod, Institut Agro Rennes- Angers)

Autres membres du jury :

Olivier LE PAPE (enseignant chercheur Institut Agro Rennes – Angers)

Sébastien LACHAMBRE (jury extérieur, co-gérant EARL Gyla)

*Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle de l'Institut Agro Rennes-Angers*

Ce document est soumis aux conditions d'utilisation «Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 4.0 France» disponible en ligne <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>



## Fiche de confidentialité et de diffusion du mémoire

### Confidentialité

Non  Oui si oui :  1 an  5 ans  10 ans

Pendant toute la durée de confidentialité, aucune diffusion du mémoire n'est possible (1).

Date et signature du maître de stage (2) : 15/09/2022  
(ou de l'étudiant-entrepreneur)


A la fin de la période de confidentialité, sa diffusion est soumise aux règles ci-dessous (droits d'auteur et autorisation de diffusion par l'enseignant à renseigner).

### Droits d'auteur

L'auteur(3) **Nom Prénom** Iroise MATHONNET autorise la diffusion de son travail (immédiatement ou à la fin de la période de confidentialité)

Oui  Non

Si oui, il autorise

- la diffusion papier du mémoire uniquement(4)  
 la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé  
 la diffusion papier et électronique du mémoire (joindre dans ce cas la fiche de conformité du mémoire numérique et le contrat de diffusion)

(Facultatif)  accepte de placer son mémoire sous licence Creative commons CC-By-Nc-Nd (voir Guide du mémoire Chap 1.4 page 6)

Date et signature de l'auteur : 15/09/2022



### Autorisation de diffusion par le responsable de spécialisation ou son représentant

L'enseignant juge le mémoire de qualité suffisante pour être diffusé (immédiatement ou à la fin de la période de confidentialité)

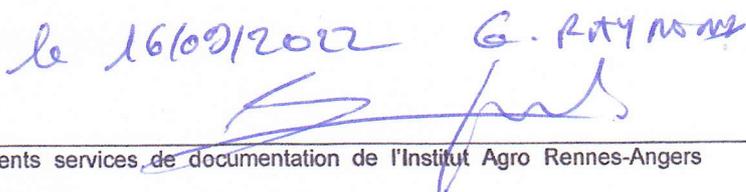
Oui  Non

Si non, seul le titre du mémoire apparaîtra dans les bases de données.

Si oui, il autorise

- la diffusion papier du mémoire uniquement(4)  
 la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé  
 la diffusion papier et électronique du mémoire

Date et signature de l'enseignant :

le 16/09/2022 

(1) L'administration, les enseignants et les différents services de documentation de l'Institut Agro Rennes-Angers s'engagent à respecter cette confidentialité.

(2) Signature et cachet de l'organisme

(3) Auteur = étudiant qui réalise son mémoire de fin d'études

(4) La référence bibliographique (= Nom de l'auteur, titre du mémoire, année de soutenance, diplôme, spécialité et spécialisation/Option)) sera signalée dans les bases de données documentaires sans le résumé

## Remerciements

Je remercie l'Institut Agro, l'INRAe et le CEVA de m'avoir permis d'effectuer mon stage de fin d'étude sur un projet de développement de l'AMTI en mer, sujet qui me passionne. Et je remercie notamment toute l'équipe du CEVA de m'avoir accueillie dans sa structure pour toute la durée de mon stage.

Je remercie plus particulièrement Sarah qui m'a encadrée, épaulée, guidée et fait confiance dans toutes mes démarches, Hervé, Bastien, Joël et Christophe pour leur participation à l'échantillonnage et/ou au conditionnement des échantillons, leur encadrement, leur aide dès que je me retrouvais en difficulté, et leurs commentaires qui m'ont permis d'avancer. Je remercie aussi Grégory pour son attention et sa réactivité lors de mon premier point d'étape, cela m'a permis de bien cibler mes objectifs à suivre sur les 6 mois.

Je remercie grandement les producteurs de l'estuaire, Anne et Daniel (Ferme Marine du Trieux), Elodie, Inès et Claire-Marine (ALEOR) et tous les conchyliculteurs que j'ai pu rencontrer, qui m'ont consacré de leur temps pour répondre à mes questions. Merci de votre sincérité et de votre générosité, sans vous ce rapport n'existerait pas.

Je remercie également Jean, Loann, Louis, et Mathis, pour leur aide que ce soit lors des prospections de terrains, lors de l'échantillonnage en mer ou dans ma recherche de matériel, et pour la bonne ambiance au sein du pôle AQUAS.

Je remercie aussi le pôle EENVI, Anthony pour m'avoir fourni les couches de cartographie, et les données de paramètres environnementaux. Et Pierre- Emmanuel pour m'avoir donné un sacré coup de main sur la partie modèle, notamment pour les compartiments ostréicoles et algocoles.

Merci aussi à tous ceux que je n'ai pas cité, ceux avec qui j'ai passé de bons moments pendant les pauses et/ou en dehors du travail. Je remercie tous ces collègues qui sont devenus des amis, pour ces moments partagés. Vous avez fait de mon dernier stage une aventure professionnelle et humaine très enrichissante.

Je remercie mes colocataires de l'hébergement pour ces belles rencontres et ces moments partagés.

Et merci à mes amis et ma famille qui m'ont toujours soutenue dans ce que j'entreprends.

# Sommaire

<b>REMERCIEMENTS</b> .....	<b>1</b>
<b>SOMMAIRE</b> .....	<b>2</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>4</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>5</b>
<b>LISTE DES ANNEXES</b> .....	<b>6</b>
<b>LISTE DES ABREVIATIONS</b> .....	<b>7</b>
<b>I. INTRODUCTION GENERALE</b> .....	<b>8</b>
A) LES ENJEUX ACTUELS ET A VENIR DE L'AQUACULTURE .....	8
B) L'AQUACULTURE MULTI-TROPHIQUE INTEGREE .....	8
C) OBJECTIFS ET DESCRIPTION DU PROJET AMIMA .....	10
a) <i>La méthode directe</i> .....	10
b) <i>La méthode indirecte</i> .....	11
D) MON PROJET DE STAGE : ELABORATION, APPLICATION ET EVALUATION DES METHODES IDENTIFIEES POUR LE MONITORING ENVIRONNEMENTAL DE L'AMTI DANS LE CONTEXTE DE L'ESTUAIRE DU TRIEUX .....	12
<b>II. MATERIELS &amp; METHODES</b> .....	<b>12</b>
A) LA ZONE D'ETUDE : CONTEXTE DE L'ESTUAIRE DU TRIEUX .....	12
a) <i>Le bassin versant du Trieux : l'amont</i> .....	12
b) <i>L'estuaire du Trieux : l'aval</i> .....	13
B) METHODES DIRECTES : STRATEGIE D'ECHANTILLONNAGE .....	14
a) <i>Critères utilisés pour établir la stratégie d'échantillonnage</i> .....	14
b) <i>Identification et choix des espèces</i> .....	15
c) <i>L'hydrodynamisme de l'estuaire</i> .....	15
C) METHODES INDIRECTES : MODELISATION DES FLUX DE MATIERES .....	16
a) <i>Stratégie d'utilisation des modèles : simple, évolutif, interactif</i> .....	16
b) <i>Bilans de masses et métabolisme des espèces étudiées</i> .....	16
c) <i>Mise en œuvre des modèles de bilan de masses dynamiques</i> .....	19
d) <i>Bilan de masse global avec interaction des différents compartiments et du bassin versant</i> ....	20
e) <i>Les données d'entrée : dépendance des acteurs de l'estuaire</i> .....	20
<b>III. RESULTATS</b> .....	<b>22</b>
A) METHODE DIRECTE .....	22
a) <i>Elaboration du plan d'échantillonnage théorique</i> .....	22
b) <i>Contraintes naturelles et techniques identifiées et à prendre en compte</i> .....	23
c) <i>Réalisation du plan d'échantillonnage final</i> .....	25
B) METHODE INDIRECTE .....	26
a) <i>Le compartiment piscicole : données et bilans de masses</i> .....	26
b) <i>Le compartiment ostréicole : données &amp; bilans de masses</i> .....	28
c) <i>Le compartiment algocole : données et bilans de masses</i> .....	33
d) <i>Synthèse des flux et scénarios</i> .....	35
<b>IV. DISCUSSION</b> .....	<b>35</b>
A) METHODE DIRECTE : STRATEGIE ET PLAN D'ECHANTILLONNAGE .....	35
B) METHODE INDIRECTES : BILAN DE MASSE DES COMPARTIMENTS AQUACOLES .....	36
a) <i>Compartiment piscicole</i> .....	36
b) <i>Compartiment ostréicole</i> .....	37
c) <i>Compartiment algocole</i> .....	38
C) METHODE DIRECTE : BILAN DE MASSE A L'ECHELLE DE L'ESTUAIRE DU TRIEUX .....	39
a) <i>Limites du bilan de masse appliqué dans cette étude</i> .....	39
b) <i>Vers une complexification des modèles : variations spatiotemporelles et hydrodynamisme</i> ....	40
D) OUVERTURE & PERSPECTIVES DES BILANS DE MASSES .....	41

<b>V. CONCLUSION .....</b>	<b>41</b>
<b>VI. BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>43</b>
ARTICLES & REVUES.....	43
SITOGRAFIE .....	47
<b>VII. ANNEXES .....</b>	<b>49</b>

## Liste des figures

**Figure 1** : Représentation schématique d'un système AMTI en milieu ouvert

**Figure 2** : Zone d'étude du projet AMIMA et localisation des concessions des différents producteurs

**Figure 3a** : Métabolisme de l'azote et du phosphore chez les espèces piscicoles (X = N ou P)

**Figure 3b** : Métabolisme de l'azote et du phosphore chez l'huître creuse

**Figure 3c** : Métabolisme de l'azote et du phosphore chez *Alaria esculenta*

**Figure 4** : Plan d'échantillonnage théorique idéal

**Figure 5** : Points prospectés en amont de l'échantillonnage

**Figure 6** : Répartition des échantillons prélevés

**Figure 7** : Bilan de masse du compartiment piscicole sur l'intégralité de la période d'étude

**Figure 8** : Evolution de la MOM dissoute (pseudo-urines) (kg) issues des truites de la FMT au cours de la période d'élevage

**Figure 9** : Evolution de la MOM particulières (fécales) (kg) issues des truites de la FMT au cours de la période d'élevage

**Figure 10** : Occupation moyenne de la surface (%) des concessions des 6 producteurs interrogés sur la période d'étude

**Figure 11** : Evolution de la biomasse totale présente (T) sur les concessions des 6 producteurs interrogés sur la période d'étude

**Figure 12** : Evolution de la biomasse totale d'huîtres creuses présente (T) sur les concessions ostréicoles exploitées de l'estuaire du Trieux sur la période d'étude

**Figure 13** : Bilan de masse du compartiment ostréicole sur la période d'étude du projet AMIMA

**Figure 14** : Quantité moyenne (kg) d'N émis dans les fèces et pseudofèces par la biomasse d'huître élevées dans l'estuaire du Trieux sur la période d'étude

**Figure 15** : Quantité moyenne (kg) d'N et P organiques totaux émis par la biomasse d'huître élevées dans l'estuaire du Trieux sur la période d'étude

**Figure 16** : Bilan de masse du compartiment algocole sur la période d'étude du projet AMIMA

**Figure 17** : Quantité moyenne (kg) d'N et P absorbée par *Alaria esculenta* sur la période d'étude

## Liste des tableaux

**Tableau 1** : Description des marqueurs retenus pour le suivi

**Tableau 2** : Faune invertébrée et macro-algues potentielles de l'estuaire du Trieux

**Tableau 3** : Données du métabolisme de la truite arc-en-ciel

**Tableau 4** : Données du métabolisme de l'huitre creuse

**Tableau 5** : Données du métabolisme d'*Alaria esculenta*

**Tableau 6** : Informations à collecter auprès des producteurs

**Tableau 7** : Paramètres environnementaux mensuels moyens (pôle EENVI, CEVA)

**Tableau 8** : Faune et flore de l'estuaire du Trieux identifiées et sélectionnées (gras) lors des prospections

**Tableau 9** : Récapitulatif des échantillons prélevés

**Tableau 10** : Données de production piscicoles collectées et/ou estimées (FMT)

**Tableau 11** : Données de production ostréicole obtenues par producteur

**Tableau 12** : Paramètres de production calculés et homogénéisés par ostréiculteur

**Tableau 13** : Données de surfaces exploitées et de production d'huitre creuse sur la zone et la période d'étude

**Tableau 14** : Données de production algocole obtenues

**Tableau 15** : Bilan de masse finaux (N, P) selon différents scénarios

**Tableau 16** : Comparaison des sorties du modèle piscicole et de la littérature

**Tableau 17** : Comparaison des sorties du modèle ostréicole et de la littérature

**Tableau 18** : Comparaison des sorties du modèle algal et de la littérature

**Tableau 19** : Avantages & inconvénients des différents modèles utilisables

## Liste des annexes

**Annexe 1** : Evolution du tonnage mondial produit de 1950 à 2018 par la pêche et l'aquaculture (FAO 2020)

**Annexe 2** : Représentation cartographique de certaines activités anthropiques du bassin versant du Trieux

**Annexe 3** : Carte des habitats benthiques de la zone intertidale du secteur Trégor-Goëlo (Bajjouk, 2009)

**Annexe 4** : Carte des habitats benthiques de la zone subtidale de l'estuaire du Trieux

**Annexe 5a** : Modèles de dispersion de particules (MARS) dans l'estuaire du Trieux selon un vent d'Est, une profondeur de 20 m et un coefficient de 70

**Annexe 5b** : Modèles de dispersion de particules (MARS) dans l'estuaire du Trieux selon un vent d'Ouest, une profondeur de 20 m et un coefficient de 70

**Annexe 6** : Equations et paramètres intermédiaires nécessaires à l'estimation des rejets et de l'absorption de l'huitre creuse

**Annexe 7** : Paramètres environnementaux (pôle EENVI, CEVA)

**Annexe 8** : Equations des facteurs de croissance algales

**Annexe 9** : Direction du vent pour Pleubian (mars à mai 2022)

**Annexe 10** : Représentation des voies d'accès des différents points d'échantillonnage

**Annexe 11a** : Profils de l'occupation des surfaces des concessions des producteurs interrogés sur la période d'étude

**Annexe 11b** : Profils des biomasses présentes aux différents stades d'élevage sur les concessions des producteurs interrogés sur la période d'étude

**Annexe 12** : Evolution moyenne de la croissance d'une truite de la FMT sur la période d'élevage

**Annexe 13** : Répartition des pertes totales d'N des truites de la FMT sur la période d'élevage

**Annexe 14** : Répartition des pertes totales de P des truites de la FMT sur la période d'élevage

**Annexe 15** : Courbe de croissance de la biomasse totale (T) d'*Alaria esculenta* cultivée sur la période d'étude

**Annexe 16** : Bilan de masse final des compartiments aquacoles du Trieux sur la période de novembre à juin

**Annexe 17** : Evolution des facteurs limitants la croissance algale sur la période d'étude

## Liste des abréviations

**AG** : Acide Gras

**AMIMA** : Assessment of environmental Monitoring methods for Integrated Management of Aquaculture in open sea

**AMTI** : Aquaculture Multi-Trophique Intégrée

**BV** : Bassin versant

**C** : Carbone

**CEVA** : Centre d'Etude et de Valorisation des Algues

**CRC BN** : Comité Régional Conchylicole de Bretagne Nord

**CUD** : Coefficient d'Utilisation Digestive

**DCSMM** : Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin

**DEB** : Dynamic Energy Budget

**DRAAF** : Direction Régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt

**DREAL** : Direction Régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement

**EENVI** : Pôle Ecologie & Environnement (CEVA)

**ETM** : Elément Trace Métallique

**FMT** : Ferme Marine du Trieux

**HAPs** : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

**IC** : Indice de Conversion

**IS** : Isotope Stable

**ITK** : Itinéraire Technique

**MES** : Matière En Suspension

**MM** : Matière Minérale

**MO** : Matière Organique

**MOM** : Matière Organique et Minérale

**N** : Azote

**OFB** : Office Français de la Biodiversité

**P** : Phosphore

**PLU** : Plan Local d'Urbanisme

**PM** : Poids Moyen

**ROCCH** : Réseau d'Observatoires de la Contamination Chimique

**SFG** : Scope For Growth

**SGR** : Specific Growth Rate

**STEP** : STation d'EPuration des eaux usées

**TGC** : Thermal Growth Coefficient

# I. Introduction générale

## A) Les enjeux actuels et à venir de l'aquaculture

La production mondiale des produits aquatiques représentait 178,5 millions de tonnes en 2018 dont 54% issus de la pêche et 46% de l'aquaculture (FAO, 2020), et sur ce total, 156 millions de tonnes ont été destinées à la consommation humaine. Le secteur aquacole rattrape donc la pêche (annexe 1), favorisé par l'augmentation simultanée de la population mondiale et de la consommation des produits halieutiques. La consommation a en effet plus que doublé entre 1960 et 2018 pour atteindre 20,5 kg par habitant et par an (Buck *et al.*, 2018 ; FAO, 2020).

Ainsi l'aquaculture paraît salvatrice pour suppléer une pêche qui ne comble plus la demande et les besoins en forte croissance. Pourtant, l'aquaculture, et notamment la pisciculture, peut impacter directement le milieu par l'influence de différents facteurs :

- Génétique via l'introggression de génotypes de populations élevées vers les populations sauvages à la suite des échappements (Jensen *et al.*, 2010 ; Føre & Thorvaldsen, 2021) ;
- Chimique (toxicité) et bactériologique via l'émission d'antibiotiques dans le milieu et l'antibiorésistance des bactéries aux traitements contre des maladies (Zhang *et al.* 2022) ;
- Pathologique par la transmission d'agents pathogènes aux espèces sauvages vivant à proximité (Alston *et al.*, 2005 ; Chary *et al.*, 2020) ;
- Organique et minéral via le relargage dans l'environnement de déchets par les poissons d'élevage, provoquant l'eutrophisation du milieu (Alston *et al.*, 2005 ; Olsen *et al.*, 2008).

Ce dernier type d'impact se trouve être un des plus étudié en pisciculture aujourd'hui et correspond au cadre conceptuel de mon sujet de stage. Ces rejets se composent d'aliments non consommés et des déchets métaboliques (fèces et rejets dissous) des poissons, l'ensemble constituant la « matière organique et minérale » (MOM). L'essentiel des déchets organiques, qui peuvent être sous formes particulières ou dissoutes, est composé de substances hydrocarbonées, d'azote, de soufre, de phosphore, etc. Les déchets minéraux sont quant à eux, essentiellement composés d'ammoniac ( $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$ ), de ses dérivés ( $\text{NO}_2^-/\text{NO}_3^-$ ) et de la forme inorganique du phosphore ( $\text{PO}_4^{3-}$ ). Ce sont donc généralement l'azote (N) et le phosphore (P) qui sont analysés pour le suivi des rejets puisqu'ils contribuent à l'eutrophisation des écosystèmes locaux (Azevedo *et al.*, 2011 ; Reid *et al.*, 2013 ; Reid *et al.*, 2018 ; Jiao *et al.*, 2022). Dans les cas extrêmes, un excès de MOM peut conduire à des zones d'anoxies impactant la vie aquatique. En outre, ces apports peuvent modifier les caractéristiques physiques et chimiques de l'eau et du sédiment, avec des répercussions sur les caractéristiques biologiques telles que la biodiversité et la biomasse des espèces présentes. Ainsi, les réseaux trophiques peuvent être perturbés par ces apports (Alston *et al.*, 2005 ; Olsen *et al.*, 2008).

## B) L'Aquaculture Multi-Trophique Intégrée

Dans l'objectif de développer une aquaculture plus vertueuse, un concept de production aquacole, nommé Aquaculture Multi-Trophique Intégrée (AMTI) se répand depuis une vingtaine d'année. L'AMTI est un mode de production qui consiste à produire au sein d'un même environnement des espèces aquatiques de niveaux trophiques différents, c'est-à-dire des espèces dont les déchets permettent la nutrition d'espèces d'un ou plusieurs niveaux trophiques inférieurs. Ceci inclut généralement des espèces nourries, souvent piscicoles et carnivores, et des espèces extractives qui valorisent l'aliment et la MOM particulière et dissoute issue des rejets de l'espèce nourrie. Le but est de reproduire les liens trophiques des écosystèmes naturels, au sein d'écosystèmes artificiels et productifs (Chopin *et al.*, 2004 ; Chopin, 2011 ; Chopin *et al.*, 2012 ; Reid *et al.*, 2018 ; Chary *et al.*, 2020).

Les systèmes de production qui correspondent à la définition d'AMTI sont nombreux. Ici, c'est l'AMTI en mer qui est étudiée (figure 1). Le plus souvent, ces systèmes sont composés d'un compartiment piscicole, qui constitue l'espèce nourrie, et de compartiments avec des espèces extractives. Ces dernières peuvent être suspensivores (filtreuses) telles que les huîtres et les moules qui filtrent la MO de petite taille, détritivores benthiques telles que les holothuries et les oursins qui assimilent la MO particulaire sédimentée, et autotrophes telles que les macroalgues qui absorbent la MM dissoute (Buck *et al.*, 2018 ; Chary *et al.*, 2020).

Contrairement aux systèmes à terre, ils se démarquent des autres sur un point crucial : ils se situent en milieu ouvert. Le fonctionnement de tels systèmes reste actuellement très théorique et les projets existants datent seulement des années 2000 (Chopin *et al.*, 2004 ; Buck *et al.*, 2018). De ce fait, aujourd'hui peu de preuves et de méthodes concrètes permettent d'évaluer l'efficacité réelle de ces systèmes. Pourtant, ils commencent à prendre de l'importance à l'échelle mondiale dans différents pays (*e.g.* Israël, Canada, Nouvelle-Zélande, etc.) qui souhaitent développer une aquaculture plus résiliente et respectueuse de l'environnement (Chopin, 2011 ; Buck *et al.*, 2018). Les systèmes d'AMTI ont également pour objectifs d'être économiquement viables, socialement acceptés et résilients en produisant simultanément des espèces différentes. Finalement, le développement de l'AMTI pose tout autant de questions éthiques, morales et politiques que techniques.

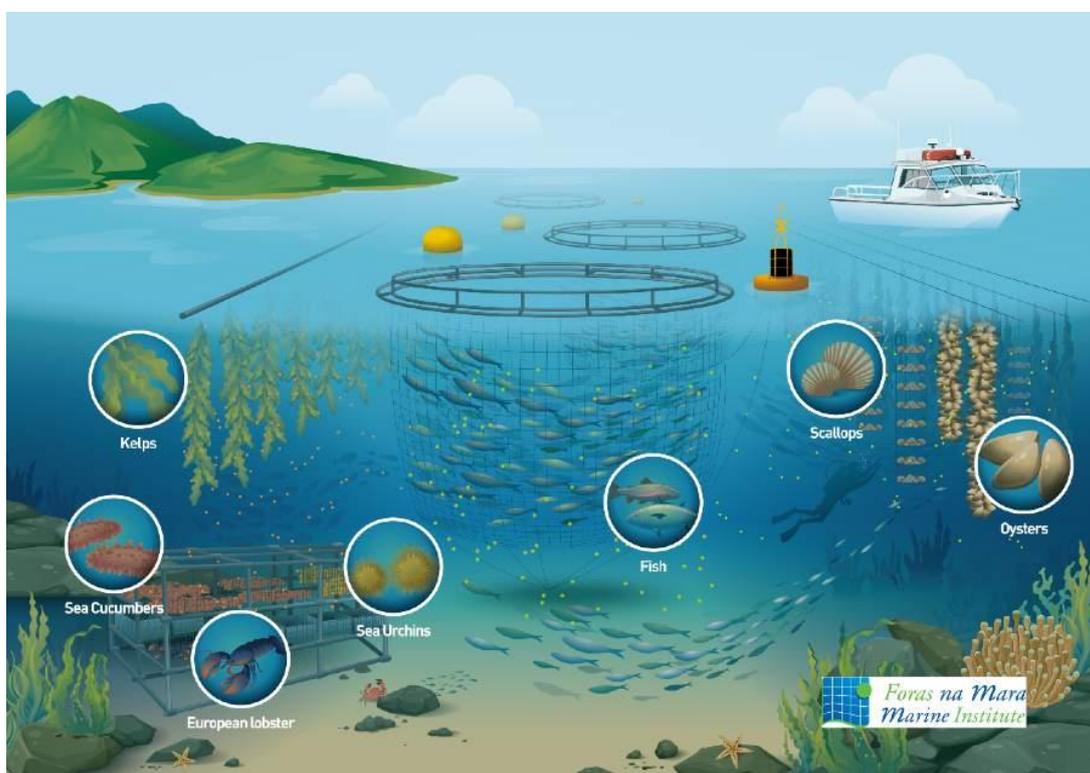


Figure 1 : Représentation schématique d'un système AMTI en milieu ouvert (source : phyconomy.net)

Ensuite, l'aquaculture en mer et plus particulièrement l'intégration de systèmes d'AMTI complexifie grandement le fonctionnement de l'écosystème de production. En effet, de nombreuses activités anthropiques sont présentes dans les zones côtières comme le trafic maritime, des productions aquacoles, de la pêche, des activités militaires, des zones de mouillages et des activités nautiques, des Aires Marines Protégées et maintenant des parcs éoliens offshore, favorisant les conflits d'usage (Buck *et al.*, 2018).

D'autres activités en amont du bassin versant (BV) peuvent aussi avoir un impact sur les relations trophiques, du fait de l'apport plus ou moins important de MOM et/ou de polluants issus des secteurs industriels, agricoles ou urbains. La courantologie et l'hydrodynamisme de la zone apportent également une incertitude sur l'évolution spatiale et temporelle de la matière dans le milieu (Alston *et al.*, 2005).

C'est sur cette question de la mesure de l'efficacité réelle de l'AMTI en mer que l'importance d'évaluer des méthodologies de monitoring environnemental a émergé. L'objectif est d'identifier et caractériser les quantités de MOM réellement recyclées issues initialement d'un élevage piscicole dans un environnement abritant d'autres productions aquacoles supposées en bénéficier. Et c'est précisément sur ce sujet que porte le projet AMIMA.

### C) Objectifs et description du projet AMIMA

Le projet AMIMA « *Assessment of environmental Monitoring methods for Integrated Management of Aquaculture in open sea* », porté par le Centre d'Etude et de Valorisation des Algues (CEVA), a débuté en 2020 et se déroule sur 30 mois. Il a pour but d'identifier une méthode de monitoring environnemental spécifique à l'AMTI en milieu ouvert et de l'évaluer sur un cas d'étude. Deux organismes publics que sont l'Institut Agro (UMR Decod) et l'INRAE (UMR SAS) de Rennes, sont partenaires scientifiques du projet. Le projet se découpe en trois étapes successives :

- I) Effectuer un inventaire des indicateurs et méthodes utilisés pour l'étude des systèmes écologiques et aquacoles en AMTI,
- II) Proposer une méthodologie adaptée aux systèmes AMTI en mer,
- III) Eprouver la méthodologie sur la zone d'étude de l'estuaire du Trieux qui concentre une grande diversité de production aquacole (cf. II.A).

En amont de mon stage, les deux premières étapes ont permis de sélectionner deux types de méthodes jugées pertinentes pour étudier les flux de MOM en milieu ouvert : une méthode directe et une méthode indirecte.

#### a) La méthode directe

La méthode directe est une méthode *in situ* qui consiste à analyser une sélection de marqueurs destinés à identifier et quantifier la signature d'un élevage piscicole dans les autres compartiments aquacoles extracteurs et certaines espèces de la biocénose (espèces présentes dans l'environnement).

Les marqueurs en question, sélectionnés sur la base de leurs avantages et limites d'application dans les systèmes ouverts et de leur complémentarité en termes d'informations collectées sont :

- L'ADN des poissons élevés, par l'utilisation de barcode génétique spécifique,
- Les isotopes stables (IS) du carbone et de l'azote,
- Certains acides gras (AG) issus de l'aliment des poissons,
- Les éléments traces métalliques (ETM), pour suivre la signature de l'aliment qui lui est donné.

Ces marqueurs ont déjà été utilisés par Chou *et al.* (2002) et Woodcock *et al.* (2017) pour suivre les effluents de piscicultures, et des variations de concentrations sont observés.

La détection d'ADN par l'utilisation de marqueurs génétiques spécifiques de l'espèce ciblée (*i.e.* barcode) est une méthode relativement commune pour identifier la présence de l'espèce dans un milieu. En aquaculture, cette méthode est généralement utilisée pour quantifier des gènes spécifiques dans les effluents des piscicultures (*e.g.* gènes de résistance aux antibiotiques, Jang *et al.*, 2018).

Les organismes ont également un profil d'AG unique qui se transfère des proies aux prédateurs avec peu de modifications, ce qui permet d'identifier les liens trophiques. De plus, les plantes terrestres qui composent la ration des poissons d'élevage contiennent une forte concentration en acide oléique et linoléique, ce qui réduit la concentration en oméga 3 et permet donc de tracer les effluents piscicoles (Fernandez-Jover, 2010 ; Woodcock *et al.*, 2017).

La détection d'IS peut également s'avérer efficace pour identifier l'existence de relations trophiques. Ils sont souvent au nombre de deux par élément, lourds ou légers suivant le nombre de neutrons dans leur noyau atomique. Les isotopes lourds ( $^{15}\text{N}$  et  $^{13}\text{C}$ ) sont dits stables, beaucoup moins abondants que les légers et ont tendance à être préférentiellement accumulés dans les tissus des animaux. Ce sont donc eux qui sont recherchés dans les analyses (Schaal, 2009 ; Gamboa-Delgado, 2022).

Enfin, les ETM sont intéressants à rechercher dans les tissus des espèces afin de suivre l'aliment composé de certains ETM spécifiques tels que le Zn, le Mg ou le Cu. Cependant, cette analyse a été exclue puisque certains métaux (Cu, Cd, Zn) sont déjà présents dans l'eau du Trieux d'après le rapport du Réseau d'Observatoires de la Contamination Chimique (ROCCH) (Chiffolleau, 2017) et ont pour origine probable l'aliment des animaux terrestres élevés en amont du BV (lessivage des excréments) (Bouvarel *et al.*, 2010).

Ainsi, l'analyse de la présence et la quantification de marqueurs retenus dans une sélection d'organismes présents dans l'estuaire rendrait compte de l'existence des flux de la MOM issus de la pisciculture et déterminerait son aire d'influence (Gao *et al.*, 2006 ; Woodcock *et al.*, 2017). Le descriptif des tissus ou éléments utilisés ainsi que les marqueurs à détecter sont représentés dans le tableau 1 ci-après.

