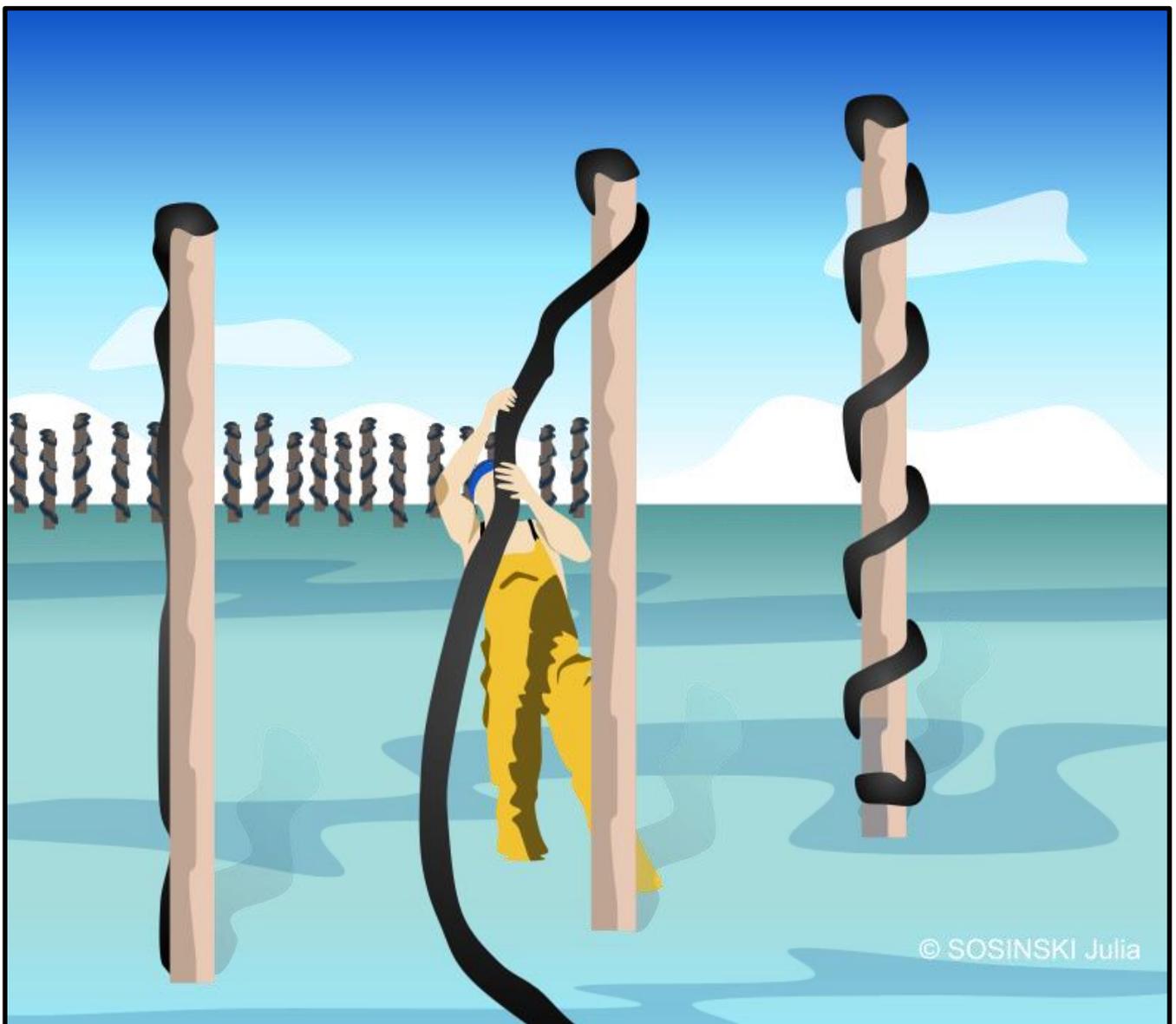


# État des lieux écologique de la Baie des Veys et mise au point d'un protocole de suivi sur deux ans.



UNIVERSITÉ  
CAEN  
NORMANDIE



© SOSINSKI Julia

SOSIŃSKI Julia

## **Sommaire**

- I. **Introduction**
- II. **Description du phénomène**
  - A. **Phénomènes de mortalité (données REMOULNOR)**
  - B. **Ralentissement de la croissance (données REMOULNOR)**
- III. **Etat des connaissances sur le Cheptel d'Utah Beach (Baie des Veys)**
  - A. **Etat des lieux environnemental**
    - 1. Connaissances hydrographiques
    - 2. Suivi HYDRONOR
    - 3. Événements climatiques
    - 4. Gestion des portes à flots
    - 5. Inventaire faunistique
  - B. **Pathogènes et risque infectieux à Utah Beach**
    - 1. *Francisella haliotica*
    - 2. *Mytilicola intestinalis*
    - 3. *Protoeces maculatus*
    - 4. *Marteilia spp*
    - 5. *Vibrio spp*
  - C. **Physiologie des moules et de la reproduction**
    - 1. Néoplasie hémocytaire
    - 2. Reproduction et Scope for Growth
  - D. **Conclusion sur la première partie**
- IV. **Ressenti des professionnels d'Utah Beach**
- V. **Proposition de suivi**
  - A. **Physiologie de la reproduction**
    - 1. Maturation
    - 2. Ratio énergétiques
  - B. **Croissance**
  - C. **Pathogènes**
  - D. **Pollution chimique**
    - 1. Détection des contaminants dans l'eau
      - a) Echantillonneurs passifs type POCIS
      - b) Suivi par bioindicateurs
        - (1) Test *Vibrio fischeri*
        - (2) Test larve d'oursins
    - 2. Détection des contaminants dans les moules
      - a) Analyse dans les chairs
      - b) Lésions internes
  - E. **Suivi des masses d'eau et du phytoplancton**
    - 1. Indicateur de biomasse : chlorophylle a et fluorescence minimale
    - 2. Indicateur de qualité : état physiologique
    - 3. Structure des communautés
      - a) Identification *via* les pigments
      - b) Cytométrie en flux
      - c) Métagénomique
  - F. **Facteurs abiotiques : continuité du réseau HYDRONOR**
  - G. **Interactions biotiques**
- VI. **Bibliographie**

## I. Introduction

Née il y a plusieurs millénaires, l'aquaculture est issue des savoirs traditionnels pour l'élevage d'espèces aquatiques. Elle s'est développée au cours des siècles, et a connu des changements majeurs avec les avancées scientifiques du XXe et XXIe siècle. On assiste à un essor toujours d'actualité, produisant ainsi plus de la moitié des poissons et produits aquatiques pour la consommation humaine (FAO, 2020). La conchyliculture regroupe tous les élevages de coquillage. En France, on retrouve principalement l'huître creuse *Magallana* (anciennement *Crassostrea*) *gigas* et l'huître plate *Ostrea edulis*, la moule commune *Mytilus edulis* et la moule méditerranéenne *Mytilus galloprovincialis*, la palourde japonaise *Ruditapes philippinarum*, la coque commune *Cerastoderma edule* et d'autres espèces comme l'ormeau tuberculeux *Haliotis tuberculata* ou encore le pétoncle d'Amérique *Placopecten magellanicus*, élevé dans l'archipel de Saint-Pierre-et-Miquelon (FAO, 2005). La conchyliculture française, avec une production moyenne de 250 000 tonnes par an et un chiffre d'affaires de 774 millions d'euros, arrive 2<sup>e</sup> au classement européen. Sur ce chiffre, la mytiliculture représente une production annuelle de 65 000 tonnes et ainsi près de 120 millions d'euros de chiffres d'affaires (2018). Le littoral normand, de par ses caractéristiques, se prête particulièrement à la mytiliculture. Ainsi, près d'une moule française sur deux est produite en Normandie<sup>1</sup>.

La mytiliculture exploite le cycle naturel des moules. Ainsi, la première étape consiste à capter les naissains (au printemps). En effet, les espèces du genre *Mytilus* ont une courte phase de vie planctonique et vont rapidement se fixer sur un substrat. Pour cela, sont disposées de grandes cordes en fibre de noix de coco, servant de collecteurs pour les naissains. Ensuite, les cordes sont dédoublées puis enroulées sur des bouchots (pieux en bois) (Marchand, 1915).

Les moules (*Mytilus spp.*) sont des bivalves marins filtreurs (microphages et suspensivores). Elles s'alimentent en piégeant les particules planctoniques dans leur mucus. Elles peuvent également se nourrir de bactéries lorsque les ressources en algues sont trop restreintes (His & Cantin, 1995). Ces espèces sont gonochoriques. Une fois la maturité sexuelle atteinte, les gonades colonisent le manteau (Gosling, 2003).

Les espèces produites sur le littoral français sont *Mytilus edulis* et *Mytilus galloprovincialis*. La moule commune *M. edulis* affectionne les eaux froides à tempérées, et peut supporter des températures négatives (Aarset, 1982). On la retrouve en Mer du Nord, mer Celtique et Manche, avec une limitation de répartition au niveau de la frontière espagnole (Fly et al., 2015). La moule méditerranéenne *M. galloprovincialis* vit dans les eaux chaudes à tempérées, avec une limite inférieure

---

<sup>1</sup> Chiffres clés publiés par le Comité National de la Conchyliculture (CNC) - <https://coquillages.com/les-statistiques/>

de 7 à 8°C (Lubet, 1973). On la retrouve en Mer Méditerranée et le long des côtes atlantiques espagnoles. Pour ces deux bivalves eurythermes, les températures maximales létales sont de 29-30°C (Almada-Villela *et al.*, 1982). Il est possible d'avoir des zones communes entre ces deux espèces. C'est notamment le cas en Bretagne, dans la Manche (Fly *et al.*, 2015). Concernant la salinité, *M. edulis* supporte des dessalures importantes allant jusqu'à 7‰ et *M. galloprovincialis*, 19‰. La salinité maximale pour les deux espèces est de 43‰ (Lubet, 1973).

Malgré la tolérance de ces espèces, la culture de moules se réalisant en milieu ouvert, les paramètres du milieu ne peuvent être maîtrisés. Ainsi, les moules sont exposées aux aléas climatiques, à la prédation, à la pollution et aux pathogènes (Charles, 2019).

Depuis 2014, on recense des épisodes de mortalité massive dans certains bassins de production. Plusieurs régions ont été touchées : Bretagne, Pays de la Loire et Poitou-Charente (Béchemin *et al.*, 2015 ; Allain & Bernard 2016). La Normandie ne fait pas exception, et un secteur bien particulier, celui de la Baie des Veys, subit des épisodes ponctuels de mortalités depuis 2008. Le SMEL réalise un suivi de la productivité des principaux secteurs mytilicoles, et la station de référence pour la Baie des Veys est Utah Beach. Ainsi, les mytiliculteurs constatent une baisse conséquente de la croissance et de la qualité des moules, ainsi que des pertes en 2020-2021 avoisinant les 60% (Blin *et al.*, 2022). Le réseau MYTILOBS (Ifremer) recense également des taux de mortalité importants en Normandie, avec notamment 40% en 2014, 65% en 2016 et 39% en 2018 pour le site d'Agon (Normand *et al.*, 2021).

La profession mytilicole souhaiterait donc avoir un état des lieux de toutes les données pouvant apporter des éléments de connaissance et de compréhension de l'état des cheptels en élevage et de la qualité du milieu côtier sur la partie occidentale de la baie des Veys (Utah Beach). Il faudra ensuite déterminer les stratégies d'analyses à adopter pour en effectuer le suivi.

## II. Description du phénomène<sup>2</sup>

### A. Phénomènes de mortalité (données REMOULNOR)

Le réseau REMOULNOR a été créé en 2002 par le SMEL afin de caractériser les bassins de production mytilicoles de la Manche. A travers ce réseau, deux types de suivis sont pratiqués. Le premier est un suivi de productivité standard. Ainsi, les moules sont élevées dans des poches-paniers implantées à mi-hauteur sur les pieux mytilicoles. Il n'y a pas de contrainte de densité donc ce suivi permet de visualiser la croissance des moules en fonction des conditions environnementales et de la zootecnie du secteur. Le second type de suivi, est celui de productivité par pieux. Il permet d'évaluer après un cycle complet d'élevage (15 mois), les caractéristiques générales des moules commercialisables.

La station d'Utah Beach, dans la partie occidentale de la Baie des Veys, est suivie depuis 2004. On remarque depuis 18 ans des épisodes ponctuels de mortalité (Fig. 1). Les principaux phénomènes de mortalités relevés sont les suivants :

- 51% en été 2005 ;
- 39% (moyenne) sur tout le cycle 2008-2009 ;
- 42% en été 2015 ;
- 51% en automne 2015 ;
- 19% au printemps 2019 ;
- 32% en été 2019 ;
- 49% (moyenne) sur tout le cycle 2020-2021.

Des mortalités massives ont été relevées tout au long du cycle 2020-2021. Dès le lancement de la saison, 34% de perte ont été recensés en automne 2020. S'ensuit des pertes de 59% en hiver, 45% au printemps et 59% en fin de cycle, en été 2021. A titre de comparaison, la mortalité moyenne régionale interannuelle (2004-2021) est respectivement de 4%, 5%, 14% et 21% pour l'automne, l'hiver, le printemps et l'été. Ces données sont corrélées avec les déclarations de mortalités auprès de la DDTM. En effet, tous les mytiliculteurs ont déclarés en octobre 2020 et août 2021 (début et fin de cycle) des mortalités brutales touchant la quasi-totalité des moules en élevage, de toute taille, tout âge (1 et 2 ans) et de tout origine (Oléron, Penestin, Les Saumonards)<sup>3</sup>.

---

<sup>2</sup> Ce chapitre est basé sur les données brutes collectées par le SMEL dans le cadre du réseau de surveillance REMOULNOR.

<sup>3</sup> Les déclarations de mortalités ont été récupérées auprès de la DDTM grâce au travail de Julie Rivière.

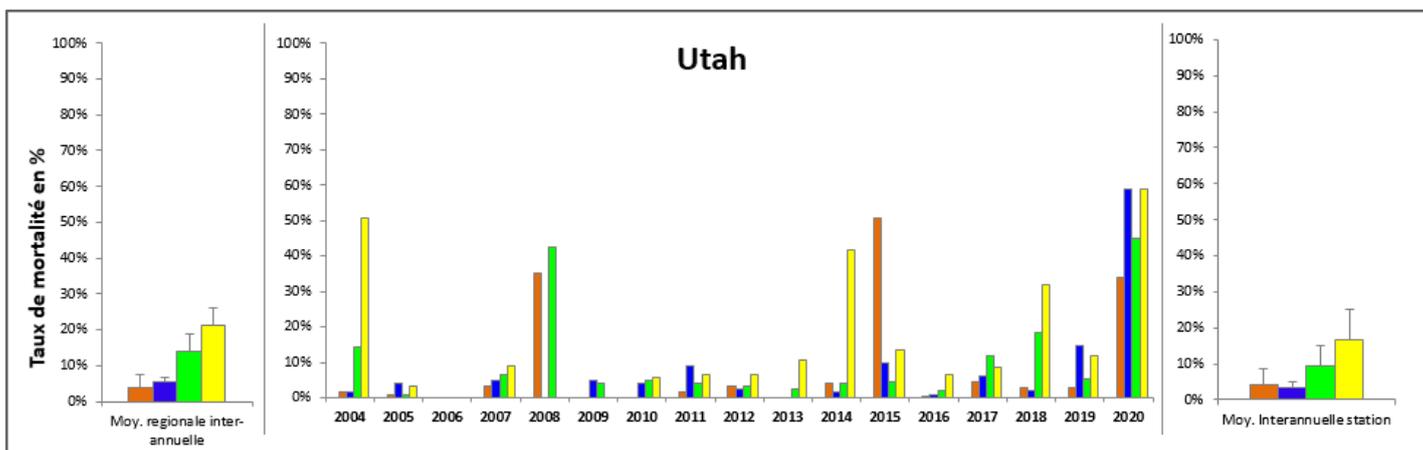


Figure 1 : Suivi des mortalités relevées à Utah Beach dans le cadre du réseau de surveillance REMOULNOR entre 2004 et 2020. Les moyennes régionales interannuelles sont représentées sur la droite et les moyennes interannuelles de la station sur la gauche.

## B. Ralentissement de la croissance (données REMOULNOR)

Le suivi de la productivité standard (sans contrainte de densité) indique à Utah Beach une longueur de coquille historiquement faible pour le cycle 2020-2021 avec une moyenne de 36,09 mm, significativement inférieur à la moyenne interannuelle de la station (43,09 mm) et régionale (43,68mm). Les mêmes conclusions sont tirées pour le poids individuel moyen avec pour le cycle une moyenne de 4,65 g par moule contre 8,13 g en moyenne interannuelle régionale et 8,64 g pour la moyenne interannuelle de la station. Le poids sec de chair est de 0,20g en fin de cycle, à nouveau il s'agit du plus faible obtenu depuis 2004. La moyenne interannuelle de la station est de 1,03g. Enfin, le taux de remplissage des moules est également historiquement faible avec une valeur de 131 en fin de cycle (été 2021), alors que la moyenne interannuelle de la station est de 324 et celle de la région de 267. Pour tous les paramètres étudiés, les moules d'Utah Beach sont en dessous de la moyenne interannuelle de la station et également en dessous des moyennes des autres stations pour le même cycle (Fig. 2).

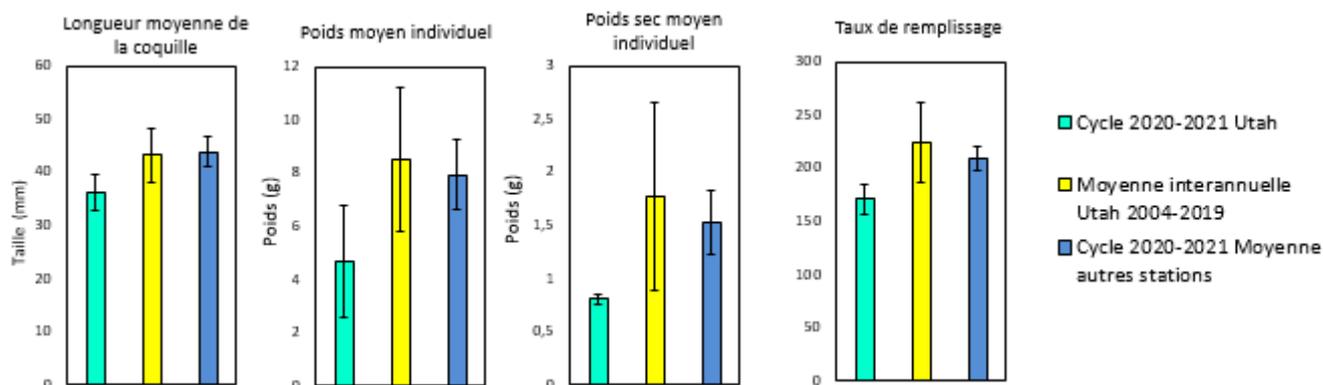


Figure 2 : Principaux résultats obtenus par le réseau REMOULNOR. Cyan : Valeurs moyennes pour le cycle 2020-2021 à Utah Beach ; Jaune : moyenne interannuelle d’Utah Beach ; Bleu : Moyenne du cycle 2020-2021 des autres stations REMOULNOR.

Concernant la productivité par pieux (condition d’élevage classique), les résultats obtenus concordent avec le suivi de productivité standard. Le poids net moyen de moules commercialisables est en chute avec pour 2020-2021 30 kg par pieux. La production est donc significativement inférieure aux moyennes interannuelles de la station (51 kg) et de la région (41 kg). Le taux de remplissage des moules commercialisables est également très faible, avec une valeur de 160, alors que les moyennes interannuelles de la station et de la région sont respectivement de 264 et 232.

La production mytilicole en Baie des Veys souffre donc de mortalités et d’un déficit de croissance, ayant atteint son maximum durant le cycle de production 2020-2021. Les prochains chapitres ont donc pour mission de dresser un état des lieux complet du cheptel afin d’apporter les premiers éléments de réponse sur cette baisse de productivité.

### III. Etat des connaissances sur le Cheptel d'Utah Beach (Baie des Veys)

#### A. Etat des lieux environnemental

##### 1. Connaissances hydrographiques

###### a) Bassin versant

La Baie des Veys est composée de vasières littorales. Elle constitue le prolongement en mer des marais de Carentan. Cette zone est caractérisée par l'accumulation de sables fins et de vases, très poldérisée, fonctionnant ainsi comme un piège à sédiment. Utah Beach (Fig. 3) se situe au Nord-Ouest de la Baie. Cet estran est sableux, interrompu ponctuellement par des platiers rocheux réduits.

La Baie des Veys est bordée par 7 bassins versants : L'Escalgrain, Le Rhin, L'Aure, La Vire, La Taute, La Douve et La Grande Crique. La baie reçoit donc de nombreux apports terrigènes (SAFEGE-Ginger-Actimar, 2013).

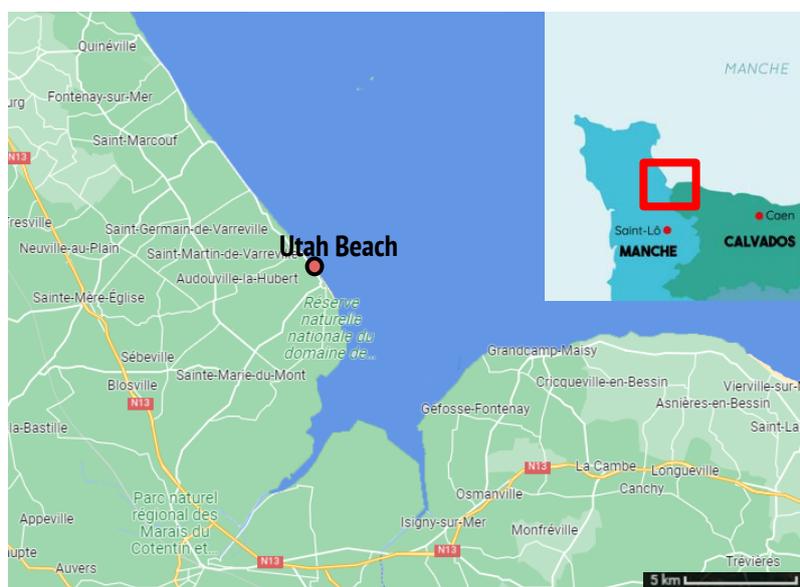


Figure 3 : Vue satellite de la Baie des Veys (©GoogleMaps). Le point rouge désigne l'emplacement d'Utah Beach. Visualisation réalisée sur QGIS.

Le bassin versant d'Utah Beach est très agricole : 142 exploitations en 2010, avec 8500 hectares de Surface Agricole Utilisée (SAU), soit 67% de la superficie totale des communes concernées (Fig. 4). De plus, le registre parcellaire graphique (RPG) indique que les surfaces du bassin versant recouvrent 4500 ha, soit près de 80% du bassin versant (Fig. 5). La majorité sont des prairies permanentes, des cultures de maïs et de blé tendre (Rocq, 2020).

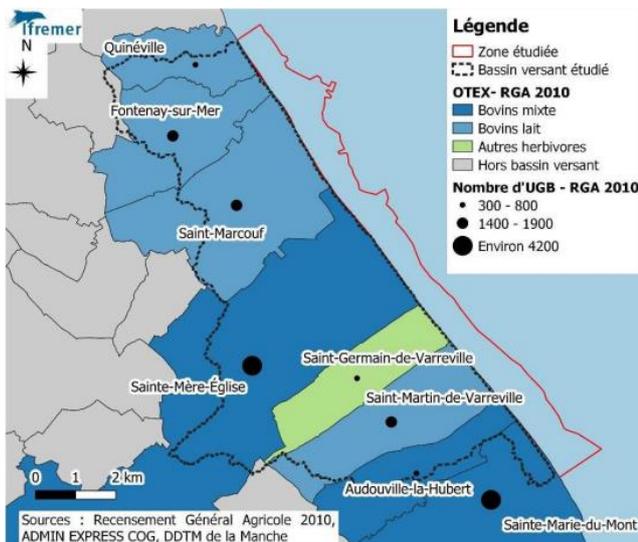


Figure 4 : orientation technico-économique des exploitations agricoles et nombre d'Unités Gros Bétail (UGB) dans les communes du bassin versant (Rocq, 2020)

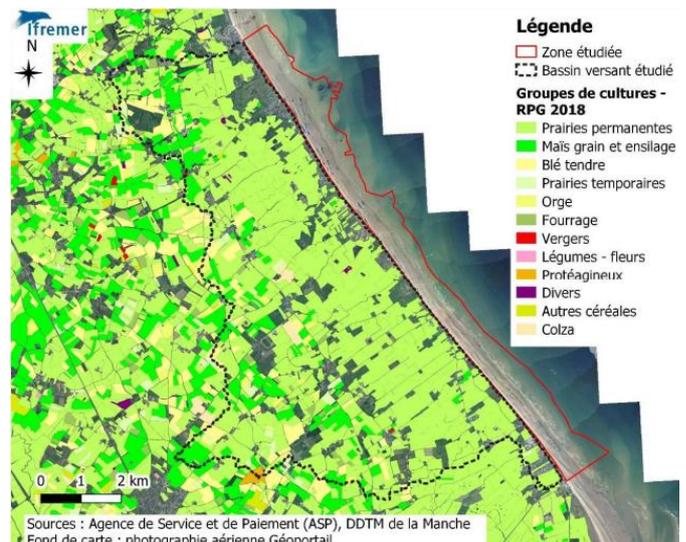


Figure 5 : registre parcellaire graphique (RPG) de 2018 dans le bassin versant d'Utah Beach (Rocq, 2020)

### b) Courantologie

La dynamique de la Baie suit un schéma bien particulier, décrit dans la Fig. 6. En effet, le déplacement des particules est divisé en 2 catégories. Les particules en provenance de l'Ouest de la Baie se déplacent vers l'Ouest en longeant la côte Est du Cotentin. A l'inverse, les apports dans l'Est de la Baie se dirigent vers l'Est en longeant la côte du Calvados. Il y a donc une distinction Est-Ouest indiquant un fonctionnement différent entre les deux parties de la Baie, et ce durant le flot comme le jusant (SAFEGE-Ginger-Actimar, 2013).