Tableau 1 : Description des marqueurs retenus pour le suivi

Analyses	Détection	Tissus / élément **	Méthode de mesure	Avantages	Inconvénients
<b>Barcoding ADN</b>	Gène mitochondrial *	Glande digestive (faune) Aliment	PCR/ qPCR	Marqueurs spécifiques déjà existants	Influence des effluents du bassin versant, non intégrateur (contenu digestif)
<b>Isotopes stables</b>	$\delta^{15}\text{N}$ , $\delta^{13}\text{C}$ **	Muscle (faune) Thalle (flore) Aliment	Spectrométrie de masse***	Eprouvée, intégration dans tissus	Temps d'intégration +++
<b>Acides gras</b>	Profil en AG (a. oléique, a. linoléique, autres ?) **	Muscle (faune) Aliment	Chromatographie en phase gazeuse GC + couplage possible avec spectrométrie de masse****		Dépend des propriétés intrinsèques, dégradation +++

\*(Mouser *et al.*, 2021), \*\* (Woodcock *et al.*, 2017), \*\*\* (Gamboa-Delgado, 2022 ; Bordeyne, 2016), \*\*\*\*HTDS<sup>†</sup>

## b) La méthode indirecte

La méthode indirecte consiste à quantifier sur la base de modèles de bilan de masse, les flux de MOM entre les différents compartiments aquacoles en tenant compte des interactions de l'environnement. Ces modèles devraient permettre de savoir dans quelle quantité la MOM est émise et recyclée entre les différents compartiments et l'estuaire d'étude. Ceci nécessite l'obtention de données environnementales et de productions issues des différents systèmes aquacoles présents.

Rappelons que parler d'AMTI revient à mettre en évidence les liens trophiques entre les compartiments ET qu'il y a extraction de la matière par récolte d'un compartiment de niveau trophique secondaire. Ainsi, la combinaison de ces deux méthodes permet de démontrer qu'il s'agit d'un système d'AMTI. La méthode directe met en évidence les liens trophiques indispensables à la définition d'AMTI, et la méthode indirecte estime les flux et l'extraction de matières des différents compartiments. La deuxième méthode apporte également la possibilité d'estimer l'intérêt écologique du système par rapport à un système non AMTI.

Ainsi, l'objectif de mon travail était la mise en œuvre des deux méthodes pour la caractérisation de l'impact environnemental d'une AMTI en milieu ouvert sur la base de l'étude de la zone de l'estuaire du Trieux.

## D) Mon projet de stage : Elaboration, application et évaluation des méthodes identifiées pour le monitoring environnemental de l'AMTI dans le contexte de l'estuaire du Trieux

Mon stage s'est déroulé en deux phases, chacune correspondant respectivement aux méthodes directe et indirecte présentées précédemment.

Tout d'abord, il s'agissait d'élaborer une stratégie d'échantillonnage dédiée au suivi des marqueurs trophiques sélectionnés pour la mise en évidence de l'existence des flux de MOM. La stratégie est définie comme « l'art de coordonner des actions et de manœuvrer habilement pour atteindre un but » (Larousse)<sup>2</sup>. L'échantillonnage, décrit d'un point de vue statistique, est « un procédé utilisé pour choisir un échantillon et qui est à la base de l'enquête par sondage ». Ainsi, l'objectif final après exploration de la zone d'étude était la mise en place d'un plan d'échantillonnage répondant à la problématique.

Par la suite, il s'agissait d'estimer les flux de matière pour les différents compartiments aquacoles grâce à des modèles de bilan de masse. Un modèle est une représentation simplifiée qui permet de matérialiser et construire une théorie sur le fonctionnement de certains faits réels. Ainsi, les modèles permettent de concevoir matériellement des situations abstraites, de les expliquer, de les rendre appréhendables, et transposables à d'autres contextes. Ils sont de plus en plus utilisés dans les prises de décisions et les prédictions, et sont parfois un des seuls appuis aux arguments scientifiques (Roy & Hasni, 2014).

Enfin, il est à noter qu'aucune donnée brute n'était disponible en début de stage. Une grande partie du travail fut donc consacrée à la recherche d'informations auprès de différents acteurs de l'estuaire.

Ce rapport présente tout d'abord la réflexion sur la stratégie d'échantillonnage et sa mise en œuvre à travers un plan d'échantillonnage sur la zone d'étude, ainsi que la méthode d'élaboration des modèles de bilan de masse et son application aux compartiments aquacoles du système. Enfin, en référence à cette méthodologie, plusieurs questions seront abordées :

- Est-ce que les méthodes employées permettent d'identifier l'ensemble des flux de MOM du système d'AMTI ?
- Est-ce que la MOM issue de l'élevage piscicole est recyclée par les compartiments aquacoles extracteurs ?
- Quelle est l'influence des apports du BV par rapport à l'élevage piscicole ?
- Quelles sont les premières leçons à tirer à travers ce cas d'étude en termes d'amélioration de la méthodologie proposée initialement ?

## II. Matériels & méthodes

### A) La zone d'étude : contexte de l'estuaire du Trieux

#### a) Le bassin versant du Trieux : l'amont

Le Trieux, petit fleuve des Côtes d'Armor, prend sa source au niveau de Kerpert, passe par Guingamp, Pontrioux (où débute l'estuaire), puis Lézardrieux et débouche devant l'Île de Bréhat. Le BV mesure 854 km<sup>2</sup> (OFB)<sup>3</sup> et possède le Leff comme affluent. Différentes structures et activités anthropiques (zones d'habitations, ports et mouillages, productions agricoles, etc.) sont présentes en amont de l'estuaire (annexe 2).

L'agglomération Guingamp-Paimpol possède également des stations de traitement des eaux usées (STEP) dont une d'envergure à Guingamp, fréquemment en surcharge hydraulique depuis quelques années, et qui parfois relargue des effluents non traités dans le Trieux, ce qui pose de sérieux problèmes de pollution et contamination bactériologique selon la DREAL<sup>4</sup>. Des travaux de réhabilitation des STEP sont en cours et devraient se terminer d'ici 2026 (Huet, 1985 ; Télégramme ; Guingamp-Paimpol Agglomération)<sup>5-9</sup>.

De plus, le draguage récurrent du port de Pontrioux et notamment en mars 2022 (La Presse d'Armor)<sup>10</sup>, pourrait provoquer un engorgement de l'estuaire en aval et davantage de matière en suspension selon le témoignage de riverains.

Enfin, le fleuve est également un point de relargage de produits phytosanitaires, de matières organiques et inorganiques issues de piscicultures en amont et de la lixiviation et du lessivage des terres agricoles (Chambre d'Agriculture de Bretagne ; DRAAF ; Géoportail)<sup>11,12,13</sup>.

Ces différentes activités anthropiques en amont du BV influencent les apports en MOM et diverses substances dans l'estuaire.

## b) L'estuaire du Trieux : l'aval

### Organisation géomorphologique de l'estuaire du Trieux

Plus en aval, l'embouchure du Trieux est composée de l'archipel de Bréhat. La figure 2 représente l'embouchure de l'estuaire et la zone d'étude du projet AMIMA. Il existe 2 chenaux qui représentent quasiment les seules zones subtidales de l'estuaire. Le chenal principal se situe dans le prolongement de l'embouchure du Trieux et est parfois dragué pour éviter l'engorgement. Sa profondeur est comprise entre 10 et 30 m environ. Le chenal secondaire au niveau du Ferlas, est plus petit, moins profond et contourne Bréhat par le sud (pointe de l'Arcouest). Sa profondeur est comprise entre 1 et 8 m environ (navicarte côtière St Quay-Portrioux – Ploumanach).

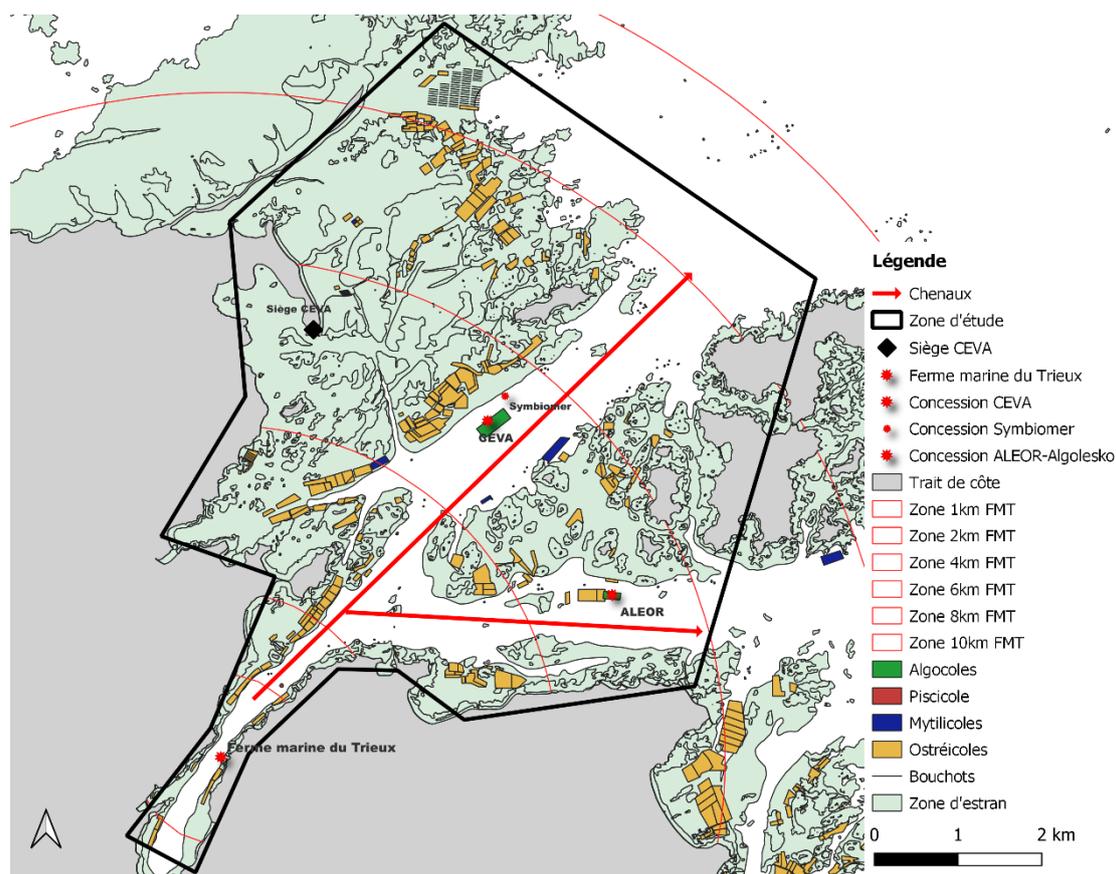


Figure 2 : Zone d'étude du projet AMIMA et localisation des concessions des différents producteurs

### La zone intertidale

Le fond de la zone intertidale de l'estuaire (annexe 3) est essentiellement composé de roches et de sables envasés. Plus au nord, derrière le Sillon de Talbert on trouve des zones de galets et cailloutis qui, avec les roches, forment des cuvettes à marée basse. Des herbiers de zostères (*Zostera marina* et *Z. noltii*) sont également répartis autour de Bréhat et

de manière plus éparse devant la pointe du Sillon. Une zone de vase marine est présente à l'ouest de l'embouchure du Trieux (Bajjouk, 2009).

#### La zone subtidale

Les données sur la composition benthique de la zone subtidale de l'estuaire paraissent moins documentées. La carte sédimentaire (annexe 4) en donne cependant un aperçu, avec une majorité de graviers à graviers caillouteux et de sables graveleux à graviers sableux. On retrouve également du maërl en quantité assez importante au sud de Bréhat. L'embouchure du Trieux est quant à elle essentiellement vaseuse. Cette diversité de substrats conditionne également les habitats benthiques subtidaux (Loarer *et al.*, 2010 ; Foussard, 2018).

Ces différences de substrats intertidaux et subtidaux sont à l'origine d'habitats diversifiés qui laissent supposer la présence d'une grande variété d'espèces dont il a fallu tenir compte dans l'élaboration du plan d'échantillonnage.

#### Les producteurs de l'estuaire du Trieux

Dans l'estuaire, plusieurs types d'aquaculture représentant les compartiments du système AMTI sont présentes : pisciculture (consommateur secondaire), conchyliculture (consommateur primaire) et algoculture (producteur primaire). Ainsi, deux fermes piscicoles s'y trouvent. La première, la Ferme Marine du Trieux (FMT), élève des truites arc-en-ciel à l'embouchure de l'estuaire. La seconde, Symbiomer, une jeune entreprise de production aquacole qui souhaite développer l'AMTI en mer, possède des cages piscicoles à côté de la concession du CEVA. Cependant, cette année l'entreprise a fait le choix de ne pas élever d'animaux.

Ensuite, d'après les données recueillies auprès du Comité Régional Conchylicole de Bretagne Nord (Données socioéconomiques 2013, CRC BN), une forte production ostréicole est présente sur la zone de Paimpol avec 8200T/an de production d'huitres creuses, soit 77% de la production annuelle des Côtes d'Armor. La zone englobe le Sillon de Talbert, l'estuaire du Trieux, la zone de Bréhat et la baie de Paimpol. S'y trouvent une vingtaine d'entreprises ostréicoles locales et une centaine d'entreprises extérieures dont les sièges sociaux sont en dehors du département, soit principalement dans le Golfe du Morbihan, en Vendée ou en Charente Maritime. Enfin, ALEOR, une entreprise de production d'algues, possède des filières d'*Alaria esculenta* dans le Ferlas, au sud de Bréhat. Le CEVA, possède une concession expérimentale dans le chenal principal, y cultive et élève des algues et des échinodermes dans le cadre de projets privés et/ou publics pour lesquels les espèces cultivées et le type de culture (co- ou mono- culture) varie en fonction des projets.

## B) Méthodes directes : stratégie d'échantillonnage

### a) Critères utilisés pour établir la stratégie d'échantillonnage

- L'intensité du signal piscicole à mettre en évidence et suivre spatialement : y a-t-il présence effective d'ADN de truite au niveau de la pisciculture et jusqu'à quelle distance des cages ? Existe-t-il un contraste isotopique très marqué entre l'aliment piscicole et le milieu naturel ?
- Le contexte physico-chimique : quelles sont les limites du panache d'influence de la pisciculture en matière particulaire et dissoute ?
- Le contexte biologique entre les compartiments aquacoles : quelle est la disponibilité des producteurs primaires (phytoplancton et macroalgues potentiellement influencés par les flux dissous) et des consommateurs primaires (invertébrés benthiques potentiellement influencés par les flux particuliers) répartis sur l'ensemble du domaine d'étude ?
- Le contexte technique : quelles sont les contraintes opérationnelles (permission de prélèvements et accessibilité de terrain), de coût (plus élevé pour le subtidal que pour l'intertidal) et d'analyses (sensibilité des méthodes) ?

C'est d'après ces critères que j'ai élaboré le plan d'échantillonnage, que j'ai ensuite appliqué au site. Pour ce faire, des simulations de l'hydrodynamisme de la zone d'étude issues du modèle MARS3D préalablement réalisés par le pôle Ecologie & Environnement (EENVI) du CEVA ont été utilisées pour estimer l'influence du courant et du vent. Des recherches bibliographiques ont également permis de connaître les spécificités de la biocénose en termes de communautés algales et d'invertébrés filtreurs benthiques. Enfin, des prospections sur le terrain ont été réalisées afin d'identifier les espèces de la biocénose réellement présentes, de vérifier l'accessibilité de l'estran par la côte et de rencontrer les conchyliculteurs pour connaître la localisation de leurs concessions et obtenir leur permission de prélèvement. Sur ces bases, le logiciel de cartographie QGIS a largement aidé aux différentes étapes d'élaboration du plan d'échantillonnage en relation avec les partenaires du projet jusqu'à sa réalisation finale. J'ai donc conçu l'ensemble des cartes du rapport qui représentent les points prospectés et échantillonnés (point GPS) afin de visualiser de façon distincte les zones d'échantillonnage, et les concessions ostréicoles et leur appartenance.

### b) Identification et choix des espèces

Les espèces principales de la biocénose ont été identifiées à l'aide du Réseau Benthique (Rebent) de l'Ifremer (Bajouk, 2009), la Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM) (Grall & Cornubert, 2012 ; Vérin *et al.*, 2012), l'Atlas de la faune marine invertébrée du golfe Normano-Breton de Le Mao *et al.* (2020) ainsi que d'autres articles spécifiques à certaines espèces (Lejart, 2009 ; Dabouineau & Ponsero, 2009). Les espèces d'intérêt pour l'étude sont identifiées en gras dans le tableau 2 ci-après.

Les producteurs primaires recensés sont des espèces pérennes intertidales comme les fucus et les mêmes espèces que celles élevées dans l'estuaire : *Alaria esculenta* (ALEOR), *Palmaria palmata* et *Saccharina latissima* (CEVA).

Les invertébrés recensés sont des espèces suspensivores : *Mytilus edulis* (et/ou *galloprovincialis*) et *Crassostrea* (= *Magallana*) *gigas*. En subtidal, il s'agit de la coquille St Jacques (*Pecten maximus*), également suspensivore.

Enfin, d'un point de vue technique, il a été choisi de conditionner les échantillons dans des sacs congélation pour les espèces de la faune et des flacons pour la flore afin d'éviter d'abimer les thalles. Ensuite, une conservation en glacière pendant l'échantillonnage, puis une congélation à -80°C jusqu'aux analyses semblait idéale pour la préservation des marqueurs d'intérêt.

Tableau 2 : Faune invertébrée et macro-algues potentielles de l'estuaire du Trieux (les espèces d'intérêt pour l'étude sont identifiées en gras)

	Faune	Flore
Intertidale	Bigorneau ( <i>Littorina littorea</i> ) Patelle ( <i>Patella vulgata</i> ) <b>Moule</b> ( <i>Mytilus spp.</i> ) <b>Huitre</b> ( <i>Crassostrea</i> (= <i>Magallana</i> ) <i>gigas</i> ) Coques ( <i>Cerastoderma edule</i> ) Polychètes ( <i>Arenicola marina</i> )	<b>Fucus</b> ( <i>F. spiralis</i> , <i>F. serratus</i> , <i>F. vesiculosus</i> ) <i>Ascophyllum nodosum</i> Ulves ( <i>U. intestinalis</i> , <i>U. lactuca</i> ) <i>Porphyra sp.</i> <b><i>Palmaria palmata</i></b>
Subtidale	Palourdes ( <i>Ruditapes decussatus</i> ) <b>Coquilles St Jacques</b> ( <i>Pecten maximus</i> )	<b><i>Saccharina latissima</i></b> <b><i>Alaria esculenta</i></b> <i>Laminaria digitata</i> <i>Laminaria hypetborea</i>

### c) L'hydrodynamisme de l'estuaire

Les sorties du modèle d'hydrodynamisme MARS réalisés par le CEVA (annexes 5a et 5b), montrent un déplacement des particules essentiellement dans les chenaux, où les fonds sont plus importants et assez peu dans les zones intertidales comportant les zones rocheuses. Il semblerait donc plus intéressant de cibler ces zones pour l'échantillonnage. Ensuite, la différence d'évolution des particules dans l'estuaire selon les secteurs de vent est

surtout marquée dans le Ferlas entre les secteurs Ouest et Est. En effet, en cas de vent d'Ouest, les particules s'y retrouvent davantage que lorsqu'il est d'Est.

Le plan d'échantillonnage devait donc prendre en compte ces particularités, et cibler davantage la zone où il est susceptible de retrouver un maximum de particules, ce qui présuppose de connaître la direction moyenne du vent dans l'estuaire.

## C) Méthodes indirectes : modélisation des flux de matières

### a) Stratégie d'utilisation des modèles : simple, évolutif, interactif

Il a été choisi de modéliser les flux d'azote (N) et de phosphore (P) issus des trois compartiments de production de l'estuaire : piscicole (truites arc-en-ciel), ostréicole (huitres creuses) et algocole (*Alaria esculenta*). La période d'étude est de 8 mois, de novembre à juin, afin de se caler sur la période de présence des truites en mer. Les données d'entrée sont les moyennes de production de chaque compartiment sur environ 8 ans.

Ensuite, la démarche a été d'établir des bilans de masses en quatre étapes de complexification :

- Un bilan individuel pour chaque compartiment aquacole considéré,
- Un bilan par compartiment à partir de la biomasse totale récoltée sur la période d'étude,
- Un bilan dynamique par compartiment en intégrant les variations mensuelles (saisonnalité) sur la période d'étude,
- Un bilan avec mise en interaction des différents compartiments et ajout des flux issus du BV.

### b) Bilans de masses et métabolisme des espèces étudiées

Afin de réaliser ces modèles, des recherches sur le métabolisme des différentes espèces étaient indispensables afin de connaître les coefficients d'assimilation (ou fixation) de l'N et du P pour chacune d'elles et ainsi déterminer les quantités rejetées dans le milieu. Les formules utilisées se basent sur la célèbre loi de Lavoisier « rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme ». Ce qui est ingéré mais non assimilé est donc rejeté (Azevedo *et al.*, 2011 ; Reid *et al.*, 2013 ; Gamito *et al.*, 2020 ; Jiao *et al.*, 2022 ; Tsiaras *et al.*, 2022).

#### La truite arc-en-ciel

Les paramètres du métabolisme de l'N et du P de la truite sont représentés par la figure 3a ci-après. Les paramètres du métabolisme à déterminer dans la littérature sont : la part non consommée de l'aliment distribué, le coefficient d'utilisation digestive (CUD) de l'N et du P qui correspond à leur digestibilité, et le pourcentage d'N et de P dans la chair de truite ou de salmonidés (tableau 3) (Reid *et al.*, 2013 ; Jiao *et al.*, 2022).

Tableau 3 : Données du métabolisme de la truite arc-en-ciel

Paramètres	Données	Source(s)
% aliment non consommé	3-5%	Reid <i>et al.</i> (2013)
CUD N & P	CUD N = CUD protéines = 0,87 CUD P = 0,60	Reid <i>et al.</i> (2013)
% N & P chair	2,76%N & 0,4%P (Salmonidés)	Reid <i>et al.</i> (2013)

#### L'huitre creuse

De la même manière, le métabolisme de l'huitre creuse en N et P est représenté sur la figure 3b ci-après. L'ensemble des équations y figurant sont issues du modèle Scope For Growth (SFG) sur Eco MARS 3D de l'Ifremer et s'appuient sur les travaux de Bodoy *et al.* (1986), Barillé *et al.* (1996), et Kobayashi *et al.* (1997). Différents paramètres intermédiaires doivent être calculés au préalable (annexe 6) :

- *Effettemp*, qui correspond à l'effet de la température selon une température de croissance optimale et la température mesurée.
  - *Colmat*, qui correspond à l'effet de colmatage total qui survient lorsque la concentration en MES est supérieure à 192 mg/L.
  - *Filt*, qui correspond au taux de filtration en L/h/g de poids sec en tenant compte de l'effet température. L'optimum est de 4,8 L/h/g de poids sec pour une température de 19°C.
  - *MOP*, qui correspond à la fraction organique ingérée par l'huître, exprimée en g/L et fonction de la quantité de chlorophylle a.
  - *Selection*, qui correspond à l'effet minimal de la MES sur l'efficacité d'ingestion. Le seuil est de 4,6 mg/L, en deçà il n'y a pas de production de pseudofèces.
  - *ORGAFRING*, qui correspond à la fraction de matière organique ingérée.
  - *EA*, qui correspond à l'efficacité d'absorption et dépend de ORGAFRING.
- Les autres paramètres (notés X<sub>x</sub>) sont des valeurs fixes estimées par les auteurs.

On note que le P est calculé pour l'ensemble du biodépôt car la distinction du P issu des pseudofèces et des fèces est difficile à effectuer (Sornin *et al.*, 1986). De plus, la partie d'N et de P dissoute n'est pas non plus calculée ici car se sont de très faibles quantités, difficiles à quantifier, qu'on estime négligeable (Raillard, 1991). Les paramètres du métabolisme à déterminer dans la littérature sont : le poids sec de la chair de l'huître, le coefficient d'ingestion et d'assimilation du phytoplancton par l'huître, et le pourcentage d'N et P dans les pseudofèces, fèces et la chair de l'huître (tableau 4).

Tableau 4 : Données du métabolisme de l'huître creuse

Paramètres	Données	Source(s)
% N & P chair (MS)	8,64%N & 0,09%P	Ciqual (Anses) <sup>14</sup>
% eau	83,3%	
% poids coquille	70%	
% N fèces & pseudofèces (MS)	0,31% & 0,23%	Razet <i>et al.</i> (1990)
% P fèces + pseudofèces (MS)	0,10%	Sorin <i>et al.</i> (1986)
Taux filtration standardisé (L/h/g PS)	4,825	Barillé <i>et al.</i> (1996)
Température optimale de filtration (°C)	18,954	
Seuil d'influence MES sur filtration (mg/L)	60	
% ingestion phytoplancton	80%	
% absorption phytoplancton	75%	

### L'*Alaria esculenta*

L'assimilation de l'N et du P chez l'espèce *A. esculenta* et chez les algues de manière générale, se fait directement par absorption des nutriments inorganiques dissous présents dans le milieu (Reid *et al.*, 2013 ; Reid *et al.*, 2018). Le calcul de la composition en N et P d'une biomasse donnée se fait en connaissant les valeurs initiales de composition en N et P de l'espèce (figure 3c et tableau 5). Il suffit de connaître la biomasse récoltée pour avoir le bilan de masse instantané en N et P.

Tableau 5 : Données du métabolisme d'*Alaria esculenta*

Paramètres	Données	Source(s)
% N & P thalle (MS)	3,3% N & 0,5% P 2,0% N & 0,223% P	Reid <i>et al.</i> (2013) Analyse CEVA & Schiener <i>et al.</i> (2015)

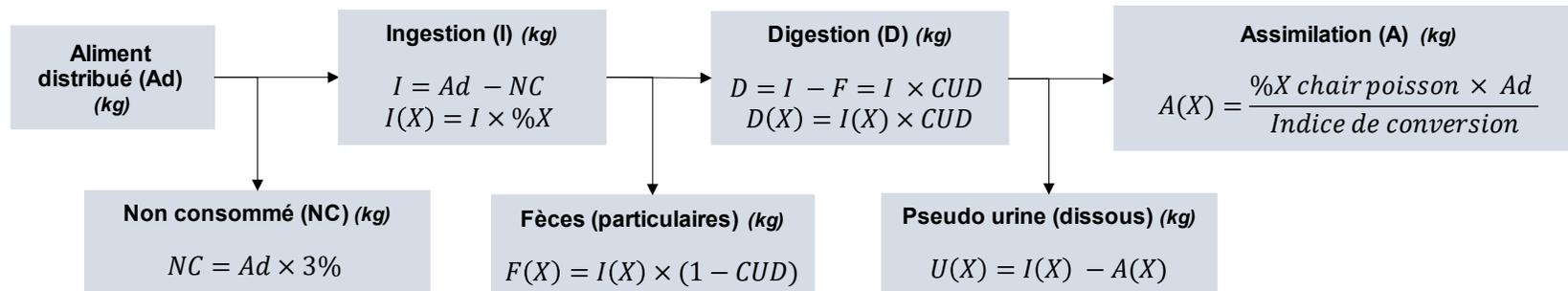


Figure 3a : Métabolisme de l'azote et du phosphore chez les espèces piscicoles (X = N ou P, CUD = Coefficient d'Utilisation Digestive)

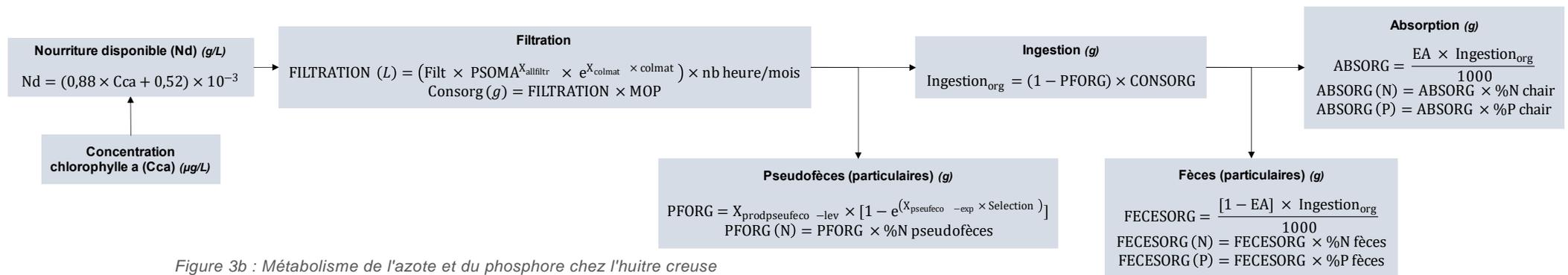


Figure 3b : Métabolisme de l'azote et du phosphore chez l'huître creuse

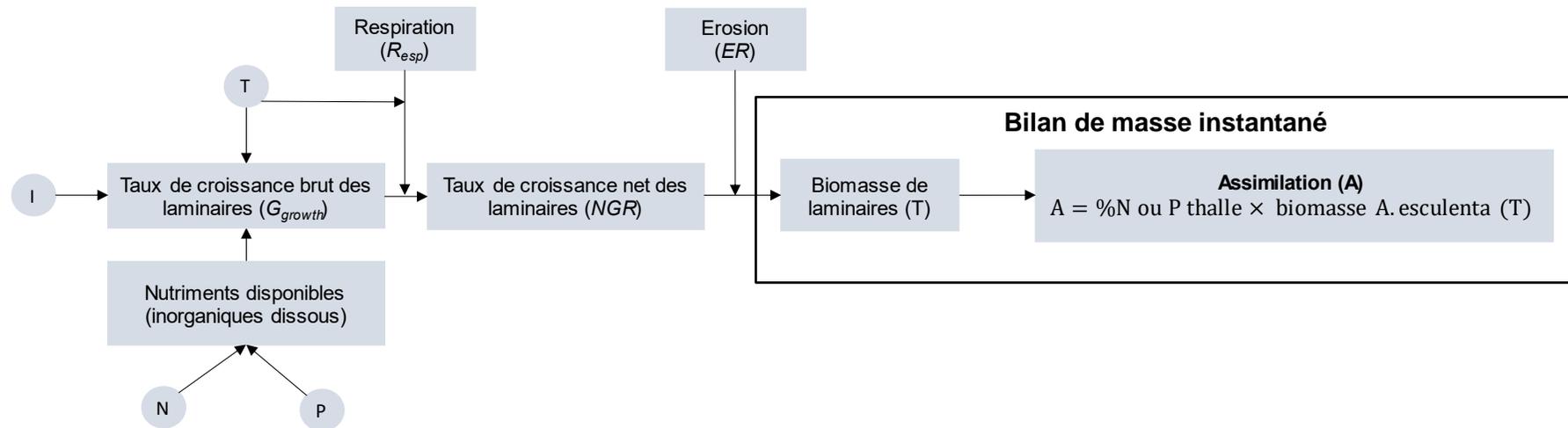


Figure 3c : Assimilation de l'azote et du phosphore chez *Alaria esculenta* (Zhang et al., 2016 – partie II C) c)

### c) Mise en œuvre des modèles de bilan de masses dynamiques

L'objectif était d'appliquer les modèles sur un pas de temps mensuel afin d'observer des éventuelles variations au cours de la période d'étude.