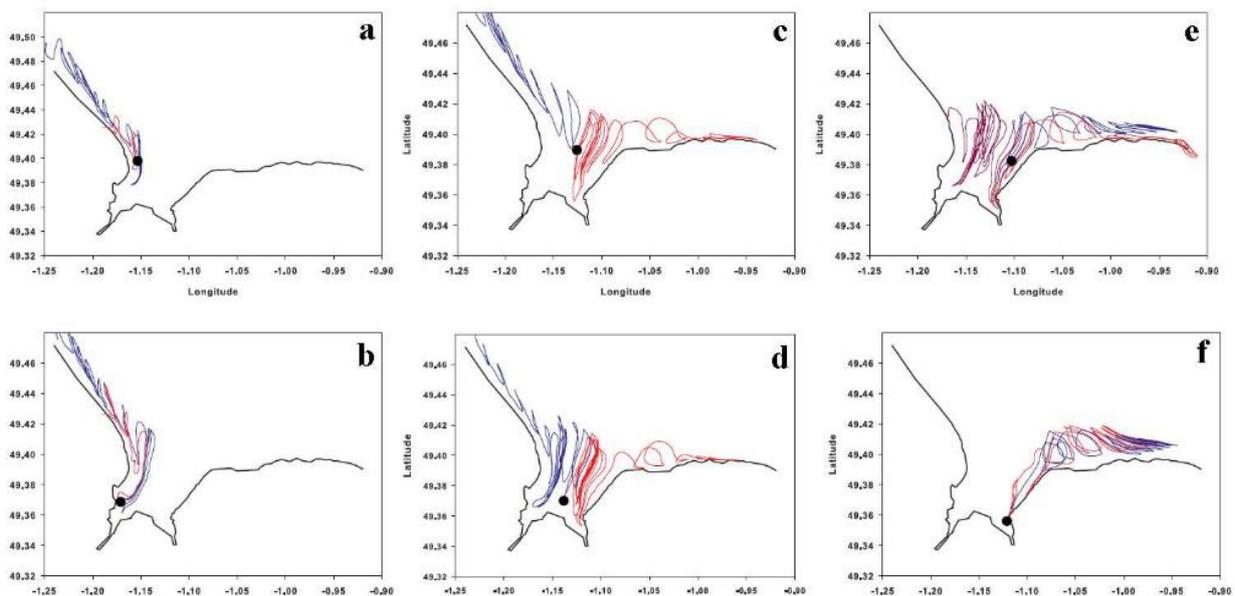


Figure 6 : Trajectoires des particules initialisées en différents points de la baie. La trajectoire en rouge correspond à un lancement à basse mer et celle en bleue à un lancement à pleine mer. Les points noirs indiquent la localisation du point de lancement (SAFEGE-Ginger-Actimar (2013)).

Néanmoins, les particules au centre de la Baie adoptent un comportement différent selon les marées. Durant le jusant, les particules partent vers l’Ouest et durant le flot, elles partent vers l’Est de la Baie (Fig. 6 c. d.)

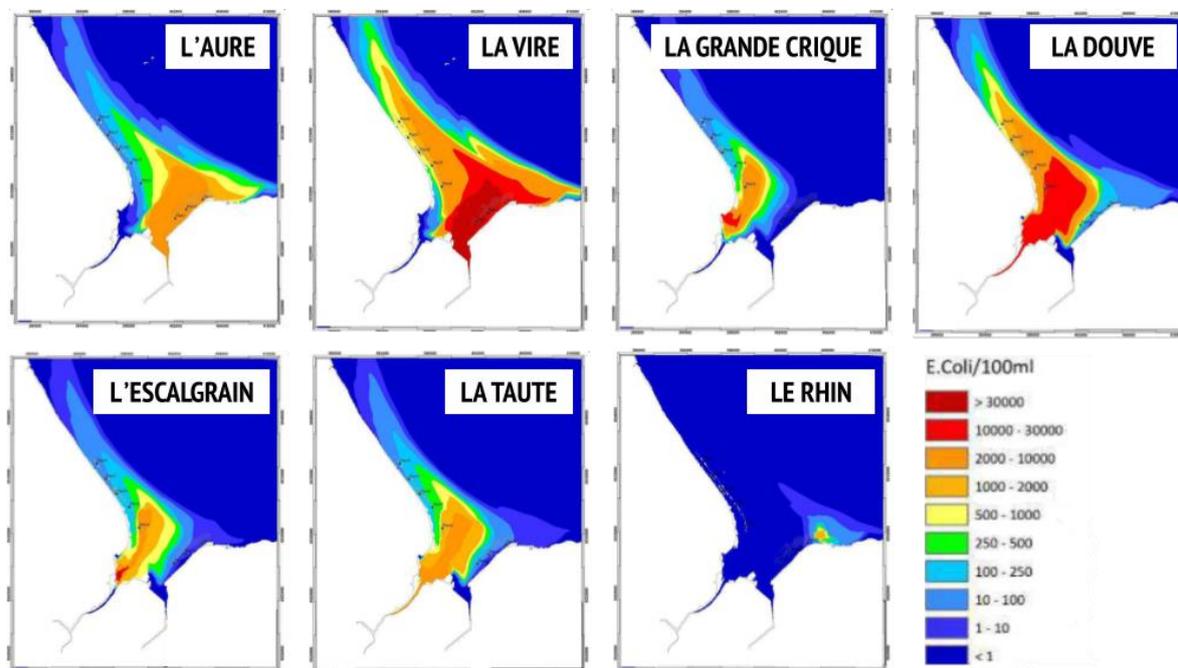


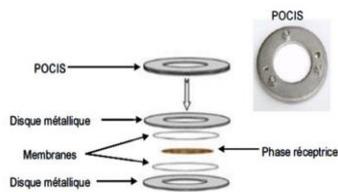
Figure 7 : Évolutions des panaches (*E. coli*) en provenance des 7 bassins versants bordant la Baie des Veys : L’Escalgrain, Le Rhin, L’Aure, La Vire, La Taute, La Douve et La Grande Crique - en condition de vives eaux. Modifié d’après le rapport SAFEGE-Ginger-Actimar (2013).

L’évolution des panaches dans la Baie des Veys (Fig. 7) indique une progression des particules vers l’Ouest. Cela confirme à nouveau que la Baie des Veys et particulièrement Utah Beach, se trouvent dans une zone très productive sous forte pression des affluents.

### c) Risque de contamination

Comme décrit précédemment, la Baie des Veys reçoit des apports d’eau douce au travers de 7 bassins versants. Ces derniers peuvent alors être une source de contamination (SAFEGE-Ginger-Actimar, 2013).

Un suivi chimique par échantillonneur passifs (Fig. 8) a été effectué pour suivre les concentrations en métaux, pesticides organophosphorés, pesticides organochlorés, phtalates, PCB , HAP et alkylphénols (Letourniant *et al.*, 2018) dans la Baie des Veys.



**Dispositif POCIS : Polar Organic Chemical Integrative Sampler**

**Composition** : Membrane hydrophile microporeuse (avec phase solide adsorbante) + 2 disques en acier

**Détection** : Pesticides + Alkylphénols



**DGT : Diffusive Gradient Thin film**

**Composition** : Acide nitrique et résine

**Détection** : Métaux



**SPMD : Semi-Permeable Membrane Device**

**Composition** : tube de polyéthylène + couche mince de lipide (trioléine)

**Détection** : HAP, PCB, p. organochlorés, p. organophosphorés, alkylphénols et phtalates.

Figure 8 : Les différents types d'échantillonneurs passifs. D'après Letourniant *et al.*, 2018.

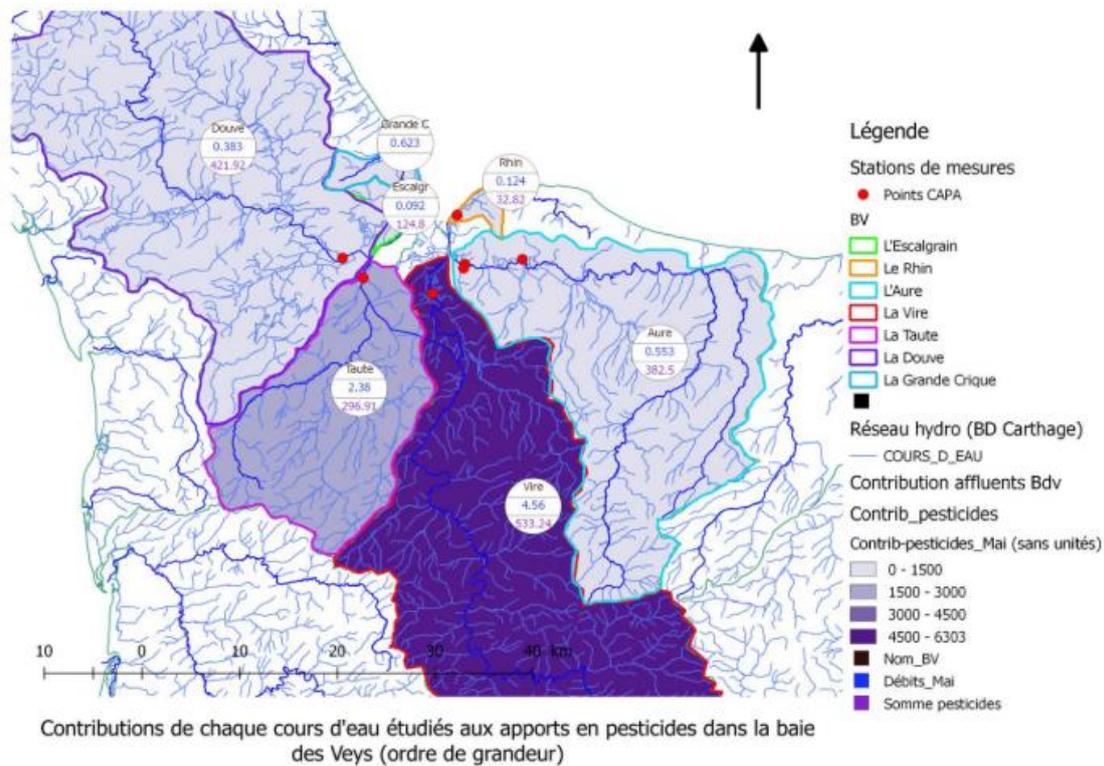


Figure 9 : Contribution de chaque cours d'eau aux apports en pesticides dans la baie des Veys en mai 2016 (indicateur). D'après Letourniant *et al.*, 2018.

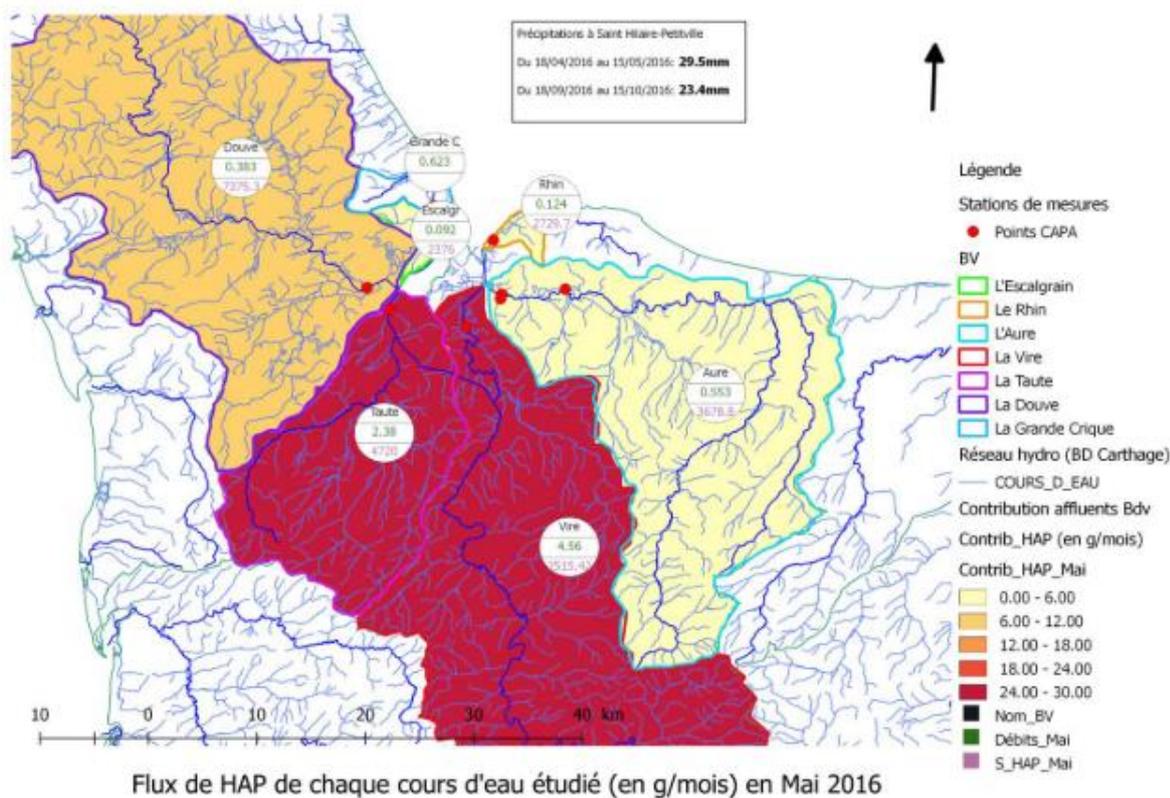


Figure 10 : Flux de HAP allant dans la Baie des Veys, calculés à partir des concentrations obtenues grâce aux capteurs passifs en mai 2016, exprimés en g/mois. D'après Letourniant *et al.*, 2018.

Suite aux mesures effectuées en mai et octobre 2016, la Vire est le plus grand contributeur de l'apport en pesticides (Fig. 9) à la Baie des Veys (prise en compte du débit et de la concentration en pesticides). Avec des concentrations importantes, la Taute est le deuxième tributaire apportant des pesticides dans la baie. Les cours d'eaux avec de plus faibles débits (Aure, Douve, Escalgrain, Rhin et Grande Crique) participent moins à la contamination malgré des concentrations en polluants plus importantes. A nouveau, ce sont les cours d'eaux avec les débits les plus importants (Vire et Taute : entre 24 et 18 g de HAP relâchés dans la Baie des Veys par mois) qui contribuent majoritairement à l'apport de contaminants (Fig. 10). Le flux de métaux (cuivre, cobalt, nickel, plomb et zinc) mesurés en mai 2016 indique une contribution de 12 à 15 kg/ mois par la Vire et 6 à 9 kg/mois par la Taute.

Il semble pertinent de rappeler que la détection de contaminants dans les cours d'eau se jetant dans la Baie des Veys ne sont que des premiers indicateurs. En effet, il reste un point d'ombre concernant les concentrations de ces contaminants au sein des mollusques et les effets précis de ces expositions.

#### d) Evaluation de la toxicité

Un mécanisme de toxicité après exposition aux HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques) semble lié à la production d'espèces réactives de l'oxygène (ROS) comme sous-produits du métabolisme (Digiulio *et al.*, 1989 ; Livingstone, 2003). Ces molécules très puissantes peuvent réagir avec des macromolécules importantes telles que l'ADN, les protéines et les lipides. Les conséquences des ROS sur les composants cellulaires et leur fonctionnement peuvent être parfois critiques pour l'individu. Chez *Mytilus edulis*, l'exposition aiguë au HAP provoque une réduction des TOSC (Total oxydative scavenger capacity) ainsi que des dommages cellulaires, y compris l'intégrité de l'ADN et l'altération de la stabilité de la membrane lysosomale dans les hémocytes (Baussant *et al.*, 2009).

Les métaux (ETM : éléments traces métalliques) sont également impliqués dans la formation de ROS. De plus, ils agissent comme inhibiteurs de la voie normale par laquelle ces espèces réactives sont éliminées des cellules (Regoli et Principato, 1995 ; Stohs *et al.*, 2000). Ainsi, une induction du processus de peroxydation des lipides membranaires se produit dans les organismes (Stohs & Bagchi, 1995 ; Viarengo *et al.*, 1990).

Il existe 209 PCB (Biphényles PolyChlorés) classés selon la substitution des chlores sur les cycles biphényles. Ces composés affectent la voie de transduction du signal de la réponse immunitaire chez les mollusques. Canesi *et al.*, 2003 ont trouvé que certains congénères induisent chez les mollusques une baisse de l'activité microbicide, la réduction de la libération des enzymes lysosomales, et la réduction de la stabilité de la membrane lysosomale des hémocytes. De plus, les MAPK (Mitogen-activated protein kinases) p38 et (JNK c-Jun N-terminal kinases), qui sont impliqués dans la réponse immunitaire, sont ciblés par différents congénères de PCB non coplanaires et coplanaires.

## 2. Le suivi HYDRONOR<sup>4</sup>

La chlorophylle a est un indicateur de la communauté phytoplanctonique (Le Merrer *et al.*, 2022). Une hypothèse pour expliquer les mortalités impressionnantes des moules à Utah Beach pourrait donc être l'absence de phytoplancton. Durant la saison 2020-2021, marquée par des phénomènes de mortalités massives, les concentrations en chlorophylle a sont restées très inférieures à la moyenne de la station et ont atteint les valeurs minimales (Fig. 11). En effet, un bloom important a été relevé au printemps 2020, puis les valeurs se sont écrasées. Ainsi, le déclin du phytoplancton pourrait expliquer le déclin des moules sur la saison 2020-2021 mais peut également être le symptôme d'un autre problème sous-jacent. De plus, les concentrations en chlorophylle a moyennes entre 2004

---

<sup>4</sup> Chapitre basé sur les données brut d'Hydronor depuis 2004

et 2019 restent très élevées malgré les phénomènes de mortalité recensés en 2004, 2008, 2014, 2015 et 2018.

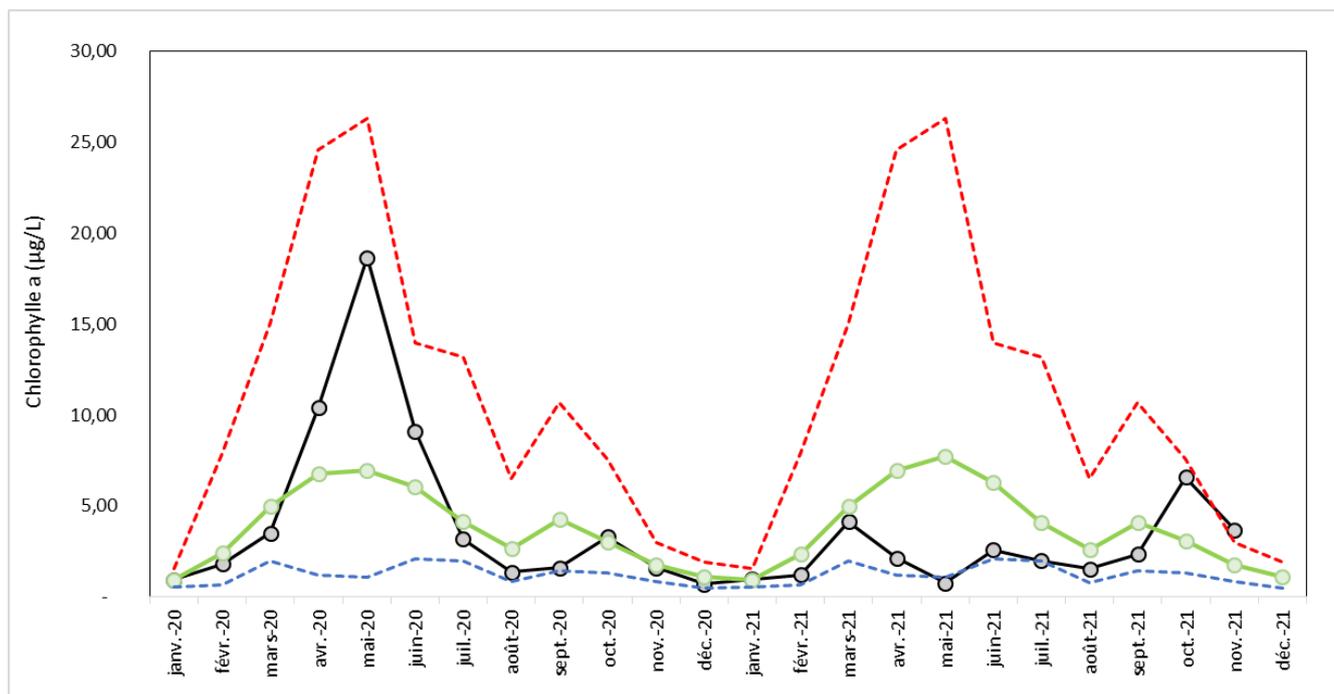


Figure 11 : Concentrations en chlorophylle a ( $\mu\text{g/L}$ ) mesurées en 2020-2021 à la station d'Utah Beach. En noir : données de l'année en cours pour la station présentée / En rouge : données Max des années précédentes pour la station présentée / En vert : données moyennes des années précédentes pour la station présentée / En bleu : données Min des années précédentes pour la station présentée. D'après Petinay et al., 2022.

Par ailleurs, le déclin du phytoplancton ne semble pas lié à une limitation en nutriment. En effet, les concentrations en nitrate et orthophosphate sont visibles sur la Fig. 12. On remarque ainsi que les variations saisonnières des nutriments sont conservées. Les pics de  $\text{NO}_3^-$  s'écrasent depuis 2017, et parallèlement des concentrations de chlorophylle a sont obtenues.

Les précipitations ne semblent influencer ni la concentration en Chlorophylle a ni les concentrations des éléments nutritifs (azote et phosphore).

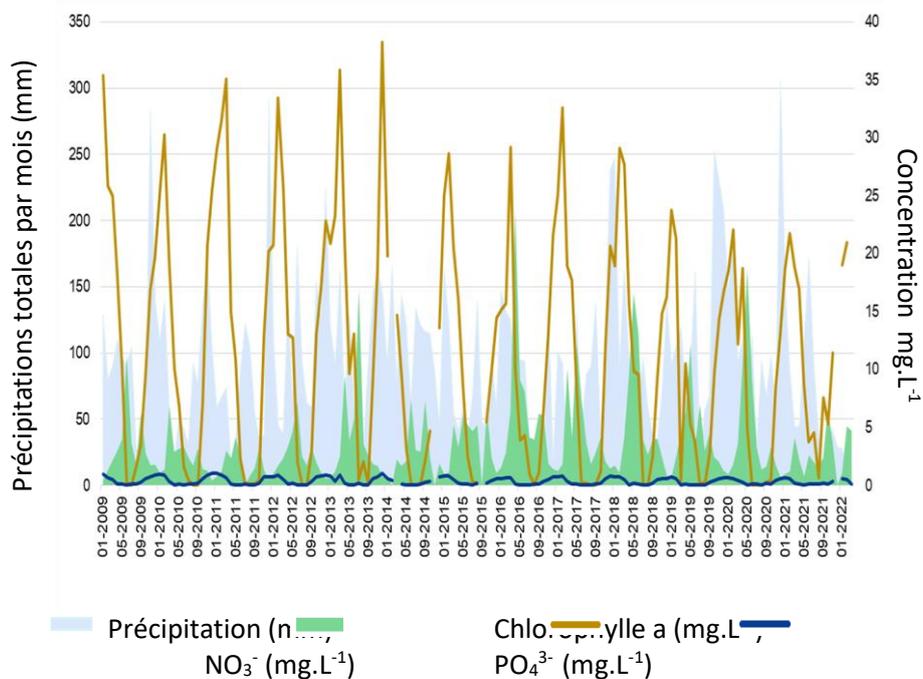


Figure 12 : Évolution de la biomasse chlorophyllienne (vert) de 2004 à début 2022. L'axe secondaire reprend les concentrations en nutriments essentiels : azote ( $\text{NO}_3^-$  en beige) ; phosphate ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) en bleu [données HYDRONOR].

La dynamique saisonnière des paramètres physico-chimiques (Fig. 13) montre une diminution significative ( $p$ -value < 0,05) des ressources en nitrate, silice et orthophosphate entre avril et septembre. Parallèlement, à cette même période le pH augmente, ainsi que la température. Le profil annuel ne montre pas de perturbation pour la température et le pH. Le color-plot des anomalies démontre ponctuellement des augmentations de température avec un réchauffement des masses d'eau depuis 2014. L'azote subit des fluctuations inter-annuelles mais son niveau relevé en 2020-2021 (mortalité massive) est supérieur aux années précédentes, et on ne relève pas d'anomalies. L'orthophosphate est significativement moins concentré entre 2004 et 2021 ( $p$ .value = 0,006). Les anomalies négatives montrent une diminution des concentrations à partir de 2015. La silice (acide orthosilicique) présente des concentrations variables selon les années. Néanmoins, les anomalies sont négatives en hiver depuis 2015. Enfin, le profil de la chlorophylle a montre à nouveau des concentrations relativement faibles, avec des anomalies négatives très marquées. Les blooms ne sont pas visibles sur les boxplots par mois car ils ne sont jamais de même amplitude ni à la même date.

La salinité est un indicateur de l'apport en eau douce dans la Baie. Malgré des dessalures ponctuels, le profil annuel reste constant.

### Paramètres physico-chimiques relevés à Utah Beach entre 2004 et 2022

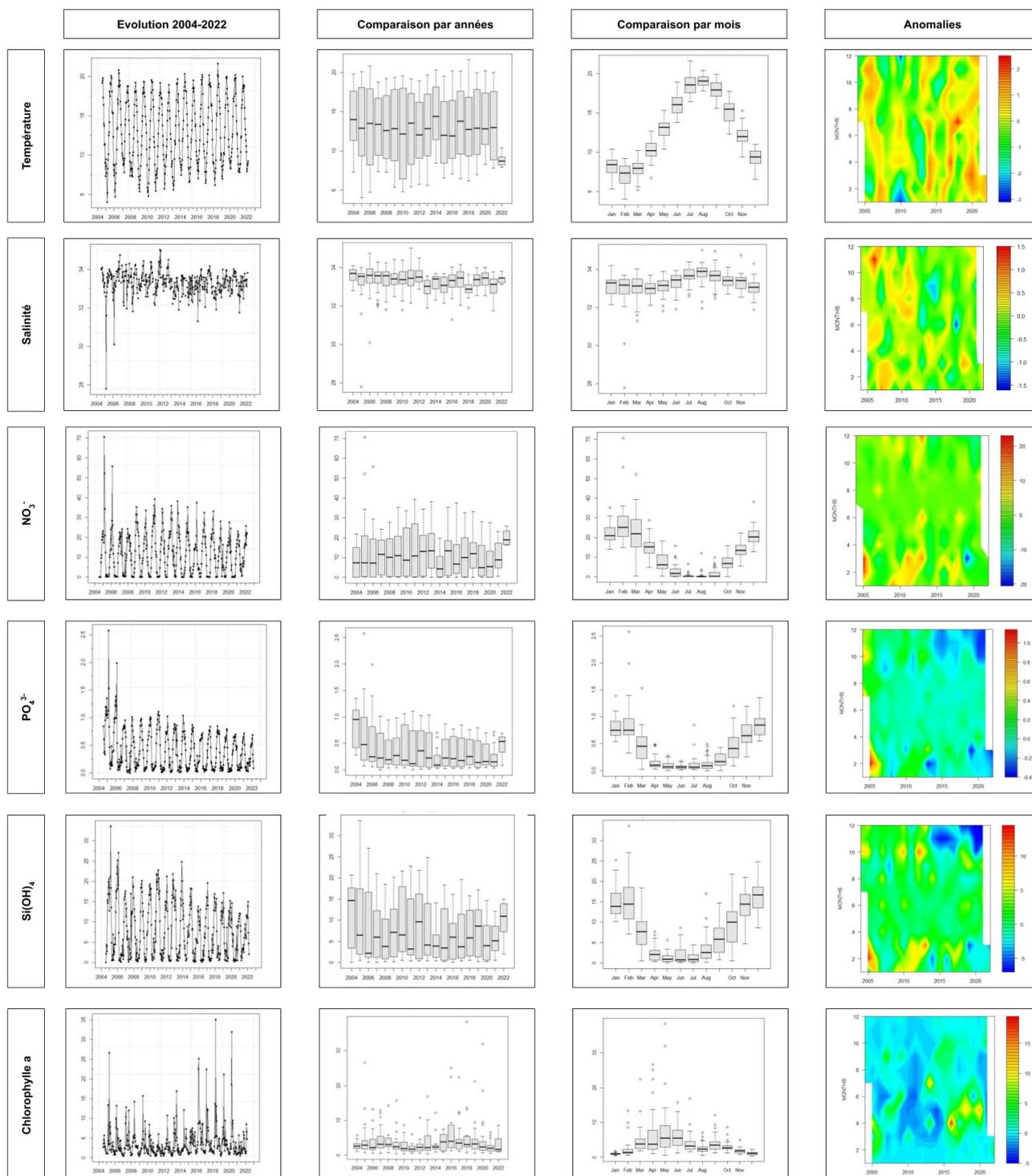


Figure 13 : Evolution de 6 paramètres : température, salinité, nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ), orthophosphate ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), acide orthosilicique ( $\text{Si(OH)}_4$ ) et Chlorophylle a, mesurés à Utah Beach entre 2004 et 2022. Le profil “anomalie” est obtenu grâce au package TTAinterfaceTrendAnalysis et permet de modéliser les anomalies [données HYDRONOR].

La partie occidentale de la Baie des Veys est fortement marquée par des phénomènes saisonniers (Fig. 13) avec des variations importantes de températures, de concentration en sels nutritifs et en chlorophylle a.

La dynamique de la Baie des Veys est décrite en Fig. 14. En effet, à Utah Beach la concentration en chlorophylle a est corrélée négativement à hauteur de 60% avec la silice, 52% avec le phosphate et 30% avec les nitrates. La chlorophylle a est également corrélée négativement avec les précipitations, à hauteur de 37%. Les nitrates sont corrélés négativement avec la salinité (66%) et la température de l'eau (94%) et de l'air (93%). Corrélation positive de 39% avec les précipitations. Le phosphate est corrélé positivement à 51% avec les précipitations et négativement avec la salinité (44%), et les températures eau et air (75%, 84%). La silice est corrélée à hauteur de 51% avec les précipitations et négativement de 74% avec la température de l'air, 63% avec la température de l'eau et de 36% avec la salinité.

La Fig. 14. démontre bien la saisonnalité des paramètres physico-chimiques à Utah Beach. En effet, les saisons sont bien regroupées selon leurs caractéristiques.

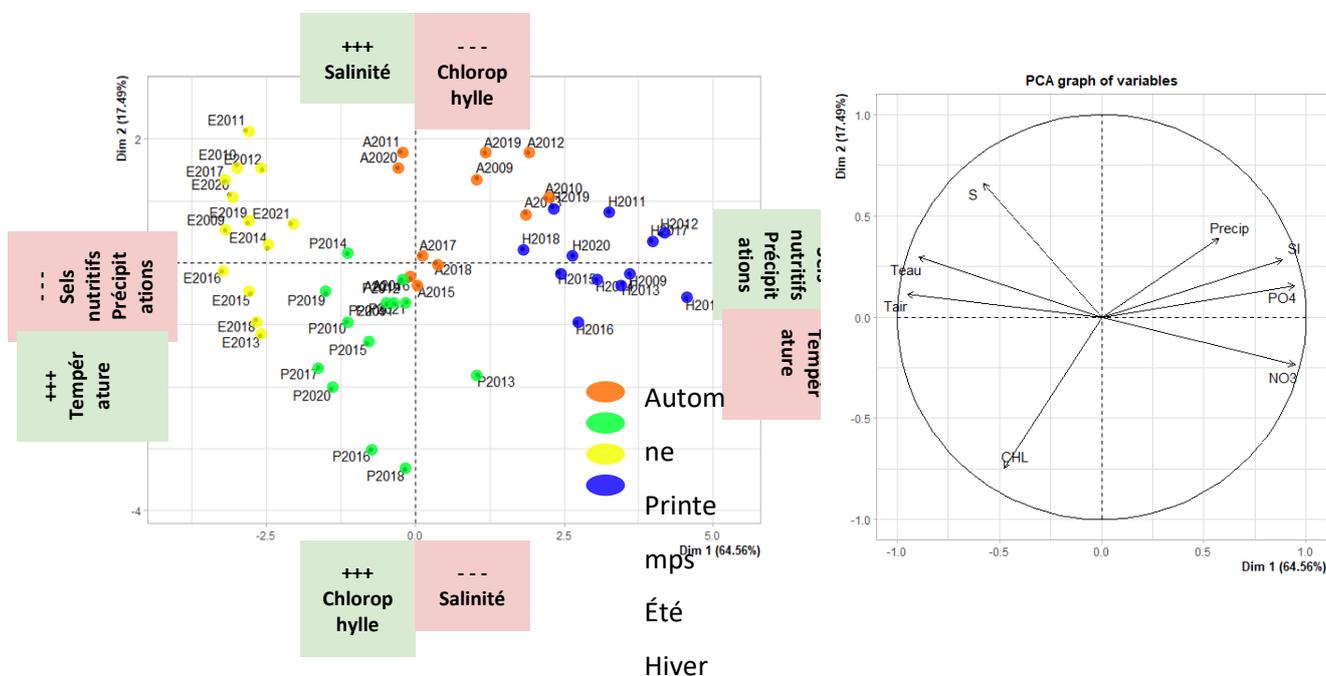


Figure 14 : ACP (Analyse en composantes principales) réalisées sur Rcommander (package Rcmdr et Rcmdr.FactoMiner.Plugin), à partir des données brutes HYDRONOR relevées à la station d'Utah Beach. La première lettre

désigne la saison (A = Automne ; H = Hiver ; P = Printemps ; E = Été), suivie de l'année (ex : A2009 pour automne 2009). S = salinité ; Précip = précipitations totales tombées durant la saison ; Teau = température de l'eau de mer ; Tair = température extérieure ; CHL = chlorophylle a ; NO3 = nitrate ; SI = acide orthosilicique ; PO4 = orthophosphate.

Cette dynamique se distingue des autres écosystèmes du Cotentin. De plus, la côte Est et Ouest présentent des modes de fonctionnement très différents (Fig. 15). Les stations HYDRONOR de la côte Est Cotentin indiquent des corrélations négatives de la chlorophylle a avec les sels nutritifs et les précipitations. A l'inverse, les stations de la côte Ouest montrent des corrélations positives entre la chlorophylle a, les sels nutritifs et les précipitations.

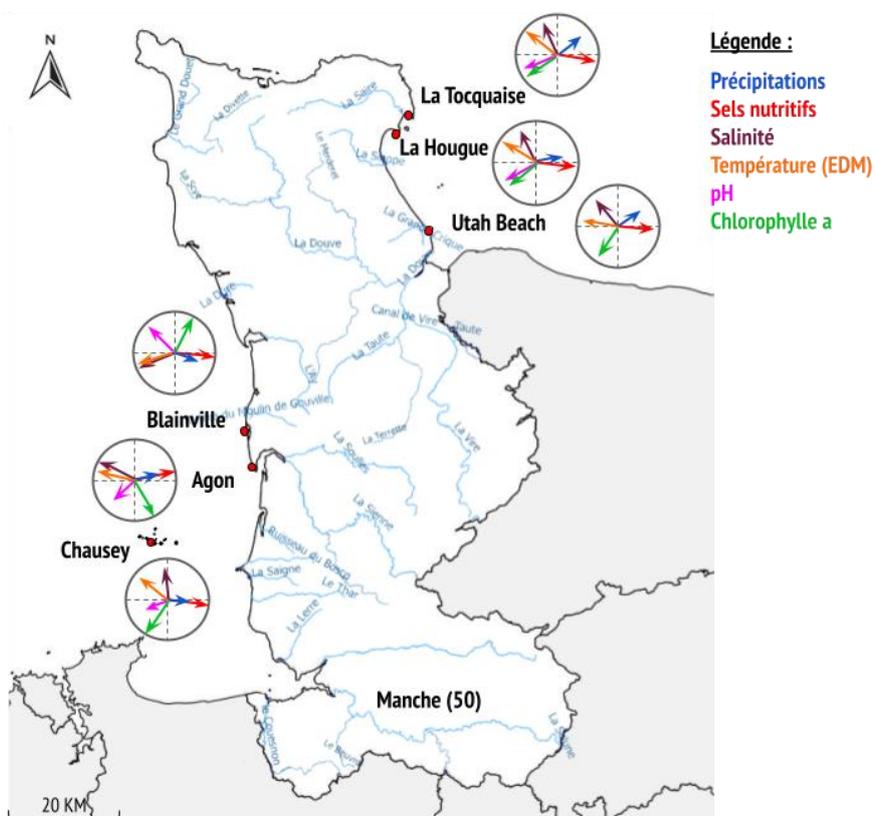


Figure 15 : Dynamique des écosystèmes littoraux de la Manche. Les ACP ont été réalisées sur Rcommander (package Rcmdr et Rcmdr.FactoMiner.Plugin), à partir des données brutes HYDRONOR relevées aux différentes stations. Flèche bleu : Précipitations ; Flèche rouge : sels nutritifs (nitrates, acide orthosilicique et orthophosphate) ; Flèche violette : salinité ; Flèche orange : température de l'eau de mer ; Flèche rose : pH ; Flèche verte : Chlorophylle a. Cartographie faite sur le logiciel QGIS.

### 3. Evènements climatiques

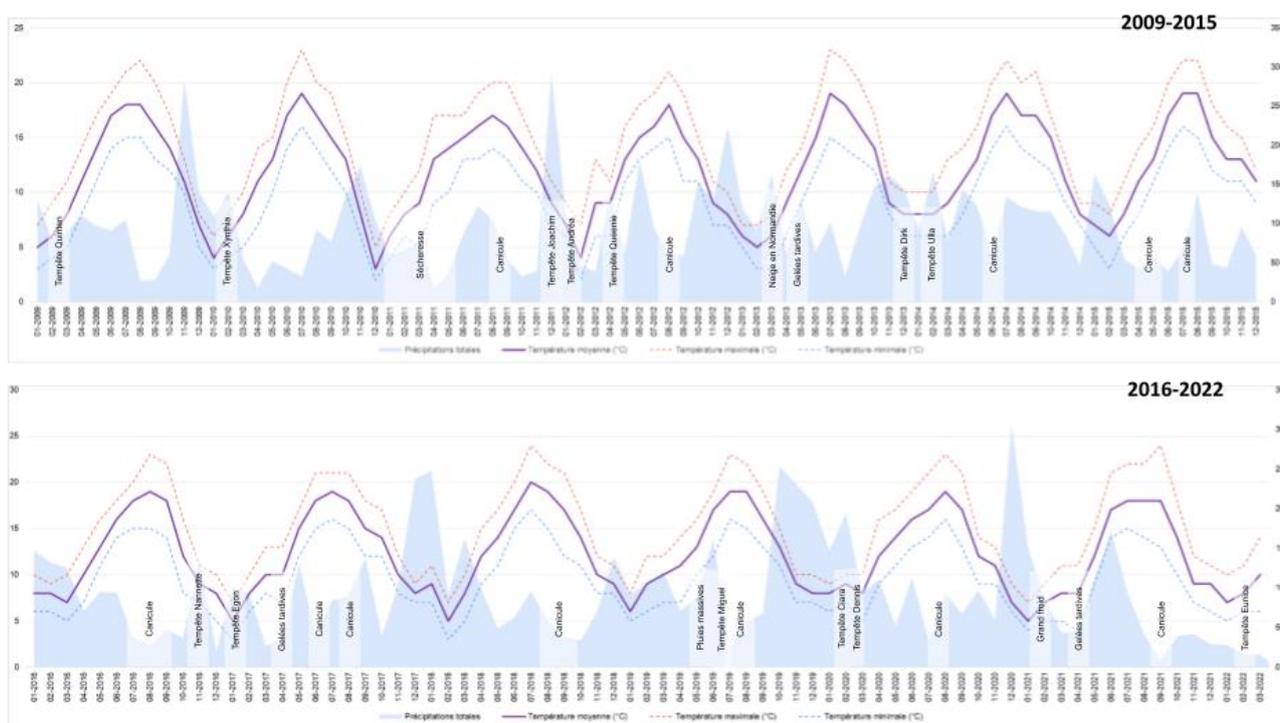


Figure 16 : Événements climatiques majeurs recensés en basse-Normandie, station de Grandcamp [historique-météo.net]

La Fig. 16 reprend les différents événements climatiques majeurs s'étant déroulés en Baie des Veys. Depuis plus d'un siècle, les auteurs soulignent l'impact d'événements caniculaires sur la mortalité des moules (Richies, 1927). Par ailleurs, Robert & Le Moine en 2003 ont établi un lien entre les mortalités de moule et les facteurs environnementaux, entraînant l'affaiblissement des individus. Néanmoins, aucune corrélation n'est obtenue entre les mortalités et la température, les précipitations ou encore la concentration en chlorophylle (Tab. 1). De plus, les pertes détectées par le réseau REMOULNOR ne permettent pas la distinction entre la prédation et les autres causes de mortalité.

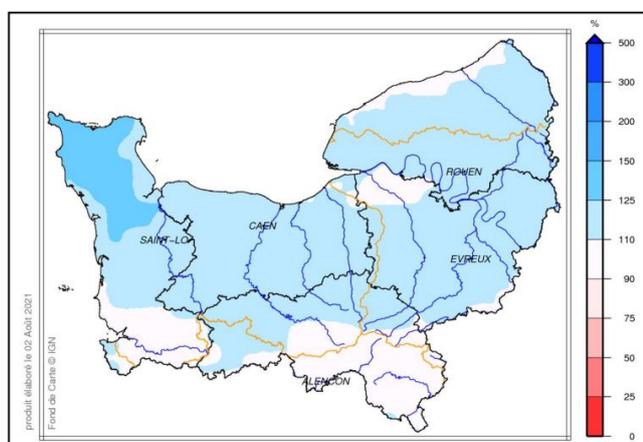
Table 1 : Corrélation entre les mortalités à Utah Beach et 3 facteurs : Température, Précipitations, Chlorophylle (R).

	cor.test(x, y, method=c("pearson", "kendall", "spearman"))			
Corrélation mortalités +	Coef	P.value	Seuil	Hypothèse
Température	0,22	0,13	0,05	Rejetée
Précipitations	-0,05	0,72	0,05	Rejetée
Chlorophylle	-0,05	0,70	0,05	Rejetée

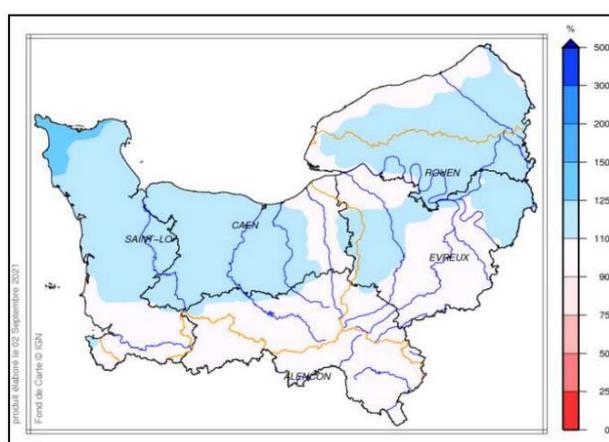
Si les précipitations ne sont pas en lien direct avec les mortalités de moules, elles sont néanmoins responsables de l'augmentation des débits des principaux cours d'eau. En effet, les précipitations de juillet et août 2021, ont eu pour conséquence d'augmenter les débits des cours d'eau (tendances allant de normales à très humides) (Fig. 17). Les débits du mois de juillet 2021 sont en

moyenne 60 % plus élevés que les débits moyens normaux d'un mois de juillet à l'échelle de la région (DREAL Normandie, 2021).

Juillet 2021



Août 2021



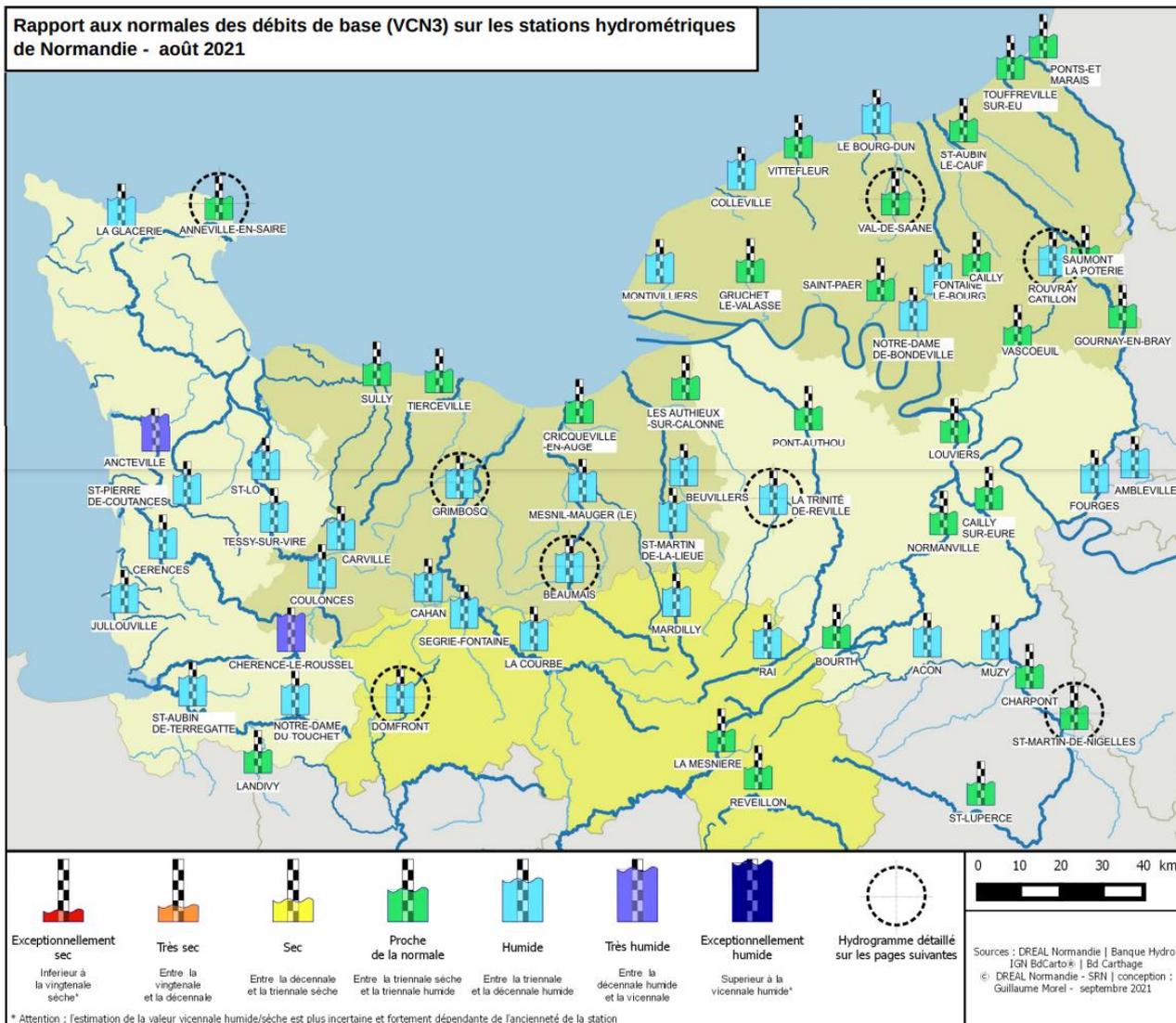


Figure 17 : A. Rapport à la normale des précipitations cumulées sur l'année hydrologique 2020-2021 de septembre 2020 à juillet 2021 B. Rapport à la normale des précipitations cumulées sur l'année hydrologique 2020-2021 de septembre 2020 à août 2021. C. Rapport aux normales des débits de base (VCN3) sur les stations hydrométriques de Normandie - juillet 2021. DREAL Normandie, 2021.

#### 4. Gestion des portes-à-flot

Les marais ont un rôle de réservoir d'eau douce essentiel. Les portes à flots sont placées sur les chenaux principaux et permettent de gérer les variations de niveau d'eau dans les marais. Elles ont pour fonction le stockage de l'eau et le drainage des zones humides. Leur fonctionnement fluctue donc selon la marée, le débit du cours d'eau et la pluviométrie.

Suite à d'importantes mortalités sur les secteurs ostréicoles situés à proximité de chenaux d'eau douce, des études ont été investiguées. Premièrement, il résulte une corrélation positive entre la salinité et les mortalités estivales des huîtres adultes en Baie des Veys (IFREMER, 2009). De plus, il résulte que les débits automnaux et printaniers sont corrélés positivement avec les mortalités ostréicoles de l'été suivant. Il s'agit donc

de périodes hydrologiques déterminantes ([CRC Normandie-Mer du Nord et Agence de l'eau Seine-Normandie, 2015](#)).

La gestion des portes à flots est un exercice difficile pour concilier les besoins des agriculteurs et des conchyliculteurs. En effet, les ouvertures des portes à flots doivent permettre ([CRC Normandie-Mer du Nord et Agence de l'eau Seine-Normandie, 2015](#)) :

- L'abreuvement en eau douce par les animaux (éviter les apports d'eau salée) ;
- Éviter la salinisation des sols par des montées d'eau saline dans les parcelles agricoles ;
- Éviter l'ennoyage des prairies en herbe lié à une hauteur d'eau bloquant les clapets de sortie des marais ;
- Empêcher la noyade d'animaux lors de montées d'eau.

Ainsi, des mesures préventives pour limiter les dessalures dans les parcs ostréicoles ont été proposées. Premièrement, afin de favoriser le mélange des masses d'eau, les ouvertures de vannes et ventelles doivent se faire tant que possible à marée haute. De plus, le risque de formation de "poches" de dessalures s'accroît avec les coefficients de marée les plus bas. Ainsi, il est recommandé d'adapter la gestion des portes à flot en fonction des coefficients de marée ([Normand & Louis, 2020](#)).

Près de 96% des apports en eau douce de la Baie des Veys proviennent de l'Aure, la Vire, la Douve et la Taute. Ces rivières ne peuvent s'écouler qu'à marée basse du fait de leur altitude, pour éviter les remontées d'eau saline dans les canaux. La gestion des fossés et des niveaux d'eau dépendent des Associations Syndicales Associées (ASA). Ainsi, les A.S.A de l'Est Cotentin entretiennent 170 km de fossés et gèrent 80% des marais arrière littoraux ([SAFEGE-ACTIMAR-GINGER, 2013](#)).

## 5. Inventaire faunistique

La prédation est une grande menace en mytiliculture. En Normandie, les principaux prédateurs sont les oiseaux marins (goéland argenté, macreuses et eider à duvet), les bigorneaux perceurs, les étoiles de mer et les crabes. On recense des dégâts sur les moules de bouchot depuis les années 1970 ([Lubet, 1974](#) ; [Lubet & Dardignac, 1976](#)).

Le goéland argenté *Larus argentatus* est une espèce opportuniste. Son régime alimentaire est donc très variable selon les localités et les saisons ([Cramp & Simmons, 1983](#)). N'étant pas des oiseaux plongeurs ils profitent de la marée basse principalement en printemps-été pour consommer les moules de petites tailles ([ONCFS & SRC Normandie-Mer du Nord, 2005](#)). En effet, l'élevage de moules sur pieux ou sur bouchots rend la ressource alimentaire plus accessible à ces prédateurs ([Camberlein, 1980](#)).

On retrouve en Normandie, près de 28% de l'effectif national en goéland argenté. Le département de la Manche représente lui 10% de l'effectif national ([Cadiou et al., 2004](#)).

Contrairement aux goélands, les macreuses (*Melanitta sp.*) et eiders (*Somateria mollissima*) sont des oiseaux plongeurs et peuvent ainsi consommer toutes les moules présentes sur un pieu. Ils se nourrissent préférentiellement en période hivernale et consomment toutes les tailles de moules (ONCFS & SRC Normandie-Mer du Nord, 2005). Gouletquer *et al.* ont rapporté en 1995 qu'un cohorte d'une quarantaine d'eiders peut consommer une ligne entière de pieux (~110-150) en une marée. Pour pallier cette prédation, trois systèmes sont utilisés pour protéger les pieux (Fig. 18) : Filet rigide, Catiprotex (cage de protection) et des filets souples. Ces filets permettent de limiter les pertes mais ils ne peuvent être installés durant tout le cycle car ils bloquent la croissance des jeunes moules (CRC Normandie - Mer du Nord, 2021).