#### Compartiment piscicole

Il s'agissait d'appliquer un modèle de type Thermal Growth Coefficient (TGC) issu de l'étude de Reid *et al.* (2013) afin de conceptualiser la croissance d'une truite au cours du temps (1). Cette équation nécessite de connaître le poids initial ( $W_0$ , en g), le poids final ( $W_t$ , en g), la température moyenne de l'eau sur la période d'étude ( $T_m$ , en °C) et la durée de croissance ( $t$ , en jours).

$$TGC = [(\sqrt[3]{W_t} - \sqrt[3]{W_0}) \div (T_m \times t)] \times 100 \quad (1)$$

Le TGC a été calculée pour l'ensemble de la période d'élevage avec les données moyennes issues de la FMT. Ensuite, une seconde équation (2) a permis d'estimer l'évolution du poids moyen (PM) d'une truite de manière mensuelle au cours de la période d'étude.

$$W(t) = [\sqrt[3]{W_0} + [(TGC/100) \times (T \times t)]]^3 \quad (2)$$

Ensuite, à l'aide de la biomasse totale initiale et du poids moyen initial, le nombre d'individus présent initialement a été estimé. Ce nombre d'individus a été extrapolé à l'intégralité de la biomasse élevée en tenant compte d'une mortalité annuelle mensualisée. La multiplication du nombre d'individus par le poids moyen a permis d'obtenir une évolution de la biomasse totale produite par la FMT entre novembre et juin. Le modèle de bilan de masse décrit en partie II C) b) a été appliqué sur ces biomasses afin de visualiser les émissions potentielles de N et P au cours du temps.

#### Compartiment ostréicole

Ce compartiment est particulier par son nombre d'acteurs, la difficulté d'obtention des données, la difficulté d'homogénéisation de ces dernières, et surtout car cette espèce possède un cycle de production pluriannuel. Ainsi, aucun modèle de croissance n'a été appliqué. Seule la littérature et les informations issues des producteurs rencontrés ont été utilisés afin de modéliser la croissance et la biomasse d'huître dans l'estuaire. Pour cela, j'ai conçu un patron représentant le taux d'occupation de la surface de concessions ostréicoles de la zone d'étude, ce qui a servi de support pour estimer la biomasse d'huîtres présente, entrante et sortante sur la période d'étude.

Ensuite, différentes biomasses ont été utilisées selon les modèles : la biomasse totale moyenne présente chaque mois dans l'estuaire pour le modèle dynamique et la biomasse totale récoltée pour le modèle instantané (quantité totale d'huîtres extraites). Ceci a permis d'estimer les quantités d'N et P fixées et émises au cours de la période d'étude.

#### Compartiment algocole

La méthodologie appliquée s'inspire de différents modèles de Broch & Slagstad (2012), Zhang *et al.* (2016) et également d'un modèle de croissance de l'Ulve obtenu auprès du pôle EENVI du CEVA. Pour les deux premières références, les auteurs ont appliqué leur modèle sur *Saccharina latissima* et *japonica* respectivement. Les données d'entrée n'existant pas pour l'espèce *Alaria esculenta*, les paramètres établis pour ces deux espèces d'algues brunes, appartenant au même ordre des laminariales qu'*A. esculenta*, ont été utilisés dans le cadre du modèle.

De manière générale, le taux de croissance brut ( $G_{growth, j^1}$ ) des algues dépend de différents facteurs : de la température de l'eau  $f(T)$  ; du quota d'N et P cellulaire spécifique de l'algue  $f(NP)$  ; et de l'intensité lumineuse  $f(I)$  (3). Elle est également dépendante d'un taux de croissance maximal spécifique ( $\mu_{max} = 0,18/j$  pour *Saccharina latissima*). Le taux de croissance net ( $NGR, j^1$ ) (4) est ensuite obtenue en soustrayant les pertes dues à la respiration ( $R_{esp, j^1}$ ) (5) (Zhang *et al.*, 2016).

$$G_{growth} = \mu_{max} \times f(T) \times f(NP) \times f(I) \quad (3) \quad NGR = G_{growth} - R_{esp} \quad (4)$$

$$R_{esp} = R_{max20} \times 1,07^{(T-20)} \quad (5)$$

$R_{max20}$  correspond au taux de respiration maximal par jour à 20°C (= 0,0015). Le calcul des différents facteurs est détaillé dans l'annexe 8. Enfin, un taux d'érosion journalier ( $ER$ ) est calculé pour prendre en compte les pertes potentielles au cours de la période de culture. Selon Zhang *et al.* (2016), ce taux peut être estimé à 0%/j de 0 à 128 jour de culture, à 0,01%/j au jour 130 et 0,015%/j pour le reste du temps de culture. On soustrait alors le ER au NGR, qu'on multiplie par le poids moyen initial afin de connaître la croissance de la biomasse.

Ensuite, le potentiel d'absorption des nutriments a été calculé. Il est fonction du quota interne en nutriment de l'algue (6). Avec  $X_{max}$ , la concentration maximale de nutriment observée dans les cellules de l'algues,  $X_{min}$  la concentration minimale observée et  $X_{int}$  la concentration estimée à la période donnée (mensuellement). Le paramètre  $X_{int}$  n'étant pas disponible, il a été estimé en fonction de  $X_{min}$  et  $X_{max}$  et selon les caractéristiques physiologiques et saisonnières de l'algue. L'absorption a ensuite été calculée avec l'équation de Michaëlis-Menten (7) où  $x$  représente le nutriment recherché (N ou P) (Pôle EENVI, CEVA ; Zhang *et al.*, 2016). Cette absorption a été exprimée en mg/g/j puis converti pour obtenir la quantité de nutriment absorbé en kg/biomasse totale sèche/mois.

$$Potentiel\ abs. = \frac{X_{max} - X_{int}}{X_{max} - X_{min}} \quad (6) \quad Abs.\ x = V_{max(x)} \times \frac{[x]}{[x] + K_m(x)} \times Potentiel\ abs. \quad (7)$$

#### d) Bilan de masse global avec interaction des différents compartiments et du bassin versant

Les bilans de masse dynamiques par compartiment ont par la suite été compilés pour établir un bilan de masse global à l'échelle de l'estuaire au cours de la période de production aquacole. Afin d'évaluer si la MOM issue de l'élevage piscicole influence les compartiments aquacoles extracteurs et d'établir l'influence du BV par rapport à la pisciculture, plusieurs bilans de masse correspondant à différents scénarios ont été calculés :

- Scénario 1 : Estuaire du Trieux avec les apports du BV
- Scénario 2 : Estuaire du Trieux avec les apports du BV et les compartiments ostréicoles et algocoles, *i.e.* sans le compartiment piscicole
- Scénario 3 : Estuaire du Trieux avec les apports du BV et la totalité des compartiments aquacoles, *i.e.* le système AMTI potentiel.

#### e) Les données d'entrée : dépendance des acteurs de l'estuaire

##### Données de productions

Afin de récupérer l'ensemble des données de production, il était nécessaire de les lister par type de producteur avant de les contacter (tableau 6). L'intérêt de connaître les itinéraires techniques (ITK) des producteurs est d'intégrer les variations saisonnières des biomasses, c'est-à-dire le tonnage moyen initial, final et la mortalité pour suivre l'évolution de la biomasse sur la période d'étude ainsi que d'autres éléments pouvant influencer les modèles de flux (ex. quantité d'aliment et IC pour le compartiment piscicole).

Tableau 6 : Informations à collecter auprès des producteurs

<b>Pisciculteur</b> <i>FMT</i>	<b>Conchyliculteurs</b> <i>&gt; 20 entreprises</i>	<b>Algoculteur</b> <i>ALEOR</i>
Itinéraire technique (période ensemencement, dédoublement, récolte, etc.)		
Tonnage final récolté		
Tonnage initial introduit		
% mortalité		<i>Non estimable</i>
Poids moyen initial et final	Surface totale concessions + réelle exploitée	
Quantité d'aliment distribué	Densité/poche/catégorie huitre	
Indice de conversion	Nb poche/catégorie huitre	
Type d'aliment	Poids final poche vendable	

### Données de production ostréicoles

Les données de productions des ostréiculteurs ont été très difficiles à obtenir et à standardiser du fait du grand nombre d'entreprises présentes dans l'estuaire (cf. partie II A)) et de leurs spécificités de production. Mon travail de collecte d'informations s'est concentré sur 6 ostréiculteurs représentant environ 36% de la surface du parc ostréicole exploité de la zone d'étude. Les informations ont été collectées entre mi-avril et mai 2022. Les taux de croissance ( $\approx 15$  g/an) et de mortalité annuelle ( $\approx 13\%$ ) n'étant pas mesurés ou connus des producteurs, la littérature a permis de les estimer pour les intégrer dans le modèle (REMORA, Fleury *et al.*, 2001).

Contrairement aux autres productions considérées, les huitres ne sont pas toutes récoltées en même temps. Les décalages dans les prélèvements induisent ainsi des flux de N et P non cohérents s'ils ne sont pas pris en considération. Le modèle de bilan de masse dynamique (comportant les variations mensuelles) a donc été réalisé en premier afin d'obtenir une estimation des biomasses récoltées (biomasses finales/ biomasses initiales) sur la période d'étude.

Une fois les données obtenues, un travail d'homogénéisation des informations a été nécessaire pour réaliser les patrons du taux d'occupation de la surface des concessions ostréicoles et de la biomasse d'huitres estimée chez les producteurs interrogés, et l'extrapoler à l'ensemble de l'estuaire. Ces patrons ont été présentés au CRC pour validation, mais le comité n'a pas été en mesure de confirmer sa cohérence vis-à-vis des concessions ostréicoles de l'estuaire. Ils ont tout de même servi de support pour la suite de la modélisation car ils représentent la seule donnée disponible.

### Données environnementales

Certains paramètres environnementaux, et leurs valeurs mensuelles, sont nécessaires comme données d'entrée des modèles. Ces données sont issues du suivi Rephy et du projet QUADRIGE menés par le pôle EENVI du CEVA (annexe 7). Ces relevés ont été effectués au niveau du pont de Lézardrieux, à l'aide d'enregistreurs de données à haute fréquence. Les données sont des moyennes mensuelles effectuées sur 6 à 13 ans selon les paramètres (tableau 7).

Pour l'ensemble des compartiments aquacoles, les données de températures sont indispensables pour l'intégration dans les modèles des variations de croissance des différents compartiments au cours de la période. Les débits et la quantité d'N et de P permettent de réaliser un profil saisonnier des émissions issues du BV, et de connaître la quantité totale d'N et de P émise dans l'estuaire qu'il sera utile de comparer aux émissions des différents compartiments aquacoles.

Pour le compartiment ostréicole, les variations de concentration en chlorophylle-a sont indispensables du fait que la majorité du régime alimentaire de l'huitre est constituée de phytoplancton (Grangeré *et al.*, 2010). La concentration en MES conditionne aussi le taux d'ingestion des huitres, et la température de l'eau est nécessaire pour estimer les taux de filtration.

Tableau 7 : Paramètres environnementaux mensuels moyens (pôle EENVI, CEVA)

	Nov.	Dec.	Janv.	Fev.	Mars	Avr.	Mai	Juin
Temp. (°C) (2007-2020)	9,5	7,8	8,1	7,3	8,4	10,9	13,4	15,5
Débits (m <sup>3</sup> /s) (2009-2020)	4,0	8,7	11,3	13,4	8,9	5,1	3,5	2,2
Qté Ntot (kg) (2009-2020)	26 169	67 629	88 793	101 298	66 646	37 431	26 304	15 255
Qté Ptot (kg) (2009-2020)	1 234	2 558	2 263	2 529	1 565	802	625	595
[MES] (mg/L) (2007-2020)	9,8	21,6	21,3	23,1	15,0	10,6	8,1	11,0
[chlo a] (µg/L) (2014-2020)	0,49	0,42	0,39	0,81	1,39	1,05	2,00	1,52

### III. Résultats

#### A) Méthode directe

##### a) Elaboration du plan d'échantillonnage théorique

Après plusieurs esquisses, un plan avec un premier gradient d'1km centré sur les cages piscicoles de la FMT, puis avec un gradient de 2km sur le reste de la zone d'étude a été adopté. Il semblait techniquement plus facile de mettre en place un échantillonnage tous les 2km en termes de temps de réalisation et pour une meilleure gestion du nombre d'échantillons. Ce gradient forme 6 zones (figure 4).

Les points d'échantillonnage de la biocénose ont été positionnés en fonction de la présence de sites de production aquacoles pour coupler l'échantillonnage des deux et avoir un comparatif des résultats. Les zones rouges ont été identifiées comme optimales pour l'échantillonnage des espèces d'intérêt aquacole et de la biocénose, bien qu'elles ne prennent pas en compte les laminaires et les coquilles St Jacques qui se trouvent uniquement en zone subtidale. Les zones d'intérêt uniquement pour la biocénose sont représentées en bleu, et des zones de référence plus éloignées sont représentées en jaune.

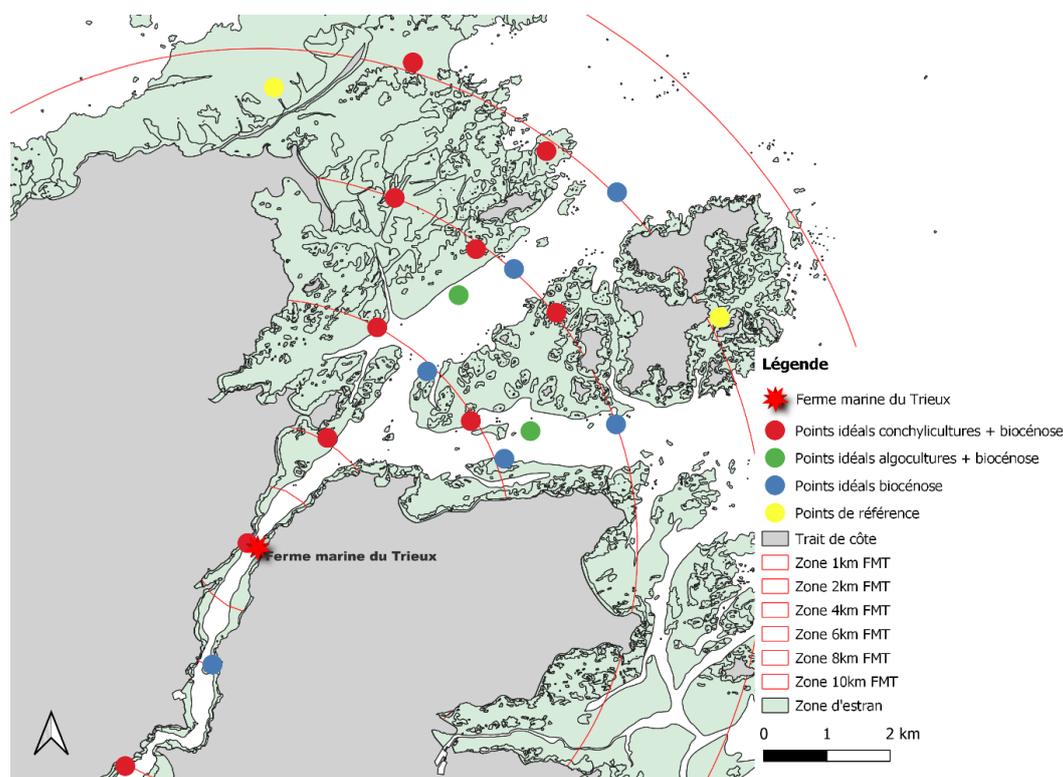


Figure 4 : Plan d'échantillonnage théorique idéal

## b) Contraintes naturelles et techniques identifiées et à prendre en compte

### Les contraintes naturelles : le biotope et la biocénose de l'estuaire du Trieux

#### Influence du vent

Le Trieux débouche dans la Manche. L'estuaire se trouve donc dans une mer reconnue pour son grand marnage, notamment en période de gros coefficient de marée. Il est primordial de prendre en compte ces phénomènes de marée, de courantologie et de vent pour estimer les zones d'échantillonnage. Pour ce qui est du vent, les données météorologiques moyennes sur 20 ans (2002-2022) de la région (station de Ploumanac'h) ont permis de constater que l'orientation moyenne annuelle du vent est de secteur Ouest-Sud-Ouest (12% du temps) (windfinder.com dans PLU Lézardrieux)<sup>15,16</sup>. De plus, le suivi mensuel des moyennes de vitesse et de direction du vent par weatherspark<sup>17</sup> montre que le vent de secteur Ouest a été dominant pour le mois de mars 2022 (35%), suivi par le Sud (24%), l'Est (21%) et le Nord (20%) pour une moyenne d'environ 23-24 km/h (annexe 9). Au vu des observations, il s'agissait donc de prendre en compte le secteur Ouest réellement dominant cette année à cette période.

#### Intertidal vs subtidal

Dans les discussions concernant l'élaboration du plan d'échantillonnage, s'est posée la question de l'étendue des étages médiolittoral et infralittoral (subtidal) à échantillonner. Et plus particulièrement des contraintes inhérentes à l'exploitation et aux prélèvements en zone subtidale nécessitant des moyens (chalutages, plongées) coûteux. Etant donné l'objectif exploratoire du projet AMIMA et de son budget limité, il a été décidé de ne pas considérer le domaine subtidal mais de se focaliser sur la zone basse de l'estran (médiolittoral inférieur, infralittoral supérieur) en profitant des conditions permises par les basses mers de vives eaux.

#### Les espèces observées en intertidal : prospections terrain

Lors des périodes de prospection qui correspondent aux 2 grandes marées du mois de mars, il a été possible d'identifier concrètement les espèces présentes dans l'estuaire. Le tableau 8 ci-après cite les espèces observées et en gras celles qui sont apparues sur l'ensemble des zones prospectées. Deux espèces ont été choisies : *Magallana gigas* (précédemment nommée *Crassostrea gigas*) car elle représente l'espèce majoritairement produite dans l'estuaire, et *Fucus serratus* car c'est une espèce caractéristique des ceintures algales du médiolittoral inférieur. Du fait qu'elle soit située dans une zone le plus souvent immergée, elle est donc plus susceptible de capter la matière dissoute que les espèces algales des zones plus exondées.

Tableau 8 : Faune et flore de l'estuaire du Trieux identifiées et sélectionnées (gras) lors des prospections

Faune	Flore
<b><i>Crassostrea (=Magallana) gigas</i></b>	<i>Pelvetia canaliculata</i>
<i>Patella vulgata</i>	<i>Osmundea pinnatifida</i>
<i>Gibbula umbilicalis</i>	<i>Mastocarpus stellatus</i>
<i>Mytilus edulis</i>	<i>Fucus vesiculosus</i>
<i>Littorina littorea</i>	<b><i>Fucus serratus</i></b>
	<i>Ascophyllum nodosum</i>
	<i>Ulva lactuca</i>
	<i>Zostera noltii</i>
	<i>Palmaria palmata</i>
	<i>Saccharina latissima</i>
	<i>Laminaria digitata</i>

### Les contraintes techniques : humaines, matériels, temporelles, d'accessibilité

#### Humaines

Les contraintes liées à la volonté des différents acteurs de l'estuaire étaient importantes car il s'agissait de réussir à impliquer dans le projet les différents professionnels du milieu,

particulièrement les aquaculteurs. Rappelons que l'objectif était également de réaliser des prélèvements sur leurs concessions en lien avec le plan d'échantillonnage, ce qui nécessitait leur accord. Les coordonnées des ostréiculteurs n'étant pas accessibles librement, le Comité Régional Conchylicole de Bretagne Nord (CRC BN) a été sollicité pour motiver les producteurs à nous les transmettre. Cette prise de contact fut longue et peu concluante (seulement 2 réponses). Il a donc fallu aller directement à leur rencontre avec cette fois un retour plus consistant de 13 producteurs.

A ces contraintes s'ajoutent celles de la disponibilité de main d'œuvre pour l'échantillonnage. Plus le nombre de manipulateurs était élevé, plus la zone échantillonnée pouvait être large et rapidement parcourue sur un temps limité pour éviter les biais temporels.

#### Matériels

Le matériel nécessaire à l'échantillonnage a été pris au CEVA et/ou apporté par les partenaires (INRAe et l'Institut Agro). De plus, le bateau du CEVA a été mis à contribution pour la collecte de certains échantillons.

#### Temporelles

L'objectif était de réaliser l'échantillonnage sur un temps limité lié à basse mer de vives eaux pour éviter une forte variabilité des mesures avec des contraintes : le temps de la marée, le temps de détroquage des huitres parfois solidement fixées à la roche, et le temps de récolte et de nettoyage des thalles des fucus.

#### Accessibilité

Ce dernier point est non négligeable car une bonne partie de l'échantillonnage devait s'effectuer à pied sur la zone d'estran. Les points prospectés en amont de l'échantillonnage figurent sur la carte ci-après (figure 5). Il s'est avéré parfois difficile d'accéder à certaines zones par la terre. Par exemple, le long des rives autour de la FMT la pente est abrupte, donc l'estran peu accessible. Par ailleurs, il était difficile de s'y déplacer du fait de la présence de vastes secteurs vaseux, de zones continuellement en eau (ex. petit chenal), et de secteurs inaccessibles à pied (zone d'estran rocheux devant Bréhat).

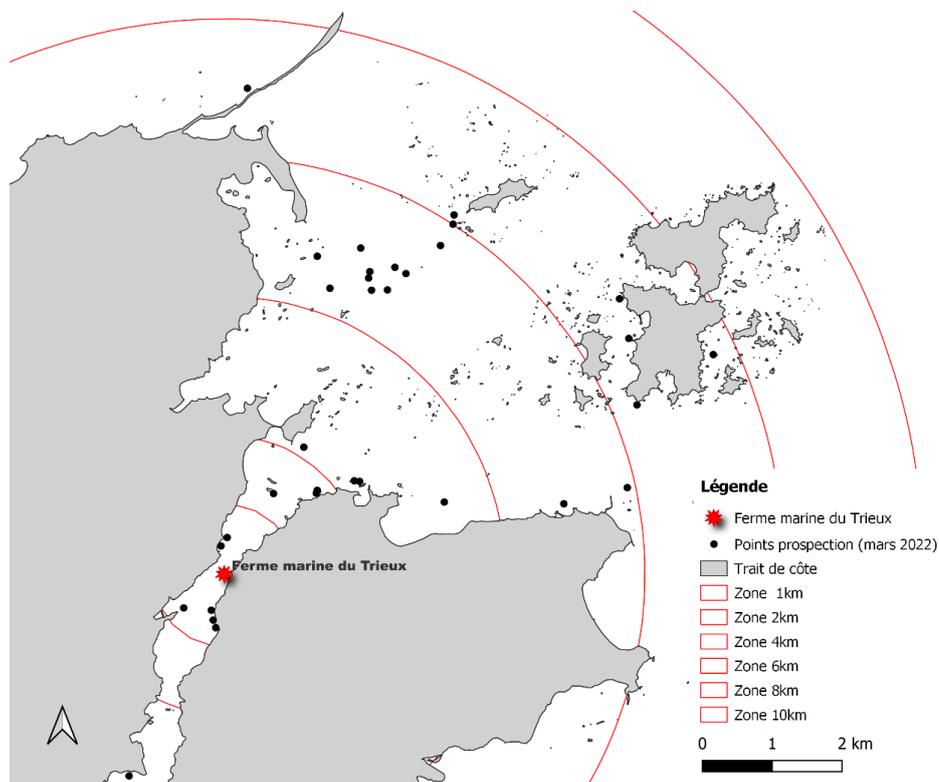


Figure 5 : Points prospectés en amont de l'échantillonnage

### c) Réalisation du plan d'échantillonnage final

L'échantillonnage de la biocénose a été réalisé les 19 et 20 avril 2022 (coefficients 97/93). La récupération des huîtres, des algues, et des truites des compartiments aquacoles, s'est faite selon la disponibilité des producteurs entre le 6 avril et le 1 juin, mais 75% de ces échantillons ont été prélevés la même semaine que ceux de la biocénose (figure 6).

Les prospections et l'identification des contraintes naturelles et techniques ont permis d'identifier assez précisément des points d'intérêt pour l'échantillonnage de la biocénose. La marée du 19 avril fut consacrée à l'échantillonnage par bateau, et celle du 20 avril à l'échantillonnage à pied par la côte (annexe 10). Les partenaires de l'Institut Agro et de l'INRAe sont venus prêter mains fortes le 20 avril. *Crassostrea (=Magallana) gigas* et *Fucus serratus* ont été échantillonnées sur 16 zones. A chaque point, cinq à dix individus par zone dans un rayon de 5m ont été prélevés afin de tenir compte de la variabilité individuelle des différents marqueurs retenus. Il a aussi été choisi de prélever 4 échantillons d'eau en amont et en aval de la FMT afin d'analyser la composition de la matière en suspension.

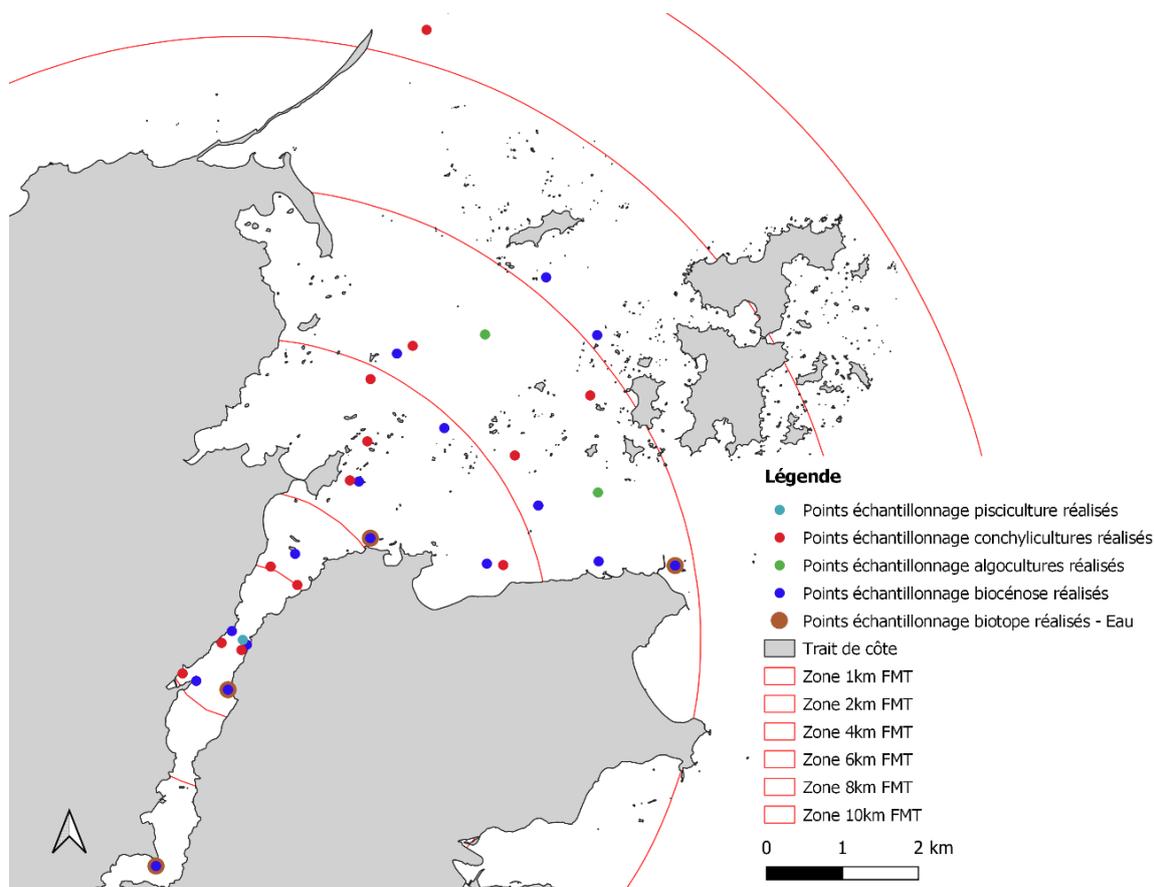


Figure 6 : Répartition des échantillons prélevés

Le choix des concessions ostréicoles échantillonnées s'est fait en fonction des retours des rencontres avec les ostréiculteurs (cf. II A) b)) et en tenant compte du fait que les huîtres devaient se trouver sur les parcs depuis suffisamment longtemps (6 mois-1an) pour intégrer les nutriments des rejets piscicoles dans leurs tissus, notamment pour les analyses des IS et AG. Les huîtres ont été récupérées chez 7 ostréiculteurs.

Pour la récupération des algues et des truites, les concessions sont clairement identifiées et repérées sur la figure 2 (partie I). Pour les algues, il s'agissait simplement de récupérer des échantillons, si possible en même temps que l'échantillonnage de la biocénose. Pour les truites, il fallait attendre la période de pêche (courant mai-juin), lorsque la température de l'eau devient supérieure à 16-18°C. De même que pour la biocénose, les échantillons ont été conditionnés en sacs congélation et conservés à -80°C.

Le nombre total d'individus obtenus est de 420 (tableau 9). Seuls 5 individus par espèce et par compartiment seront utilisés pour l'analyse. Le but est d'utiliser ceux en meilleur état pour l'analyse des marqueurs trophiques.

Tableau 9 : Récapitulatif des échantillons prélevés

Espèces	Biocénose		Systèmes aquacoles				
	<i>Magallana gigas</i>	<i>Fucus serratus</i>	<i>Magallana gigas</i>	<i>Alaria esculenta</i>	<i>Saccharina latissima</i>	<i>Palmaria palmata</i>	<i>Oncorhynchus mykiss</i>
Date	19 et 20/04/22		14/04-17/05/22	25/04/22	05/05/22	05/05/22	31/05/22
Nb de zones	16		13	1	1		1
Nb d'ind./zone	~ 10	5	~10	20	10	10	10
Nb total d'ind.	160	80	130	20	10	10	10

## B) Méthode indirecte

### a) Le compartiment piscicole : données et bilans de masses

#### Les données d'entrée obtenues

Les données recueillies pour faire le modèle de bilan de masse du compartiment piscicole sont recensées dans le tableau 10. Toutes les données, et notamment celles de production n'étaient pas connues. La FMT est en effet une petite structure qui transforme l'intégralité de leur production. De ce fait, tous les paramètres d'élevage ne sont pas suivis.

Tableau 10 : Données de production piscicoles collectées et/ou estimées (FMT)

Paramètres	Données	Source(s)
Biomasse initial & final (T)	4T → 17T	FMT
% mortalité total	30%	Calcul (biomasses)
Quantité aliment allouée (T)	18,2T	Calcul (IC) + FMT
Indice de Conversion	1,4	FMT
Poids moyen initial & final (g)	350g → ~2100g	FMT
Type d'aliment	TSALMO 21 coulant	Le Gouessant/FMT

#### Le bilan de masse instantané : total récolté sur la période d'étude

Les informations recueillies ont permis d'établir un bilan de masse moyen de la quantité d'N et de P issus de la biomasse totale de truites arc-en-ciel produite par la FMT sur la période d'étude (figure 7). La biomasse finale moyenne récoltée est de 17T, avec une biomasse initiale de 4T, la biomasse nette produite au sein de l'estuaire est donc de 13T. Ce qui équivaut à une émission de 55,2 g N/kg et 10 g P/kg de truite produite sur toute la période d'élevage de novembre à juin.

#### Le bilan de masse dynamique mensuel : variations sur la période d'étude

Le modèle de croissance TGC met en évidence l'importance du facteur température dans la croissance des truites, espèces poïkilothermes (annexe 13). Les émissions de N et P sont étroitement liées à la biomasse présente, plus les poissons sont gros, plus ils émettent de rejets dans l'environnement, avec une proportion plus importante d'N dissous et de P particulaire (figures 8 & 9).

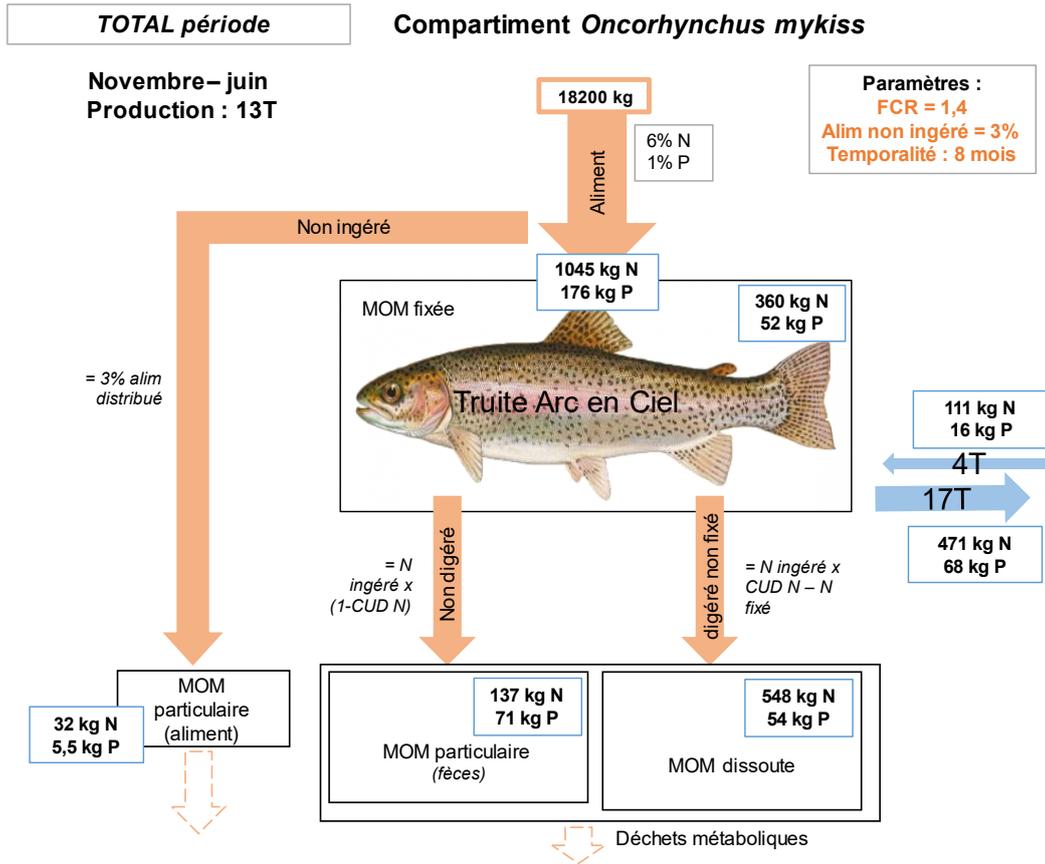


Figure 7 : Bilan de masse du compartiment piscicole sur l'intégralité de la période d'étude

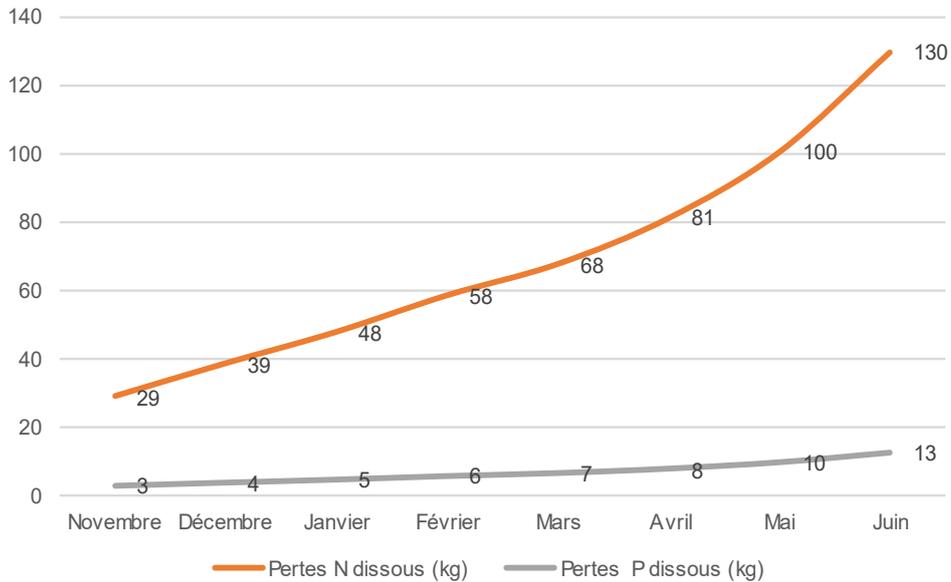


Figure 8 : Evolution de la MOM dissoute (kg) issues des truites de la FMT au cours de la période d'élevage

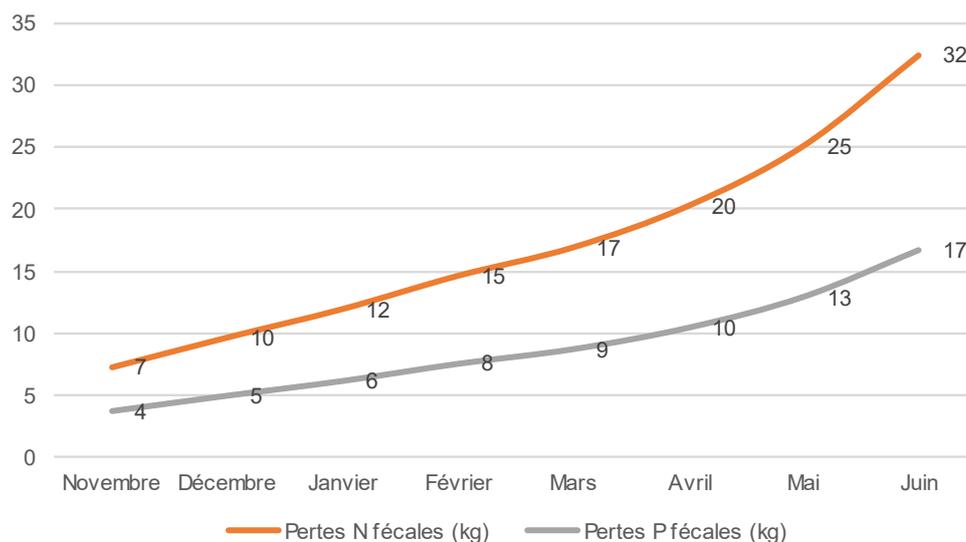


Figure 9 : Evolution de la MOM particulières (fécales) (kg) issues des truites de la FMT au cours de la période d'élevage

## b) Le compartiment ostréicole : données & bilans de masses

### Les données d'entrée obtenues

#### Retours des échanges auprès des producteurs

Les informations ont été collectées auprès des 6 ostréiculteurs et ont mis en évidence des cycles de production très variés (*i.e.* structures de tailles différentes, variétés d'huitres, période entrée/sortie). Par exemple, certains produisent uniquement des huitres creuses diploïdes, d'autres uniquement des triploïdes (qui ont un cycle de production plus court de fait de leur croissance plus rapide), et d'autres produisent des deux. Finalement, on retrouve une proportion de 39% de diploïdes et 61% de triploïdes pour ces 6 producteurs (tableau 11). Ensuite, les tonnages produits s'échelonnent de 20 à 1200 T/an, ce qui montre la diversité de taille d'exploitation présente dans l'estuaire. Un producteur sort du lot par son fonctionnement en produisant quasiment que des huitres déjà prégressées et celles-ci ne restent pas plus d'un an sur ses concessions avant d'être vendues. Les informations de production de cette entreprise sont néanmoins importantes à conserver dans la base de données car elle produirait 45% du tonnage annuel de la zone d'étude du projet AMIMA. Et l'ensemble de ces 6 producteurs produiraient près de 70% de la production annuelle de la zone d'étude (tableau 12).

Dans un deuxième temps, il a fallu se rendre à l'évidence de la complexité de quantifier des biomasses, leur estimation par les producteurs étant absente ou grossière. En effet, leur croissance individuelle étant variable, une partie des huitres peut être mise en vente quand l'autre est remise en pousse. Cette non connue des producteurs est très variable d'une année à l'autre selon les variations en amont des afflux du BV. De ce fait, il est devenu nécessaire de standardiser les stades d'élevage pour réaliser les modèles. Pour ce faire, trois stades ont été retenus : naissain (~18 mois), demi-élevage (~2 ans) et élevage/vendable (~3-4 ans). Les données de PM de chaque stade variant selon les producteurs, une moyenne a été effectuée :

- 0,4 à 10 g pour le naissain, soit un PM = 5 g
- 15 à 55 g pour le demi-élevage, soit PM = 35 g
- 65 à 80 g pour l'élevage/vendable, soit PM = 73 g

De plus, chaque producteur possède sa manière de produire et sa manière d'estimer les biomasses. Certains parlent en taille de maille de poche (M4 à M14), d'autre en taille de grille de criblage (G10 à G30), et encore d'autres en calibre (n°6 à n°2-1).

De même, le nombre de poche par stade d'élevage n'était pas connu des producteurs. Il a été calculé *a posteriori* en partant de la quantité de naissain initial, du taux de mortalité estival du naissain et des densités d'huitres par poche aux différents stades (tableau 11).

Tableau 11 : Données de production ostréicole obtenues par producteur

	Paramètres d'élevage	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Naissain	Quantité naissain introduit (nb)	5M	400k	3,5M	6,5M		8M
	% mortalité naissain juin	70%	30%	50%	30%		40%
	Gain de poids moyen/an (g)	15	15	15	15		15
	Gain de poids moyen/mois (g)	1,25	1,25	1,25	1,25		1,25
	Densité par poche mars (nb)	900	200	1500	2000		1500
	Densité par poche septembre (nb)	2000	1000	NA	NA		NA
Demi-élevage	Gain de poids moyen/an (g)	30	30	30	30	30	30
	Gain de poids moyen/mois (g)	3	3	3	3	3	3
	Densité par poche (nb)	190	150	155	600	170	350
Elevage/Vendable	Gain de poids moyen/an (g)	30	30	30	30	30	30
	Gain de poids moyen/mois (g)	3	3	3	3	3	3
	Densité par poche (nb)	190	150	140	150	170	180
Autres	Production annuelle (T)	200	20	150	150	1200	150
	Surface totale concession (ha)	6,25	3	5,9	8,8	35	11
	Surface concession exploitée (ha)	6,25	1,5	5	5,2	30	9
	% diploïdes	10%	0%	100%	40%	7%	75%
	% triploïdes	90%	100%	0%	60%	93%	25%

#### Homogénéisation des données pour l'ensemble des producteurs : élaboration des profils

Après homogénéisation des données de production, des profils d'évolution de la biomasse ont été réalisés pour chacun des producteurs et sur la période d'étude. Ces différents profils sont en annexe 11a et 11b. Ce travail a également permis d'estimer la surface de concession réellement exploitée comparativement à la surface cadastrale. En effet, un taux d'erreur est possible puisque les tables ostréicoles ne couvrent pas l'intégralité des surfaces de concession représentées sur le cadastre. Ce taux de variation a pu être estimé à l'échelle des 6 producteurs rencontrés et extrapolé à l'échelle de l'estuaire (tableau 12).

Tableau 12 : Paramètres de production calculés et homogénéisés par ostréiculteur (\*somme, \*\*moyenne)

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	Total
Biomasse novembre (T)	157	27	111	255	675	368	1592*
Biomasse juin (T)	154	24	121	230	1119	286	1933*
Surface totale concessions (QGIS) (ha)	9,6	2,0	3,0	8,8	36,3	13,9	73,7*
Surface totale réelle concession (ha)	6,25	3	5,9	NA	35	11	61,2*
Surface exploitée (ha)	6,25	1,5	5	5,2	30	9	57,0*
Taux de variation (QGIS - réelle) (%)	0,650	NA	NA	NA	0,963	0,790	0,801**
% surface totale exploitée de l'estuaire	4,0%	1,0%	3,2%	3,3%	19,2%	5,8%	36%*
Production (T) /ha	32	13	30	29	40	17	26,8**
Volume vendu/an (T)	200	20	150	150	1200	150	1870*

A l'aide de ces profils, des patrons ont été créés. La part la plus faible dans l'occupation de la surface des concessions est représentée par le naissain, avec une relative stabilité sur toute la période (légère augmentation en mars correspondant à la période d'achat et de mise à l'eau du naissain). La part du demi-élevage est plus élevée et relativement stable également sur toute la période, avec une légère augmentation au printemps, période de plus forte croissance et de dédoublement des poches. Enfin, la part d'huitre en élevage/vendable est la part la plus fluctuante. Ces huitres occupent la surface la plus grande entre mars et juin, suivi d'une forte baisse en fin d'année, à partir de novembre jusqu'en février (période de commercialisation la plus forte des huitres).

Une légère baisse d'occupation est également visible en avril en raison des ventes à Pâques (figure 10).

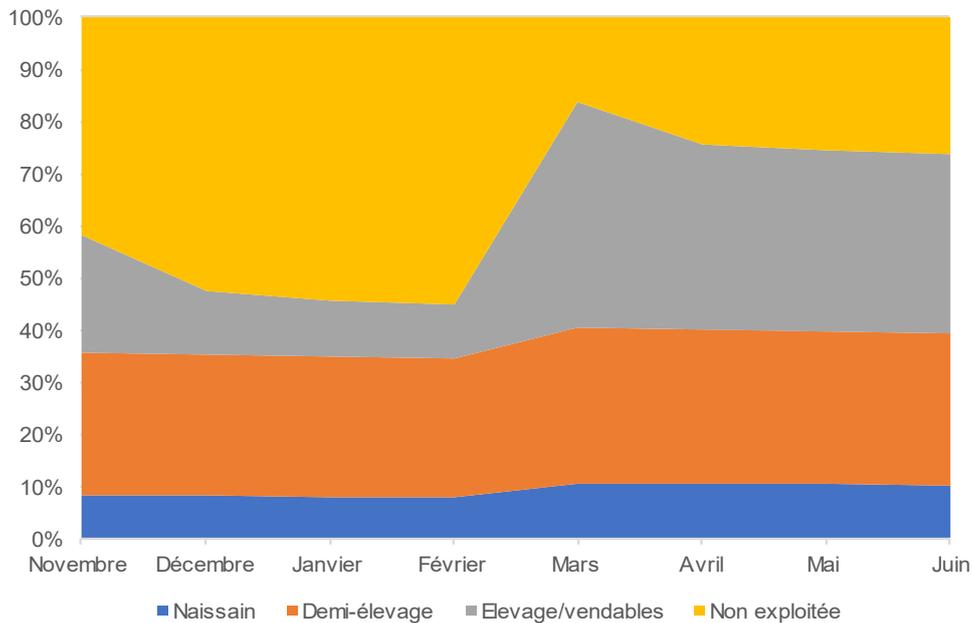


Figure 10 : Occupation moyenne de la surface (%) des concessions des 6 producteurs interrogés sur la période d'étude

Les biomasses de naissain et de demi-élevage sont corrélées à la période de criblage qui a lieu vers février/mars. En effet, l'ensemencement du naissain dans l'estuaire s'effectue à cette période, le naissain présent depuis 1 an, passe en demi-élevage pour poursuivre sa croissance et le demi-élevage passe en élevage/vendable (figure 11).

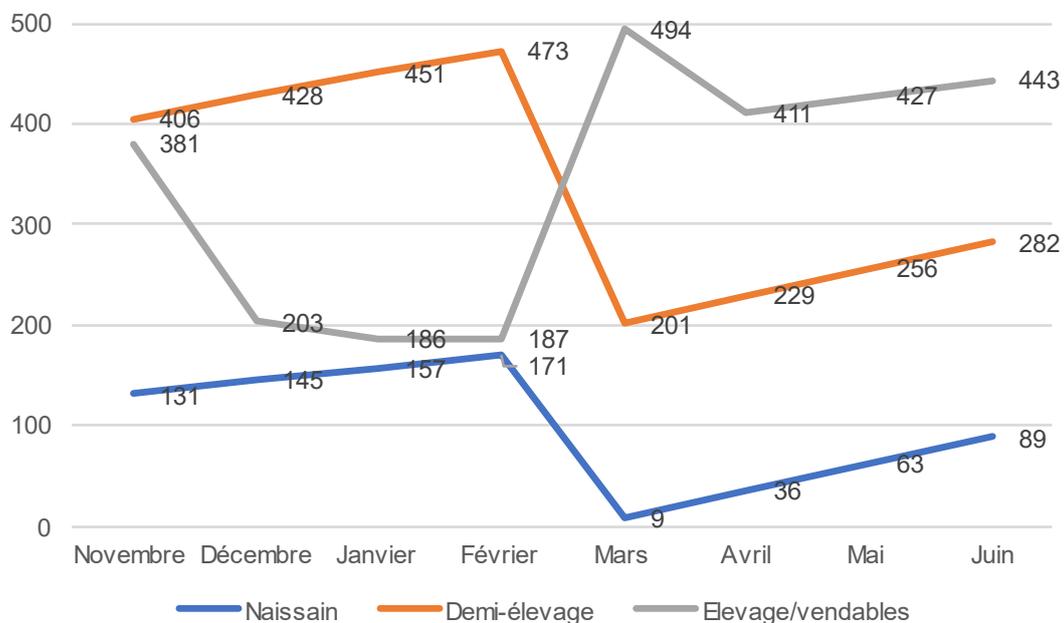


Figure 11 : Evolution de la biomasse totale présente (T) sur les concessions des 6 producteurs interrogés sur la période d'étude

Ces patrons ont permis de calculer un taux d'occupation de la surface des concessions chaque producteur interrogé. Le patron de la figure 10 a été utilisé pour extrapoler à l'échelle de l'estuaire du Trieux.

### Extrapolation des profils à l'échelle de la zone d'étude, l'estuaire du Trieux

Les informations socioéconomiques (datant de 2013) obtenues du CRC, l'étude d'Armorstats (2017)<sup>18</sup>, ainsi que les données cadastrales étudiées sur QGIS, ont permis d'estimer la surface totale de la zone de production ostréicole de Paimpol. D'après les données d'Armorstats, l'ensemble de la zone représente une surface cadastrale de 585 ha et produit chaque année environ 8200T d'huitres creuses. La zone d'étude qui n'inclut pas la baie de Paimpol représente 195 ha sur le cadastre ostréicole. La soustraction de cette surface à la surface totale permet d'estimer que 2737 T d'huitres creuses sont récoltées annuellement sur les concessions de la zone d'étude.

Ensuite, la surface des concessions réellement exploitées a été calculée à l'aide du taux de variation. Elle est de 156 ha (VS 195 ha par calcul sur QGIS), soit 80% de la surface cadastrale calculée (tableau 14). Les données d'occupation de surface pour la période d'étude obtenues dans la partie précédente ont été extrapolées à l'échelle de la surface de l'estuaire. Ainsi, en moyenne 9% de la surface totale réellement exploitée est utilisée pour le naissain, 28% pour le demi-élevage, 26% pour l'élevage/vendable et 37% est non exploitée. Les moyennes sur l'année sont sensiblement les mêmes. La part non exploitée semble importante et peut s'expliquer par plusieurs raisons. Tout d'abord, bon nombre des producteurs rencontrés n'utilisent pas l'intégralité des surfaces dont ils disposent notamment parce qu'ils sont en cours de développement et/ou de rachat de concessions. Ensuite, certains conchyliculteurs n'utilisent pas certaines concessions qui se trouvent dans des zones peu accessibles ou peu propices à l'élevage ostréicole telles que celles situées en eau profonde. Grâce à ces ratios, les biomasses moyennes par stades d'élevage sont obtenues (tableau 13).

Tableau 13 : Données de surfaces exploitées et de production d'huitre creuse sur la zone et la période d'étude

Echelle estuaire du Trieux	% surface	Surface (ha)	Nb de poche estimé	Biomasse/poche (kg)	Biomasse moyenne (T)
Surface totale concessions ostréicoles estuaire QGIS (ha)		195	781069		
Erreur/différence (QGIS - réelle)		0,801			
Surface exploitée concessions ostréicoles estimée (ha)	100%	156	625700		
Surface naissain calculée (ha)	9%	15	58142	5,2	<b>302</b>
Surface demi-élevage calculée (ha)	28%	44	175968	7,0	<b>1232</b>
Surface vendables calculée (ha)	26%	40	159738	10,9	<b>1737</b>
Surface non exploitée (ha)	37%	58	231853		
Biomasse totale vendue (T)					<b>1817</b>
Biomasse totale présente estuaire (T)					<b>3271</b>

Cependant, ces biomasses sont des moyennes calculées à un instant  $t$ , donc supposée fixe par stade tout au long de l'année. De plus, ce sont les biomasses totales présentes dans l'estuaire et non celles récoltées le bilan de masse instantané, *i.e.* la quantité d'N et P extraite du milieu à un instant  $t$ . Ainsi, le profil d'évolution saisonnière de la biomasse totale sur la période d'étude a été réalisé avec la même méthode que celle utilisée pour estimer les biomasses totales de chaque producteur (figure 12). On constate que la biomasse présente est corrélée au taux d'occupation de la surface des concessions, avec une forte augmentation en mars, correspondant à l'ajout du naissain et/ou des huitres prégressies. Grâce à ces variations de la biomasse totale, il a été possible d'estimer le tonnage récolté sur la période et la zone d'étude. Celui-ci serait d'environ 1817 T. Le tonnage de naissain introduit en début du cycle d'élevage correspond à environ 302T, donc la quantité totale de biomasse réellement produite sur la période et dans la zone d'étude est d'environ 1515T. Ce volume est utilisé afin de réaliser le bilan de masse.

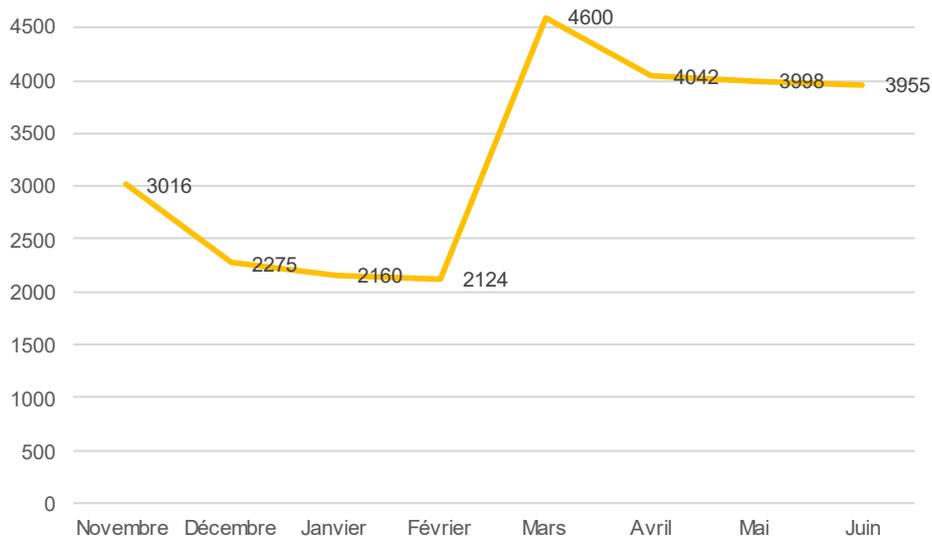


Figure 12 : Evolution de la biomasse totale d'huitres creuses présente (T) sur les concessions ostréicoles exploitées de l'estuaire du Trieux sur la période d'étude

### Le bilan de masse instantané : total récolté sur la période d'étude

Les données estimées précédemment ont permis d'estimer que la biomasse moyenne annuelle d'huitres creuses produites dans l'estuaire est d'environ 1515T, pour un volume total récolté de 1817T entre novembre et juin. Ce volume a été utilisé pour réaliser le bilan de masse (figure 13). La quantité totale de biodépôt (fèces et pseudofèces) serait d'environ 128T. Dont une quantité d'N et P organique émise dans le milieu de 349 kg d'N et 128 kg de P, soit 220 mg N/kg MS et 70 mg P/kg MS d'huitre produite.

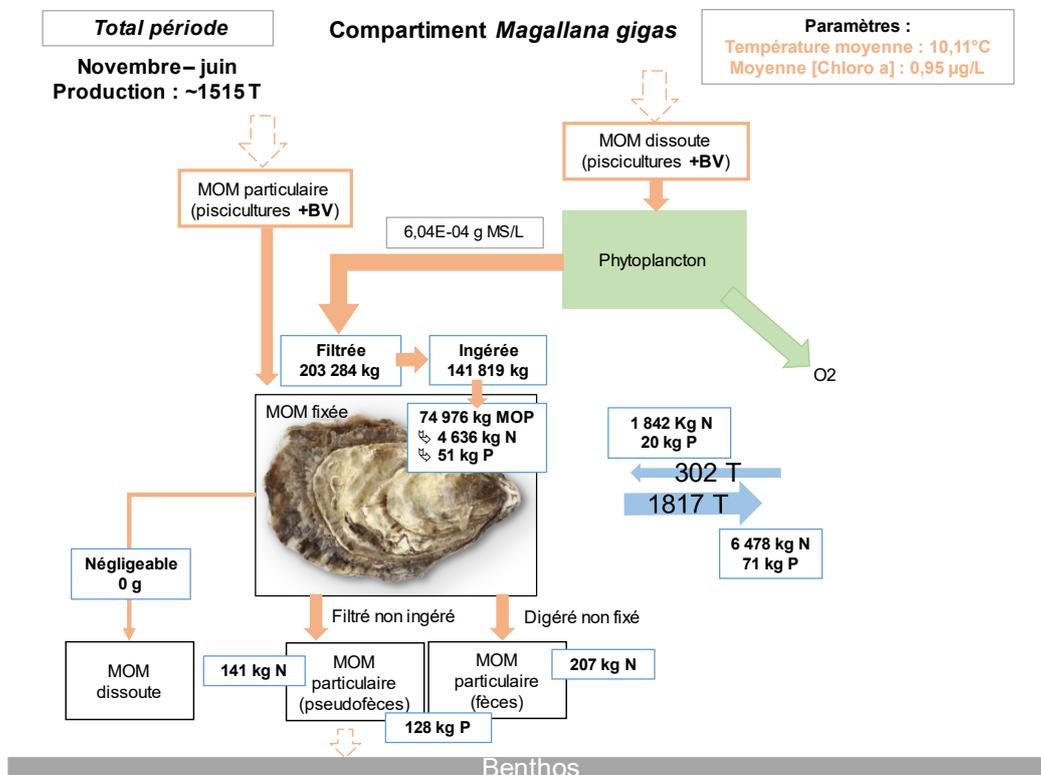


Figure 13 : Bilan de masse du compartiment ostréicole sur la période d'étude du projet AMIMA

## Le bilan de masse dynamique mensuel : variations sur la période d'étude

La biomasse moyenne présente sur la période d'étude est de 3271T mais elle varie au cours de la période d'étude (cf. III B) a) figure 9) entraînant une variation des flux de N et P. La quantité d'N et de P fixée et excrétée par la biomasse d'huître de l'estuaire (figures 14 & 15) est fluctuante au cours du temps selon différents facteurs : la concentration en chlorophylle a (plus élevée au printemps), la concentration en MES (plus forte en hiver) et surtout selon la biomasse d'huître présente (cf. figure 10). Ceci entraîne une fixation et une émission de N et P organiques totaux également plus élevées.

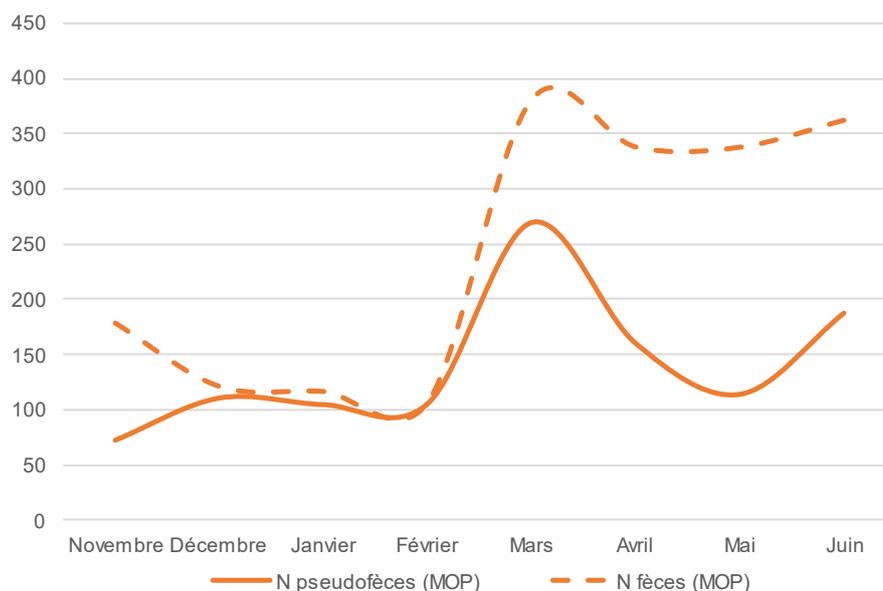


Figure 14 : Quantité moyenne (kg) d'N émis dans les fèces et pseudofèces par la biomasse d'huître élevée dans l'estuaire du Trieux sur la période d'étude

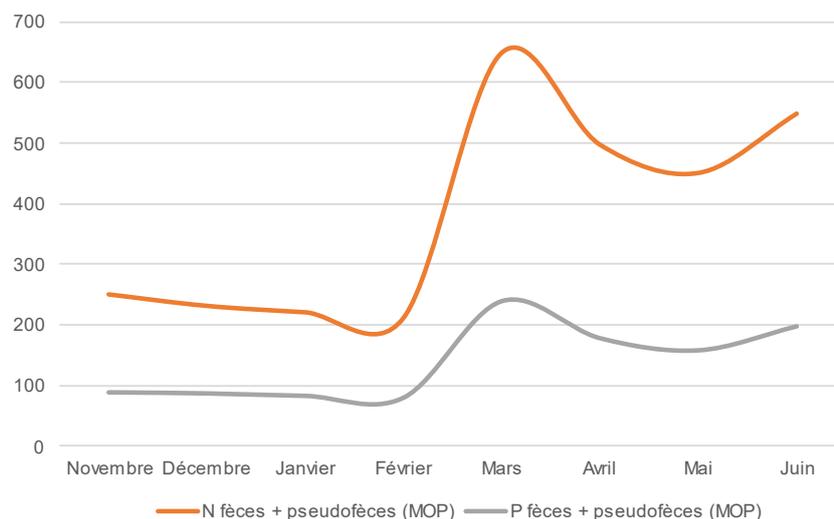


Figure 15 : Quantité moyenne (kg) d'N et P organiques totaux émis par la biomasse d'huître élevée dans l'estuaire du Trieux sur la période d'étude

### c) Le compartiment algocole : données et bilans de masses

#### Les données obtenues

Les données de production d'*Alaria esculenta* sont recensées dans le tableau 14 ci-dessous. Peu d'informations sont nécessaires pour alimenter le modèle de ce compartiment

car les algues ont un métabolisme et un schéma d'alimentation simplifié par rapport aux espèces des deux autres compartiments considérés.