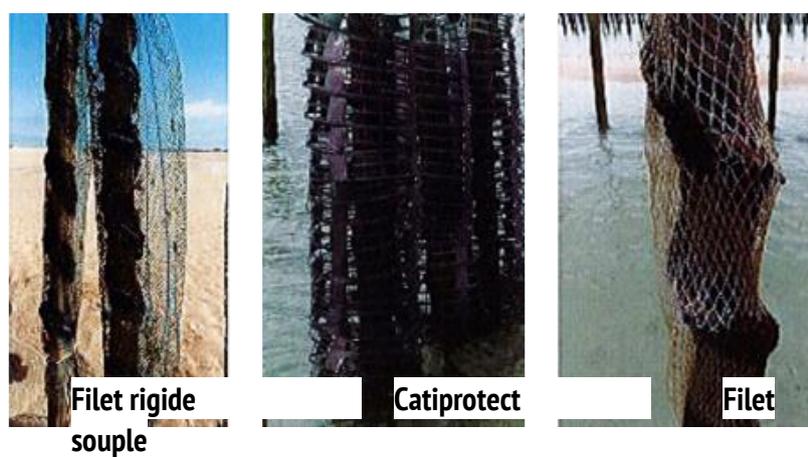


Figure 18 : Systèmes de protection utilisés par les mytiliculteurs contre la prédation aviaire (CRC Normandie - Mer du Nord, 2021).

A Utah Beach, les goélands sont présents en quantité importante du fait de la proximité du site avec la réserve de Beauguillot et des îles St Marcouf. En 2020, les goélands argentés ont été observés de mai à septembre. Néanmoins, les pertes sont relativement faibles avec un total de 35 tonnes soit 3,5% de la production globale (CRC Normandie - Mer du Nord, 2021).

Sur ce secteur le système de protection contre la prédation aviaire est une gaine en plastique entourant les pieux (Fig. 19). Néanmoins, les mailles de petites tailles peuvent être obstruées par des algues, et ainsi limiter l'apport en nourriture et donc retarder la pousse (CRC Normandie - Mer du Nord, 2021).



Figure 19 : Gaine en plastique sur Utah Beach, et présence d'algues obstruant les mailles (CRC Normandie - Mer du Nord, 2021).

Les bigorneaux perceurs sont également des prédateurs de moules. Cette appellation désigne trois espèces : *Ocenebra erinaceus*, *Ocenebra inornata* et *Nucella lapillus* (Basuyaux *et al.*, 2012). La pourpre, qui désigne *N. lapillus*, est l'espèce induisant le plus de dégâts en mytiliculture. Ce gastéropode est initialement présent dans les estrans rocheux, mais s'établit très bien dans les bouchots (Fig. 20) (Basuyaux & Lelièvre, 2003). L'agglomération de moules sur les pieds offre un environnement protecteur pour cette espèce, en plus d'une large disposition de nourriture (Charles, 2019).



Figure 20 : Bigorneaux perceurs (étoiles vertes) et leurs pontes (encadré noir) sur un pieux à Briqueville-sur-Mer (Manche). Les flèches indiquent les zones censées comporter des moules, qui ont été ravagées par les gastéropodes. D'après Charles, 2019.

D'autres prédateurs peuvent nuire grandement à la profession mytilicole. On retrouve ainsi *Asterias rubens*, l'étoile de mer commune. Dans l'estuaire de la Vilaine, cette espèce a causé plus de 60% de pertes en 2017. En effet, *A. rubens* est invasive et prolifère très rapidement lorsque l'environnement est propice. En effet, elle apprécie des températures douces au printemps et en automne, ainsi qu'un déficit en eau douce (Guillou, 1981 ; Charles, 2019). Néanmoins, on ne rapporte pas de cas de prolifération de cette étoile de mer en Baie des Veys.

Enfin, les espèces peuvent se battre pour la même ressource trophique (phytoplancton), c'est la compétition trophique. En réalité, les moules d'une même population peuvent être en compétition sur le même pieux. De plus, certaines espèces consomment également le phytoplancton essentiel à la

croissance de *Mytilus sp.*. On retrouve notamment les balanes (*Balanus sp.*, *Semibalanus sp.*, *Chthamalus sp.*) sur les côtes normandes (Gruet, 2002). Ces dernières peuvent se fixer directement sur la coquille des moules et vivre ainsi en filtrant les microalgues (Charles, 2019).

Que les moules soient en compétition entre elles ou avec d'autres espèces, cela va entraîner des répercussions sur leurs capacités de croissance. De la même manière, il est néfaste d'implanter des moules dans un milieu déjà surexploité. Des densités trop élevées entraînent un épuisement trophique et peuvent favoriser la propagation de certains parasites (Lambert, 1952 ; Lubet & Dardignac, 1976).

Les concessions accordées à Utah Beach par la DDTM ont subi une révision complète en 2020 et les parcelles cédées ont une tendance à la baisse. Il n'y a donc à priori pas d'augmentation de biomasse en élevage (Fig. 21).



Figure 21 : Cadastre officiel des concessions de cultures marines actuel superposé aux photo aériennes de 2011 - Secteur d'Utah Beach © IGN-BDCARTO 2013 Source : DDTM 50 (J. Rivière) - Photo aérienne : IFREMER 2011 Cartographie : SML/CM - Direction Départementale des Territoires et de la Mer de la Manche

## B. Pathogènes et risque infectieux à Utah Beach

### 1. *Francisella halioticida*

Une nouvelle espèce de *Francisella sp.* a été isolée en février 2005, à partir d'un mollusque marin moribond d'élevage, l'ormeau géant *Haliotis gigantea*. Cette bactérie était la cause de mortalité massive dans une ferme d'abalone au Japon. Ce signalement est le premier à recenser une bactérie du genre *Francisella sp.*, étant pathogène pour les mollusques (Kamaishi *et al.*, 2010). La bactérie est

nommée *F. haliotcida* ; halio- pour l'espèce de découverte (l'ormeau) et le suffixe -cida signifiant "tueur de".

*Francisella haliotcida* est une bactérie aérobie, Gram-négative, de forme coccoïde, dont la taille est comprise entre 0,5 et 1 µm. Sa plage de croissance va de 8 à 25°C, avec un optimum à 20°C et une température létale de 37°C (Brevik et al., 2011).

Cette bactérie est compliquée à faire pousser en laboratoire. Elle nécessite un milieu MEA (Modified Eugon Agar ; Kamaishi et al., 2010). Elle forme alors après 3 à 7 jours d'incubation à 20°C, des colonies blanc grisâtre de 1 à 2 mm. Ces colonies sont halophiles et ne poussent pas à 0% de NaCl (Brevik et al., 2011). Charles (2019) a recherché la présence de *F. haliotcida* dans des moules bretonnes (suite à des mortalités), par qPCR. Il en résulte que la bactérie est présente dans les lots subissant des mortalités et est absente dans ceux exempts de mortalité.

L'implication de *Francisella haliotcida* dans les mortalités de moule est une piste tout à fait plausible. En effet, cette bactérie a déjà été reconnue comme responsable de mortalités massives chez le pétoncle *Patinopecten yessoensis* au Canada (Meyer et al., 2017) et au Japon (Kawahara et al., 2018). De plus, les symptômes principaux sont des lésions macroscopiques orange à rose dans les muscles adducteurs des pétoncles. L'examen histologique a révélé des infiltrations d'hémocytes, l'abondance d'hémocytes nécrotiques, et la lyse des fibres musculaires (Kawahara et al., 2018).

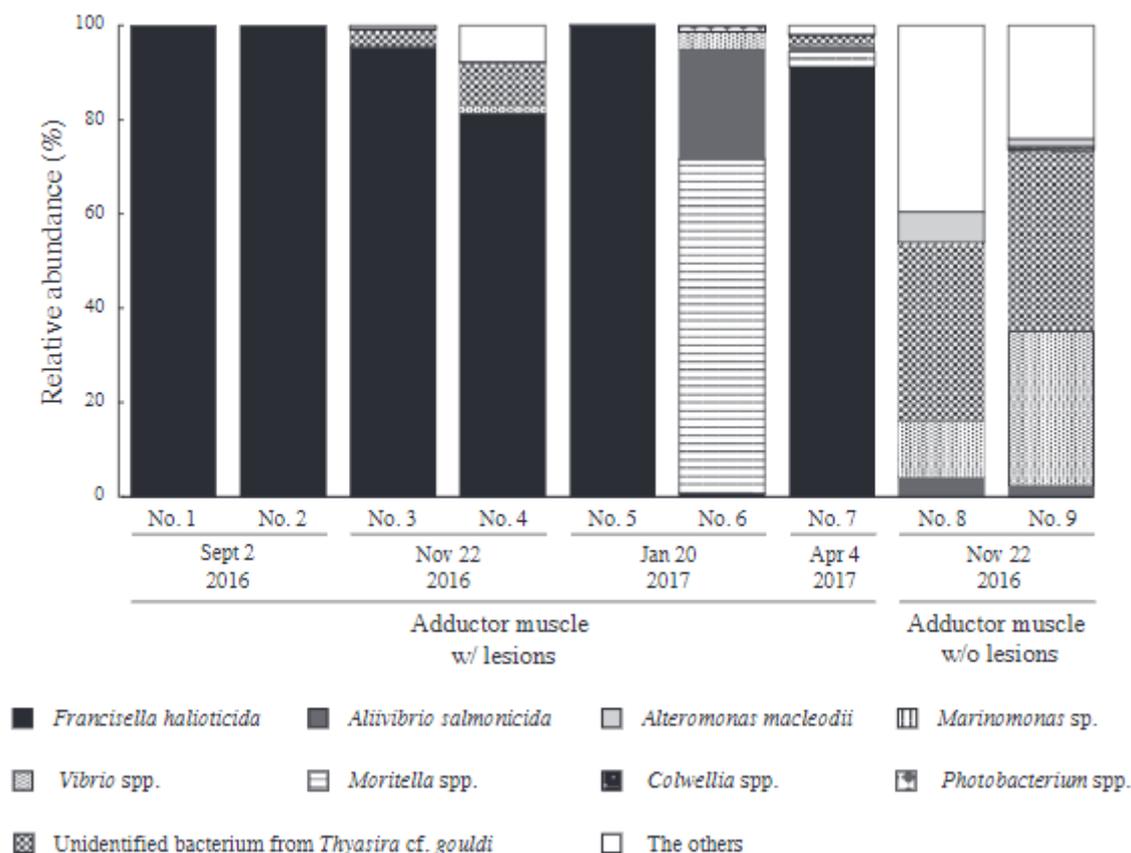


Figure 22 : Profils quantitatifs des gènes d'ARNr 16S d'espèces bactériennes dans le muscle adducteur avec et sans lésions du pédoncle Yesso. Seules les abondances relatives d'espèces/groupes représentatifs sélectionnés ont été présentées. D'après Kawahara *et al.*, 2018.

La figure 22 met en évidence l'abondance (80 - 100%) de *Francisella halioticida* dans les muscles adducteurs des pédoncles avec lésions. Inversement, la bactérie est absente des pédoncles sains.

Ces résultats sont en accord avec ceux trouvés par Charles (2019) dans les moules.

Une thèse est actuellement en cours (2021-2024, Université de Caen Normandie, UMR 8067 BOREA et LABÉO) portant sur la souche bactérienne *Francisella halioticida*. Cette thèse va permettre le séquençage complet du génome de la bactérie et également la réalisation d'infections expérimentales sur *M. edulis*.

## 2. *Mytilicola intestinalis*

*Mytilicola intestinalis* (Fig. 23) est un copépode, endoparasite, s'établissant dans l'intestin moyen des moules adultes et dans la glande digestive des juvéniles (Couteaux - Bargeton, 1953). Ce parasite peut être retrouvé plus rarement dans d'autres bivalves tels que les huîtres, coques ou palourdes (Bower, 2009). Une fois établi dans le système digestif, le copépode entraîne des lésions de l'épithélium digestif et réduit la vitesse de filtration de son hôte (Campbell, 1970). Une seule moule peut abriter plusieurs individus, conduisant ainsi à une réduction significative de la filtration et donc un amaigrissement important. Néanmoins, le parasite seul ne peut conduire à la mort de l'individu (Charles, 2019).

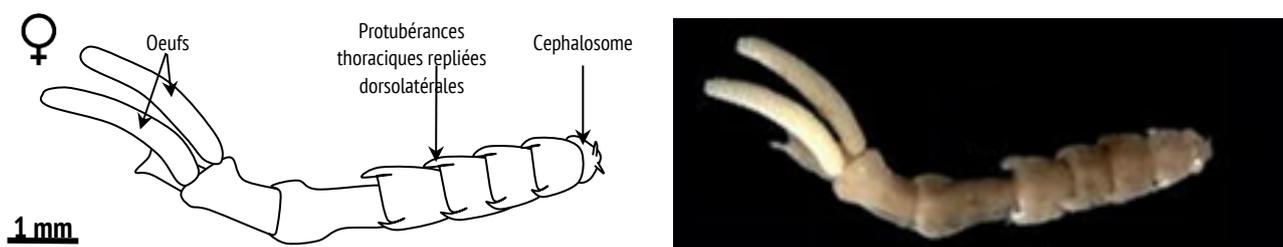


Figure 23 : (Droite) Anatomie simplifiée de *Mytilicola intestinalis* ; (Gauche) Photographie de *Mytilicola intestinalis*, d'après Elsner *et al.*, 2011.

La France a été touchée, au début des années 60, par des mortalités massives, allant de 30 à 90% de pertes. La Baie de l'Aiguillon a subi une infestation par *M. intestinalis* au printemps, soit juste après la période de ponte (état physiologique fragile). En automne, les moules étaient fragilisées par

des températures élevées. A nouveau, les infestations par le parasite ont été très néfastes en combinaison avec les températures (Brienne, 1964 ; Marteil 1976 ; Charles, 2019).

La densité élevée des moules en élevage contribue à la propagation rapide du parasite. Les épisodes d'infestation des moules par *Mytilicola intestinalis* dans les années 60 à 80 dans les baies de l'Aiguillon et du mont Saint-Michel ont contribué à réduire le nombre de bouchots dans les zones surchargées (Bompais, 1991).

Le réseau REMOULNOR (SMEL) évalue chaque année le risque d'infestation par *Mytilicola intestinalis*.

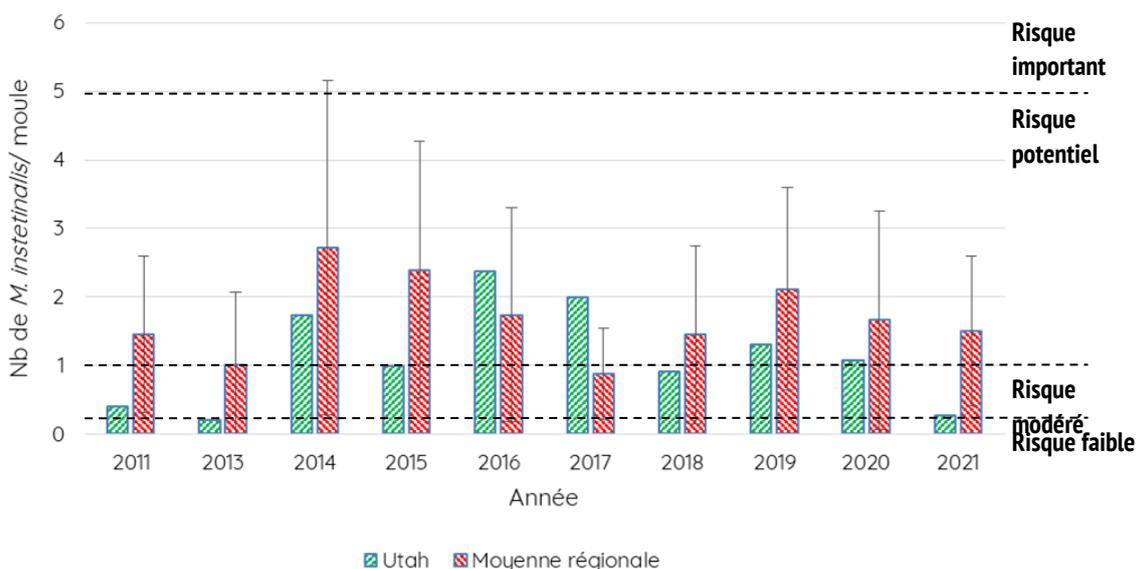


Figure 24 : Taux d'infestation par *Mytilicola intestinalis* relevé à Utah Beach entre 2011 et 2021 (Vert). Les moyennes régionales sont représentées en rouge.

Les risques d'infestations par *Mytilicola intestinalis* (Fig. 24) sont restés relativement faibles depuis 2011, avec quelques exceptions notamment en 2014, 2016 et 2017 où le risque est jugé de potentiel lorsque la moyenne de parasite par moule dépasse 1. La figure 25 est une photographie d'une moule parasitée prise par le SMEL en 2013.



### 3. *Proctoeces maculatus*

Les trématodes digénétiques de la famille des Fellodistomatidae ont normalement un cycle de vie se découplant en 3 phases majeures : le vers adulte se trouve dans un poisson ; les sporocystes grandissent dans les mollusques bivalves et ce sont les cercaires qui infectent le poisson. Le cycle de vie du genre *Proctoeces* est dit abrégé (progénétique), et les trématodes adultes comme les sporocystes mûrissent dans l'hôte mollusque (Tripp & Turner, 1978). L'anatomie du parasite a été décrite par Lang & Dennis (1976) (Fig. 26). En Normandie, *P. maculatus* a été retrouvé pour la première fois en 1983 sur la côte Ouest du Cotentin (Le Breton & Lubet, 1992).

Chez *Mytilus edulis*, les sporocystes progressent dans les lacunes sanguines et dans le tissu conjonctif intergonadique du manteau. Cela a pour effet de stopper l'activité génitale dans les tubules gonadiques. Enfin, le manteau finit par être vidé de ses réserves et de ses cellules germinales. Il prend alors un aspect très fin et transparent (Le Breton & Lubet, 1992).

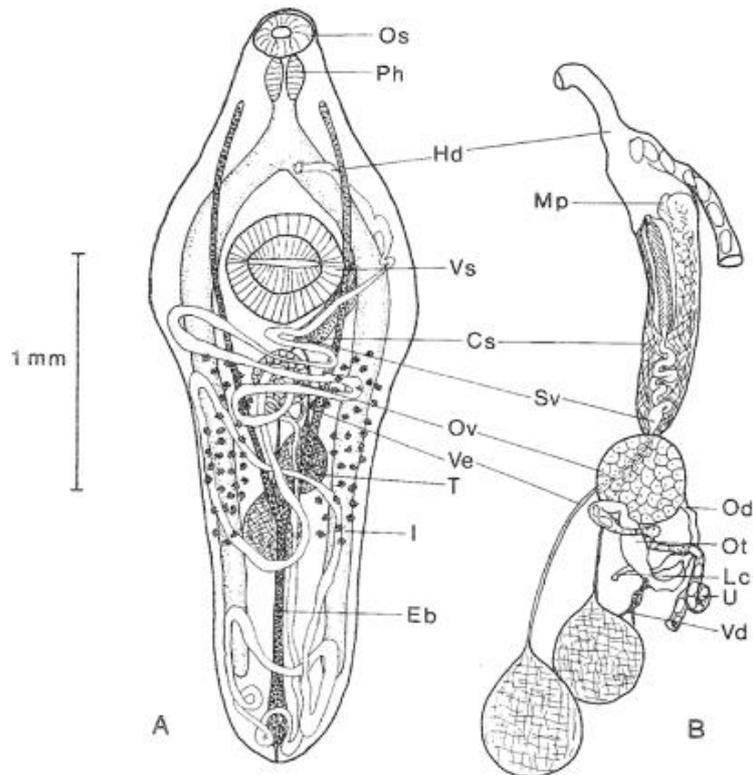


Figure 26 : *Proctoeces maculatus* extrait de *Mytilus edulis*. A : animal entier en vue ventrale (les œufs ont été omis de l'utérus). B : vue ventrale des organes génitaux (proportions approximatives et disposition basée sur des sections en série et des spécimens vivants). Abréviations : Cs, sac cirrus ; Eb, vessie excrétrice ; Hd, conduit hermaphrodite ; I, intestin ; Le, canal de Laurer ; MP, papille musculaire ; Od, oviducte ; Os, ventouse buccale ; Ot, ootype ; Ov, ovaire ; Ph, pharynx ; Sv, vésicule séminale ; testicules de T. ; U, utérus ; Vd, conduit vitellin ; Ve, canal efférent ; Vs ventouse ventrale. D'après Lang & Dennis, 1976.

Il semble que les moules femelles soient plus parasitées que les mâles, avec expérimentalement 53% de pertes chez les femelles contre 13% chez les mâles (Lebreton & Lubet, 1992).

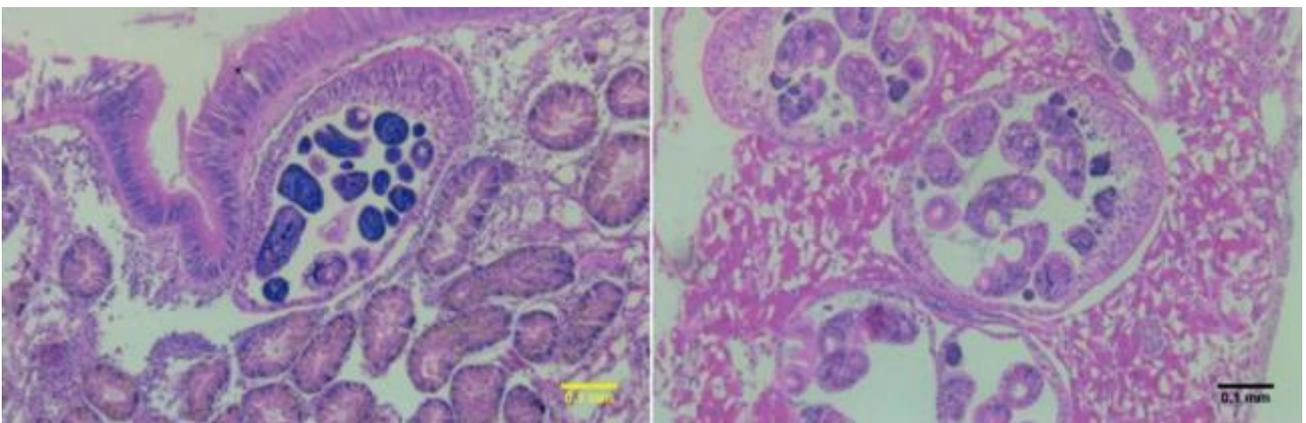


Figure 27 : Sporocystes de *Proctoeces maculatus* contenant des cercaires, adjacents aux tubules digestifs (Droite) et dans le manteau (Gauche), d'après Jones *et al.*, 2021.

Les cercaires de *P. maculatus* sont visibles par histopathologie (Fig. 27 ; Jones *et al.*, 2021) mais l'infestation peut être visible à l'échelle macroscopique (Fig. 28 ; Markowitz *et al.*, 2016).

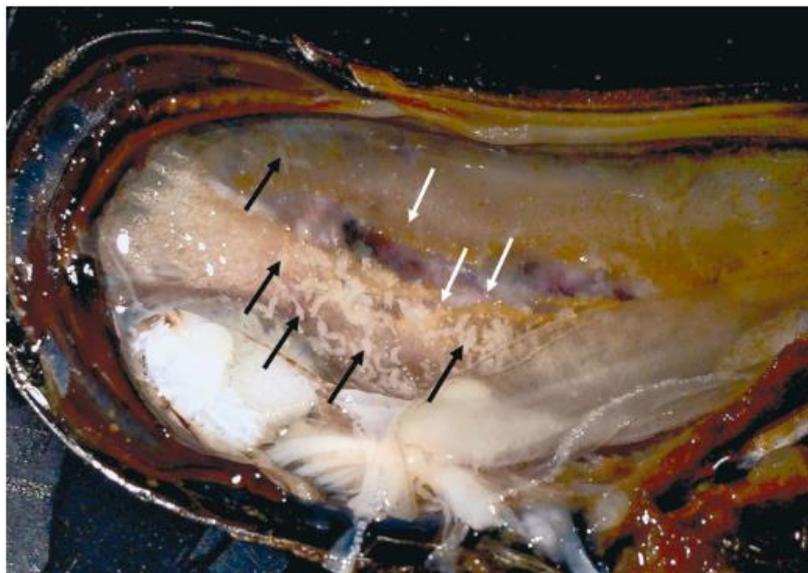


Figure 28 : Sporocystes de *Proctoeces maculatus* (flèches noires) et kystes métacercaires de *Himasthla quissetensis* (flèches blanches) dans le manteau de *Mytilus edulis*, d'après Markowitz *et al.*, 2016.

#### 4. *Marteilia spp.*

Les paramyxéens sont un groupe de parasites protistes dont plusieurs espèces sont connues comme néfastes pour la conchyliculture. On retrouve ainsi le genre *Marteilia*, dont l'espèce *Marteilia refringens* qui a causé de nombreuses mortalités chez l'huître plate *Ostrea edulis* (Grizel *et al.*, 1974). Comps *et al.*, ont décrit en 1982 une espèce s'attaquant aux moules, *Marteilia maurini*. Il y a toujours des débats si *M. refringens* et *M. maurini* sont de la même espèce. Actuellement, le nom officiel est *M. refringens* avec deux types selon l'affinité pour l'hôte : O pour les huîtres et M pour les moules (Le Roux *et al.*, 2001).