Tableau 14 : Données de production algocole obtenues

<i>Alaria esculenta</i>			
	Paramètres	Données	Source(s)
<b>Métabolisme</b>	% N & P thalle (MS)	3,3% N & 0,5% P	Reid et al. (2013)
	Poids moyen initial (g MF)	0,1	ALEOR
<b>Production</b>	Poids moyen final (g MF)	20	ALEOR
	Biomasse totale final (T)	~3	ALEOR

### Le bilan de masse instantané : total récolté sur la période d'étude

On estime à environ 12 kg d'N et 2 kg de P absorbé et fixé par les algues au cours de la période de culture (figure 16).

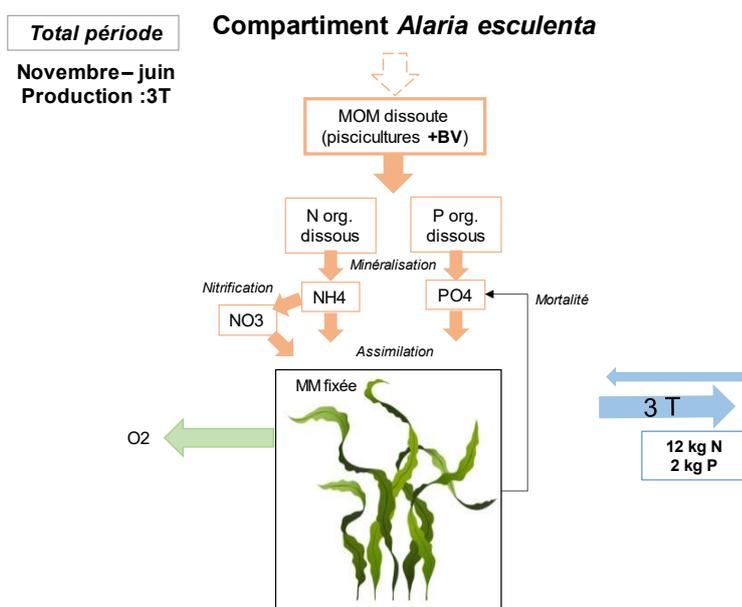


Figure 16 : Bilan de masse du compartiment algocole sur la période d'étude du projet AMIMA

### Le bilan de masse dynamique mensuel : variations sur la période d'étude

D'après le modèle utilisé, la croissance est presque exponentielle à partir du mois d'avril jusqu'à la récolte en juin (annexe 15). Il semble donc que sur cette période l'absorption de nutriments est maximale. De plus, le profil d'absorption de l'N et P sur la période d'étude met en évidence que l'essentiel des nutriments est capté au cours des deux derniers mois de production (figure 17).

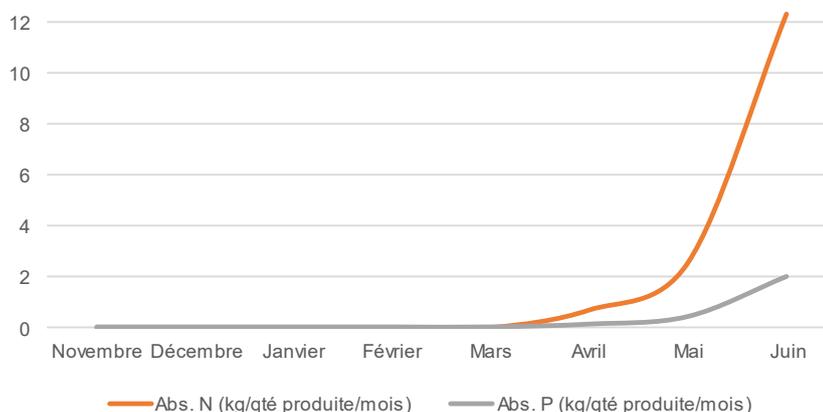


Figure 17 : Quantité moyenne (kg) d'N et P absorbée par *Alaria esculenta* sur la période d'étude

#### d) Synthèse des flux et scénarios

La mise en commun des différents compartiments permet de schématiser les flux d’N et P globaux de l’estuaire du Trieux sur la période d’étude de novembre à juin (annexe 16).

##### Scénario 1 : Estuaire du Trieux avec les apports du BV

L’estuaire du Trieux possède des apports élevés d’N et P issus de l’amont du BV, de l’ordre de 430 T d’N et 12 T de P sur l’ensemble de la période d’étude (tableau 15), soit 99,75% d’N et 97,92% de P émis dans l’estuaire. Le BV est donc fortement émetteur de nutriments.

##### Scénario 2 : Estuaire du Trieux avec les apports du BV et les compartiments ostréicoles et algocoles, i.e. sans le compartiment piscicole

L’ajout de compartiments aquacoles extracteurs (huitres et algues) est bénéfique et permet la diminution du bilan de masse finale en N et P de l’estuaire, soit une extraction d’environ 4T d’N (par le compartiment ostréicole notamment), et d’environ 50 kg de P (tableau 15). Ce scénario permet d’obtenir la plus faible émission d’N et P dans l’estuaire.

##### Scénario 3 : Estuaire du Trieux avec les apports du BV et la totalité des compartiments aquacoles, i.e. le système AMTI potentiel

La simulation d’un potentiel système d’AMTI dans l’estuaire, avec l’ajout du compartiment piscicole, montre que le bilan de masse global en N est plus faible que pour le scénario 1 ( $\approx -4T$ ) mais plus élevée que le scénario 2 ( $\approx +1T$ ). Le bilan en P est quant à lui plus élevé que le scénario 1 et 2 ( $\approx +20kg$  et  $\approx +70kg$ ). Le compartiment piscicole impacte donc l’environnement par ses rejets, mais ne représente *in fine* que 0,08% de la part d’N et 0,64% de la part de P du total de l’estuaire, soit un impact négligeable comparativement au BV.

Tableau 15 : Bilan de masse finaux (N, P) selon différents scénarios

Scénarios		Compartiments aquacoles			Bassin versant	Biocénose	TOT période
		Truites arc-en-ciel	Huitres creuses	<i>Alaria esculenta</i>			
<b>1 - Sans systèmes aquacoles</b>	Bilan N (kg)	0	0	0	429 525	?	429 525
	Bilan P (kg)	0	0	0	12 173	?	12 173
<b>2 - Sans pisciculture</b>	Bilan N (kg)	0	- 4 636	-12	429 525	?	424 877
	Bilan P (kg)	0	-51	-2	12 173	?	12 120
<b>3 – avec AMTI potentiel</b>	Bilan N (kg)	357	-4 636	-12	429 525	?	425 234
	Bilan P (kg)	79	-51	-2	12 173	?	12 199

## IV. Discussion

### A) Méthode directe : stratégie et plan d’échantillonnage

L’objectif était de parvenir à récolter des individus issus des systèmes aquacoles et de la biocénose pour ensuite analyser leur composition en marqueurs trophiques d’intérêt (ADN de truite, IS, AG) et d’ainsi observer ou non si des liens trophiques existent entre les différents compartiments. Une stratégie d’échantillonnage a donc été élaborée et appliquée, en tenant compte d’un maximum de paramètres afin de collecter des échantillons jugés pertinents (proximité de la pisciculture, hydrodynamisme, espèces extractrices, etc.).

La mise en œuvre du plan d’échantillonnage a permis de récolter différentes espèces supposées rendre compte de l’influence de la pisciculture sur deux niveaux de la chaîne trophique : *Fucus serratus* (producteur primaire) et *Crassostrea (=Magallana) gigas* (consommateur primaire), réparties sur l’ensemble de la zone d’étude. A ces espèces ont été associées les espèces d’élevage (*Oncorhynchus mykiss*, *Magallanas gigas*, *Alaria esculenta*). Soit un total de 420 échantillons qui seront analysés ultérieurement. Les résultats futurs permettront de juger de la pertinence du gradient d’échantillonnage et des zones échantillonnées. Il sera également possible de mieux cerner les limites et de proposer des pistes d’amélioration.

Un avantage du site étudié est qu'il a été possible de récolter les mêmes espèces le long d'un gradient d'influence ce qui limite le biais lié à l'utilisation d'espèces différentes. Un autre avantage est que ces espèces sont présentes sur la durée et peuvent ainsi intégrer sur plusieurs semaines les signatures piscicoles. Cette configuration ne sera pas forcément possible sur tous les sites d'étude et nécessitera une réflexion complémentaire quant aux espèces ou spectres d'espèces indicatrices à prendre en compte. Néanmoins, pour des raisons opérationnelles et de coût dans le contexte de pré-étude que représente le projet AMIMA, il a été fait abstraction du domaine subtidal dans lequel d'autres espèces peuvent se révéler d'autant plus intéressantes qu'elles sont immergées en permanence. Dans ce cas, une prospection serait à assurer en espérant bénéficier de la configuration observée en intertidal. Ainsi, certaines espèces en zone subtidale telles que certaines laminaires (ex. *Laminaria digitata*), *Pecten maximus* ou autres bivalves (ex. *Cerastoderma edule*) ont déjà été répertoriées dans le cadre de suivis et inventaires REBENT (Bajjouk, 2009), ou d'autres études de Dabouineau & Ponsero (2009), de Miossec *et al.* (2012), de Le Mao *et al.* (2020), ou des suivis de pêche du CDPMEM 22<sup>19</sup>. Cette prospection nécessiterait cependant des moyens (bateau équipé d'une drague épibenthique ou d'un chalut scientifique, plongées) dont il faudra prendre en compte les coûts en toute logique plus élevés qu'une prospection dans le domaine intertidal.

Une autre piste d'amélioration serait de prendre directement en compte l'aire d'influence des rejets piscicoles particuliers et/ou dissous, par la mise en place de techniques de terrain permettant d'évaluer la répartition spatiale des rejets piscicoles et d'analyser la composition en marqueurs trophiques, tels que l'utilisation de pièges à particules, et/ou d'espèces bioindicatrices (homards, mollusques, etc.) disposés sous les cages piscicoles et selon un gradient d'éloignement de celles-ci. Taleb *et al.* (2007) ont, par exemple, pu identifier des niveaux de contamination variables selon les sites par l'utilisation de *Mytilus galloprovincialis* comme espèce bioindicatrice. De même, Chou *et al.* (2002) ont observé des variations dans l'accumulation d'ETM chez le homard placé à différentes distances de cages piscicoles.

La stratégie d'échantillonnage définie dans notre étude s'est basée en partie sur des sorties du modèle hydrodynamique MARS avec une profondeur fixée à 20 m, soit une profondeur élevée par rapport à celle de l'ensemble de l'estuaire, ce qui peut donc être discutable. De plus, la particule modélisée n'a pas de poids et était alors considérée comme se déplaçant dans la même masse d'eau. Ainsi, seule la dispersion des particules légères sont modélisées ici en omettant donc une partie des particules organiques lourdes qui sédimentent et peuvent être remises en suspension par les courants de marée et courants de fond. L'intégration d'un taux de sédimentation et/ou l'extrapolation des données de quantité de fèces présents dans des pièges à particules en amont de l'échantillonnage, permettrait une meilleure prise en compte de l'hydrodynamisme des particules dans l'estuaire et donc de mieux cibler les zones d'échantillonnage à prélever. Aussi, l'utilisation de traceurs environnementaux de particules apporterait des connaissances complémentaires sur l'hydrodynamisme notamment dans les zones estuariennes où le marnage est important et conditionne les flux de matière (Woodcock *et al.*, 2017).

Enfin, la création d'un réseau de producteurs aquacoles adhérent à la démarche, et plus largement des acteurs de l'interprofession, faciliterait l'élaboration du plan d'échantillonnage sur les zones d'intérêt, surtout si ces acteurs intéressés sont nombreux.

## B) Méthode indirectes : bilan de masse des compartiments aquacoles

### a) Compartiment piscicole

#### Comparaison des résultats avec la littérature

Le modèle estime une perte de 68,7% de l'N et 73,6% du P total de l'aliment distribué initialement aux truites de la FMT. Dont 24% d'N particulaire, 76% d'N dissous et 41% de P dissous, 59% de P particulaire. Le P (majoritairement sous forme particulaire) est

probablement moins exporté que l’N (majoritairement sous forme dissoute) par l’hydrodynamisme du milieu mais participe à l’eutrophisation locale. Les résultats de Olsen *et al.* (2008), Reid *et al.* (2013) et Dauda *et al.* (2019) sont dans les mêmes ordres de grandeurs (tableau 16). Cependant, les sorties du modèle donnent une quantité de nutriments dissous supérieure à la littérature, notamment pour la part de P dissous, ce qui peut s’expliquer par la différence des systèmes d’élevage étudiés. Dans l’étude d’Olsen *et al.* (2008), il s’agit de saumons (*Salmo salar*) élevés en conventionnel dans une structure produisant 1000T/an (VS 17T/an pour la FMT). La conduite d’élevage (type d’aliment, IC, fréquence de nourrissage, densité, etc.) et l’hydrodynamisme du milieu influence aussi la quantité de nutriments rejetés.

Par ailleurs, la quantité de P émise dépend du CUD utilisé dans le modèle et influence fortement les résultats finaux d’émission de P. Ainsi, les quantités de P rejetés peuvent varier sur une large gamme allant de 0 g P/kg à 10,5 g P/kg (Storebakken *et al.*, 2000 ; Azevedo *et al.*, 2002).

Tableau 16 : Comparaison des sorties du modèle piscicole et de la littérature

Paramètres	Quantité N		Quantité P		Sources
	Littérature (mesures)	Modèle (cette étude)	Littérature (mesures)	Modèle (cette étude)	
Rejets totaux (g/kg de truite)	43,9 29,4 ± 4,2	55,2	7,3 2,3 ± 2,3	10,0	Olsen et al. (2008) Reid et al. (2013)
Rejets particuliers (g/kg de truite)	14,3	13,0	5,2	5,9	Olsen et al. (2008)
Rejets dissous (g/kg de truite)	29,6	42,2	2,1	4,1	Olsen et al. (2008)
% rejets/qté alim. distribué	61,8% ↳ 33% part. ↳ 69% dis. 70% ↳ 19% part. ↳ 81% dis.	68,7% ↳ 24% part. ↳ 76% dis.	69,3 % ↳ 72% part. ↳ 28% dis. 70% ↳ 100% part. ↳ 0% dis.	73,6% ↳ 43,2% part. ↳ 30,4% dis.	Olsen et al. (2008)  Dauda et al. (2019)

### Limites et perspectives d’amélioration

Il n’y a pas eu de suivi précis de la biomasse produite car l’élevage partenaire ne calcule pas les paramètres de production quotidiennement. Ils ne considèrent pas cela comme essentiel puisqu’il s’agit d’une très petite structure familiale qui produit pour transformer l’intégralité de leur biomasse dans leur entreprise. Une amélioration du dispositif serait de développer un partenariat pour réaliser ce suivi sur toute la période d’étude, voire sur plusieurs années afin d’observer des tendances de croissance des truites, d’émissions d’N et P et les saisonnalités.

### b) Compartiment ostréicole

#### Comparaison des résultats avec la littérature

Pour ce compartiment, il n’a pas été possible d’utiliser un modèle mécaniste car il manquait les données d’entrée nécessaires et notamment les quantités (et qualité) des matières ingérées par les huitres. Il a donc fallu se contenter du différentiel entre les biomasses d’huitres entrées et sorties pour évaluer ce qui a été extrait. Les mesures de Haven & Morales (1966) permet d’avoir un ordre de grandeur des quantités émises par les huitres (tableau 17).

Tableau 17 : Quantification des émissions de biodépôts ostréicole de la littérature

Paramètres	Littérature (mesures)	Sources
Total biodépôts (g/semaine/huitre)	1,62-3,92	Haven & Morales (1966)
Fèces (g/jour/huitre)	0,03	
MIP (%)	77-91	

## Limites et perspectives d'amélioration

Tout d'abord, il aurait également fallu envisager un partenariat avec les ostréiculteurs afin de les impliquer en amont dans le projet. Ainsi, il aurait été possible d'avoir un suivi plus fin des biomasses ostréicoles (PM mensuels, suivi des déplacements des poches, mortalités, etc.) et surtout des itinéraires techniques et de la saisonnalité, qui influencent grandement les flux de matières (entrée du naissain et des huitres prégressées, périodes et quantités réelles extraites, etc.). Le modèle présenté ici se fonde en effet sur des données simplifiées et lissées entre les producteurs. L'homogénéisation des informations était nécessaire mais a pu provoquer une perte de précision et d'exhaustivité. Par exemple, avoir pris le mois de mars comme mois de référence d'entrée du naissain est simplifié puisque celle-ci se déroule sur un laps de temps plus large de février à avril, voire mai. Le fait d'avoir des différences d'ITK entre les huitres diploïdes et triploïdes complexifie également la démarche et il serait pertinent de distinguer les deux types d'huitres dans des modèles différents.

Ensuite, le modèle ne prend pas en compte la fraction détritique provenant des apports du BV ou de la remise en suspension du sédiment, et potentiellement ingérée par l'huitre (Shpigel & Blaylock, 1991). Dans ce sens, Grangeré *et al.* (2010) s'accordent pour dire que la quantité de phytoplancton est la principale source d'alimentation utilisée par l'huitre pour la croissance. Pourtant, cela ne prend pas en compte l'intégralité des sources d'alimentation des huitres : microalgues benthiques remises en suspension, matières détritiques, mais aussi des protistes (ciliés, flagellés), bactéries et fungi (Barillé *et al.*, 1996 ; Metian *et al.*, 2020). Même si la quantité de phytoplancton détermine la croissance de l'huitre, elle ne détermine pas l'intégralité de la production de biodépôt. De plus, la ressource en phytoplancton disponible est estimée de manière simplifiée alors que de nombreux paramètres peuvent jouer sur sa biomasse et sa disponibilité comme les courants, le vent, la prédation, la stratification vertical qui provoque l'apparition de gradients ou de patches phytoplanctoniques (Grangeré *et al.*, 2010).

Il serait donc intéressant de réaliser un autre modèle représentant le compartiment phytoplanctonique. Ensuite, la quantité d'N et P ingérée par les huitres est inconnue. Seule la part fixée est calculée ici, ce qui ne permet pas de prendre en compte dans le bilan de masse l'influence des rejets d'N et P issus des huitres. Et enfin, le modèle a été réalisé en tenant compte uniquement de la quantité de P de la chair de l'huitre, pas de la quantité stockée dans la coquille. La quantité de P réellement extraite est donc plus élevée que ce qui est calculé ici.

Ainsi des pistes d'améliorations sont nombreuses pour ce compartiment dont la modélisation demande d'obtenir beaucoup d'informations concernant les paramètres environnementaux (MES, N et  $P_{\text{orga/inorg}}$ , N et  $P_{\text{dissous/particulaire}}$ , chlorophylle a, débit/courantologie, matière détritique, etc.). Là encore, il s'agit de faire les suivis des différents paramètres en amont.

### c) Compartiment algocole

#### Comparaison des résultats avec la littérature

D'après l'application du modèle de Zhang *et al.* (2016), on obtient des concentrations finales absorbées de 29,64 g d'N/kg MS et 4,86 g de P/kg MS de Wakamé atlantique (*Alaria esculenta*). Les concentrations retrouvées par Shea (2008) et Reid *et al.* (2013) sont similaires, ce qui permet de confirmer la cohérence des résultats du modèle obtenus dans cette étude (tableau 18).

Tableau 18 : Comparaison des sorties du modèle algal et de la littérature

Paramètres	Quantité N		Quantité P		Sources
	Littérature (mesures)	Modèle (cette étude)	Littérature (mesures)	Modèle (cette étude)	
Qté absorbée (g/kg MS)	29,5 33,04	29,64	3,5 4,79	4,86	Shea (2008) Reid <i>et al.</i> (2013)

## Limites et perspectives d'amélioration

De même que pour les deux compartiments précédents, le modèle serait plus précis si un suivi de la croissance et des paramètres de production était réalisé en amont (PM initial et final, intensité lumineuse de surface, température au niveau des filières, etc.). De plus, le résultat sur l'intensité lumineuse comme facteur limitant la croissance est à nuancer étant donné que le facteur nutriment a été estimé selon les potentielles caractéristiques physiologiques de l'algue (annexe 17). Zhang *et al.* (2016) observe quant à lui que la concentration en N limite la croissance. Avoir un suivi des quotas d'N et P des thalles de l'espèce considérée semble donc nécessaire puisque celui-ci dépend de la saison. En effet, la quantité de nutriments séquestrés par les algues peut varier fortement selon le taux d'humidité interne. Et ce taux évolue selon les saisons, de la zone du thalle analysée, et de l'exposition en mer. Par exemple, ce taux est de 75% à 92% pour *Saccharina latissima* (Reid *et al.*, 2013).

En outre, la littérature ne donne que très peu de paramètres de référence pour *Alaria esculenta*, donc un biais existe du fait que les données d'entrée se basent sur les paramètres initiaux de *Saccharina latissima*. Des paramètres physiologiques pour l'espèce *Alaria esculenta* serait donc intéressant à déterminer dans le cadre de cette étude. Enfin, de manière générale, la composition en N par g de biomasse est plus faible en juillet qu'en mai, cependant l'augmentation de la biomasse compense cette différence et *in fine* davantage de nutriments sont captés par les algues en été (Shea, 2008). Ainsi, la quantité de nutriment fixée est étroitement liée à la biomasse produite, donc à la croissance des algues. Il semble donc nécessaire d'utiliser un modèle de croissance enrichie par des mesures du milieu et de l'espèce considérée.

### C) Méthode directe : bilan de masse à l'échelle de l'estuaire du Trieux

#### a) Limites du bilan de masse appliqué dans cette étude

Il est indéniable que le BV est un compartiment d'apport de nutriments considérable et qu'il est essentiel de le prendre en considération. En effet, les proportions d'N et P provenant du BV représentent respectivement 99,75% et 97,92% des émissions de l'estuaire, ce qui souligne que les apports de la FMT sont négligeables (0,08% d'N et 0,64% de P). Ainsi, les flux des BV, conditionnant les flux initiaux, doivent être intégrés dans les modèles de suivi des flux de matière, que ce soit pour le Trieux ou dans le cadre d'autres zones dans lesquelles la méthodologie serait appliquée. Dans le cadre de cette étude, la quantification de l'N et du P issus des activités humaines en amont du Trieux apporterait aussi une information supplémentaire sur l'origine des nutriments et donc la mise en place de solutions de captage, que ce soit pour l'élaboration de l'échantillonnage ou pour obtenir des données d'entrée des modèles. Qui plus est, effectuer des relevés d'N et de P à différents points de la zone d'étude, tout en ayant connaissance de la proportion du dissous et du particulaire, serait idéal afin d'affiner les modèles pour chaque compartiment qui capte préférentiellement l'une des deux formes.

Parmi les compartiments « extracteurs », le compartiment ostréicole est le plus efficace puisqu'il soustrait plus de 4T d'N au sein de l'estuaire du Trieux sur la période d'étude. Quant au compartiment algocole, il influence peu les quantités d'N et de P extraites à l'échelle de l'estuaire du Trieux sur la période d'étude (12kg N et 2kg P). Cela met tout de même en évidence l'importance des algues dans l'AMTI puisqu'elles captent l'N et le P, tout en produisant de l'oxygène (non mesuré ici).

Cependant, une étude du compartiment biocénose serait nécessaire afin d'estimer les quantités réellement extraites par la faune et la flore sauvage, largement plus représentées que les espèces d'élevage, notamment pour les algues. La biomasse de fucus, de laminaires et des espèces d'algues annuelles comme les ulves, est significative et participe au captage de l'N et P du BV. Ces espèces représentent également une biomasse récoltée conséquente. De même, la macrofaune benthique telle que les coques, les palourdes, et

autres bivalves, sont des espèces potentiellement en compétition avec les huîtres, et également captatrices de la MOP.

Ce compartiment « biocénose » représente donc la boîte noire de la méthode de bilan de masse sélectionnée dans le projet AMIMA, car aucune donnée de biomasse présente dans l'estuaire n'a été récoltée. Il serait donc intéressant de développer l'analyse de ce compartiment par la suite. Il s'agirait de recenser les biomasses récoltées par les pêcheurs à pieds professionnels, les récoltants de goémons, les biomasses pêchées en pêche embarquée (e.g. dragage de coquille, pêche aux casiers, récoltes d'algues de fond), le ramassage d'ulve (cf. projets CEVA et collectivités locales sur les échouages d'algues vertes), mais aussi de mettre en place des campagnes d'estimation de la biomasse de chaque espèce afin d'estimer les émissions et le captage des nutriments de ce compartiment.

Finalement, d'après les résultats des bilans de masse, le système considéré comme étant de l'AMTI dans cette étude (i.e. la compilation des compartiments piscicoles, ostréicoles et algocoles) influence de façon négligeable les quantités de N et P sur la globalité de la zone d'étude puisque le bilan est négatif pour les rejets d'N et très faiblement positif en termes de rejet de P.

#### b) Vers une complexification des modèles : variations spatiotemporelles et hydrodynamisme

L'objectif final d'un tel projet pourrait être de parvenir à intégrer les variations spatiotemporelles aux flux de matières. Pour cela il serait intéressant de poursuivre le projet par la mise en place de suivis de production plus précis tout en développant d'autres modèles plus complexes à différentes échelles. Ceux-ci possèdent des avantages et inconvénients d'utilisation différents (tableau 19). Ces modèles permettent d'évaluer de façon plus précise les flux de matières, de l'espèce à l'écosystème en modélisant également les flux liés aux particules sédimentées, et les processus de sédimentation de ces dernières. En effet, la distance entre les compartiments aquacoles n'est pas du tout prise en compte ici. Pourtant, l'éloignement joue étroitement sur le captage des particules puisque la dispersion est déterminée par l'hydrodynamisme de la zone et la nature des particules. Ainsi, il est possible que les compartiments ostréicoles et algocoles ne captent pas ou très peu, les particules rejetées par le compartiment piscicole, du fait des courants dominants dans les chenaux.

Tableau 19 : Avantages & inconvénients des différents modèles utilisables

Modèles	Echelle	Avantages	Inconvénients
TGC et SGR (Reid et al., 2018)	Spécifique	Gratuit, simple, dynamique, prise en compte de la température	Décrit seulement la croissance
DEB (Kooijman, 2010)	Spécifique	Gratuit, robuste, dynamique, bonne prise en compte de la température, opensource, générique	Complexe, ne prend pas en compte l'environnement de la ferme, nouveau pour les algues
DEPOMOD (Chary, 2019)	Dispersion des rejets particuliers	Complet, dynamique, adaptable, déposition	Cher, complexe, doit être couplé à d'autres modèles pour être dynamique, ne prend pas en compte la température, ne décrit pas le dissous
FARM (Ferreira et al., 2007)	Exploitation	Simple, relativement complet, prend en compte la qualité de l'eau, intègre des systèmes AMTI	Ne fait pas de déposition, développé pour peu d'espèces de poissons, peu d'info sur les modèles utilisés
ECOPATH (Gamito et al., 2020)	Ecosystème	Modélisation des chaînes trophiques	Nécessite données d'entrée (biomasse, consommation, régime alimentaire) de chaque compartiment trophique

Elaborer ces modèles qui décrivent l'évolution des flux de MOM permettrait potentiellement de favoriser le développement et l'acceptation de l'AMTI. De fait, le modèle appliqué renforce les arguments qui prouvent l'intérêt de l'AMTI et donc la nécessité de faire évoluer la réglementation et les choix politiques d'aménagement du territoire en faveur de ces systèmes de production aquacoles. Cependant, il ne permet pas de connaître les

différentes formes de MO consommées et émises par les différentes espèces (accumulation potentielle de fèces et pseudofèces).

## D) Ouverture & perspectives des bilans de masses

Une des idées du projet était d'estimer si la croissance algale serait stimulée, en testant différents scénarios et notamment avec la présence d'une biomasse piscicole plus conséquente. Malheureusement, les modèles utilisés ne permettent pas de faire de lien direct entre les émissions d'N et P du compartiment piscicole et la quantité d'N et P absorbée par les algues au cours de la période d'élevage.

Cependant, une hypothèse peut être émise. La croissance du compartiment algocole dépend essentiellement de trois facteurs : la température, l'intensité lumineuse et la disponibilité en N et P. Pour Zhang *et al.* (2016), le paramètre limitant se trouvait être la quantité d'N dans le milieu. L'expérimentation se déroulait dans une baie fermée sans fleuve. Ici, le cadre est tout autre, le Trieux apporte une quantité très importante d'N et P avec une moyenne d'environ 50T N/mois et 1,5T P/mois sur la période d'étude, donc ici l'N n'est pas limitant, il s'agit de l'intensité lumineuse (sur la période de novembre à juin). Ainsi, le scénario d'ajout d'une biomasse piscicole plus importante n'aurait potentiellement pas d'effet sur la croissance des algues, puisqu'elles sont déjà à leur maximum de croissance par rapport à leur absorption d'N. Le test a été réalisé en estimant arbitrairement une concentration d'N de 100 mg/L (>> réalité), ce qui n'a pas fait évoluer la quantité finale d'N absorbée par les algues. Il s'agirait plutôt d'augmenter la surface des filières d'algues pour capter le surplus d'N et P.

Pour aller plus loin que le cadre du projet AMIMA, les modèles de bilan de masse sont aussi des outils pertinents à utiliser pour simuler le dimensionnement des différents compartiments selon leur influence en N et P. De ce fait, il était intéressant de reprendre l'étude de Reid *et al.* (2013) pour estimer le ratio entre la quantité de nutriments issus du compartiment piscicole et la quantité de nutriments captés par le compartiment algocole. Dans notre étude, nous obtenons un ratio de 13,3:1 pour l'N et 14,7:1 pour le P. Soit un ratio deux fois plus important pour l'N et quatre fois pour le P que Reid *et al.* (2013). Ainsi il faudrait produire environ 250T d'*Alaria esculenta* (MF) pour compenser et capter les rejets issus du compartiment piscicole de l'estuaire du Trieux, soit multiplier par 100 le tonnage actuel.