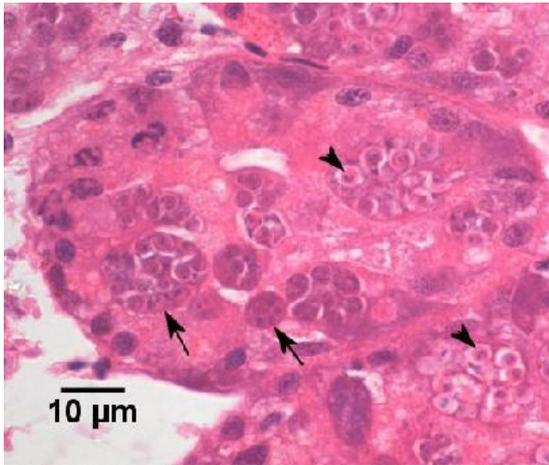


Figure 29 : Sporangiospore à différents stades de développement (flèches) et spores en développement (têtes de flèches) de *Marteilia refringens* type M dans l'épithélium des tubules de la glande digestive de *Mytilus edulis*. Coloration à l'hématoxyline et à l'éosine. OIE, 2012.

Dans les moules, *Marteilia* se loge dans les tubules de la glande digestive (Fig. 29). Cela a pour conséquence de perturber la digestion et le stockage des réserves métaboliques. L'état physiologique de l'animal se dégrade alors (Grizel & Tigé, 1973). Cet affaiblissement favorise le développement d'autres pathogènes, causant des infections secondaires (Grizel, 1985).

## 5. *Vibrio spp.*

Le microbiome des bivalves marins est essentiel dans la lutte contre les pathogènes. Par exemple, les mortalités massives de *Crassostrea gigas* ont été attribuées à l'interaction complexe entre les huîtres, leurs microbiomes et les variables environnementales (Samain & McCombie, 2008 ; Pernet *et al.*, 2014). Chez les moules, le microbiote est très riche avec des communautés bactériennes appartenant à divers genre tels que *Vibrio*, *Pseudoalteromonas*, *Alteromonas*, *Photobacterium* ... (Fig. 30).

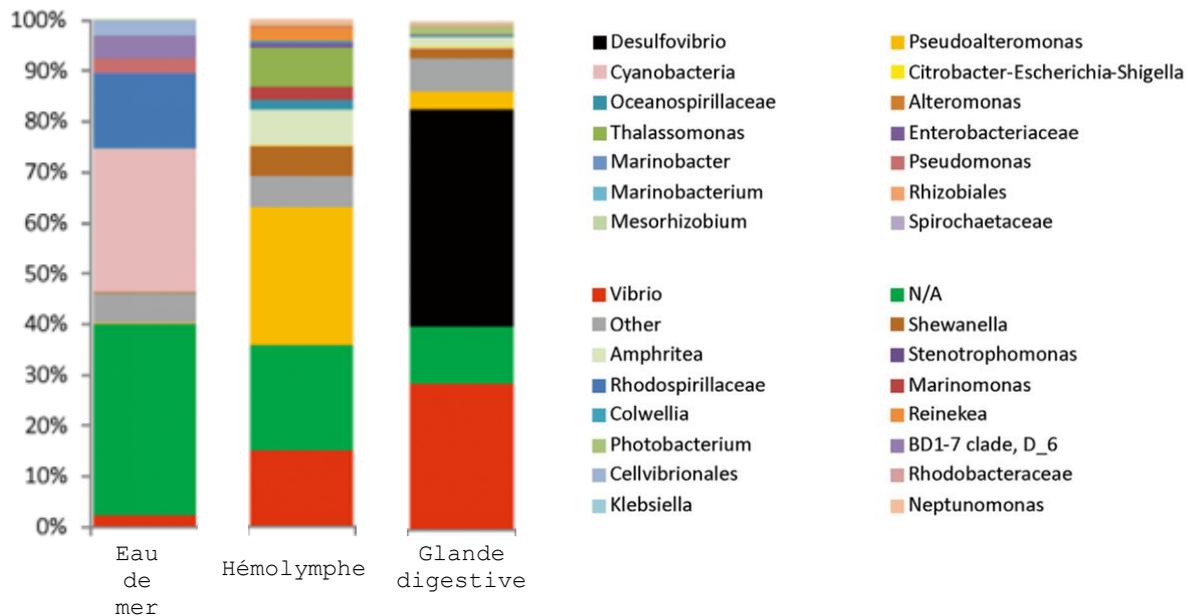


Figure 30 : Abondances relatives des genres bactériens trouvés dans l'eau de mer et les tissus de *M. galloprovincialis* par analyse de profil basée sur le gène 16 rDNA. Adapté depuis Vezzulli *et al.*, 2018.

La famille des Vibrionaceae est naturellement très présente dans les microbiotes des moules. On retrouve notamment le clade *Splendidus* qui regroupe 17 espèces<sup>5</sup> dont : *V. splendidus*, *Vibrio alginolyticus*, *Vibrio harveyi*, *Vibrio tubiashii*, et *Vibrio vulnificu* ; qu'on retrouve fréquemment dans les mollusques bivalves marins (Beaz-Hidalgo *et al.*, 2010; Kwan & Bolch, 2015 ; Pérez-Cataluña *et al.*, 2016). Romero *et al.* (2014) on noté une saisonnalité dans l'abondance de ces espèces dans les mollusques.

Suite aux mortalités importantes de moules en 2014, une grande proportion de bactéries appartenant au clade *Splendidus* ont été retrouvées dans les moules mortes (68%) contre 18% chez les moules saines (Bechemin *et al.*, 2014 ; François *et al.*, 2015). Lors d'infection expérimentale par injection de broyats de moules moribondes à des individus sains, des taux de mortalités de 100% ont été relevés (Bechemin *et al.*, 2015). Ainsi, de nombreux auteurs affirment que les mortalités de moules sont "Vibrio-dépendantes" et seraient liées au déséquilibre du microbiote des moules (Bechemin *et al.*, 2015 ; Travers *et al.*, 2016 ; Soletchnik & Robert, 2016).

Charles (2019) a établi la proportion des espèces bactériennes présentes dans les moules en fonction de l'intensité de mortalité observée (Fig. 31). Il en résulte que les espèces les plus abondantes sont *V. splendidus* et *Pseudoalteromonas sp.*, toutes mortalités confondues. Si aucune espèce ne semble directement liée aux mortalités, on remarque que les proportions sont déséquilibrées dans les sites à mortalités importantes. Notamment, lors de mortalités élevées l'espèce *V. splendidus*

<sup>5</sup> Le nombre d'espèces est fréquemment discuté et réévalué par de nouvelles études.

représente 81% du clade *Splendidus* contre 56% pour les sites à mortalités modérées et 62% pour les sites à faibles mortalités. Ces résultats confirment l'hypothèse selon laquelle les mortalités dépendent d'un déséquilibre du microbiome avec une dominance de *V. splendidus* lors de mortalités importantes.

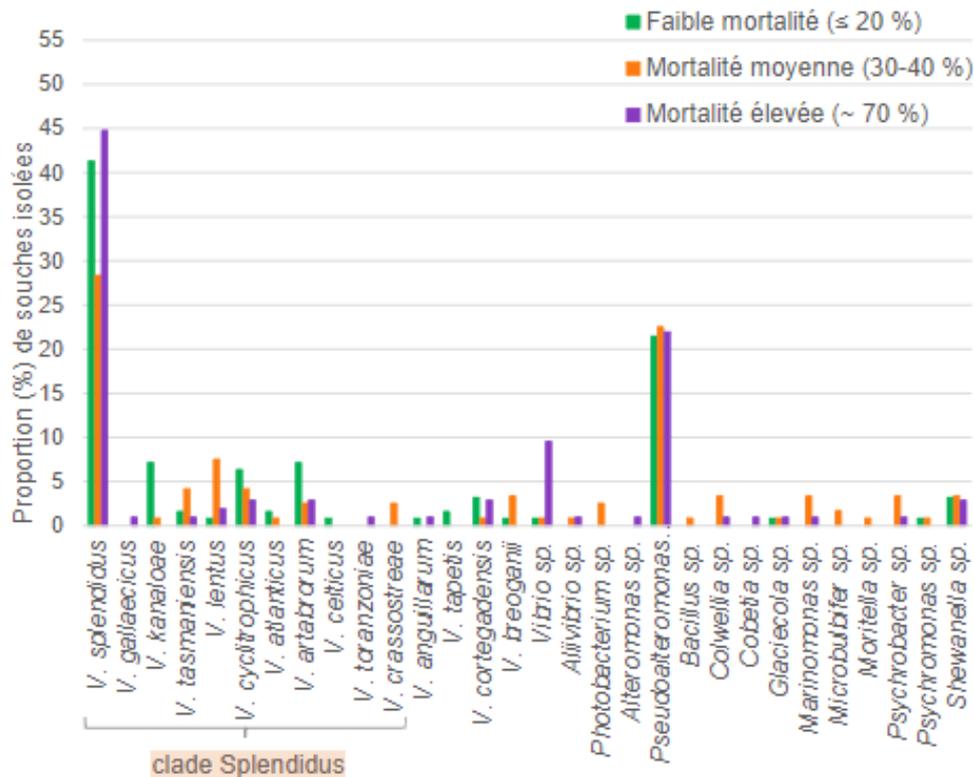


Figure 31 : Proportion (%) des espèces bactériennes isolées à partir des tissus des moules, entre février et octobre 2017 en fonction de l'intensité de la mortalité observée. D'après Charles, 2019.

## C. Physiologie des moules et de la reproduction

### 1. Néoplasie hémocytaire

La néoplasie ("neo" signifiant nouveau et "plasie" signifiant croissance) correspond à la formation du "néoplasme", se développant par prolifération cellulaire incontrôlée, sans coordination fonctionnelle avec les autres tissus. La néoplasie hémocytaire correspond donc au cancer des hémocytes (cellules sanguines) des moules (Pépin, 2019). Ces hémocytes anormaux vont s'infiltrer dans les tissus conjonctifs et les organes vitaux, conduisant dans la majorité des cas à la mort de l'individu (Ciocan & Sunila, 2005). On retrouve des cas de néoplasie hémocytaire dans tous les océans (Charles, 2019).

La transmission de cette maladie fait débat. D'après [Metzger et al. \(2015, 2016\)](#), lorsque le génotype des néoplasmes est différent de celui des cellules de l'hôte, il est alors possible qu'un néoplasme soit transmis à d'autres individus, de la même espèce ou non.

Les néoplasmes contiennent des quantités anormales d'ADN, ils sont aneuploïdes et généralement hyperploïdes. [Benabdelmouna et al. \(2018\)](#) ont étudié par cytométrie, la ploïdie des moules en provenance de toute la façade atlantique. Il en résulte une corrélation positive entre l'augmentation de l'aneuploïdie et la mortalité des moules étudiées. Les auteurs ont alors établi qu'au-delà de 10% d'hémocytes en phase de réplication d'ADN (S), de croissance de la cellule (G2) ou de mitose (M), l'animal est considéré comme atteint par la maladie. A l'échelle de la population, au-delà de 6% d'individus touchés, des mortalités sont à prévoir.

Ces hémocytes aneuploïdes perdent leur capacité de phagocytose, conduisant à l'immunodépression des moules. Ainsi, elles voient leur capacité de clairance bactérienne s'amoinrir et sont donc plus sensibles aux infections ([Kent et al., 1989](#)).

## **2. Reproduction et Scope for growth**

Pour établir le bilan énergétique d'un animal, les paramètres tels que la nutrition, la respiration, et l'assimilation sont mesurés. Chez les mollusques marins, ce bilan prend la forme d'un potentiel de croissance, dit "Scope for growth" ([Bayne, 1976](#)). Ce dernier permet d'estimer l'état physiologique de l'animal, en fonction des paramètres environnementaux. Il est calculé grâce à l'équation de Winberg, soit la soustraction de toutes les pertes d'énergies (respiration et excrétion) à l'énergie totale absorbée ([Thompson, 1984](#)) ([Fig. 32](#)).

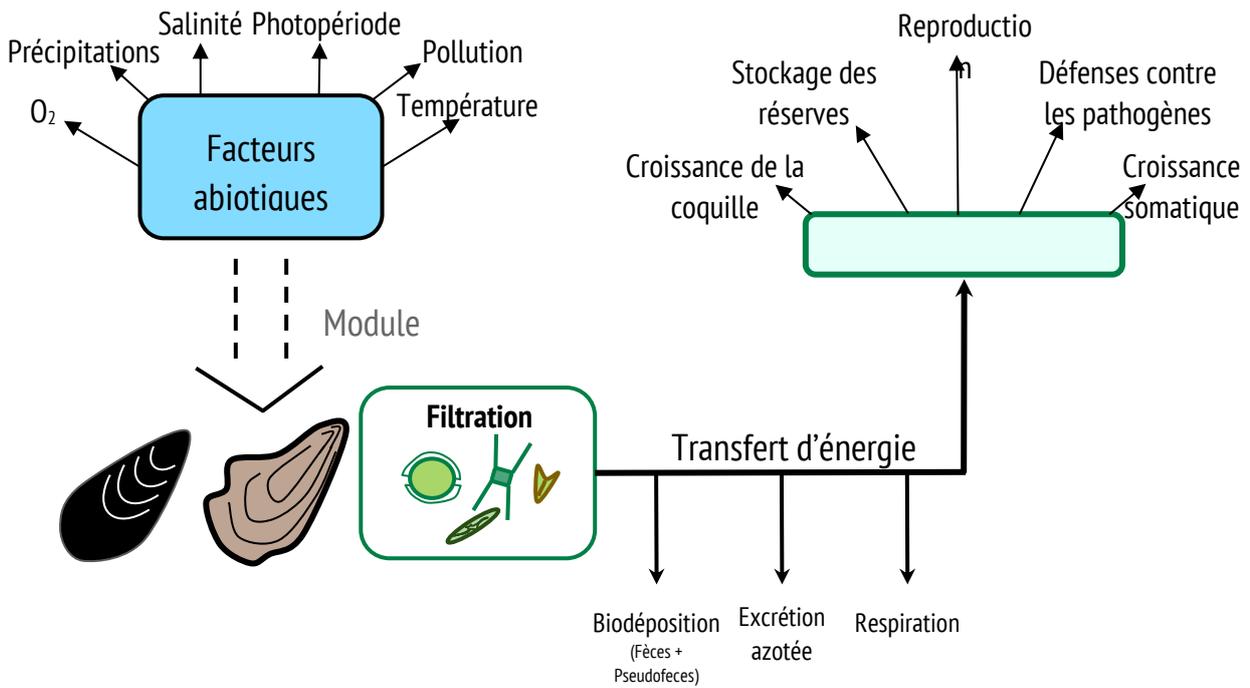


Figure 32 : Représentation schématique du Scope For Growth chez les bivalves marins.

Le cycle de reproduction des moules est fonction des facteurs environnementaux (température, nourriture). Généralement, le développement des gonades commence en octobre ou novembre, et se poursuit tout l'hiver. En février, les gonades sont mûres et une première ponte a lieu début printemps, suivie d'une seconde ponte, partielle, en automne. *Mytilus edulis* supporte des températures allant de 0°C à plus de 23°C, mais sa température optimale pour la gamétogénèse est comprise entre 2°C et 15°C (Gosling, 2003).

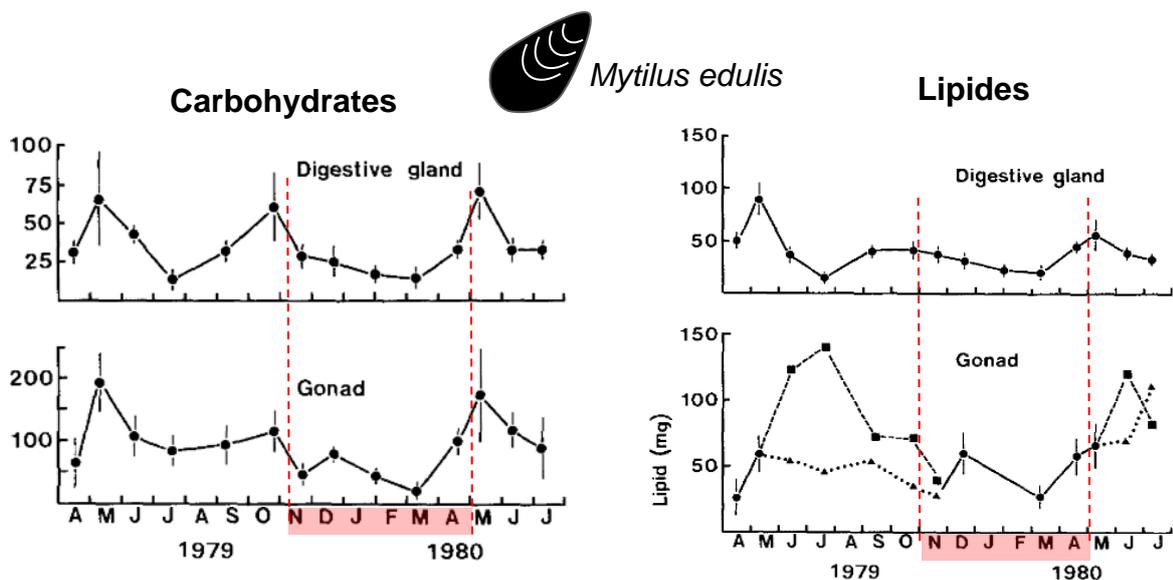


Figure 33 : (Gauche) Teneur en glucides des tissus (mg par moule). (Droite) Teneur en lipides des tissus (mg par moule). (■) gonade femelle, (▲) gonade mâle, (●) données combinées. Intervalle de confiance à 95%. D'après Thompson, 1984.

La période de reproduction coïncide avec un affaiblissement des réserves. En effet, l'étude de [Thompson \(1984\)](#) indique une baisse significative de la contenance en carbohydrates dans les gonades et la glande digestive de *Mytilus edulis*, entre octobre et mars 1980. La même conclusion est tirée concernant les teneurs en lipides ([Fig. 33](#)). Ces résultats sont partagés par ceux de [Myrand et al. \(2000\)](#). En effet, les auteurs ont établi qu'après la première ponte, la masse du manteau diminuait de 45%, puis de 58% pour la seconde ponte (ce qui équivaut à une perte de 284 mg). De plus, des mortalités sont survenues après la seconde ponte, probablement en lien direct avec la déplétion des réserves durant la reproduction mais également en lien avec la faible quantité de nourriture disponible. De plus, les températures élevées relevées durant l'expérience se sont ajoutées comme un stress supplémentaire sur les moules déjà fragilisées.

Une étude menée sur la bioénergétique de *Magallana gigas* illustre également bien ce phénomène. Il s'agit ainsi d'un modèle huître donc certaines discordances sont possibles. [Enriquez-Diaz \(2004\)](#) a établi les valeurs de Scope For Growth des huîtres pacifiques soumises à deux types de régimes alimentaires. Il en résulte qu'en été, les huîtres sont en déficit énergétique (SFG négatif), ce qui n'est pas imputable à l'environnement mais directement à la physiologie de l'huître (période de reproduction). De plus, cette période délicate est plus ou moins longue en fonction de la gamétogenèse, qui est elle-même dépendante de la richesse trophique. Ainsi, les huîtres nourries avec un haut niveau de nourriture ont un déficit énergétique plus long et plus important que celles nourries avec un bas niveau.

Ainsi, la physiologie de la reproduction est un élément essentiel à prendre en compte dans notre étude. En effet, la baisse de l'état physiologique des moules durant la gamétogenèse n'explique pas à elle seule les mortalités mais peut s'ajouter comme un facteur supplémentaire exerçant une pression sur les individus.

## D. Conclusion première partie

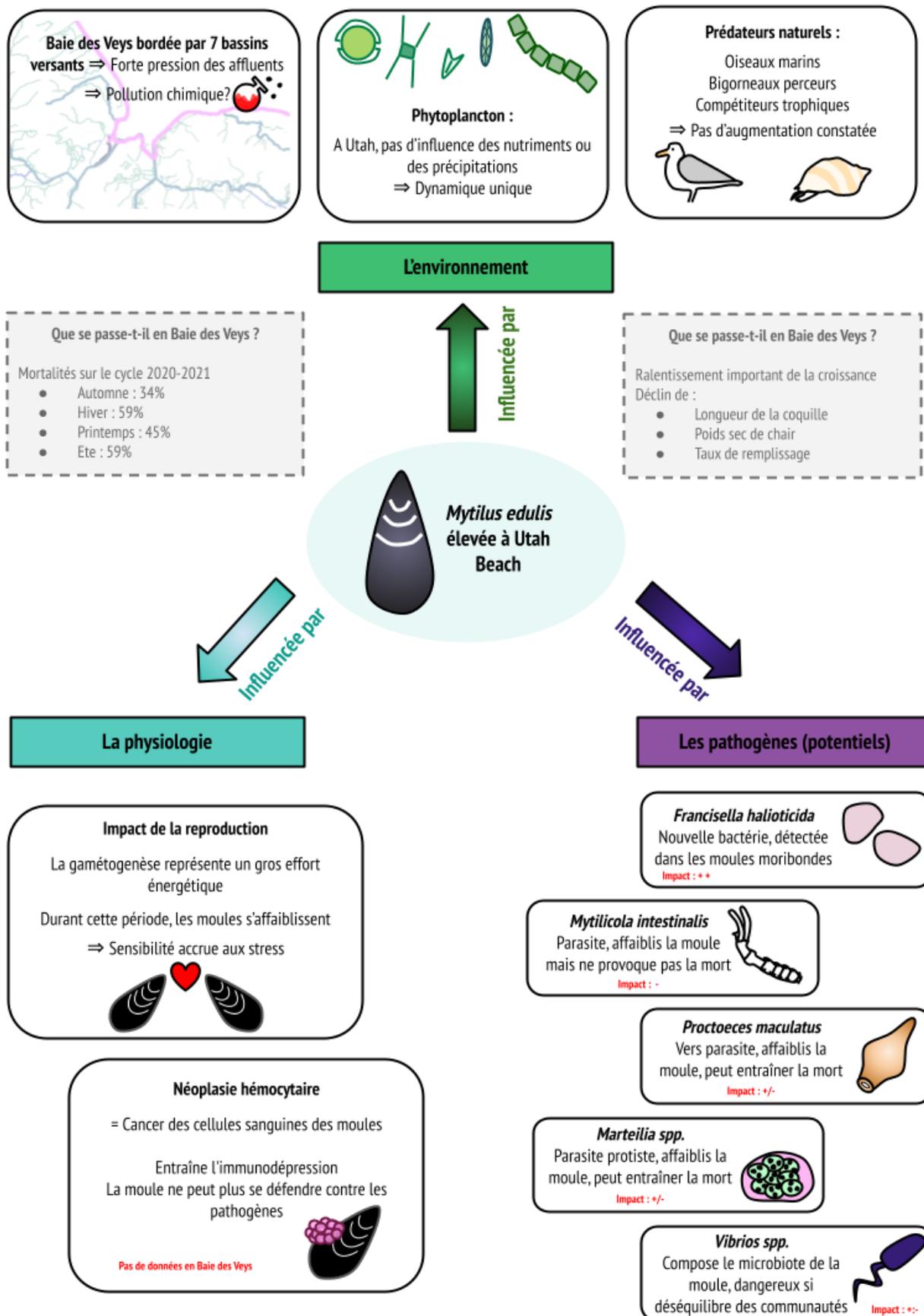
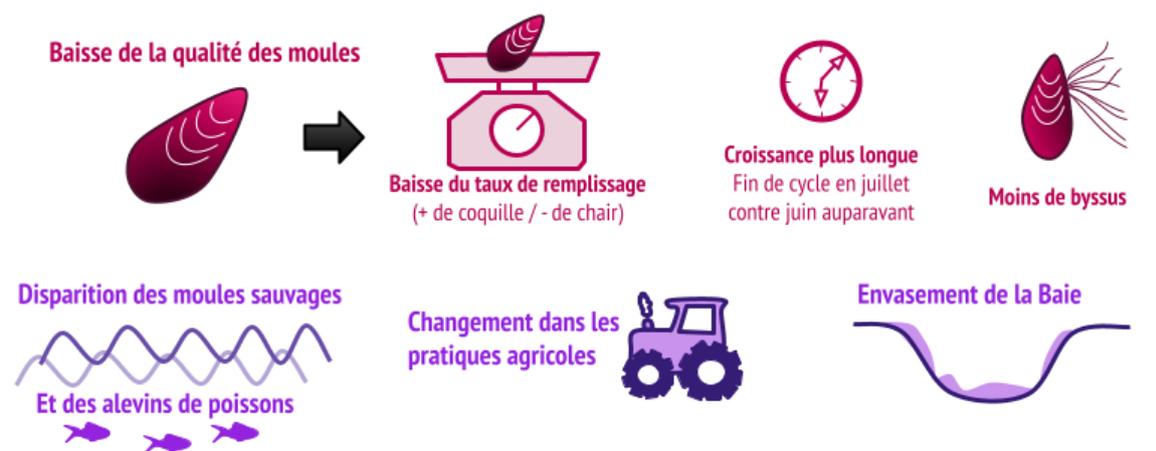


Figure 34 : Résumé schématisés des facteurs impactants le cheptel mytilicole d'Utah Beach.

#### IV. Ressenti des professionnels d'Utah Beach



1<sup>er</sup> épisode de mortalité : Automne 2020 (Octobre-Novembre)  2<sup>ème</sup> épisode de mortalité : Août 2021



## V. Proposition de suivi

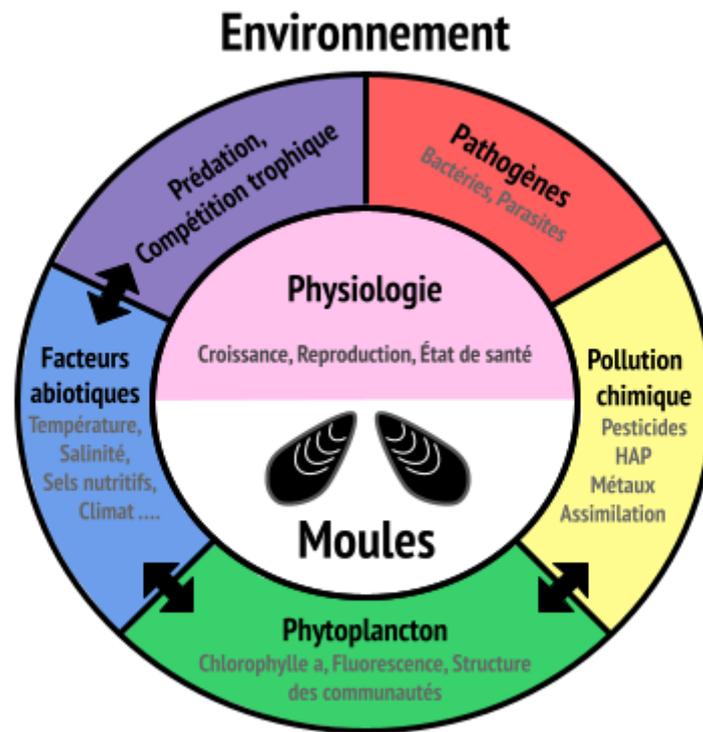


Figure 35 : Schématisation des différents axes à étudier dans le protocole de suivi

### A. Physiologie de la reproduction

#### 1. Maturation

Les moules ont un cycle biologique annuel, dépendant des conditions environnementales. Une fois la maturité atteinte, les gonades vont s'hypertrophier et envahir le manteau (Gosling, 2003). Ainsi, il est possible à l'aide d'une coupe histologique colorée à l'hématoxyline-éosine, d'identifier le sexe et le stade de maturation des individus (Fig. 36) (Jones *et al.*, 2021).

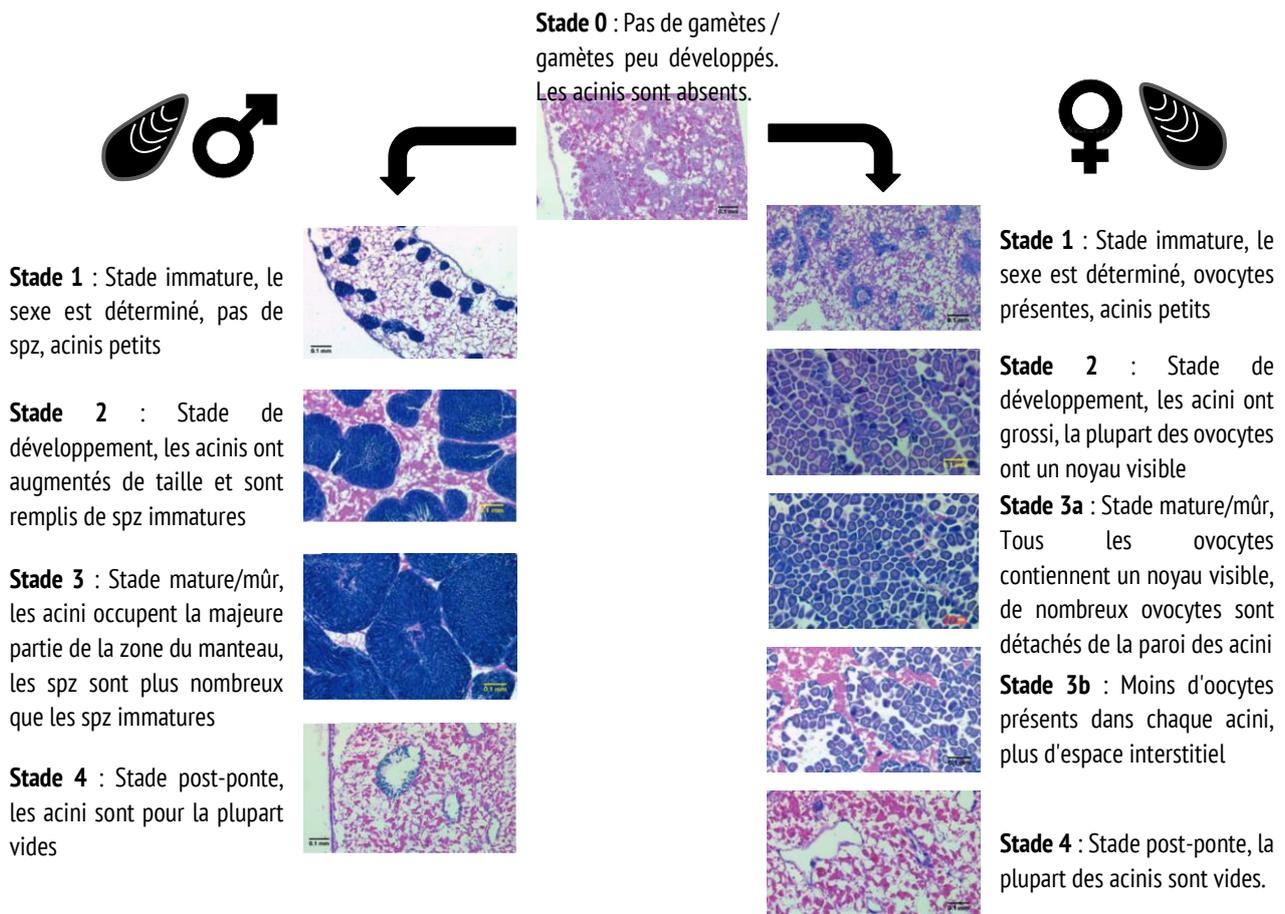


Figure 36 : Photomicrographies histologiques représentant des stades gamétogéniques distincts pour chaque sexe. Photographies modifiées de Jones *et al.*, 2021 ; stades de gamétogenèse des moules modifiés de Chipperfield, 1953 et Duinker *et al.*, 2008.

## 2. Balance énergétique

Les facteurs environnementaux exerçant une pression sur les moules vont induire des modifications physiologiques chez certains individus (Diaz *et al.*, 2018). En cas de stress, la maintenance somatique et le métabolisme basale vont nécessiter plus d'énergie (Bayne, 1973). Ainsi, plus une moule aura stocké d'énergie, sous forme de tissus adipo-granuleux et de tissus conjonctifs vésiculaires ; plus elle sera en mesure de résister aux différents stress (Gabbott & Bayne, 1973).

### Protocole de Jones *et al.*, 2021 :

A partir d'une coupe histologique du manteau, il est possible de déterminer les ratios de ces différents tissus. En effet, la coloration à l'hématoxyline-éosine va colorer :

- Les gonades en violet ;
- Les tissus adipo-granuleux en rose ;
- Pas de coloration sur les tissus conjonctifs vésiculaires.

Le logiciel ImageJ permet ensuite à l'aide d'une photographie de la coupe, de déterminer la proportion de chaque tissu (*via* l'analyse des différentes couleurs). Ce ratio combiné à un suivi temporel permet ainsi de déterminer les périodes de l'année où les moules se reproduisent (proportion de gonades dans le manteau) et lorsqu'elles sont le plus vulnérables (moins de réserves disponibles).

## B. Croissance

Comme l'ont souligné les réseaux de suivi des moules tels que [MYTILOBS](#) (IFREMER) ou [REMOULNOR](#) (SMEL) ; il est essentiel de suivre la croissance des moules en contrôlant :

- La longueur individuelle en cm (mesure au pieds à coulis) ;
- Le poids total (g) ;
- Le poids de chair humide (g) ;
- Le poids sec de chair (g) ;
- Le poids sec de coquille (g).

Ces données permettent de définir la croissance des moules (gain de poids et gain de taille) et également de déterminer l'indice de condition de [Walne & Mann \(1975\)](#).

$$\text{Indice de condition} = \frac{\text{Poids sec de chair}}{\text{Poids sec de coquille}}$$

Cette indice est le rapport du poids sec de chair sur le poids sec de coquille. Ce dernier permet d'indiquer le taux de remplissage de la moule et ainsi son état physiologique. En effet, la quantité de chaire sèche est un bon indicateur de l'état de santé (quantité de réserve énergétique).

## C. Pathogènes

### 1. Histologie

Les organismes procaryotes sont couramment présents dans les mollusques bivalves, dans divers organes. Les infections bactériennes sont associées à des nécroses tissulaires, réactions inflammatoires avec infiltrations hémocytaires et présences de granulocytes. Ainsi, un examen histopathologique permet d'identifier les signes d'infections ([Darriba, 2017](#)). Cette même analyse permet d'identifier les infestations parasitaires ([Fig. 37](#)). La coloration à l'hématoxyline-éosine permet de révéler la présence de sporocystes ou de métacercaires de trématodes tels que *Proctoeces maculatus*, et également d'identifier les parasites tels que *Mytilicola sp.* et *Marteilia sp.* ([Cheikh, 2017](#)).

La détection de certaines bactéries est également possible grâce à l'immunopéroxydase qui permet qu'un anticorps se lie spécifiquement à des antigènes dans les tissus biologiques. Dans la Fig. 38, cette technique a été utilisée dans différentes coupes de *M. edulis* et l'organisme recherché est la bactérie *Vibrio splendidus*. La coloration rose montre la présence de la bactérie dans les tissus.

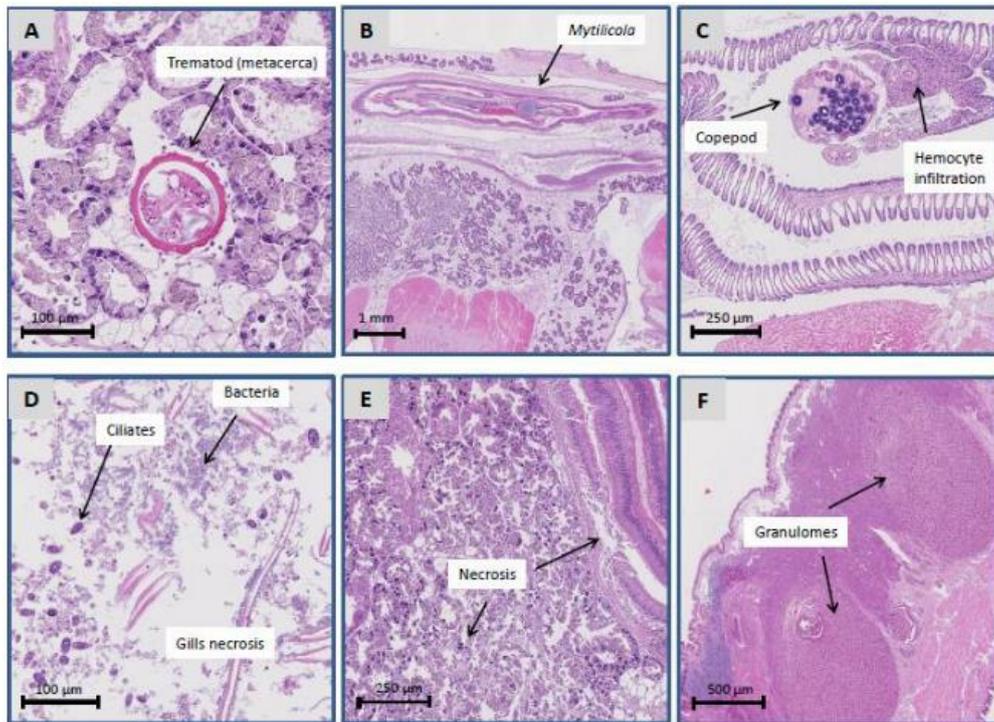


Figure 37 : Observations histologiques de coupes colorées à l'hématoxyline-éosine de tissus de moules lors d'infections expérimentales par cohabitation de réservoir d'eau avec des moules septiques. A. Trématode non identifié dans les glandes digestives (métacercues), B. *Mytilicola* sp. en lumière digestive, C. Infiltration de copépodes et d'hémocytes non identifiés dans les branchies, D. Nécrose des bactéries, des ciliés et des branchies, E. Nécrose des glandes digestives et de l'œsophage, F. Granulomes inflammatoires. Les barres d'échelle de 100 µm, 250 µm, 500 µm ou 1 mm sont indiquées. D'après Cheikh, 2017.

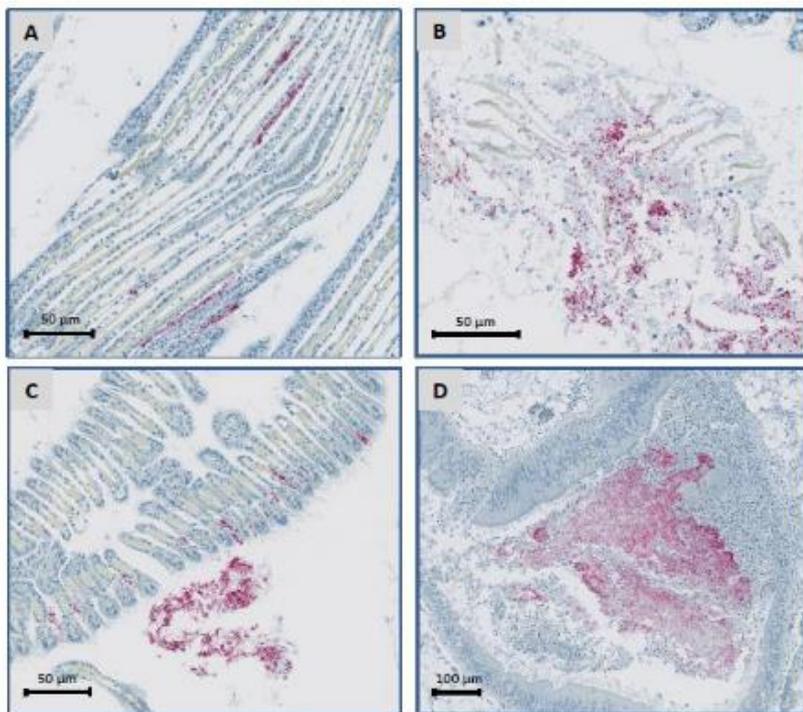


Figure 38 : Observations histologiques de tissus de moules lors d'infections expérimentales par *V. Splendidus* 10/068 1T1 via la cohabitation d'un réservoir d'eau avec des moules septiques. Les bactéries marquées GFP ont été détectées par immunohistochimie (marquage rose). Les tissus étaient contre-colorés. A-C : branchies, D : œsophage et estomac. Les barres d'échelle de 50 ou 100 µm sont indiquées. D'après Cheikh, 2017.

La détection des pathogènes permet de déterminer la prévalence et l'intensité des infections (Apeti *et al.*, 2014) :

$$\text{Prévalence} = \frac{\text{Nombre de moules avec le même type de pathogène}}{\text{Nombre total de moules analysées}}$$

$$\text{Intensité} = \frac{\text{Nombre d'occurrence de la pathologie}}{\text{Nombre de moules malades}}$$

La prévalence concerne le nombre de moules contaminés dans l'échantillon et l'intensité décrit l'amplitude de la pathologie (un même individu peut porter plusieurs pathogènes, plusieurs signes infectieux, etc...) (Jones *et al.*, 2021).

## 2. Biologie moléculaire

La qPCR (Polymerase Chain Reaction en temps réel) est une technologie très populaire, utilisée dans de nombreux secteurs d'activité. Le principe de cette technologie repose sur la détection et la quantification d'un reporter fluorescent, émettant un signal proportionnel au nombre d'amplicon générés au cours de la PCR. Ce processus peut être entièrement automatisé, permettant son application à grande échelle (Poitras & Houde, 2002).

Il est ainsi possible, à partir d'un prélèvement de chair sur des moules moribondes ou saines, de déterminer la présence et la quantité de certains pathogènes. [Charles et al. \(2020\)](#) a réalisé une liste des gènes cibles recherchés lors de PCR dans le cadre de recherche de pathogènes suite à des mortalités massives de moules sur les côtes françaises ([Tab. 2](#)).

Table 2 : Gènes cibles, amorces (sens (Fw) et sens inverse (Rv)) et sonde (Pr) utilisés pour la détection des agents pathogènes connus des mollusques bivalves. D'après [Charles et al., 2020](#).

Name of pathogens	Target gene	Oligo-nucleotides sequences (5'-3')	References
<i>Bonamia</i> sp.	28S rRNA	Fw TCCCTGCCCTTTGTACACA Rv CTCTTATCCACCTAATTCACCTCAG Pr TxR-CGCCCGTCGCTTCTACCGATT-BHQ2	Present paper
<i>Haplosporidium nelsoni</i>	SrRNA	Fw CACGCGCGCTACAATGT Rv CGAGATTACCCGGCCTTCT Pr FAM-CACGCAACGAGTTCAACCTTGCC-BHQ1	Present paper
<i>Marteilia</i> sp.	ITS1	Fw CACACTACTCTTCGCTTTTCGAT Rv GACTACCCGTGCCGAACA Pr Cy3-TCGCAAACAGGAAGCGGCTCTC-BHQ1	Present paper
<i>Mikrocytos mackini</i>	28S rRNA	Fw GGTGGCCGAATGACGTAGT Rv GCCTATGACAGCACGAAGCA Pr Cy5-CCGCTTCGGCGTGCAGTCTC-BHQ2	Present paper
<i>Nocardia crassostreae</i>	16S-23S rRNA ITS	Fw CCTCGATACCGCCGAAGAA Rv CAACACACCCGCATCAAA	Carrasco et al. (2013)
OsHV-1	B region	Fw GTCGCATCTTTGGATTTAACAA Rv ACTGGGATCCGACTGACAAC Pr TxR-TGCCCTGTGCATCTTGAGGTATAGACAATC-BHQ2	Martenot et al. (2010)
<i>V. aestuarianus</i>	dnaJ	Fw GTATGAAATTTAACTGACCCACAA Rv CAATTTCTTTGAAACAACCAC Pr TxR-TGGTAGCGCAGACTTCGGCGAC-BHQ2	Saulnier et al. (2009)
<i>V. tubiashii</i>	vtpA	Fw GGTACGGAATATCCGGGATT Rv TTCACCGCTGAGTTGTTTCAT Pr Cy3-ATCGTCGATAAATCAGGCACAACCTGT-BHQ1	Present paper
	vth	Fw CGGTTGATATTTCGCGTCAA Rv GTGTGAAACCCTGCGAAGTA Pr Cy5-TATCACAGATGCGCTCGGTTTCAGTC-BHQ2	Present paper
<i>V. harveyi</i>	16S rRNA	Fw CGAGCGGAAACGAGTTATCTG Rv CTCACCAACTAGCTAATCCCACCTA Pr TxR-CCGCATAAATACCTACGGTCAAAGAGGG-BHQ2	Present paper
<i>V. splendidus</i> ( <i>Splendidus</i> cluster)	toxR	Fw AGCAGCGGCTGAAATTGCA Rv GGCCGCAGTTGGTGTGTT Pr FAM-CAATGACTGAAGCTGTCGAGCCC-BHQ1	Oden et al. (2018)

### 3. Bactériologie

Afin d'identifier les colonies bactériennes présentes dans les moules, il est possible de réaliser des cultures à partir des broyats de chair. En effet, les broyats sont centrifugés afin de sédimenter les débris cellulaires, et le surnageant est mis en culture (à différentes dilutions) dans une gélose marine Zobell (Agar). Après 48H d'incubation à 22°C, les colonies bactériennes prédominantes avec des phénotypes différents sont isolées. L'ADN de ces colonies est ensuite extrait puis caractérisé par analyse moléculaire ([Charles et al., 2020](#)).

## D. Pollution chimique

### 1. Détection des contaminants dans l'eau

#### a) Echantillonneurs passifs type POCIS

Les échantillonneurs passifs de type POCIS (Polar Organic Chemical Integrative Sampler) permettent de réaliser le screening des contaminants organiques hydrophiles présents dans le milieu (Petty *et al.*, 2004). Le POCIS est composé d'une membrane hydrophile microporeuse (en polyéther), contenant une phase solide adsorbante (Fig. 39).

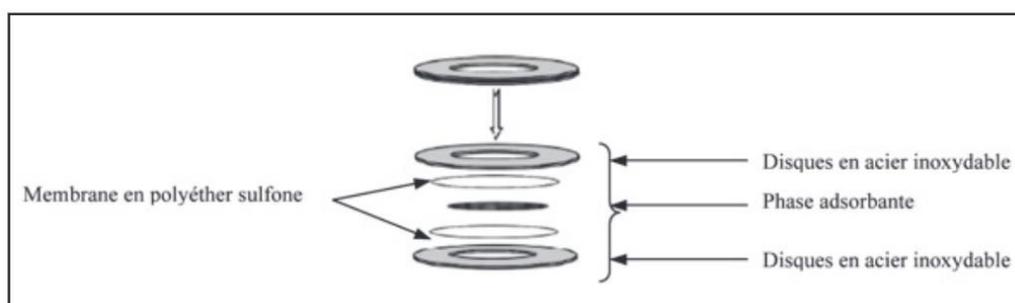


Figure 39 : Composition d'un échantillonneur POCIS, d'après Miege *et al.*, 2011.

Les molécules sont adsorbées sur la membrane par diffusion passive. Afin d'évaluer la concentration en contaminants, il est nécessaire de prendre en compte la durée d'exposition et le débit. La concentration de l'eau en contaminant est alors donnée par la formule suivante (Miege *et al.*, 2011)

:

$$C_{\text{eau}} = C_{\text{pocis}} \times M_{\text{pocis}} / R_s \times t$$

Avec :

$C_{\text{eau}}$  : la concentration moyenne (sur la période d'échantillonnage) dans l'eau ambiante ( $\mu\text{g/L}$ ) ;

$C_{\text{pocis}}$  : la concentration dans le POCIS ( $\mu\text{g/g}$ ) ;

$M_{\text{pocis}}$  : la masse de la phase adsorbante du POCIS (g) ;

$R_s$  : le taux d'échantillonnage (L/j), correspondant au volume d'eau épurée par unité temps ;

$t$  : la durée d'exposition (j).

Les molécules recherchées par les POCIS sont les molécules polaires qui ne sont donc pas forcément accumulées dans les chairs des animaux. Dans le cadre du déclin du phytoplancton en 2021, il est pertinent de rechercher principalement les herbicides pouvant induire ces pertes. La Table 3 regroupe les herbicides ayant été détectés dans la Douve et la Vire en 2016 (Letourniant *et al.*, 2018).

Table 3 : Herbicides retrouvés dans la Douve et la Vire en 2016 durant le projet CAPA (Letourniant *et al.*, 2018).

2.4 DICHLOROENZAMIDE	DESETHYLATRAZINE	METOLACHLOR ESA
2.6 DICHLOROENZAMIDE	DESETHYLTERBUMETON	METOLACHLOR OA
ACETOCHLOR	DESETHYLTERBUTHYLAZINE	OXADIAZON
ACETOCHLOR ESA + ALACHLORE ESA	DICHLORPROP	PROPAZINE
ALACHLORE	DINOTERB	PROPYZAMIDE
ATRAZINE	HYDROXYATRAZINE	SOMAZINE
BENTAZONE	<b>IRGAROL *algicide</b>	TERBUTRYN
CARBENDAZIME	ISOPROTURON	QUINMERAC
CHLORTOLURON	ISOXABEN	DIMETHACHLOR
CLOMAZONE	MÉTAZACHLORE	DIMETHENAMID
DCPMU	METCONAZOLE	TERBUTHYLAZINE
DEISOPROPYLATRAZINE	METOLACHLOR	TERBUTHYLAZINE-2-HYDROXY

## b) Suivi par bioindicateurs

### (1) Test *Vibrio fischeri*

Le test d'inhibition de la bioluminescence, basé sur la bactérie marine gram négative, *Vibrio fischeri* est standardisé (ISO 11348-3:2007). La souche bactérienne NRRL B-11177 est utilisée pour estimer la toxicité de différents milieux. De nombreux kits sont disponibles pour réaliser ses tests en routine : Microtox® ; LumiStox® ; ToxAlert® (Farre & Barcelo, 2003).

La quantité de lumière produite est directement proportionnelle à l'activité métabolique de la population de *V. fischeri* et toute inhibition enzymatique conduit à une diminution de la bioluminescence. Il est alors possible de mesurer le pourcentage d'inhibition (Parvez *et al.*, 2006). En effet, la luminescence (bleu-vert) de la bactérie repose sur une enzyme spécifique, la luciférase. Elle catalyse l'oxydation des aldéhyde et du FMNH<sub>2</sub>. Son activation est fonction de la glycolyse et de la respiration cellulaire *via* les couples de coenzymes NAD-NADH et FMN-FMNH<sub>2</sub> (Férard *et al.*, 1983). La toxicité de l'échantillon testé est déterminée par la concentration qui inhibe 50 ou 20% de la luminescence des bactéries, après 5, 15 ou 30 minutes d'exposition (Pérez, 2012). Le protocole est décrit dans la Fig. 40.

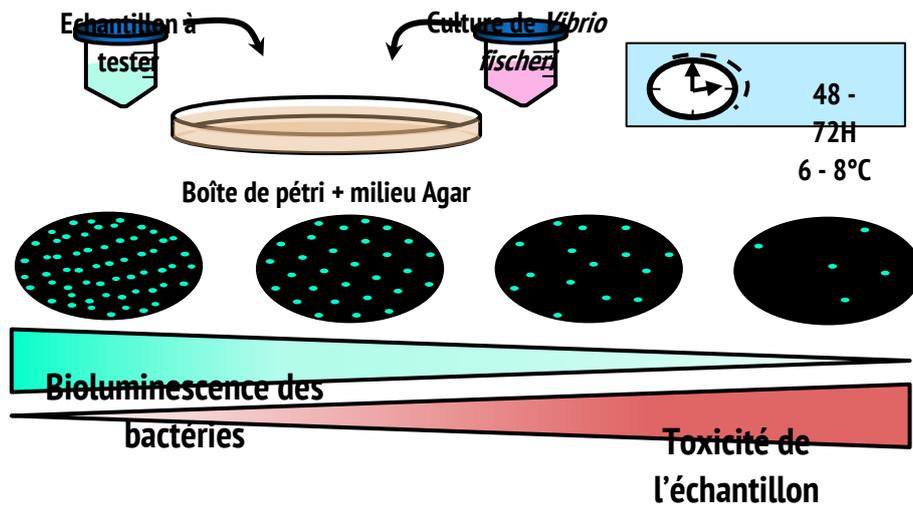


Figure 40 : Mise en place du test de bioluminescence *Vibrio fischeri* et lecture des résultats.

## (2) Test larve d'oursin

Les oursins sont utilisés en écotoxicologie à différents stades de développement : adultes, larves, gamètes. Les tests d'exposition des gamètes sont les plus courants du fait de leurs rapidité et facilité de mise en place. Il est alors possible d'étudier l'activation, la mobilité et la mortalité des spermatozoïdes (Mohri, 1956 ; Timourian & Watchmaker, 1977).