## V. Conclusion

Ce rapport présente l'étude préliminaire de l'application d'une méthodologie de monitoring environnemental, utilisé pour mettre en évidence et quantifier les relations trophiques entre les productions aquacoles de l'estuaire du Trieux, formant un système potentiellement en AMTI en milieu ouvert. Bien qu'intéressant et encourageant pour la suite du projet AMIMA, les résultats obtenus ont permis de valider partiellement les questions soulevées au début de mon stage. Cependant, plusieurs pistes peuvent être proposées pour améliorer la méthodologie et la transposer à d'autres sites d'étude.

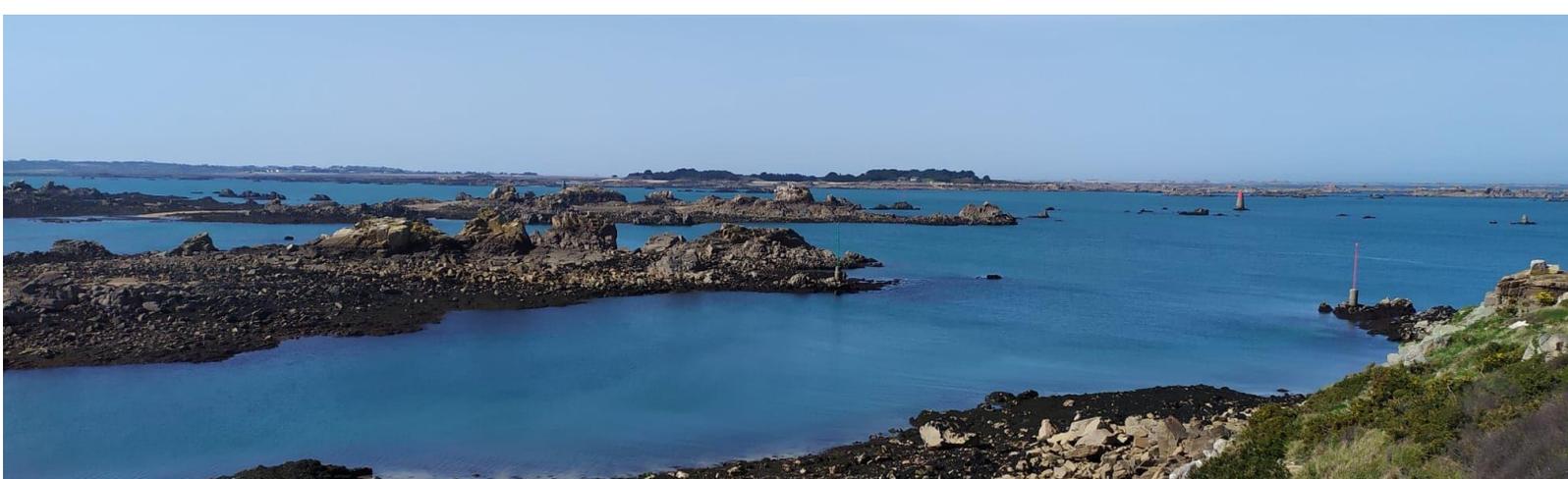
Sur la durée de mon stage, les méthodes appliquées ne permettent pas d'affirmer que les 3 compartiments aquacoles considérés ici forment un système AMTI. En effet, seul un des critères est confirmé, *i.e.* l'extraction d'une partie de l'N et du P présent dans l'estuaire par ces compartiments. Cependant, les flux de matière entre eux n'ont pas été identifiés, il n'est donc pas possible d'affirmer la présence de liens trophiques.

Ensuite, les modèles appliqués sont simplifiés et ne prennent pas en compte de nombreux facteurs comme les flux entre compartiments (pas de spatialisation ou de liens direct d'un compartiment à l'autre), les flux liés aux producteurs primaires (phytoplancton/prédation), et les flux benthiques (sédimentation, reminéralisation et remise en suspension des particules sédimentées). De plus, ils ne permettent pas de savoir s'il y a un recyclage des rejets piscicoles en dehors des compartiments aquacoles puisque le

compartiment biocénose n'a pas été modélisé. Enfin, le fait de se retrouver dans un estuaire augmente l'incertitude sur les flux de matière et l'abondance des nutriments, d'où la nécessité d'intégrer le bassin versant dans la modélisation. Son importance ici est telle que les rejets piscicoles ne représentent qu'une partie négligeable des apports.

Finalement, cette étude montre qu'afin de transposer la méthodologie à d'autres zones, il est primordiale de connaître au préalable les caractéristiques de cette zone étudiée en termes : d'hydrodynamisme (courantologie, marnage), d'espèces de la biocénose présentes (diversité, homogénéité, filtreurs/algues), d'espèces des systèmes aquacoles (piscicoles, conchylicole et algocole), d'acteurs et professionnels présents sur le territoire et leur importance (biomasses produites, poids économique), de paramètres environnementaux et leurs saisonnalité (concentration d'N et P dissous/particulaire, organique/inorganique, chlorophylle a, MES, débits si fleuve en amont, etc.).

De plus, il s'agirait de développer des partenariats sur le long terme avec les producteurs et acteurs locaux (sur au moins une année de production) afin d'obtenir l'ensemble des données de productions indispensables ; mais aussi pour leur faire découvrir l'AMTI, les impliquer et leur montrer les potentiels d'une diversification des productions aquacoles et leur répartition sur la zone considérée. Sans l'appui et l'ambition des producteurs pour faire évoluer les pratiques, aucun développement de systèmes en AMTI en milieu ouvert ne pourrait en effet voir le jour.



## VI. Bibliographie

### Articles & revues

- ALSTON**, Dallas E., CABARCAS, Alexis, CAPELLA, Jorge, et al. Environmental and social impact of sustainable offshore cage culture production in Puerto Rican waters. *Final Report*, 2005, vol. 4, p. 9-12.
- AZEVEDO**, Paula A., BUREAU, Dominique P., LEESON, Steve, et al. Growth and efficiency of feed usage by Atlantic salmon (*Salmo salar*) fed diets with different dietary protein: energy ratios at two feeding levels. *Fisheries science*, 2002, vol. 68, no 4, p. 878-888. <https://doi.org/10.1046/j.1444-2906.2002.00506.x>
- AZEVEDO**, P. A., PODEMSKI, C. L., HESSLEIN, R. H., et al. Estimation of waste outputs by a rainbow trout cage farm using a nutritional approach and monitoring of lake water quality. *Aquaculture*, 2011, vol. 311, no 1-4, p. 175-186. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2010.12.001>
- BAJJOUK**, Touria. Réseau de surveillance des biocénoses benthiques côtières (REBENT). Bilan des actions sur la région Bretagne pour l'année 2008. 2009. [RST/IFREMER/DYNECO/AG/09-14/TB](https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2010.12.001)
- BARILLÉ**, Laurent, HÉRAL, Maurice, et BARILLÉ-BOYER, Anne-Laure. Modélisation de l'écophysiologie de l'huître *Crassostrea gigas* dans un environnement estuarien. *Aquatic Living Resources*, 1997, vol. 10, no 1, p. 31-48. <https://doi.org/10.1051/alr:1997004>
- BODOY**, Alain, PROU, Jean, et BERTHOME, Jean-Paul. Etude comparative de différents indices de condition chez l'huître creuse (*Crassostrea gigas*). *Haliotis*, 1986, vol. 15, p. 173-182. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00000/2961/>
- BORDEYNE**, François. *Production primaire et fonctionnement de communautés intertidales à canopée de Fucus*. 2016. Thèse de doctorat. Paris 6. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01534707>
- BOUVAREL**, Isabelle, DOURMAD, Jean-Yves, et GAC, Armelle. Synthèse 2. Les stratégies d'alimentation des animaux au sein de l'exploitation et du territoire et leurs incidences environnementales. In : *Élevages et environnement*. Educagri éditions, 2010. p. 65-118. <https://doi.org/10.3917/edagri.espag.2010.01.0065>
- BROCH**, Ole Jacob et SLAGSTAD, Dag. Modelling seasonal growth and composition of the kelp *Saccharina latissima*. *Journal of applied phycology*, 2012, vol. 24, no 4, p. 759-776. [DOI: 10.1007/s10811-011-9695-y](https://doi.org/10.1007/s10811-011-9695-y)
- BUCK**, Bela H., TROELL, Max F., KRAUSE, Gesche, et al. State of the art and challenges for offshore integrated multi-trophic aquaculture (IMTA). *Frontiers in Marine Science*, 2018, vol. 5, p. 165. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00165>
- CHARY**, Killian. *Analyse environnementale intégrée pour le développement d'une aquaculture durable : scénarios de pisciculture marine dans le lagon de Mayotte*. 2019. Thèse de doctorat. Université Montpellier.
- CHARY**, Killian, AUBIN, Joël, SADOUL, Bastien, et al. Integrated multi-trophic aquaculture of red drum (*Sciaenops ocellatus*) and sea cucumber (*Holothuria scabra*): assessing bioremediation and life-cycle impacts. *Aquaculture*, 2020, vol. 516, p. 734621. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734621>
- CHIFFOLEAU**, Jean-Francois. La contamination chimique sur le littoral Loire-Bretagne. Résultats de 35 années de suivi du Réseau d'Observation de la Contamination Chimique. 2017. [RST.RBE-BE/2017.02](https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734621)
- CHOPIN**, Thierry, ROBINSON, S., SAWHNEY, M., et al. The AquaNet integrated multi-trophic aquaculture project: rationale of the project and development of kelp cultivation as the inorganic extractive component of the system. *Bulletin-Aquaculture Association of Canada*, 2004, vol. 104, no 3, p. 11.
- CHOPIN**, Thierry. Progression of the integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) concept and upscaling of IMTA systems towards commercialization. *Aquaculture Europe*, 2011, vol. 36, no 4, p. 5-12.
- CHOPIN**, Thierry, COOPER, John Andrew, REID, Gregor, et al. Open-water integrated multi-trophic aquaculture: environmental biomitigation and economic diversification of fed aquaculture by extractive aquaculture. *Reviews in Aquaculture*, 2012, vol. 4, no 4, p. 209-220. <https://doi.org/10.1111/j.1753-5131.2012.01074.x>

- CHOU**, C. L., HAYA, K., PAON, L. A., et al. Aquaculture-related trace metals in sediments and lobsters and relevance to environmental monitoring program ratings for near-field effects. *Marine Pollution Bulletin*, 2002, vol. 44, no 11, p. 1259-1268. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(02\)00219-9](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(02)00219-9)
- DABOUINEAU**, Laurent et PONSERO, Alain. Synthèse sur la biologie des coques *Cerastoderma edule*. 2009. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00340837v2>
- DAUDA**, Akeem Babatunde, AJADI, Abdullateef, TOLA-FABUNMI, Adenike Susan, et al. Waste production in aquaculture: Sources, components and managements in different culture systems. *Aquaculture and Fisheries*, 2019, vol. 4, no 3, p. 81-88. <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2018.10.002>
- FAO**. 2020. La situation Mondiale des pêches et de l'aquaculture 2020. La durabilité en action. Rome. <https://doi.org/10.4060/ca9229fr>
- FERNANDEZ-JOVER**, Damian, MARTINEZ-RUBIO, Laura, SANCHEZ-JEREZ, Pablo, et al. Waste feed from coastal fish farms: a trophic subsidy with compositional side-effects for wild gadoids. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011, vol. 91, no 4, p. 559-568. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2010.12.009>
- FERREIRA**, J. G., HAWKINS, A. J. S., et BRICKER, S. B. Management of productivity, environmental effects and profitability of shellfish aquaculture—the Farm Aquaculture Resource Management (FARM) model. *Aquaculture*, 2007, vol. 264, no 1-4, p. 160-174. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.12.017>
- FLEURY**, Pierre-Gildas, CLAUDE, Serge, BOUGET, Jean-François, et al. Réseau d'évaluation de la croissance de l'huître creuse sur les côtes françaises (REMORA) ; résultats des stations de BRETAGNE (Année 1999). 2000. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00113/22388/>
- FØRE**, Heidi Moe et THORVALDSEN, Trine. Causal analysis of escape of Atlantic salmon and rainbow trout from Norwegian fish farms during 2010–2018. *Aquaculture*, 2021, vol. 532, p. 736002. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.736002>
- FOUSSARD**, Valérie. Bilan d'activité 2016-2018 de la coordination de la recherche et des études inter-estuariers. 2018. [https://professionnels.ofb.fr/sites/default/files/images/MIE/bilan\\_activit%c3%a9\\_coordination\\_inter-estuaire+ANNEXE1\\_2016-2018.pdf](https://professionnels.ofb.fr/sites/default/files/images/MIE/bilan_activit%c3%a9_coordination_inter-estuaire+ANNEXE1_2016-2018.pdf)
- GAMBOA-DELGADO**, Julián. Isotopic techniques in aquaculture nutrition: State of the art and future perspectives. *Reviews in Aquaculture*, 2022, vol. 14, no 1, p. 456-476. <https://doi.org/10.1111/raq.12609>
- GAMITO**, Sofia, QUENTAL-FERREIRA, Hugo, PAREJO, Aida, et al. Integrated multi-trophic aquaculture systems: energy transfers and food web organization in coastal earthen ponds. *Aquaculture Environment Interactions*, 2020, vol. 12, p. 457-470.
- GAO**, Qin-Feng, SHIN, Paul KS, LIN, Guang-Hui, et al. Stable isotope and fatty acid evidence for uptake of organic waste by green-lipped mussels *Perna viridis* in a polyculture fish farm system. *Marine Ecology Progress Series*, 2006, vol. 317, p. 273-283. [doi: 10.3354/meps317273](https://doi.org/10.3354/meps317273)
- GRALL**, Jacques et CORNUBERT, Ondine. Biocénoses des fonds meubles du médiolittoral. Sous-région marine Manche-mer du Nord. Evaluation initiale DCSMM. 2012. <https://doi.org/10.3354/aei00375>
- GRANGERÉ**, Karine. *Réponse écophysiological de l'huître creuse Crassostrea gigas à la variabilité spatio-temporelle des facteurs environnementaux. Etude par modélisation écologique*. 2009. Thèse de doctorat. Université de Caen Basse-Normandie. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00000/6785/>
- GRANGERÉ**, Karine, LEFEBVRE, Sébastien, BACHER, Cédric, et al. Modelling the spatial heterogeneity of ecological processes in an intertidal estuarine bay: dynamic interactions between bivalves and phytoplankton. *Marine Ecology Progress Series*, 2010, vol. 415, p. 141-158. <https://doi.org/10.3354/meps08659>
- HAVEN**, Dexter S. et MORALES-ALAMO, Reinaldo. ASPECTS OF BIODEPOSITION BY OYSTERS AND OTHER INVERTEBRATE FILTER FEEDERS 1. *Limnology and Oceanography*, 1966, vol. 11, no 4, p. 487-498. <https://doi.org/10.4319/lo.1966.11.4.0487>
- HUET**, Gilbert. Réconcilier économie et écologie : le Trieux. *Aménagement et Nature*, 1985.

- JANG**, Hyun Min, **KIM**, Young Beom, **CHOI**, Sangki, et al. Prevalence of antibiotic resistance genes from effluent of coastal aquaculture, South Korea. *Environmental pollution*, 2018, vol. 233, p. 1049-1057. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.10.006>
- JENSEN**, Østen, **DEMPSTER**, T., **THORSTAD**, E. B., et al. Escapes of fishes from Norwegian sea-cage aquaculture: causes, consequences and prevention. *Aquaculture Environment Interactions*, 2010, vol. 1, no 1, p. 71-83. <https://doi.org/10.3354/aei00008>
- JIAO**, Yangmei, **ZHAO**, Hongwei, **LI**, Zichen, et al. Nitrogen budgets for freshwater aquaculture and mariculture in a large tropical island—A case study for Hainan Island 1998–2018. *Marine Environmental Research*, 2022, vol. 177, p. 105642. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2022.105642>
- KOBAYASHI**, Masato, **HOFMANN**, Eileen E., **POWELL**, Eric N., et al. A population dynamics model for the Japanese oyster, *Crassostrea gigas*. *Aquaculture*, 1997, vol. 149, no 3-4, p. 285-321. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(96\)01456-1](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(96)01456-1)
- KOOIJMAN**, Bas et **KOOIJMAN**, S. A. L. M. *Dynamic energy budget theory for metabolic organisation*. Cambridge university press, 2010.
- LEJART**, Morgane. *Etude du processus invasif de Crassostrea gigas en Bretagne : Etat des lieux, dynamique et conséquences écologiques*. 2009. Thèse de doctorat. Université de Bretagne occidentale-Brest. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00444262>
- LE MAO**, Patrick, **GODET**, Laurent, **FOURNIER**, Jerome, et al. *Atlas de la faune marine invertébrée du golfe Normano-Breton Volume 1/7-Présentation et Volume 7/7-Bibliographie, glossaire & index général des espèces*. Éditions de la Station biologique de Roscoff, 2020. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02472438>
- LOARER**, Ronan, **ROLLET**, Claire, et **RIGOUIN**, Loic. Approche sectorielle intertidale-cartographie des sédiments. Secteur Morlaix (site Terenez-île aux Dames). In : *Journées Rebert*, 13-14 octobre 2010, Brest. 2010. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00028/13950/>
- MEDDAD-HAMZ**, Amel, Stratégie d'échantillonnage en écologie, Département de biologie de la faculté des Sciences, Université Badji Mokhtar. Consulté le 22/02/2022. [https://www.researchgate.net/publication/312328312\\_Strategie\\_d'Echantillonnage\\_en\\_Ecologie](https://www.researchgate.net/publication/312328312_Strategie_d'Echantillonnage_en_Ecologie)
- METIAN**, Marc, **POUIL**, Simon, **DUPUY**, Christine, et al. Influence of food (ciliate and phytoplankton) on the trophic transfer of inorganic and methyl-mercury in the Pacific cupped oyster *Crassostrea gigas*. *Environmental Pollution*, 2020, vol. 257, p. 113503. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113503>
- MIOSSEC**, L., **SOUDANT**, D., et **LE STUM**, M. Consolidation et mise au point de méthodes de bio-indication et transfert aux opérateurs. Contributions Hydrobiologie en milieu marin. Rapport Aquaref. Rapport Aquaref, Action, 2012.
- MOUSER**, Joshua B., **BREWER**, Shannon K., **NIEMILLER**, Matthew L., et al. Refining sampling protocols for cavefishes and cave crayfishes to account for environmental variation. *Subterranean Biology*, 2021, no 39. [doi: 10.3897/subtbiol.39.64279](https://doi.org/10.3897/subtbiol.39.64279)
- OLSEN**, Lasse M., **HOLMER**, Marianne, et **OLSEN**, Yngvar. Perspectives of nutrient emission from fish aquaculture in coastal waters. *Literature review with evaluated state of knowledge. FHF project, 2008*, vol. 542014, p. 87. [http://www.fiskerifond.no/files/projects/attach/fhf-nutrients\\_and\\_aquaculture.pdf](http://www.fiskerifond.no/files/projects/attach/fhf-nutrients_and_aquaculture.pdf)
- RAILLARD**, Olivier. *Étude des interactions entre les processus physiques et biologiques intervenant dans la production de l'huître creuse Crassostrea gigas (Thunberg) du bassin Marennes-Oléron : essais de modélisation*. 1991. Thèse de doctorat. Université Paris 6. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00107/21855/>
- RAZET**, Daniel, **HERAL**, Maurice, **PROU**, Jean, et al. Variations des productions de biodépôts (fèces et pseudofèces) de l'huître *Crassostrea gigas* dans un estuaire macrotidal : baie de Marennes-Oléron. *Haliotis*, 1990, vol. 10, p. 143-161. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00000/3031/>
- REID**, G. K., **CHOPIN**, T., **ROBINSON**, S. M. C., et al. Weight ratios of the kelps, *Alaria esculenta* and *Saccharina latissima*, required to sequester dissolved inorganic nutrients and supply oxygen for

- Atlantic salmon, *Salmo salar*, in integrated multi-trophic aquaculture systems. *Aquaculture*, 2013, vol. 408, p. 34-46. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.05.004>
- REID**, Gregor K., LEFEBVRE, Sébastien, FILGUEIRA, Ramón, et al. Performance measures and models for open-water integrated multi-trophic aquaculture. *Reviews in Aquaculture*, 2018, vol. 12, no 1, p. 47-75. <https://doi.org/10.1111/raq.12304>
- ROY**, Patrick et HASNI, Abdelkrim. Les modèles et la modélisation vus par des enseignants de sciences et technologies du secondaire au Québec. *McGill Journal of Education/Revue des sciences de l'éducation de McGill*, 2014, vol. 49, no 2, p. 349-371. <https://doi.org/10.7202/1029424ar>  
[https://www.aquaref.fr/system/files/Aquaref\\_2013\\_B2\\_IFREMER\\_guide\\_methode\\_DCE\\_VF.pdf](https://www.aquaref.fr/system/files/Aquaref_2013_B2_IFREMER_guide_methode_DCE_VF.pdf)
- SCHAAL**, Gauthier. *Structure et fonctionnement des réseaux trophiques associés aux écosystèmes littoraux rocheux en situation écologiques contrastées : approches isotopiques et biochimiques combinées*. 2009. Thèse de doctorat. Paris 6.
- SCHIENER**, Peter, BLACK, Kenneth D., STANLEY, Michele S., et al. The seasonal variation in the chemical composition of the kelp species *Laminaria digitata*, *Laminaria hyperborea*, *Saccharina latissima* and *Alaria esculenta*. *Journal of applied phycology*, 2015, vol. 27, no 1, p. 363-373. DOI: [10.1007/s10811-014-0327-1](https://doi.org/10.1007/s10811-014-0327-1)
- SHEA**, Ryan Steven. *Design of an Efficient Raft from the Nutrient Perspective for the Cultivation of Saccharina Latissima and Alaria Esculenta, Two Sea Weeds Used as the Inorganic Extractive Component of an Integrated Multi-trophic Aquaculture*. 2008. Thèse de doctorat. University of New Brunswick, Department of Biology.
- SHPIGEL**, Muki et BLAYLOCK, Robert A. The Pacific oyster, *Crassostrea gigas*, as a biological filter for a marine fish aquaculture pond. *Aquaculture*, 1991, vol. 92, p. 187-197. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(91\)90020-8](https://doi.org/10.1016/0044-8486(91)90020-8)
- SORNIN**, J. M., FEUILLET, M., HÉRAL, M., et al. Influence des cultures d'huîtres *Crassostrea Gigas* sur le cycle du phosphore en zone intertidale : rôle de la biodéposition. *Oceanologica acta*, 1986, vol. 9, no 3, p. 313-322. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00000/2973/>
- STOREBAKKEN**, T., SHEARER, K. D., ROEM, A. J., et al. Growth, uptake and retention of nitrogen and phosphorus, and absorption of other minerals in Atlantic salmon *Salmo salar* fed diets with fish meal and soy-protein concentrate as the main sources of protein. *Aquaculture Nutrition*, 2000, vol. 6, no 2, p. 103-108. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2095.2000.00135.x>
- SUGIURA**, Shozo H., MARCHANT, Daniel D., KELSEY, Kevin, et al. Effluent profile of commercially used low-phosphorus fish feeds. *Environmental pollution*, 2006, vol. 140, no 1, p. 95-101. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.06.020>
- TALEB**, Zoheir M., BENGHALI, Sofiane, KADDOUR, Amina, et al. Monitoring the biological effects of pollution on the Algerian west coast using mussels *Mytilus galloprovincialis*. *Oceanologia*, 2007, vol. 49, no 4.
- TSIARAS**, Kostas, TSAPAKIS, Manolis, GKANASSOS, Athanassios, et al. Modelling the impact of finfish aquaculture waste on the environmental status in an Eastern Mediterranean Allocated Zone for Aquaculture. *Continental Shelf Research*, 2022, vol. 234, p. 104647. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2022.104647>
- VÉRIN**, Yves, VAZ, Sandrine, et COPPIN, Franck. Biocénoses des fonds durs du circalittoral. Sous-région marine Manche-Mer du Nord. Evaluation initiale DCSMM. 2012.
- WOODCOCK**, S. H., TROEDSSON, Christofer, STROHMEIER, Tore, et al. Combining biochemical methods to trace organic effluent from fish farms. *Aquaculture Environment Interactions*, 2017, vol. 9, p. 429-443. <https://doi.org/10.3354/aei00242>
- ZHANG**, Jihong, WU, Wenguang, REN, Jeffrey S., et al. A model for the growth of mariculture kelp *Saccharina japonica* in Sanggou Bay, China. *Aquaculture Environment Interactions*, 2016, vol. 8, p. 273-283. <https://doi.org/10.3354/aei00171>
- ZHANG**, Jiachao, ZHANG, Xuanrui, ZHOU, Yang, et al. Occurrence, distribution and risk assessment of antibiotics at various aquaculture stages in typical aquaculture areas surrounding the Yellow Sea. *Journal of Environmental Sciences*, 2022, vol. 126, p. 621-632. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.01.024>

## Sitographie

- <sup>1</sup> « High Tech Detection Systems ». s. d. HTDS. Consulté le 29 juin 2022. <https://www.htds.fr/presentation-htds/>.
- <sup>2</sup> Larousse, Éditions. s. d. « Dictionnaire Français en ligne - Larousse ». Consulté le 16 mars 2022. <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais-monolingue>.
- <sup>3</sup> Organisation hydrologique et classification sanitaire du bassin versant du Trieux, Office Français de la Biodiversité (OFB). Consulté le 26/02/2022. <https://professionnels.ofb.fr/fr/node/540>
- <sup>4</sup> « Avis de l'autorité environnementale relatif au projet d'aménagement de la station d'épuration des eaux usées de Pont-Ezer située sur la commune de Plouisy (22) », DREAL Bretagne. Dossier reçu le 21 juillet 2014. Consulté le 04/03/2022. [https://www.bretagne.developpementdurable.gouv.fr/IMG/pdf/2856\\_ae\\_cle2777eb.pdf](https://www.bretagne.developpementdurable.gouv.fr/IMG/pdf/2856_ae_cle2777eb.pdf)
- <sup>5</sup> « Station de Pont-Ezer. Des travaux urgents mais coûteux », Emmanuel Nen, Le Télégramme du 3 avril 2019. Consulté le 04/03/2022. <https://www.letelegramme.fr/cotes-darmor/gingamp/station-de-pont-ezer-des-travaux-urgents-mais-couteux-03-04-2019-12250498.php>
- <sup>6</sup> « Plus aucun permis de construire accordé entre Guingamp et Paimpol ? », Julien Vaillant, Le Télégramme du 21 février 2021. Consulté le 04/03/2022. <https://www.letelegramme.fr/cotes-darmor/gingamp/plus-aucun-permis-de-construire-accorde-entre-gingamp-et-paimpol-21-02-2021-12707987.php>
- <sup>7</sup> « Assainissement saturé : une menace pour les permis de construire en Bretagne », Julien Vaillant, Le Télégramme du 23 février 2021. Consulté le 04/03/2022. <https://www.letelegramme.fr/cotes-darmor/kerpert/assainissement-sature-une-menace-pour-les-permis-de-construire-en-bretagne-23-02-2021-12709534.php>
- <sup>8</sup> « A Pléhédel, la station d'épuration inaugurée », Marie-Hélène Clam, Le Télégramme du 25 novembre 2021. Consulté le 04/03/2022. <https://www.letelegramme.fr/cotes-darmor/plehedel/a-plehedel-la-station-d-epuration-inauguree-25-11-2021-12875254.php>
- <sup>9</sup> « Assistance à Maitrise d'Ouvrage – Construction d'une nouvelle station d'épuration à Pont Ezer – Commune de Plouisy », Guingamp-Paimpol Agglomération, règlement de la consultation, Marché public. NouMa. Consulté le 04/03/2022. <https://www.nouma.fr/appel-offre/bretagne/cotes-darmor/gurunhuel/1567587>
- <sup>10</sup> « Le port de Pontrieux en chantier pour préparer la saison », Rédaction Paimpol, La Presse d'Armor du 26 mars 2022. Consulté le 31/05/2022. [https://actu.fr/bretagne/pontrieux\\_22250/le-port-de-pontrieux-en-chantier-pour-preparer-sa-saison\\_49717816.html](https://actu.fr/bretagne/pontrieux_22250/le-port-de-pontrieux-en-chantier-pour-preparer-sa-saison_49717816.html)
- <sup>11</sup> « Economie agricole », Chambres d'Agriculture de Bretagne. s. d. Consulté le 05/03/2022. <http://www.chambres-agriculture-bretagne.fr/synagri/economie-agricole>.
- <sup>12</sup> « BSV et outils pour raisonner les interventions ». Direction Régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt de Bretagne. Consulté le 03/03/2022. <https://draaf.bretagne.agriculture.gouv.fr/bsv-et-outils-pour-raisonner-les-interventions-r298.html>.
- <sup>13</sup> Géoportail, le portail national de la connaissance du territoire mis en œuvre par l'IGN. Consulté fréquemment entre le 21/02/2022 et le 29/08/2022. <https://www.geoportail.gouv.fr/carte>
- <sup>14</sup> Anses. s. d. « Ciqual : composition nutritionnelles détaillée de l'huitre creuse ». Consulté le 29 juin 2022. <https://ciqual.anses.fr/#/aliments/10035/huitre-creuse-crue>.
- <sup>15</sup> Windfinder.com. s. d. « Windfinder.com - Wind and weather statistic Ploumanac'h Perros-Guirec ». Windfinder.com. Consulté le 29 juin 2022. [https://www.windfinder.com/windstatistics/ploumanac\\_h\\_perros-guirec](https://www.windfinder.com/windstatistics/ploumanac_h_perros-guirec).
- <sup>16</sup> PLU rapport partie 2, commune de Lézardrieux, décembre 2016. Consulté le 26/02/2022. <https://mairie-lezardrieux.fr/mairie-en-ligne/urbanisme.html>
- <sup>17</sup> « Météo, température moyenne pour Pleubian (France) - Weather Spark ». s. d. Consulté le 29 juin 2022. <https://fr.weatherspark.com/m/37631/3/M%C3%A9t%C3%A9o-moyenne-en-mars-%C3%A0-Pleubian-France#Figures-WindSpeed>.
- <sup>18</sup> « Une filière économique en Côtes d'Armor, la conchyliculture », Armorstat. Mise à jour en janvier 2017. Consulté le 16/05/2022. [https://www.armorstat.com/armorstat\\_publications.html](https://www.armorstat.com/armorstat_publications.html)

[https://www.armorstat.com/publications/Fiche\\_filiere\\_conchyliculture\\_2017.pdf](https://www.armorstat.com/publications/Fiche_filiere_conchyliculture_2017.pdf)

<sup>19</sup>« CDPMEM22 • Comité Départemental des Pêches Maritimes et des Elevages Marins des Côtes d'Armor ». s. d. Comité Départemental des Pêches Maritimes et des Élevages Marins 22. Consulté le 16 août 2022. <https://cdpmem22.fr/>.