Il est également possible de réaliser les tests d'exposition directement sur les embryons, en mesurant les taux de survie, de malformations et les retards de croissance. Ces tests ont été standardisés par les travaux de Petinay *et al.* en 2009. Le protocole issu de cette standardisation est repris dans la Fig. 41.

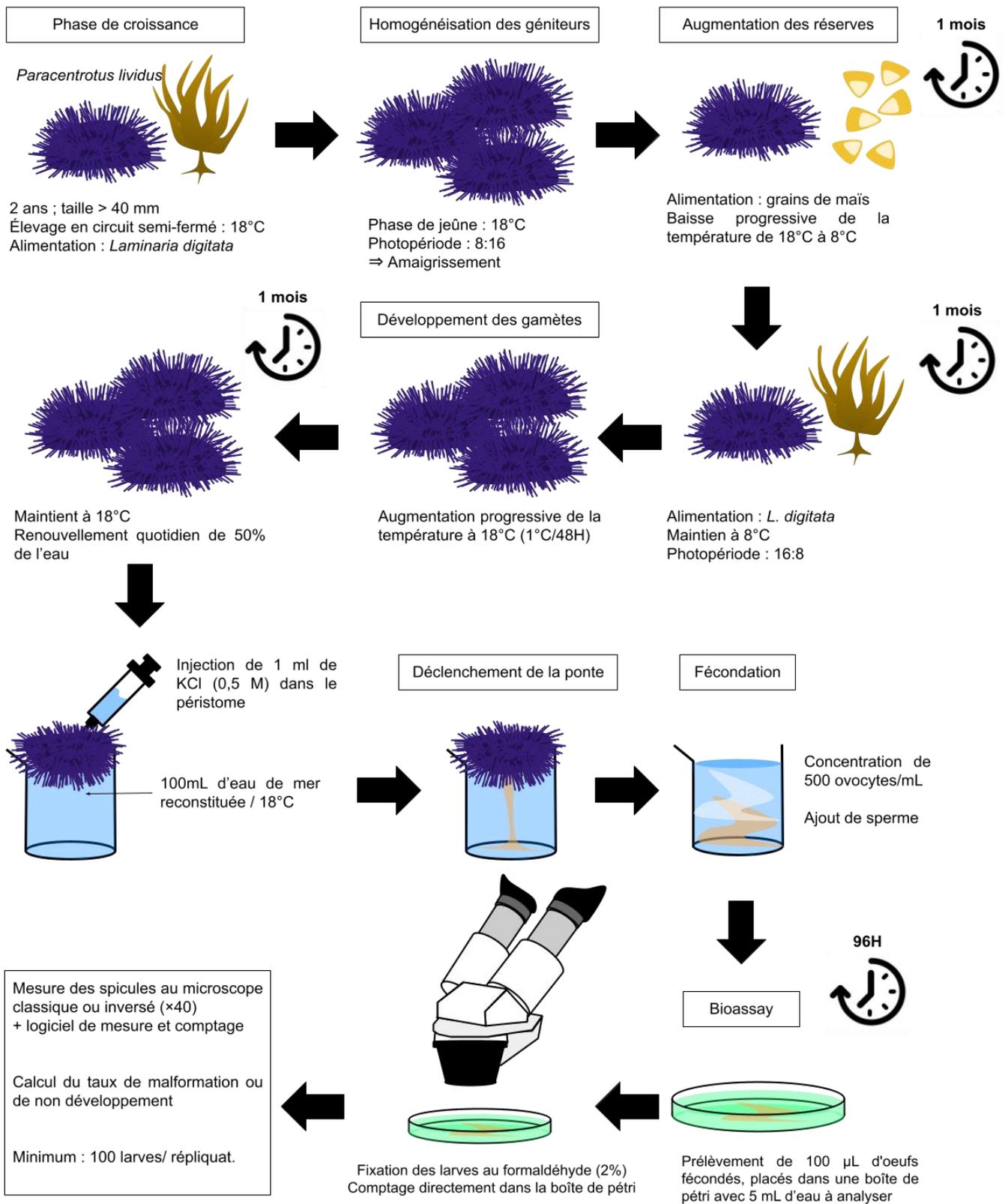


Figure 41 : Illustration du protocole d'évaluation de la toxicité d'un milieu avec l'exposition des gamètes de *Paracentrotus lividus*. Illustrations réalisées à partir du protocole de Petinay *et al.*, 2009.

## 2. Détection des contaminants dans les moules

### a) Analyse dans les chairs

Les bivalves marins, filtreurs, sont utilisés depuis plusieurs décennies comme organismes modèles pour étudier et surveiller la pollution environnementale par les métaux dans les eaux côtières du monde entier (Goldberg *et al.*, 1983 ; De Kock & Kramer, 1994). De nombreux programmes de biosurveillance mettent en relief les liens entre la teneur en corps métalliques et autres contaminants dans les bivalves avec les quantités biodisponibles dans l'environnement (Mubiana *et al.*, 2006).

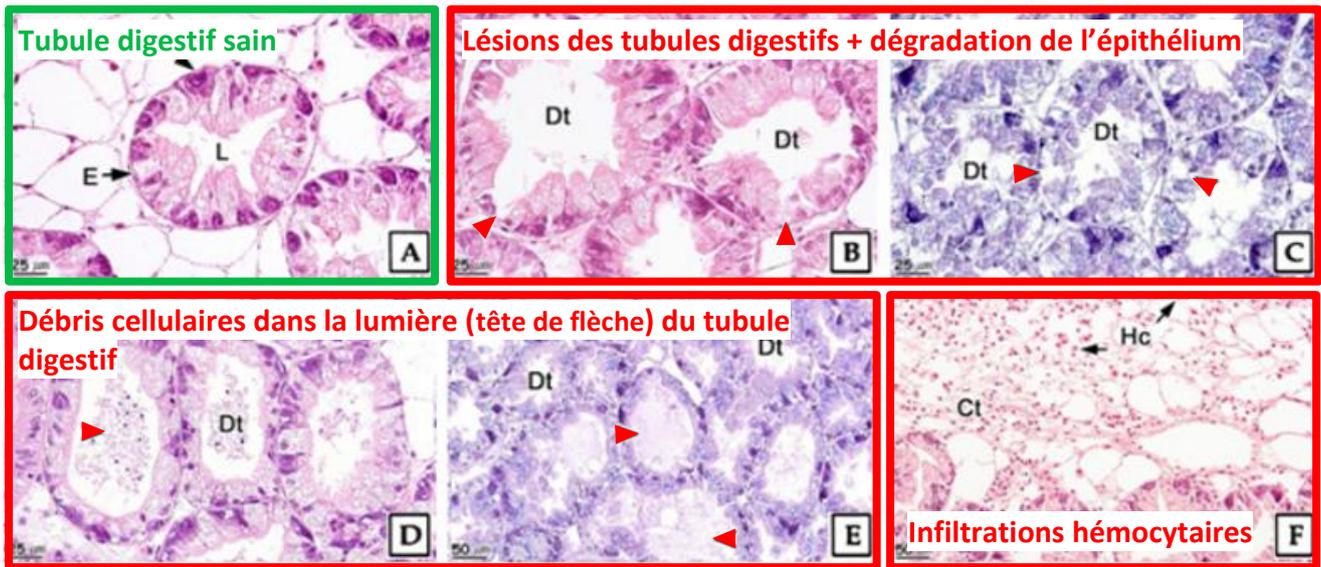
Le Réseau d'Observation de la Contamination Chimique, ROCCH (IFREMER), a été conçu pour répondre aux exigences de la DCE (Directive Cadre sur l'Eau). Ce réseau de surveillance contrôle directement dans différentes matrices les concentrations en trois ETM (Cadmium, Plomb, Mercure), en HAP, dioxines et PCB. Les trois matrices sont eau, sédiment et coquillage.

Le réseau comporte de nombreux points de surveillance annuelle, dont deux principaux en Baie des Veys : Grandcamp et Geffosses.

### b) Lésions internes

L'exposition aiguë des moules aux ETM (Éléments traces métalliques) peut provoquer en plus des lésions cellulaires (Stohs & Bagchi, 1995 ; Viarengo *et al.*, 1990), des dégradations visibles à l'échelle des organes (Sherin *et al.*, 2013). Il en va de même pour les expositions aux pesticides (Canesi *et al.*, 2003 ; Baussant *et al.*, 2009).

Après une coloration à l'hématoxyline-éosine, les premières anomalies sont visibles (Fig. 42, 43).



Concentrations en ETM impliqués :

Metal ions	Al	As	Cr	Mn	Co	Cu	Ni	Zn	Cd	Pb
Concentration (mg/kg)	366.5 (± 249.7)	11.5 (± 1.4)	3.7 (± 0.6)	21.9 (± 4.5)	1.0 (± 0.2)	9.0 (± 1.8)	2.5 (± 0.5)	179.5 (± 67.8)	2.8 (± 1.3)	2.1 (± 0.6)

Figure 42 : Photomicrographies d'altérations histologiques sur la glande digestive de *Mytilus galloprovincialis*. A : tubule digestif. B et C : Destruction de l'épithélium du tubule digestif (Dt) (tête de flèche). D et E : Débris cellulaires remplis dans la lumière (tête de flèche) du tubule digestif. F : Augmentation des hémocytes (Hc) dans le tissu conjonctif (Ct). Bpc, cellule basophile ; E, cellule épithéliale ; L, lumière. Modifié d'après Jeon *et al.*, 2013.

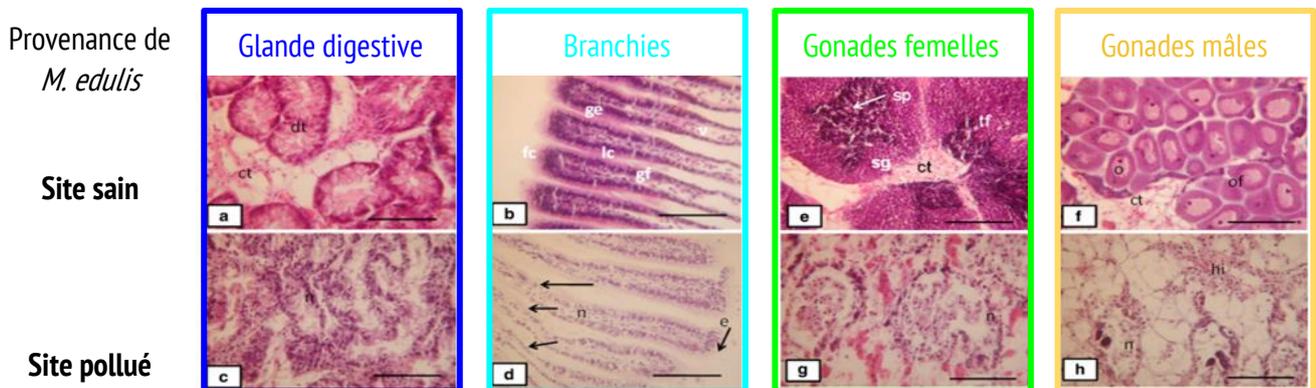


Figure 43 : Micrographies optiques de coupes à travers la glande digestive et les branchies de *M. edulis* montrant la structure histologique des moules prélevées sur des sites de référence et pollués au temps zéro de l'expérience, colorées avec de l'hématoxyline H et de l'éosine à 5-10  $\mu$ m d'épaisseur. a et b glande digestive et branchies du site de référence, c glande digestive du site pollué avec tubules nécrotiques ; d branchies du site pollué avec érosion des cils et filaments branchiaux nécrotiques e et f gonades mâles et femelles du site de référence, g gonades mâles du site pollué avec follicules testiculaires nécrotiques et h gonades femelles du site pollué avec follicules d'œufs nécrotiques et inflammatoires. Modifié d'après Sherin *et al.*, 2013.

## E. Suivi des masses d'eau et du phytoplancton

### 1. Indicateur de biomasse : chlorophylle a et fluorescence minimale

La quantité de chlorophylle a est utilisée comme indicateur de la biomasse phytoplanctonique (Belin, 2012). La mesure de fluorescence de la chlorophylle a est une technique largement utilisée pour estimer les performances photosynthétiques des végétaux. L'estimation de  $F_0$ , la fluorescence minimale relevée lorsque tous les centres réactionnels sont ouverts est un indicateur de biomasse phytoplanctonique (relation entre le nombre de centres et le nombre de cellules phytoplanctoniques) (Oxborough & Baker, 1997).

### 2. Indicateur de qualité : état physiologique

Le rapport de la fluorescence variable sur la fluorescence minimale ( $F_v'/F_m'$ ) permet d'estimer l'efficacité du photosystème II (PSII) en tenant compte de la capacité photochimique et des processus de décroissance thermique non photochimique. Ce rapport est dépendant de l'état de réduction ou d'oxydation des pools de quinone A (Bradbury & Baker, 1984 ; Quick & Horton, 1984).

Le rapport  $F_v/F_m$  mesure la quantité maximale d'électron émise par un centre PSII ayant reçu un électron. C'est un indicateur de la qualité physiologique des microalgues. Les valeurs indiquent : (Claquin, comm. pers.) :

- $F_v/F_m = 0,6$  : très bon état physiologique ;
- $F_v/F_m = 0,5$  : bon état physiologique ;
- $F_v/F_m = 0,4 - 0,3$  : moyen-mauvais état physiologique ;
- $F_v/F_m = 0,2 - 0,1$  : mauvais-très mauvais état physiologique.

### 3. Structure des communautés

#### a) Identification *via* les pigments

Il existe de nombreuses techniques d'identification du phytoplancton *in situ* comme en laboratoire. Le spectrofluorimètre FluoroProbe® permet, avec l'identification des pigments, de classer les microalgues en 4 grandes classes (Kring *et al.*, 2014) :

- Chlorophytes et Euglenophytes ;

- Cyanobactéries riches en phycocyanine ;
- Heterokontophytes, Haptophytes et Dinophytes ;
- Cyanobactéries riches en phycoérythrine et Cryptophytes.

A l'aide de diodes électroluminescentes, les pigments accessoires associés au photosystème II sont excités. Les changements dans l'émission chl a résultante permettent une estimation fluorimétrique des classes d'algues en fonction des différences d'espèces et des pigments d'antenne périphériques dépendant de la classe (Beutler *et al.* 2002).

### b) Cytométrie en flux

La cytométrie repose sur la capacité d'appliquer un courant laminaire à un liquide parfaitement calibré en limitant les turbulences pour que les cellules puissent passer en ligne. Ainsi, cette technique permet de mesurer, sur une suspension de particules (cellules, bactéries, parasites, billes..), les caractéristiques individuelles de chaque particule telles que la taille, la forme ou bien la complexité. Un premier faisceau de lumière informe sur la taille des particules (Forward Scatter, FSC) tandis qu'un second (Side Scatter, SSC) informe sur la forme, l'aspect et la structure interne des particules. Ainsi, la cytométrie en flux permet le comptage, l'analyse et l'identification des espèces et des groupes de phytoplancton. Cette technique possède un fort potentiel pour la discrimination des différents groupes de phytoplancton sur des échantillons naturels non perturbés. De plus, la cytométrie en flux permet également la détermination de petites particules telles que les bactéries (Dubelaar & Jonker, 2000).

Après excitation à 488 nm, le signal de fluorescence dans le rouge est récupéré. Ce dernier informe sur la quantité de chlorophylle dans la cellule. S'il y a présence de pigments accessoires, un signal spécifique sera émis (exemple : phycoérythrine). Il est alors possible de séparer des populations par des indicateurs (Claquin, *comm. pers.*) (Fig. 44).

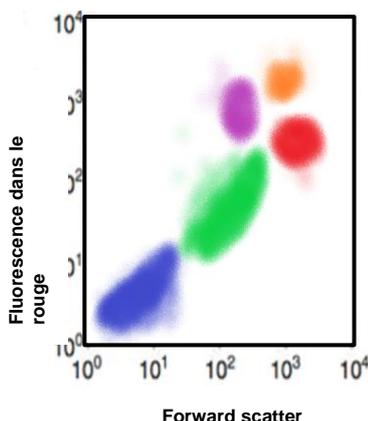


Figure 44 : Exemple de spectre (illustration) obtenu après analyse d'un échantillon d'eau de mer. Les différentes couleurs utilisées indiquent des communautés phytoplanctoniques différentes.

### c) Métagénomique

Le séquençage métagénomique est une technique très puissante pour évaluer la diversité phytoplanctonique. Cette technique consiste en un séquençage complet de tout l'ADN retrouvé dans le milieu ; le screening est alors extrêmement large. La technique implique la fragmentation de l'ADN, le séquençage des fragments puis l'analyse des données (assemblage des fragments) (Fig. 45) (DeLong *et al.*, 2006 ; Venter *et al.*, 2004).

La première génération de techniques de génomique reposait sur le clonage des morceaux d'ADN dans des vecteurs (plasmide, chromosome bactérien ...) puis l'amplification et le tri de ces vecteurs en les transformant en *E. coli* et en isolant des colonies individuelles (DeLong *et al.*, 2006, Venter *et al.*, 2004).

La deuxième génération de métagénomiques est basée sur le séquençage à haut débit (nouvelle génération), qui supprime le besoin de clonage. Ainsi, cela réduit le coût de la métagénomique et augmente également la couverture des organismes capturés dans un échantillon. Cependant, la longueur de séquence plus courte rend l'analyse en aval plus complexe et introduit davantage d'incertitudes dans les attributions de fonctions taxonomiques et géniques (Johnson & Martiny, 2014).

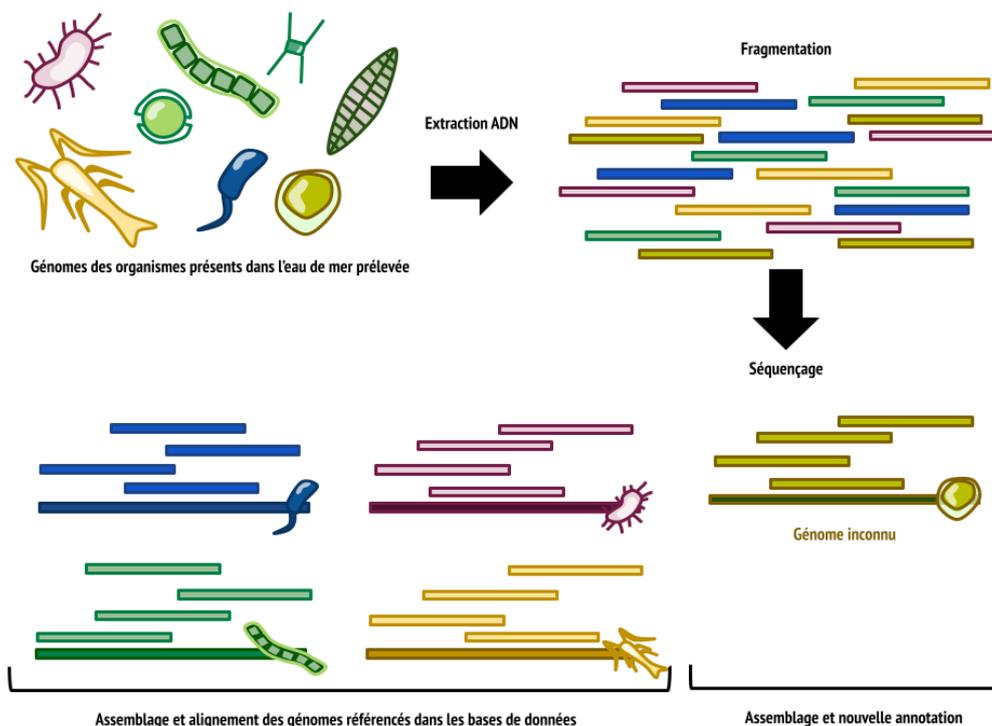


Figure 45 : Principe de la métagénomique

## F. Facteurs abiotiques : continuité du réseau HYDRONOR

Il est pertinent de continuer les mesures menées dans le cadre du réseau [HYDRONOR](#) (SMEL). En effet, les paramètres étudiés sont les suivants :

- Paramètres physiques : température, salinité, oxygène : relevés in situ à l'aide de sonde multiparamètre;
- Sels nutritifs : Ammonium, nitrite, nitrate, phosphate, silicate : analysés en laboratoire par méthodes spectrophotométriques ;
- Paramètres biologiques et assimilés : Turbidité, Matières en suspension et Matière Organique Particulaire (filtration, séchage et pesée) : mesurés au laboratoire.

## **G. Interactions biotiques**

Il est compliqué d'étudier précisément toutes les interactions biotiques de *Mytilus edulis*. Comme évoqué dans les chapitres précédents, les prédateurs et compétiteurs ne semblent pas être une menace importante pour les moules en élevage à Utah Beach. Ainsi, il n'est pas nécessaire d'instaurer un protocole spécialement dédié à cette surveillance. Les témoignages et la vigilance des mytiliculteurs devront apporter les informations nécessaires et nous alerter en cas de changement.

## **H. Conclusion**

L'état des lieux du cheptel mytilicole d'Utah Beach a soulevé plusieurs zones d'ombres, qu'il est essentiel d'éclairer grâce au suivi à venir. Premièrement, il convient d'analyser les contaminants chimiques arrivants dans la baie au travers d'échantillonneurs passifs et d'ajouter à cela un suivi de la qualité de l'eau avec des bioindicateurs (*V. fischeri*, larve d'oursin). En cas d'alerte, il sera possible de mesurer l'accumulation de ces contaminants dans les chairs des moules. Suite à cela, le compartiment trophique sera étudié avec le suivi des masses d'eau selon le protocole HYDRONOR et l'ajout de la mesure de la fluorescence afin d'ajouter un axe qualitatif aux mesures quantitatives. Parallèlement, aura lieu un échantillonnage récurrent des moules pour inclusion en paraffine afin de déclencher, si nécessaire, des analyses approfondies et identifier des lésions, parasites, ou infiltrations hémocytaires. Au travers de mesures biométriques (poids sec, longueur de coquille, ...) la croissance et l'indice de condition des moules seront évalués régulièrement (bimensuellement) afin de détecter tout bouleversement. Le protocole de suivi est détaillé dans la [Fig. 46](#). Le devis final de ces analyses est en cours de rédaction ([Fig. 47](#)) et ce travail permettra de proposer un plan d'étude à la profession.

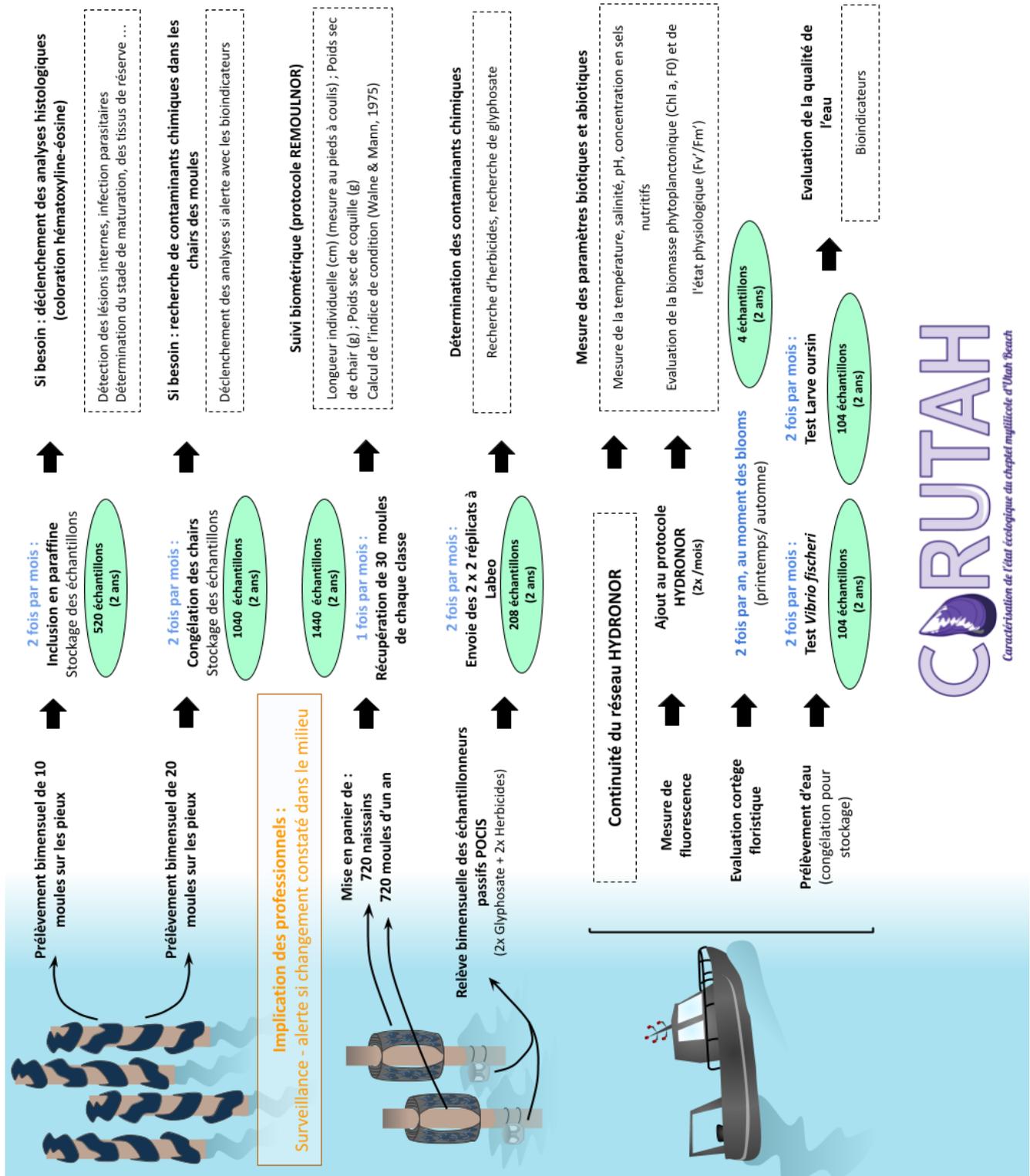


Figure 46 : Plan d'échantillonnage dans le cadre du projet CARUTAH (Caractérisation de l'état écologique du cheptel mytilicole d'Utah Beach).