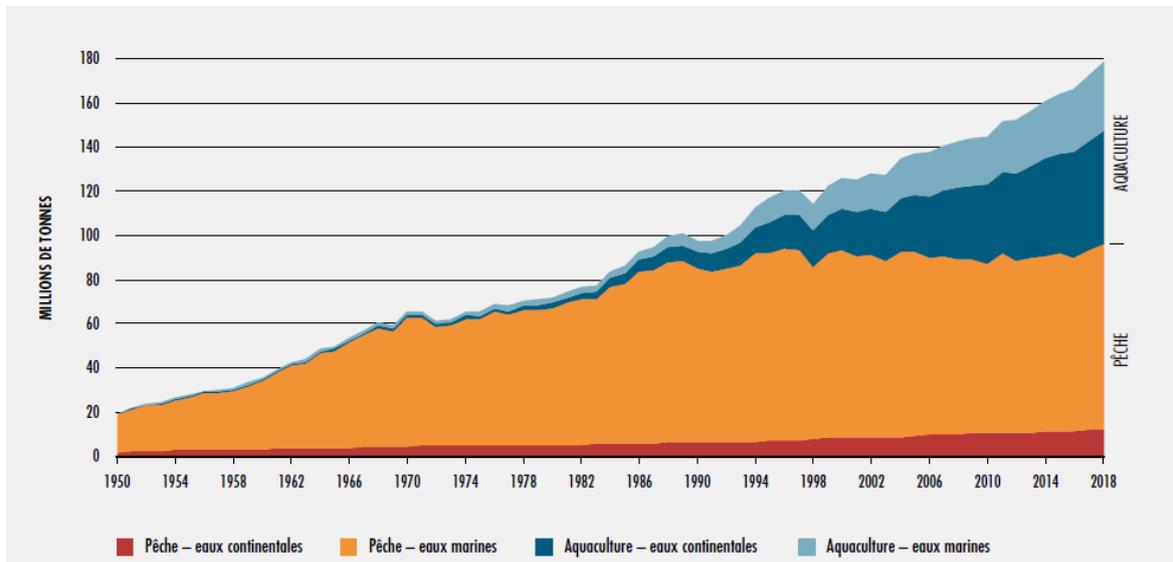
« Projet d'arrêté portant sur le schéma des structures des cultures marines des Côtes d'Armor », Direction Départementale des Territoires et de la Mer. Mise à jour le 28/01/2019. Consulté le 16/05/2022.

<https://www.cotes-darmor.gouv.fr/Publications/Consultations-publiques-Environnement/Consultations-archivees/Schema-des-structures>

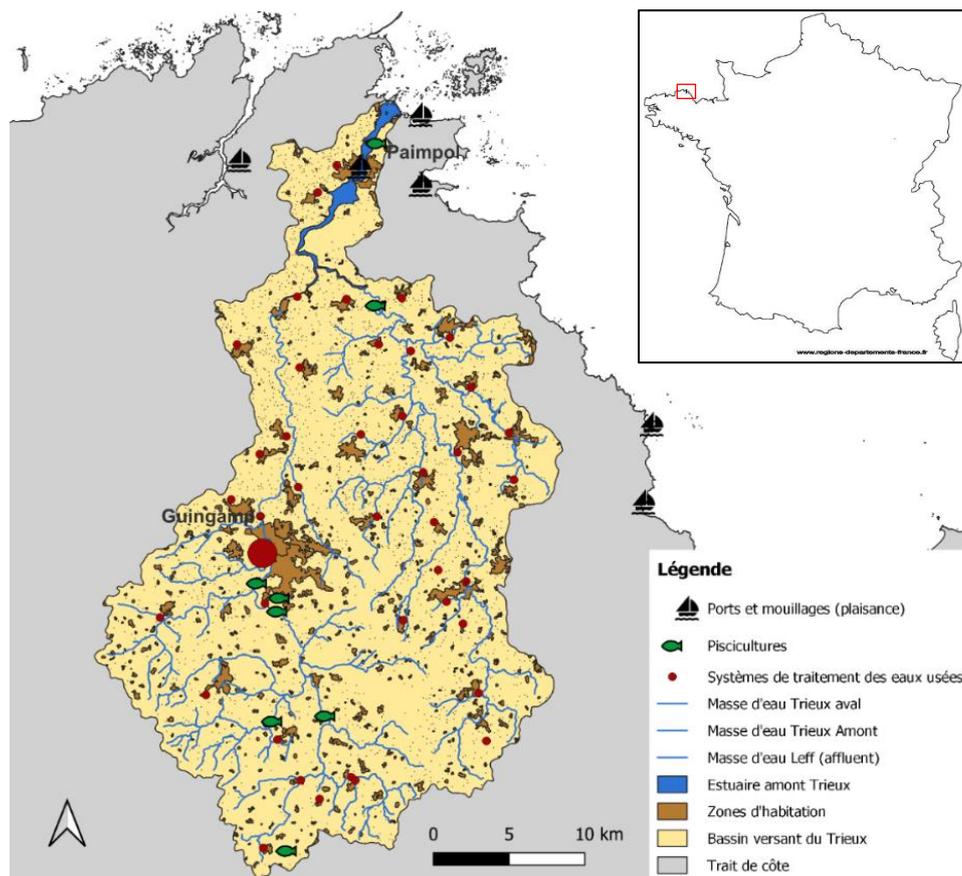
L'état écologique et les pressions significatives, Sage Argoat Trégor Goëlo, Pays de Guingamp. Etat des lieux 2019. Consulté le 01/03/2022.

<https://www.paysdeguingamp.com/sage/masses-deau/>

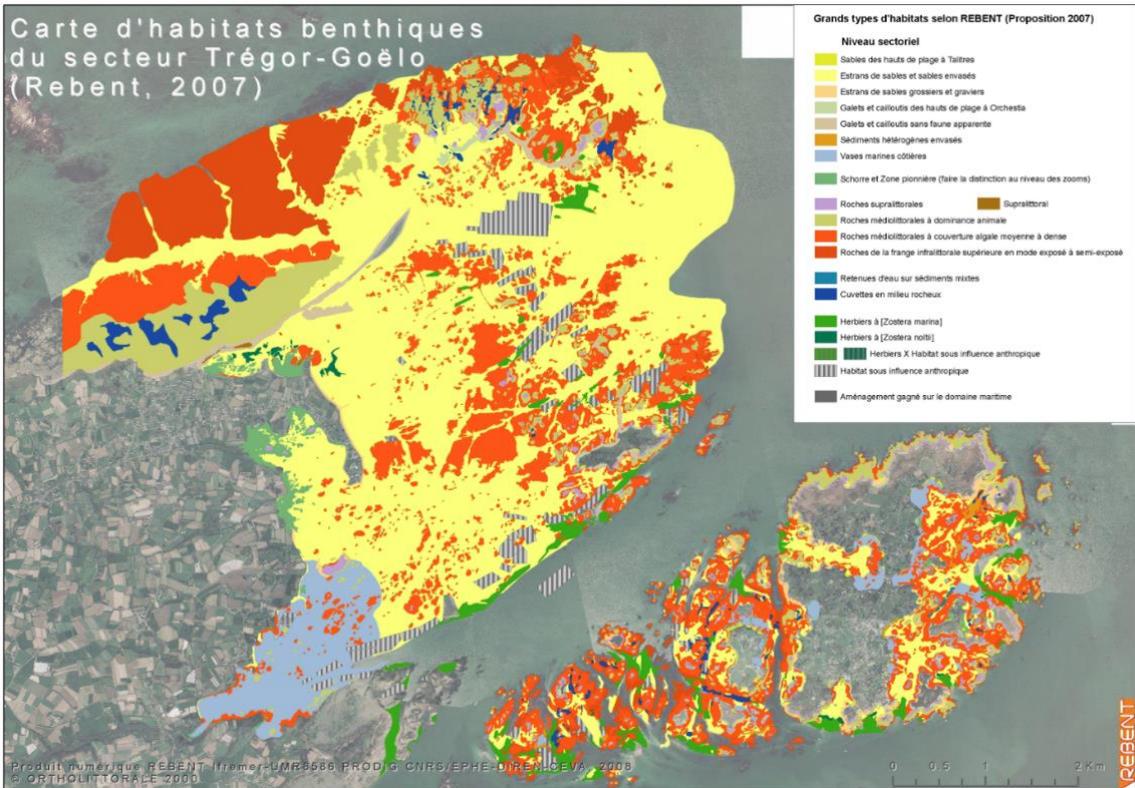
## VII. Annexes



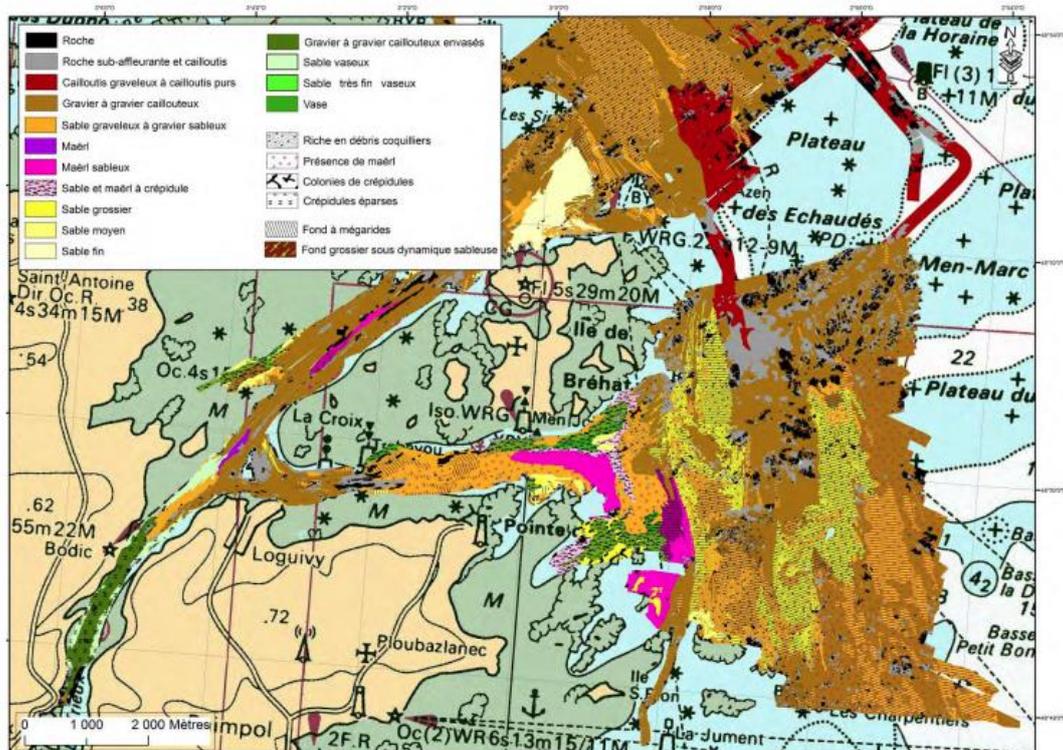
Annexe 1 : Evolution du tonnage mondial produit de 1950 à 2018 par la pêche et l'aquaculture (FAO 2020)



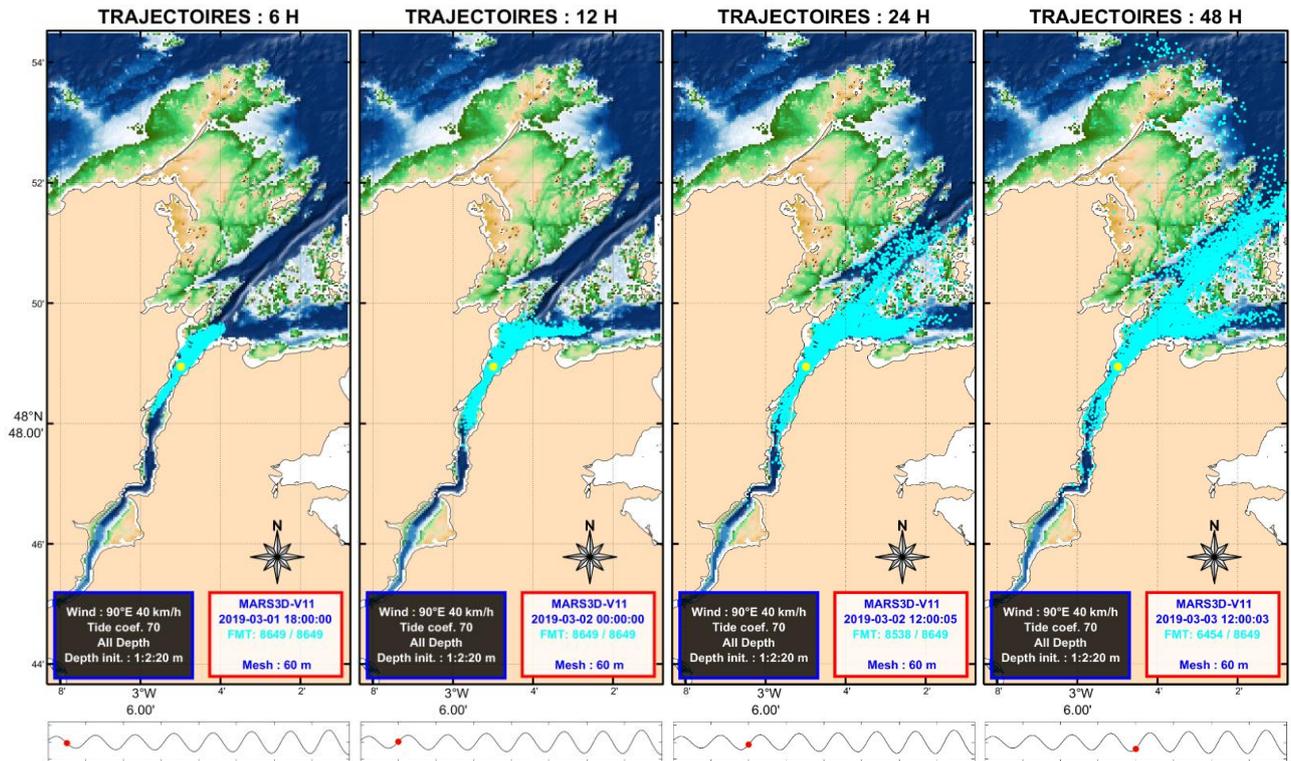
Annexe 2 : Représentation cartographique de certaines activités anthropiques du bassin versant du Trieux



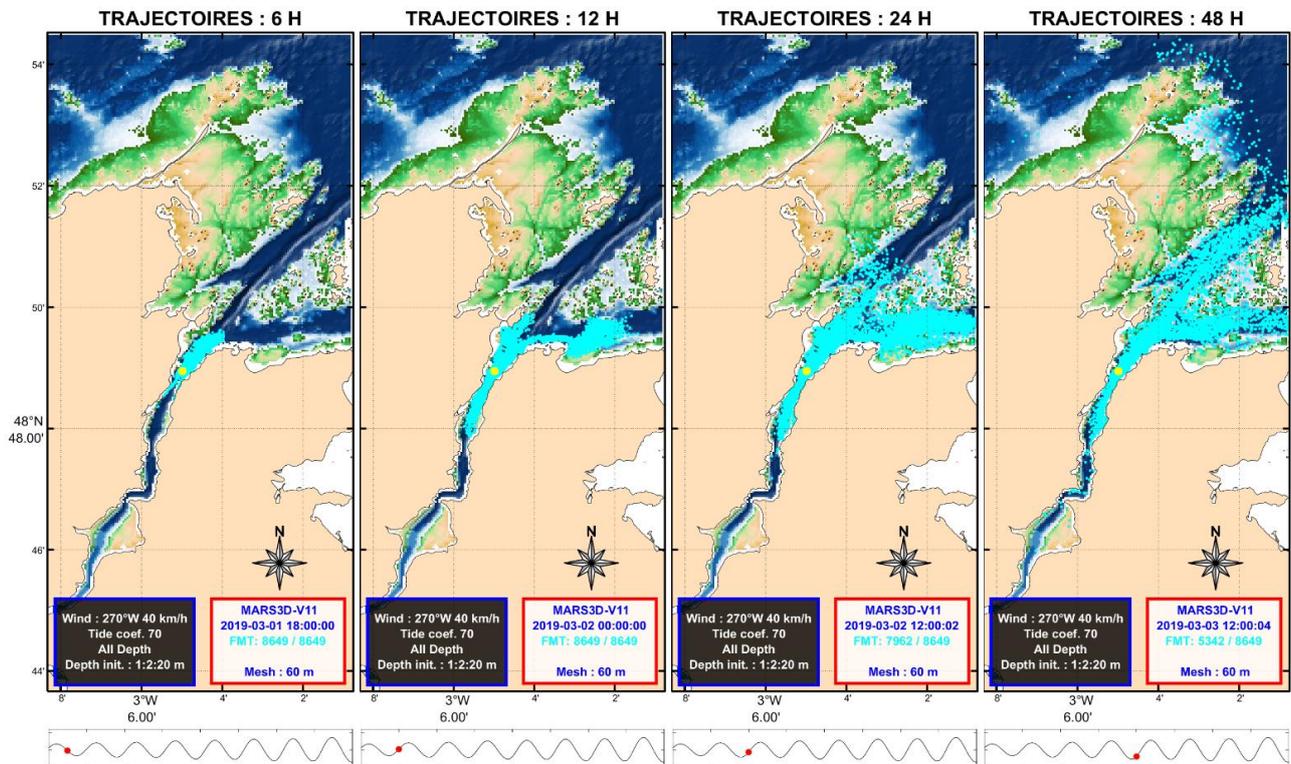
Annexe 3 : Carte des habitats benthiques de la zone intertidale du secteur Trégor-Goëlo (Bajjouk, 2009)



Annexe 4 : Carte des habitats benthiques de la zone subtidale de l'estuaire du Trieux (Sextant, Ifremer)

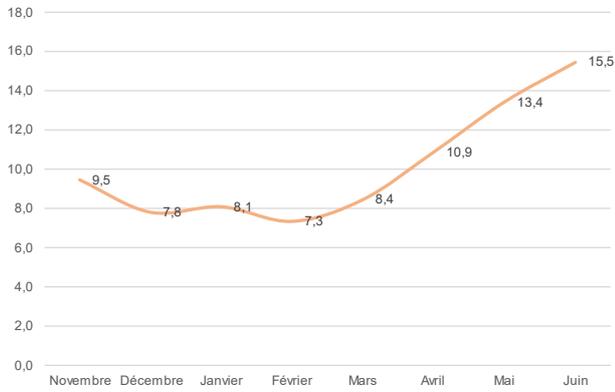


Annexe 5a : Modèles de dispersion de particules (MARS) dans l'estuaire du Trieux selon un vent d'Est, une profondeur de 20 m et un coefficient de 20

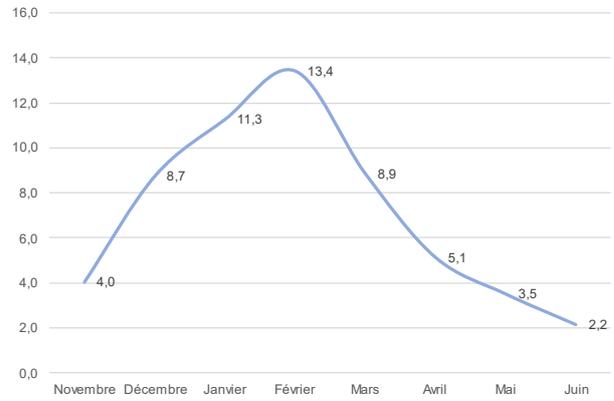


Annexe 5b : Modèles de dispersion de particules (MARS) dans l'estuaire du Trieux selon un vent d'Ouest, une profondeur de 20 m et un coefficient de 20

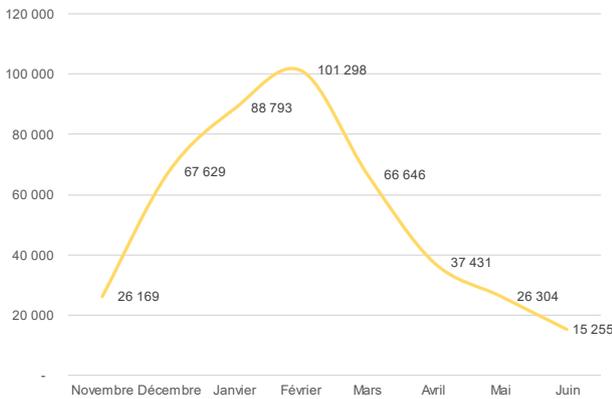
Equations et paramètres intermédiaires	Paramètres
$effettemp = X_{Filt} \times [T_m - Tempopt_{Filt}]^2$	<p><math>X_{Filt}</math>, paramètre traduisant effet max de la T° sur le colmatage (=0,013)</p> <p><math>T_m</math>, température moyenne mensuelle mesurée (°C)</p> <p><math>Tempopt_{Filt}</math>, température optimale de filtration (=19°C)</p>
$colmat = \min(0, X_{colmat,thr} - MES)$	<p><math>X_{colmat,thr}</math>, seuil de MES à partir duquel il y a colmatage des huitres (=192 mg/L)</p> <p><math>MES</math>, concentration en matière en suspension dans le milieu (mg/L)</p>
$Filt = X_{Filtmax} - effettemp$	<p><math>X_{Filtmax}</math>, intensité de filtration maximale (=4,8 L/h/g)</p>
$Selection = \min(0, X_{prodpsueufec-thr} - MES)$	<p><math>X_{prodpsueufec-thr}</math>, paramètre de la loi sélective de pré-ingestion (=4,6 mg/L)</p>
$ORGAFRING = \frac{Ingestion_{org}}{Ingestion_{org} + Ingestion_{inorg}} \times 100$	
$EA = X_{absmaxmop} \times [1 - e^{(-X_{absdet} \times ORGAFRING)}]$	<p><math>X_{absmaxmop}</math>, paramètre pour l'efficacité d'absorption (=0,8)</p> <p><math>X_{absdet}</math>, paramètre pour l'absorption du détritique (=0,23)</p>
<p><math>X_{allfiltr}</math>, paramètre de la loi de filtration (=0,66)</p> <p><math>X_{colmat}</math>, paramètre de la loi de filtration (=0,07)</p> <p><math>X_{prodpsueufeco-lev}</math>, paramètre de la loi d'ingestion de la MO (=0,59)</p> <p><math>X_{psueufeco-exp}</math>, paramètre de la loi d'ingestion de la MO (=0,07)</p>	



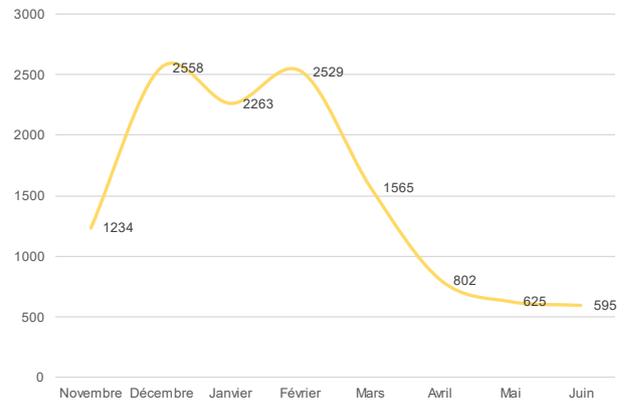
(a) Températures (°C) moyennes du Trieux (2007-2020) sur la période d'étude



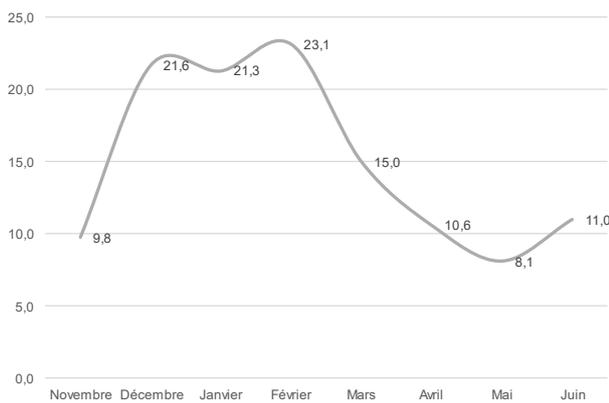
(b) Débits moyen (m³/s) du Trieux (2007-2020) sur la période d'étude



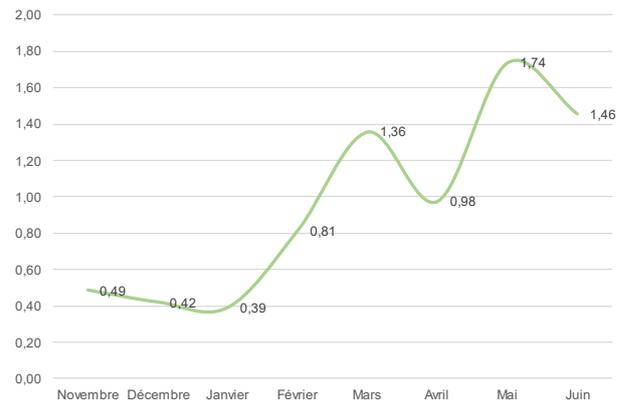
(c) Quantités moyennes d'N total (kg) du Trieux (2009-2020) sur la période d'étude



(d) Quantités moyennes de P total (kg) du Trieux (2009-2020) sur la période d'étude



(e) Concentrations moyennes de MES (mg/L) du Trieux (2007-2020) sur la période d'étude

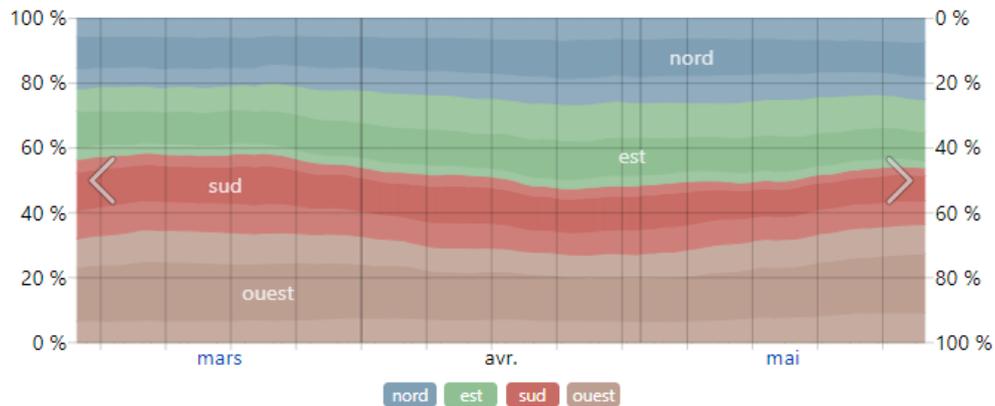


(f) Concentrations moyennes de chlorophylle a (µg/L) du Trieux (2014-2020) sur la période d'étude

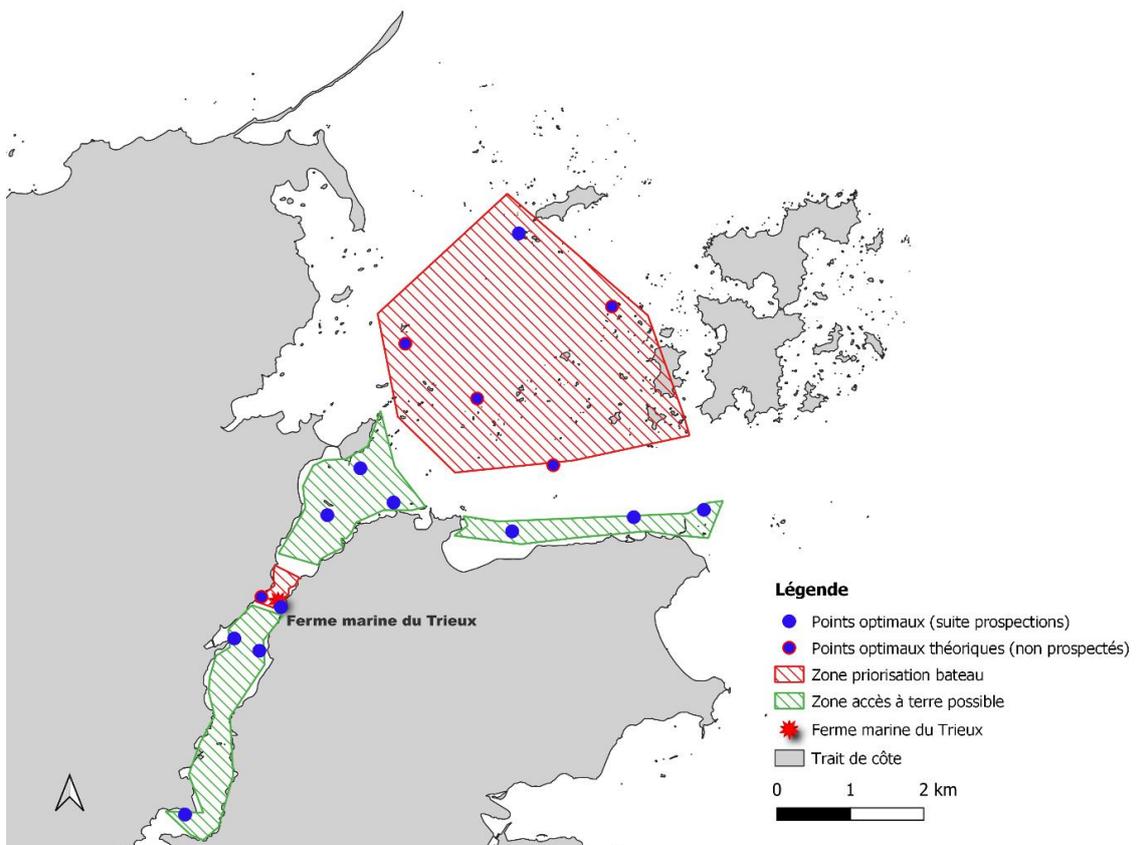
Annexe 7 : Paramètres environnementaux (pôle EENVI, CEVA)

Annexe 8 : Equations des facteurs de croissance algales

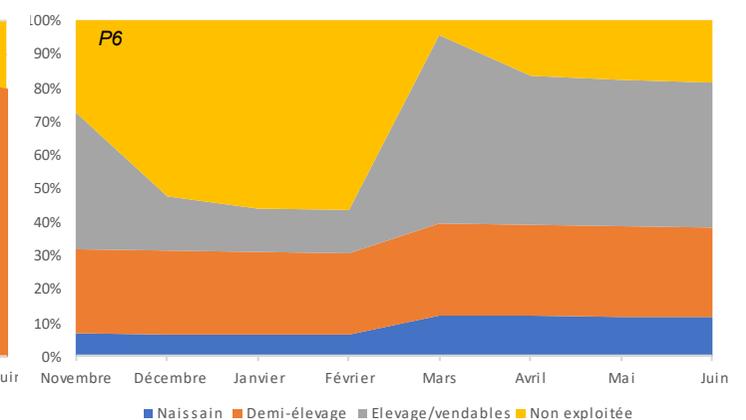
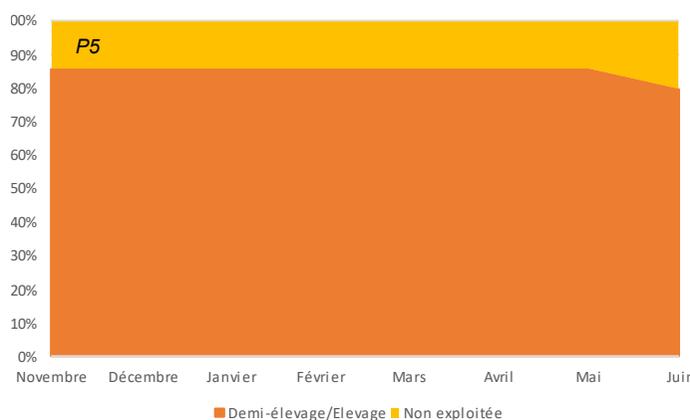
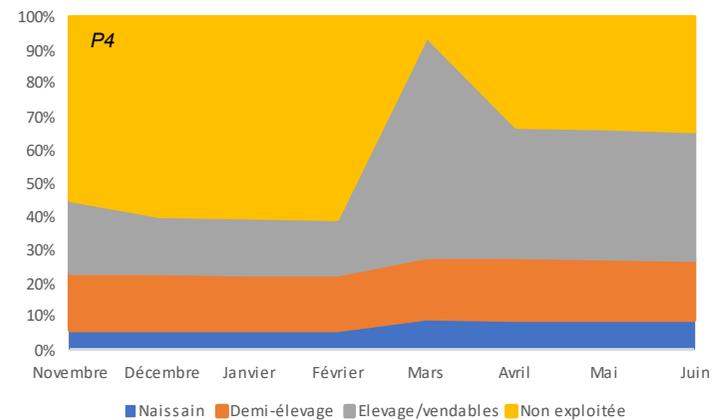
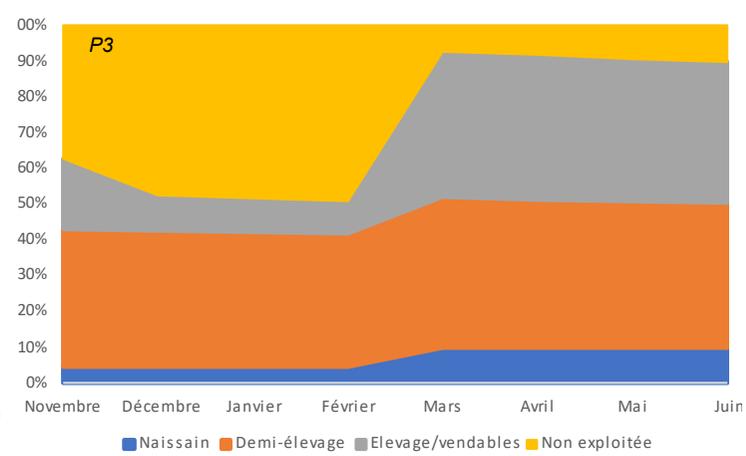
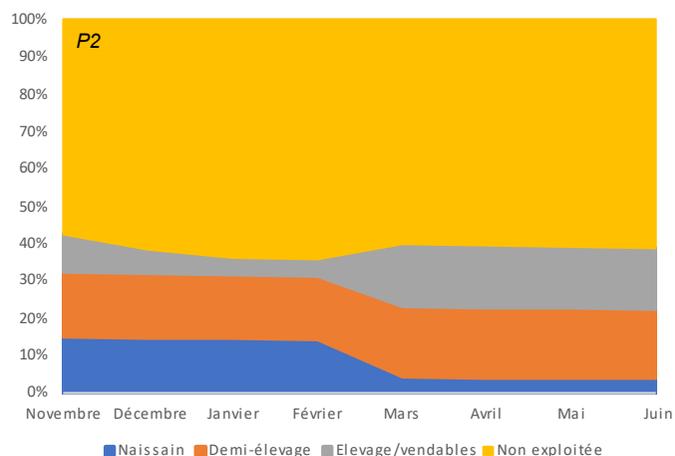
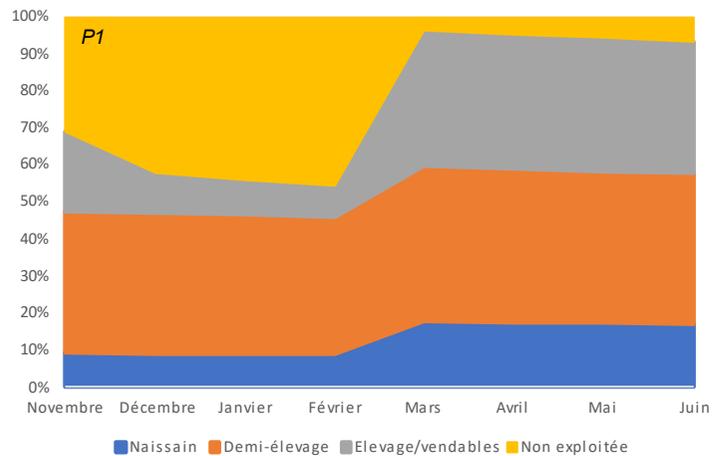
Equations facteurs croissance algale	Paramètres
$f(T) = \begin{cases} 0,08T + 0,2 & -1,8 \leq T < 10 \\ 1 & 10 \leq T \leq 15 \\ \frac{19}{4} - \frac{T}{4} & 15 < T \leq 19 \\ 0 & T > 19 \end{cases}$	<p><math>T</math>, température (°C)</p>
$f(I) = \frac{I}{I_0} \times e^{(1-\frac{I}{I_0})}$ $I = I_s \times e^{-kz}$ $k = 0,0484MES + 0,0243$ $I_s = 200,38 - 116,47 \times \cos\left[\frac{2\pi(t-1)}{365}\right]$	<p><math>I</math> l'intensité lumineuse (W/m<sup>2</sup>) à la profondeur <math>z</math>,</p> <p><math>I_0</math> l'intensité lumineuse optimale pour la croissance (=180 W/m<sup>2</sup>),</p> <p><math>I_s</math> l'intensité lumineuse à la surface (W/m<sup>2</sup>),</p> <p><math>k</math> le coefficient d'extinction lumineuse (/m)</p> <p><math>MES</math> la concentration en matière en suspension dans le milieu (mg/L).</p>
$f(NP) = \min(f(N), f(P))$ $f(N) = 1 - \frac{N_{min}}{N_{int}} \quad f(P) = 1 - \frac{P_{min}}{P_{int}}$	<p><math>X_{min}</math>, concentration minimale critique de nutriment contenu dans les cellules algales</p> <p><math>X_{int}</math>, concentration effective estimée selon les caractéristiques physiologiques de l'algue</p>



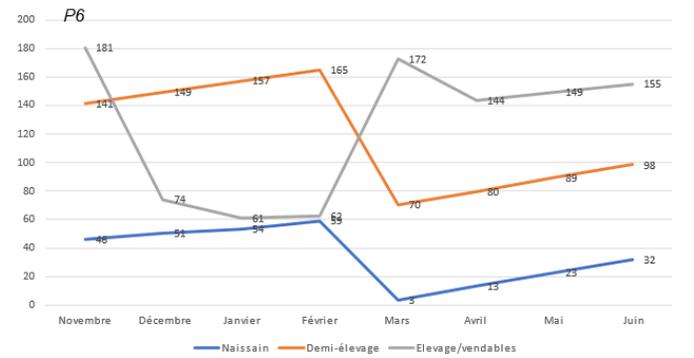
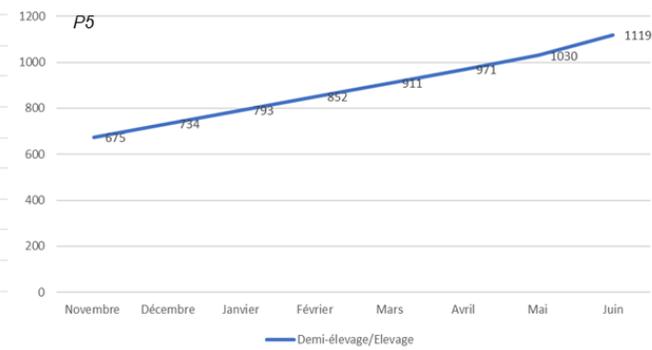
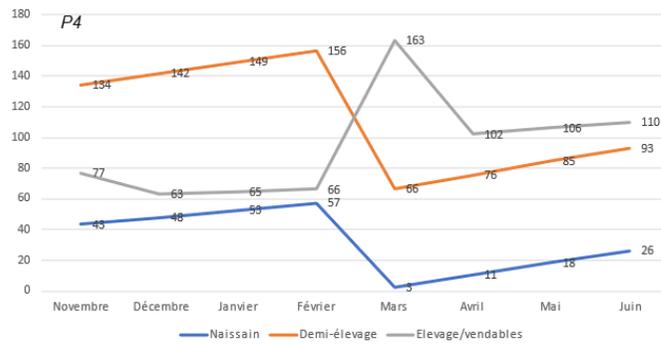
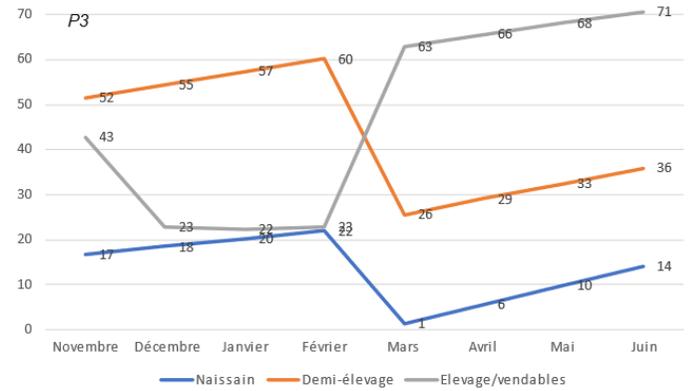
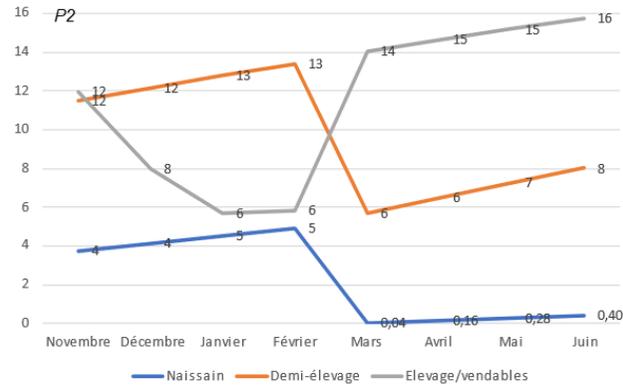
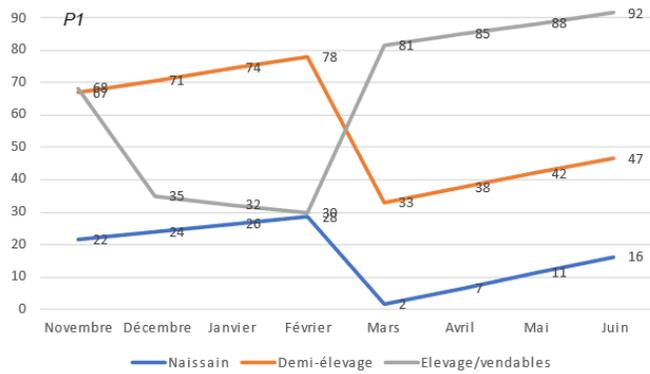
Annexe 9 : Direction du vent pour Pleubian (mars à mai 2022)



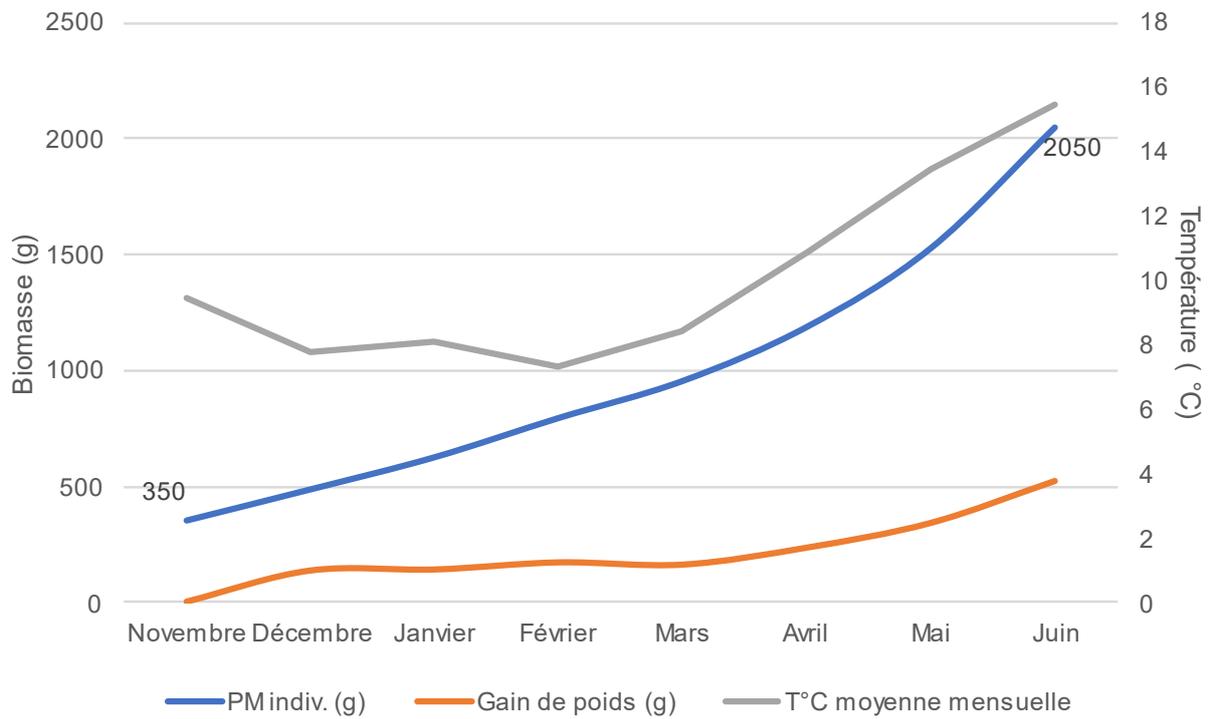
Annexe 10 : Représentation des voies d'accès des différents points d'échantillonnage



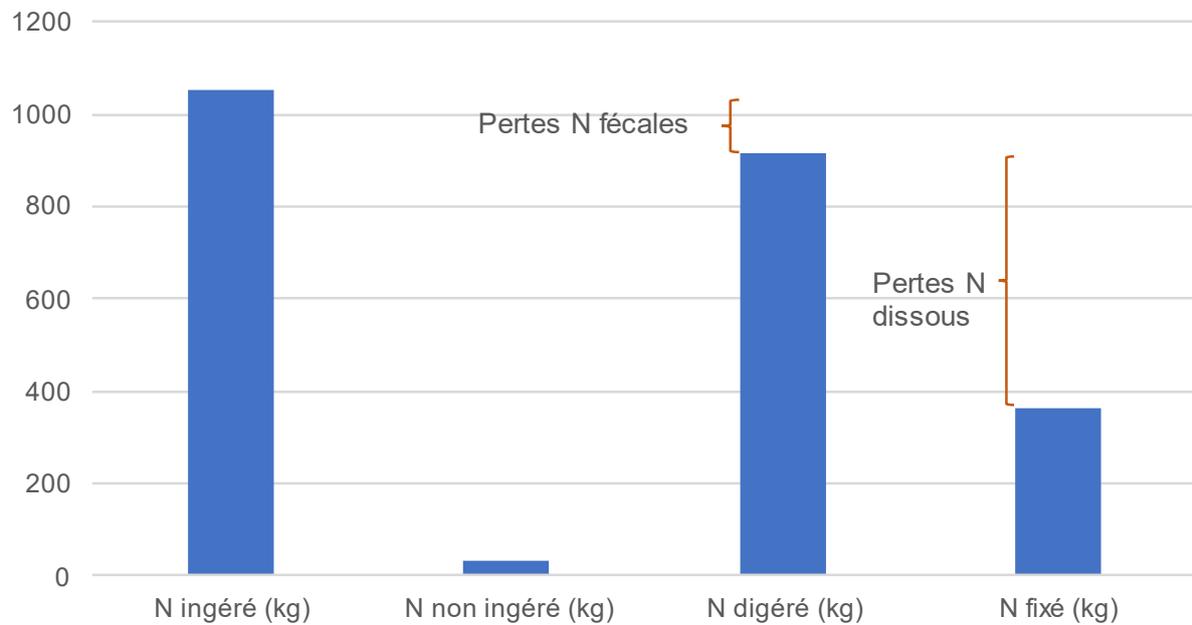
Annexe 11a : Profils de l'occupation des surfaces des concessions des producteurs interrogés sur la période d'étude



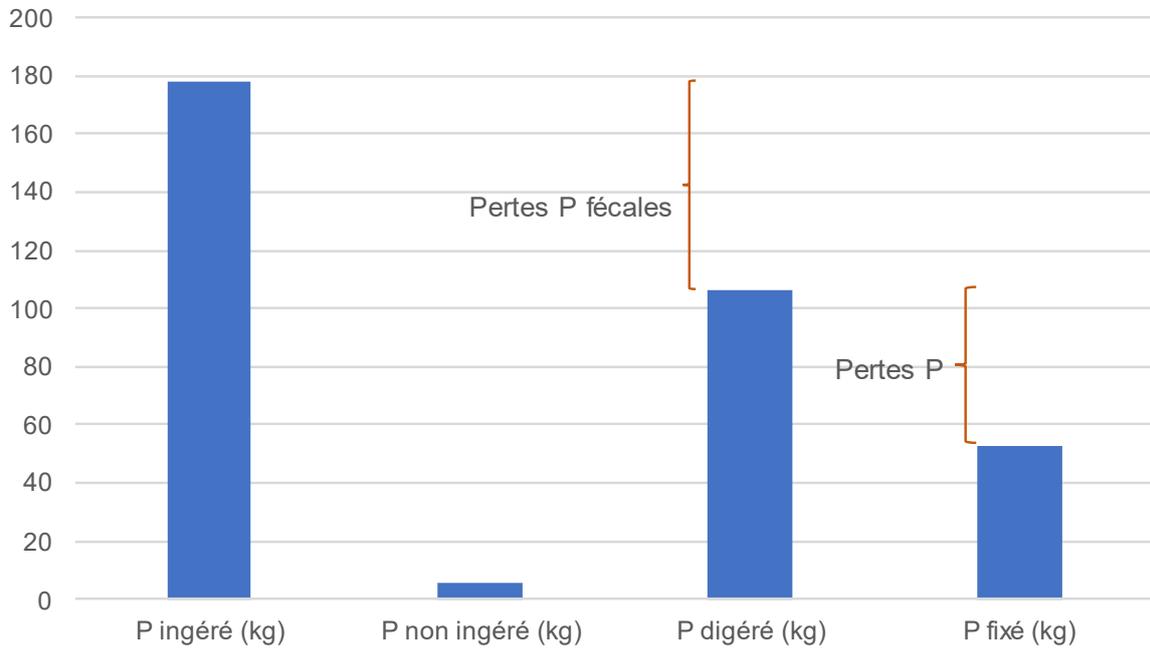
Annexe 11b : Profils des biomasses présentes aux différents stades d'élevage sur les concessions des producteurs interrogés sur la période d'étude



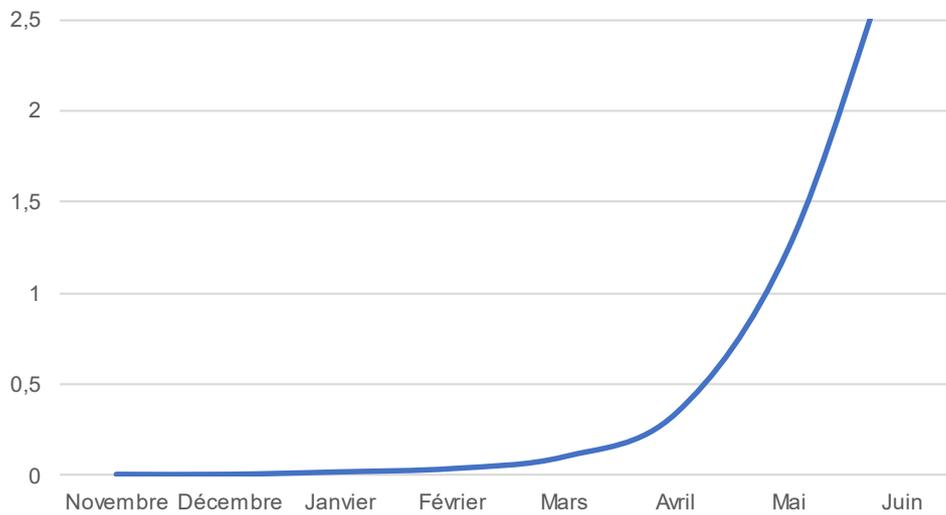
Annexe 12 : Evolution moyenne de la croissance d'une truite de la FMT sur la période d'élevage



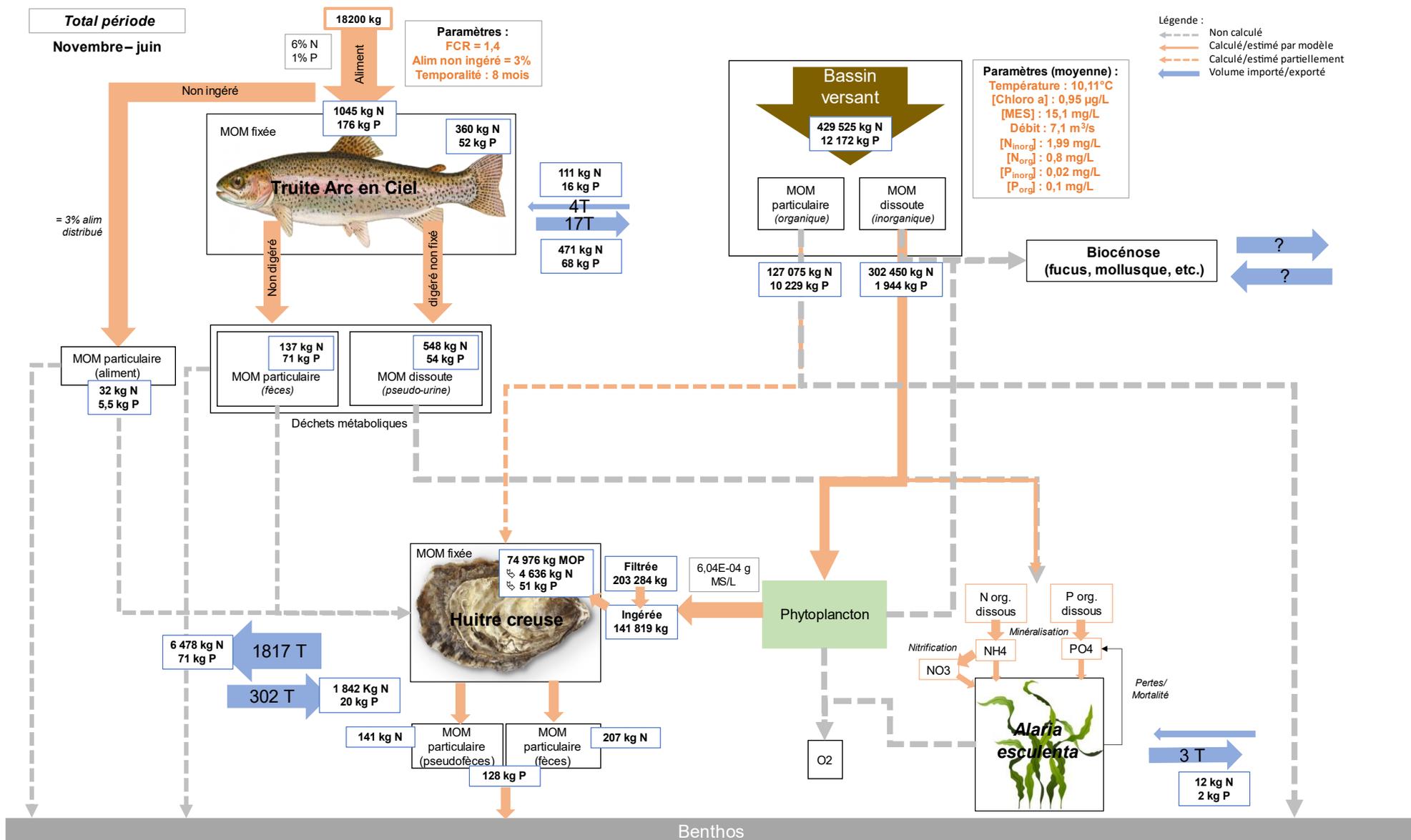
Annexe 13 : Répartition des pertes totales d'N des truites de la FMT sur la période d'élevage



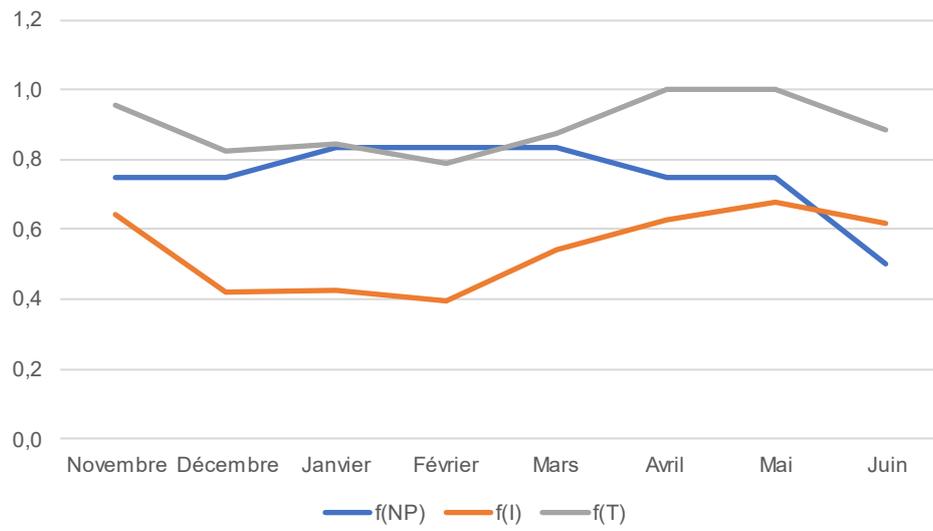
Annexe 14 : Répartition des pertes totales de P des truites de la FMT sur la période d'élevage



Annexe 15 : Courbe de croissance de la biomasse totale (T) d'*Alaria esculenta* cultivée sur la période d'étude



Annexe 16 : Bilan de masse final des compartiments aquacoles du Trieux sur la période de novembre à juin



Annexe 17 : Evolution des facteurs limitants la croissance algale sur la période d'étude

	Diplôme : Ingénieur Spécialité : Agronome Spécialisation / option : Sciences Halieutiques et Aquacoles (Aquaculture) Enseignant référent : Gregory RAYMOND
Auteur(s) : Iroise MATHONNET Date de naissance* : 21/12/1997	<u>Organismes d'accueil</u> : Institut Agro Rennes – Angers Centre d'Etude et de Valorisation des Algues
Nb pages : 62      Annexe(s) : 17	<u>Adresses</u> :
Année de soutenance : 2022	65, rue de St Briec, 35000 Rennes 83, Presqu'île de Pen Lan, 22610 Pleubian
<u>Maîtres de stage</u> : Hervé Le Bris & Sarah Bouchemousse	
Titre français : Mise en évidence et quantification des relations trophiques au sein d'un système d'Aquaculture Multi-Trophique Intégrée (AMTI) en milieu ouvert : application à l'estuaire du Trieux	
Titre anglais : Identification and quantification of trophic relations within an Integrated Multi-Trophic Aquaculture (IMTA) system in an open environment: application to the Trieux estuary	
Résumé (1600 caractères maximum) :	
<p>L'objectif de l'étude est d'évaluer un outil de monitoring environnemental de l'Aquaculture Multi-Trophique Intégrée (AMTI) en milieu ouvert afin d'identifier si les rejets issus du compartiment piscicole sont recyclés par les compartiments extracteurs (huitres et algues). Pour cela, deux méthodes sont testées au sein de l'estuaire du Trieux. Une méthode directe qui consiste au prélèvement d'espèces dans le milieu afin d'analyser leur composition en biomarqueurs (acides gras, isotopes stables, ADN de truite et éléments trace métallique). Et une méthode indirecte qui consiste à modéliser les flux de matière entre compartiments via l'utilisation de modèles de bilan de masse simples. Des prospections de terrain et des rencontres auprès des acteurs de l'estuaire ont été effectuées afin de collecter les données nécessaires. Ainsi, une stratégie d'échantillonnage a été mise en œuvre et a permis d'obtenir 420 échantillons pour les analyses de biomarqueurs. Trois modèles de bilan de masse ont été effectués pour le compartiment piscicole (<i>Oncorhynchus mykiss</i>), le compartiment conchylicole (<i>Crassostrea gigas</i>) et le compartiment algocole (<i>Alaria esculenta</i>). <i>In fine</i>, on calcule des émissions d'N et de P de 55,2 g N/kg et 10 g P/kg de truites, 220 mg N/kg et 70 mg P/kg d'huitres creuse et une absorption de 4,15 g N/kg et 0,68 g P/kg d'<i>Alaria esculenta</i> en moyenne sur la période d'étude. Ce projet appréhende la complexité du fonctionnement de systèmes considérés comme de l'AMTI en milieu ouvert compte tenu de l'hydrodynamisme du milieu et des apports de nutriments du bassin versant.</p>	
Abstract (1600 caractères maximum) :	
<p>The objective of the study is to evaluate an environmental monitoring tool for Integrated Multi-Trophic Aquaculture (IMTA) in open sea to identify if the discharges from the fish compartment are recycled by the extractive compartments (oysters and algae). For this, two methods are tested in the Trieux estuary. A direct method which consists in sampling species in the environment to analyse their composition in biomarkers (fatty acids, stable isotopes, trout DNA, and metallic trace elements). And an indirect method which consists in modelling the flow of matter between compartments via the use of simple mass balance models. Field surveys and meetings with estuary stakeholders were conducted to collect the necessary data. Thus, a sampling strategy was implemented and resulted in 420 samples for biomarker analyses. Three mass balance models were performed for the fish compartment (<i>Oncorhynchus mykiss</i>), the shellfish compartment (<i>Crassostrea gigas</i>) and the algal compartment (<i>Alaria esculenta</i>). <i>In fine</i>, we calculate N and P emissions of 55.2 g N/kg and 10 g P/kg of trout, 220 mg N/kg and 70 mg P/kg of hollow oysters and an absorption of 4.15 g N/kg and 0.68 g P/kg of <i>Alaria esculenta</i> on average over the study period. This project addresses the complexity of the functioning of systems considered as IMTA in open sea given the hydrodynamics of the environment and the nutrient inputs from the watershed.</p>	
Mots-clés : AMTI, flux de matière, estuaire, biomarqueurs, compartiments trophiques, échantillonnage, bilan de masse, azote, phosphore.	
Key Words: IMTA, material flux, estuary, biomarkers, trophic compartments, sampling, mass balance, nitrogen, phosphorus.	

\* Élément qui permet d'enregistrer les notices auteurs dans le catalogue des bibliothèques universitaires