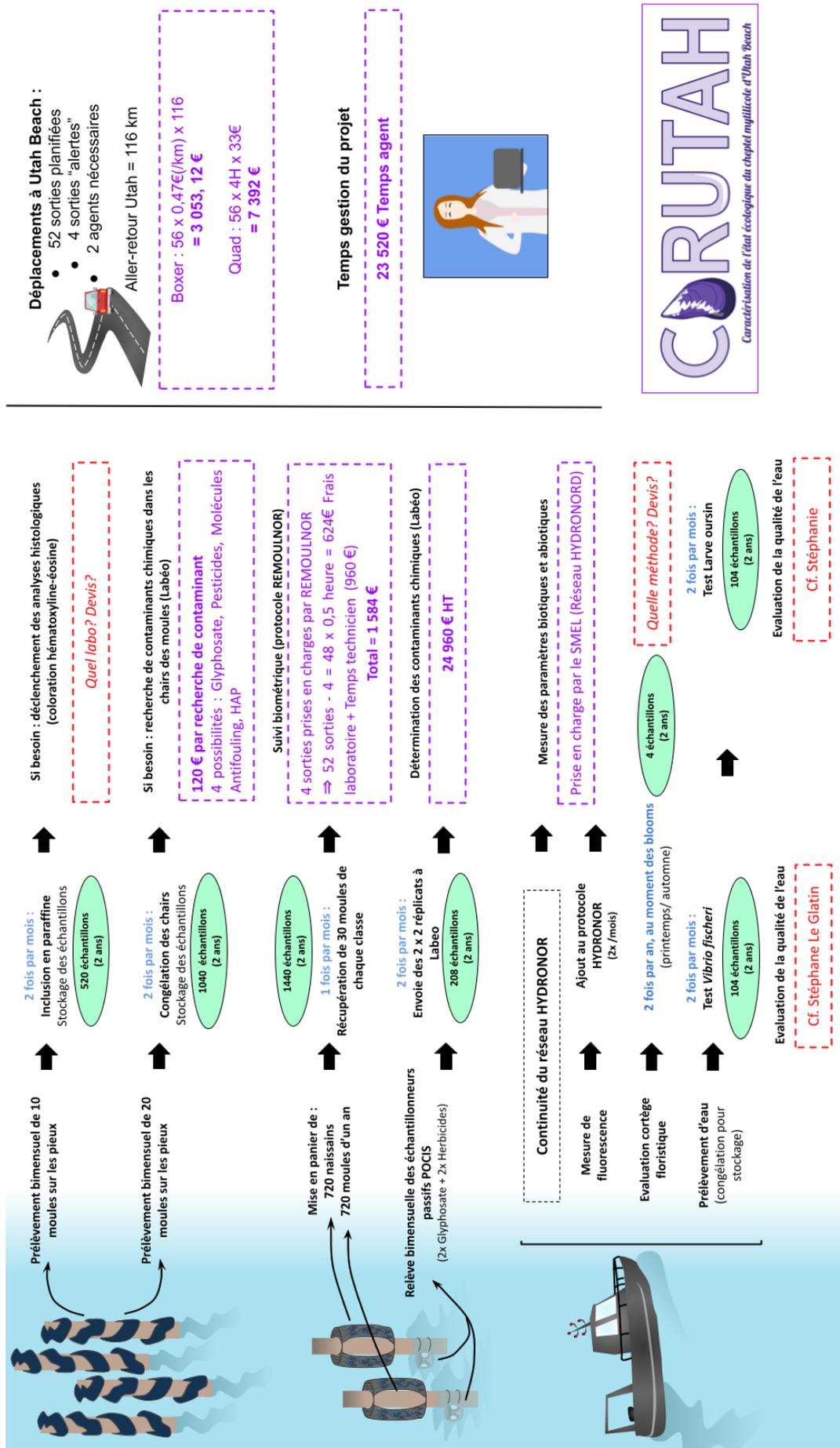


Figure 47 : Budgétisation prévisionnelle du projet CARUTAH.

## VI. Bibliographie

- Aarset A.V., 1982. Freezing tolerance in intertidal invertebrates (a review). *Comp. Biochem. Physiol. A Physiol.*, 73A(4): 571-580, doi: 10.1016/0300-9629(82)90264-X
- Allain G., Bernard I., 2016. Les mortalités de moules en 2014 et 2015 vues par les professionnels. *Compte-rendu de la phase 1 : synthèse sur l'émergence, la propagation et l'installation des mortalités*. CRC Bretagne Nord.
- Apeti, D. A., Y. Kim, G. Lauenstein, J. Tull & R. Warner. 2014. Occurrence of parasites and diseases in oysters and mussels of the U.S. coastal waters. National Status and Trends, the Mussel Watch monitoring program. NOAA Technical Memorandum NOSS/ NCCOS 182, Silver Spring, MD. 51 pp.
- Basuyaux O., Buret R., Laisney N., Jacquette J.-M., 2012. Prédation par les perceurs dans le secteur conchylicole de la pointe d'Agon à Gouville sur mer. SMEL.
- Basuyaux O., Lelièvre Y., 2003. Infestation des cordes mytilicoles et optimisation de la collecte des perceurs. SMEL
- Baussant, T., Bechmann, R. K., Taban, I. C., Larsen, B. K., Tandberg, A. H., Bjørnstad, A., Sanni, S. 2009. Enzymatic and cellular responses in relation to body burden of PAHs in bivalve molluscs: A case study with chronic levels of North Sea and Barents Sea dispersed oil. *Marine Pollution Bulletin*, 58(12), 1796–1807. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2009.08.007>
- Bayne, B. L. 1973. Physiological changes in *Mytilus edulis* L. induced by temperature and nutritive stress. *J. Mar. Biol. Assoc. U. K.* 53: 39–58.
- Bayne, B. L. 1976. Aspects of reproduction in bivalve molluscs. In: *Estuarine processes*. Ed. by M. Wiley. New York: Academic Press, (1) pp 432-448.
- Beaz-Hidalgo R, Balboa S, Romalde JL & Figueras MJ. 2010. Diversity and pathogenicity of *Vibriosis* species in cultured bivalve molluscs. *Environ Microbiol Rep* 2,34–43. doi: 10.1111/j.1758-2229.2010.00135
- Bechemin C., Soletchnik P., Polsenaere P., Le Moine O., Pernet F., Protat M., Fuhrmann M., Quéré C., Goulitquer S., Corporeau C., Renault T., Lapègue S., Travers M.A., Morga B., Garrigues M., Garcia C., Haffner P., Dubreuil C., Faury N., Baillon L., 2014. Surmortalités de la moule bleue *Mytilus edulis* dans les Pertuis Charentais (mars 2014) -Rapport d'expertise.
- Bechemin C., Soletchnik P., Polsenaere P., Le Moine O., Pernet F., Protat M., Fuhrmann M., Quéré C., Goulitquer S., Corporeau C., others, 2015. Épisodes de mortalité massive de moules bleues observés en 2014 dans les Pertuis charentais. *Bull. Épidémiologie Santé Anim. Aliment.*(67): 6–9.
- Belin, C. 2012. Cahier de procédures REPHY 2012-2013. Document de prescription. Date d'application: 1er octobre 2012. DYNECO/VIGIES/12-07 . <https://archimer.ifremer.fr/doc/00449/56068/>

- Benabdelmouna A., Saunier A., Ledu C., Travers M.-A., Morga B., 2018. Genomic abnormalities affecting mussels (*Mytilus edulis-galloprovincialis*) in France are related to ongoing neoplastic processes, evidenced by dual flow cytometry and cell monolayer analyses. *J. Invertebr. Pathol.*, 157(0): 45-52, doi: 10.1016/j.jip.2018.08.003
- Beutler, M., Wiltshire, K. H., Meyer, B., Moldaenke, C., Lüring, C., Meyerhöfer, M., Dau, H. 2002. A fluorometric method for the differentiation of algal populations in vivo and in situ. *Photosynthesis research*, 72(1), 39-53.
- Blin, J., Moal, S., Petinay, S. 2022. Suivis de la production mytilicole Bas-Normande, résultats du cycle 2020-2021. Rapport d'étude REMOULNOR, S.M.E.L.
- Bompais X., 1991. Les filières pour l'élevage des moules -Guide pratique. Ifremer.
- Bower S.M., 2009. Précis des maladies infectieuses et des parasites des mollusques et des crustacés exploités commercialement : *Mytilicola intestinalis*, maladie de vers rouges chez les moules. *Pêch. Océans Can.*, <http://www.dfo-mpo.gc.ca/science/aah-saa/diseases-maladies/mirwdmu-fra.htm>
- Bradbury, M., & Baker, N. R. 1984. A quantitative determination of photochemical and non-photochemical quenching during the slow phase of the chlorophyll fluorescence induction curve of bean leaves. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics*, 765(3), 275-281.
- Brevik, Ø. J., Ottem, K. F., Kamaishi, T., Watanabe, K., & Nylund, A. 2011. *Francisella haliotica* sp. nov., a pathogen of farmed giant abalone (*Haliotis gigantea*) in Japan. *Journal of applied microbiology*, 111(5), 1044-1056.
- Brienne H., 1964. Observations sur l'infestation des moules du pertuis breton par *Mytilicola intestinalis* Steuer. Ifremer.
- Cadiou, B., Pons, J.M., Yesou, P. 2004. Oiseaux marins nicheurs de France métropolitaine (1960-2000). Editions Biotope, Mèze, 218p.
- Campbell S.A., 1970. The occurrence and effects of *Mytilicola intestinalis* in *Mytilus edulis*. *Mar. Biol.*, 5(1): 89-95
- Charles, M. 2019. Étude des pathogènes, des conditions physiologiques et pathologiques impliqués dans les mortalités anormales de moules (*Mytilus* sp.). Thèse de doctorat, Université Caen Normandie XI, 332 p.
- Charles, M., Bernard, I., Villalba, A., Oden, E., Burioli, E. A., Allain, G., Houssin, M. 2020. High mortality of mussels in northern Brittany—Evaluation of the involvement of pathogens, pathological conditions and pollutants. *Journal of Invertebrate Pathology*, 170, 107308.
- Cheikh, Y.B. 2017. Mécanismes de défense hématocytaires chez *Mytilus edulis* : interactions avec *Vibrio Splendidus* sp. et modulation du phénotype MXR par les contaminants environnementaux. Autre [q-bio.OT]. Normandie Université, 2017. Français. NNT : 2017NORMLH01 . tel-01703593
- Chipperfield, P. N. 1953. Observations on the breeding and settlement of *Mytilus edulis* (L.) in British waters. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 32(2), 449-476.
- Ciocan C., Sunila I., 2005. Disseminated neoplasia in blue mussels, *Mytilus galloprovincialis*, from the Black Sea, Romania. *Mar. Pollut. Bull.*, 50(11): 1335-1339, doi: 10.1016/j.marpolbul.2005.04.042

- Comité Régional de Conchyliculture Normandie et Mer du Nord. 2021. Effarouchement par les mytiliculteurs des goélands argentés, prédateurs de moules de bouchot sur les côtes du département de La Manche entre Janvier 2020 et Décembre 2020.
- Comité Régional de Conchyliculture Normandie et Mer du Nord ; Agence de l'eau Seine-Normandie. 2015. Étude sur la possibilité et les conditions d'ouverture des portes à flot de la Vire au regard des risques pour les usages et les infrastructures situés en amont des portes. 88pp.
- Comps, M., Grizel, H., & Papayanni, Y. 1982. Infection parasitaire causée par *Marteilia maurini* sp. chez la moule *Mytilus galloprovincialis*. In CIEM Conseil International pour l'Exploration de la mer.
- Couteaux-Bargeton M., 1953. Contribution à l'étude de *Mytilus edulis* L. parasité par *Mytilicola intestinalis* Steuer. ICES J. Mar. Sci., 19(1): 80-84, doi: <https://doi.org/10.1093/icesjms/19.1.80>
- Cramberlain, G. 1980. Méthode d'effrayant du Goéland argenté appliquée à la protection de la mytiliculture dans les côtes du Nord. Bulletin mensuel de l'Office National de la Chasse, spc. Sci. Tech. Nov. 1980 : 261 - 267.
- Cramp P., Simmons I. 1983 in Pons, 1992. Biologie de population du goéland argenté *Larus argentatus* et ressources alimentaires d'origine humaine. Cas de la colonie de Trébéron et de la fermeture de la décharge de Brest (Finistère). Thèse de doctorat, Université Paris XI, 220p.
- Darriba, S. 2017. Histopathological atlas: marine bivalve molluscs. 1st edition. Intecmar. Santiago de Compostela, Spain: Xunta de Galicia (Conselleria do Mar).
- De Kock, W.C., Kramer, K.J.M., 1994. Active biomonitoring (ABM) by translocation of bivalve molluscs. In: Kramer, K.J.M. (Ed.), Biomonitoring of Coastal Waters and Estuaries. CRC Press, Inc., Boca Raton, pp. 51-84.
- DeLong E.F, Preston CM, Mincer T, Rich V, Hallam SJ. 2006. Community genomics among stratified microbial assemblages in the ocean's interior. Science 311:496–503
- Diaz, R., M. A. Lardies, F. J. Tapia, E. Tarifeno & C. A. Vargas. 2018. Transgenerational effects of pCO<sub>2</sub>-driven ocean acidification on adult mussels *Mytilus chilensis* modulate physiological response to multiple stressors in larvae. Front. Physiol. 9:1349.
- Digiulio, R.T., Washburn, P.C., Wenning, R.J., Winston, G.W., Jewell, C.S., 1989. Biochemical responses in aquatic animals – a review of determinants of oxidative stress. Environmental Toxicology and Chemistry 8, 1103–1123.
- DREAL - Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement de Normandie. 2021. Bulletin de situation hydrologique Normandie, Juillet 2021.
- DREAL - Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement de Normandie. 2021. Bulletin de situation hydrologique Normandie, Août 2021.
- Duinker, A., Håland, L., Hovgaard, P., & Mortensen, S. 2008. Gonad development and spawning in one and two year old mussels (*Mytilus edulis*) from Western Norway. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 88(7), 1465-1473.

- Dubelaar, G. B., & Jonker, R. R. 2000. Flow cytometry as a tool for the study of phytoplankton. *Scientia Marina*, 64(2), 135-156.
- Elsner, N.O., Jacobsen, S., Thieltges, D.W. 2011. Alien parasitic copepods in mussels and oysters of the Wadden Sea. *Helgol Mar Res* 65, 299–307. <https://doi.org/10.1007/s10152-010-0223-2>
- Enriquez-Diaz, M.R. 2004. Variabilité et bioénergétique de la reproduction chez l'huître creuse *Crassostrea gigas*. PhD Thesis, Université de Bretagne Occidentale. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00000/1095/>
- FAO, Agriculture Organization of the United Nations. 2005. Vue générale du secteur aquacole national : France. Division des pêches de la FAO.
- FAO, Agriculture Organization of the United Nations. 2020. Aquaculture topics and activities. Aquaculture : Division des pêches de la FAO.
- Farré, M., & Barceló, D. 2003. Toxicity testing of wastewater and sewage sludge by biosensors, bioassays and chemical analysis. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 22(5), 299-310.
- Férard, J.B., Vasseur, P., Danoux, L., Larbaigt, G. 1983. Application d'un test d'inhibition de luminescence bactérienne à l'étude toxicologique d'effluents complexes et de substances chimiques. *Revue Française des Sciences de l'Eau*, 2, 221-237.
- Fly E.K., Hilbish T.J., Wetthey D.S., Rognstad R.L., 2015. Physiology and biogeography: The response of European mussels (*Mytilus* spp.) to climate change. *Am. Malacol. Bull.*, 33(1): 136-149, doi: 10.4003/006.033.0111
- François C., Garcia C., Lupo C., Travers M.A., Morga B., Tourbiez D., Faury N., Haffner P., Serpin D., Dubreuil C., Chollet B., Baillon L., Lapègue S., Renault T., 2015. Bilan 2014 du réseau Repamo -Réseau national de surveillance de la santé des mollusques marins. Ifremer.
- Gabbott, P. A. & B. L. Bayne. 1973. Biochemical effects of temperature and nutritive stress on *Mytilus edulis* L. *J. Mar. Biol. Ass. U.K.* 53:269–286.
- Goldberg, E.D., Koide, M., Hodge, V., Flegal, A.R., Martin, J.H., 1983. US Mussel Watch: 1977e1978 results on trace metals and radionuclides. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 16, 69e93
- Gosling E., 2003. *Bivalve Molluscs: Biology, Ecology and Culture*. Fishing News Books. E. Gosling, Oxford, 443 p
- Gouletquer P., Joly J.P., Le Gagneur E., Ruelle F., 1995. La mytiliculture dans la Manche : Biomasses en élevage et croissance de *Mytilus edulis* L. Ifremer.
- Grizel, H., & Tigé, G. 1973. La maladie de la glande digestive d'*Ostrea edulis* Linne. Actes CIEM, CM 1973/K:13. Presented at the «Comité des crustacés, coquillages et benthos». Retrieved from <https://archimer.ifremer.fr/doc/00000/5929/>
- Grizel, H., Comps, M., Bonami, J. R., Cousserans, F., Duthoit, J. L., & Le Pennec, M. A. 1974. Recherche sur l'agent de la maladie de la glande digestive de *Ostrea edulis* Linné. *Science et Pêche*, (240), 7-30.

- Grizel, H. 1985. Étude des récentes épizooties de l'huître plate *Ostrea edulis* Linne et de leur impact sur l'ostreiculture bretonne[PhD Thesis]. Université des Sciences et Techniques du Languedoc. Retrieved from <https://archimer.ifremer.fr/doc/00000/2581>
- Gruet Y., 2002. Reconnaissance de quelques espèces communes de crustacés (balanes et crabes) : au site mésolithique de Beg-er-Vil (Morbihan, France). *Rev. Archéom.*, 26 (1): 125-139, doi: 10.3406/arsci.2002.1028
- Guillou M. 1981. Les populations d'*Asterias rubens* L. (Echinodermata : Asteroidea) en baie de Douarnenez (Finistère). Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale.
- His E., Cantin C., 1995. Biologie et physiologie des coquillages. Ifremer.
- Ifremer, Laboratoire Environnement Ressources de Normandie. 2009. Qualité du Milieu Marin Littoral. Bulletin de la surveillance. Edition 2009. Départements : Seine Maritime, Eure, Calvados et Manche. RST/LERN/09-07. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00293/40393/>
- Jeon, M., Kang, J. C., & Lee, J. S. 2013. Concentration of heavy metal and alteration of reproductive and histological biomarkers of *Mytilus galloprovincialis* in Gamak Bay of the southern coast of Korea. *The Korean Journal of Malacology*, 29(1), 33-41.
- Jones, C. P., St. Gelais, A. T., Byron, C. J., Costa-Pierce, B. A., Smolowitz, R. M., Condon, M. E., Shippey, E. G. 2021. A Histopathological-Biochemical Health Assessment of Blue Mussel *Mytilus edulis*. *Journal of Shellfish Research*, 40(1), 77–92. <https://doi.org/10.2983/035.040.0108>
- Johnson, Z.I. , Martiny, A.C. 2015. Techniques for Quantifying Phytoplankton Biodiversity. *Annual Review of Marine Science*, 7(1), 299–324. doi:10.1146/annurev-marine-010814-015902
- Kamaishi, T., Miwa, S., Goto, E., Matsuyama, T., & Oseko, N. 2010. Mass mortality of giant abalone *Haliotis gigantea* caused by a *Francisella* sp. bacterium. *Diseases of aquatic organisms*, 89(2), 145-154.
- Kawahara, M., Kanamori, M., Meyer, G. R., Yoshinaga, T., & Itoh, N. 2018. *Francisella haliotica*, identified as the most probable cause of adductor muscle lesions in Yesso scallops *Patinopecten yessoensis* cultured in southern Hokkaido, Japan. *Fish Pathology*, 53(2), 78-85.
- Kent M.L., Elston R.A., Wilkinson M.T., Drum A.S., 1989. Impaired defense mechanisms in bay mussels, *Mytilus edulis*, with hemic neoplasia. *J. Invertebr. Pathol.*, 53(3): 378-386, doi: 10.1016/0022-2011(89)90103-1
- Kring, S.A., Figary, S.E., Boyer, G.L., Watson, S.B., Twiss, MR .2014. Rapid in situ measures of phytoplankton communities using the bbe FluoroProbe: evaluation of spectral calibration, instrument intercompatibility, and performance range. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 71(7): 1087-1095. <https://doi.org/10.1139/cjfas-2013-0599>
- Kwan T., Bolch C., 2015. Genetic diversity of culturable *Vibrio* In an Australian blue mussel *Mytilus galloprovincialis* hatchery. *Dis. Aquat. Organ.*, 116(1): 37-46, doi: 10.3354/dao02905
- Lambert L., 1952. Un parasite de la moule, le cop rouge ( *Mytilicola intestinalis* Steur). *Rev. Décologie - Terre Vie*, 0 (0): 80-94.

- Lang, W. H., & Dennis, E. A. 1976. Morphology and seasonal incidence of infection of *Proctoeces maculatus* (Looss, 1901) Odhner, 1911 (Trematoda) in *Mytilus edulis* L. *Ophelia*, 15(1), 65-75.
- Le Breton, J., & Lubet, P. 1992. Resultats d'une intervention sur une parasitose a *Proctoeces maculatus* (Trematoda, Digenea) affectant la mytiliculture de l'ouest Cotentin[Technical Report] 14, 107–118. Retrieved from <https://archimer.ifremer.fr/doc/00000/922/>
- Le Merrer, Y., Manach, S., Bizzozero, L. 2022. Suivi hydrologique et phytoplanctonique environnemental et sanitaire dans la masse d'eau Loire Large (GC46). Recommandations dans le cadre du suivi DCE Loire-Bretagne et du RePHY - sanitaire. ODE/LITTORAL/LER/MPL/22.07. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00756/86807/>
- Le Roux, F., Lorenzo, G., Peyret, P., Audemard, C., FIGUERAS, A., Vivarès, C., Berthe, F. 2001. Molecular evidence for the existence of two species of *Marteilia* in Europe. *Journal of Eukaryotic Microbiology*, 48(4), 449-454.
- Livingstone, D.R., 2003. Oxidative stress in aquatic organisms in relation to pollution and aquaculture. *Revue De Médecine Vétérinaire* 154, 427–430.
- Lubet P., 1973. Exposé synoptique des données biologiques sur la moule *Mytilus galloprovincialis* (Lamarck 1819)(FAO Rapports sur les pêches No. 88). FAO, Rome.
- Lubet P., 1974. La mytiliculture et son évolution récente. *Penn Ar Bed - Rev. Régionale Géographie Sci. Nat. Prot. Nat.*, 9 (77).
- Lubet P., Dardignac M.J., 1976. Technologie de la mytiliculture. *Haliotis*, 5 (0): 19.
- Marchand H.F.A. 1915. Les procédés actuels de la mytiliculture en France. In: *Annales de la Société linnéenne de Lyon*, tome 61, pp. 31-46. <https://doi.org/10.3406/linly.1915.4226>
- Markowitz, K. N., Williams, J. D., & Krause, M. K. 2016. Development of quantitative PCR assay for detection of the trematode parasite *Proctoeces maculatus* in the blue mussel *Mytilus edulis*. *Diseases of Aquatic Organisms*, 122(2), 125–136. <https://doi.org/10.3354/dao03072>
- Marteil L., 1976. La conchyliculture française -2e Partie -Biologie de l'huître et de la moule. *Rev. Trav. Inst. Pêch. Marit.*, 40(2): 149 —346.
- Metzger M.J., Reinisch C., Sherry J., Goff S.P., 2015. Horizontal Transmission of Clonal Cancer Cells Causes Leukemia in Soft-Shell Clams. *Cell*, 161(2): 255-263, doi: 10.1016/j.cell.2015.02.042
- Metzger M.J., Villalba A., Carballal M.J., Iglesias D., Sherry J., Reinisch C., Muttray A.F., Baldwin S.A., Goff S.P., 2016. Widespread transmission of independent cancer lineages within multiple bivalve species. *Nature*, 534(7609): 705-709, doi: 10.1038/nature18599
- Meyer, G. R., Lowe, G. J., Gilmore, S. R., & Bower, S. M. 2017. Disease and mortality among Yesso scallops *Patinopecten yessoensis* putatively caused by infection with *Francisella haliotidica*. *Diseases of Aquatic Organisms*, 125(1), 79-84.

- Miège, C., Budzinski, H., Jacquet, R., Soulier, C., Pelte, T., & Coquery, M. 2011. Polar organic chemical integrative sampler (POCIS): application for monitoring organic micropollutants in wastewater effluent and surface water. *Journal of Environmental Monitoring*, 14(2), 626-635.
- Mohri, H. 1956. Studies on the respiration of sea urchin spermatozoa. The cytochrome oxidase activity in relation to the dilution effect, *J. Exp. Biol.* 33, 330–337.
- Mubiana, V. K., Vercauteren, K., & Blust, R. 2006. The influence of body size, condition index and tidal exposure on the variability in metal bioaccumulation in *Mytilus edulis*. *Environmental Pollution*, 144(1), 272-279.
- Myrand, B., Guderley, H., & Himmelman, J. H. 2000. Reproduction and summer mortality of blue mussels *Mytilus edulis* in the Magdalen Islands, southern Gulf of St. Lawrence. *Marine Ecology Progress Series*, 197, 193–207.
- Normand, J., Louis, W. 2020. Etude du fonctionnement des zones Portes à flot de la Vire - Analyses des données acquises dans le cadre du suivi des effets liés à la manipulation des vanelles. Rapport IFREMER. 36 pp.
- Normand, J., Benabdelmouna A., Louis W., Grizon J. 2021. MYTILOBS Campagne 2019 - 2020, Réseau d'observation des moules d'élevage sur la côte Atlantique et dans la Manche. RST ODE/UL/LERN/21-07. Convention DPMA 2020 – IFREMER. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00750/86251/>
- OIE. 2012. Manual of Diagnostic Tests for Aquatic Animals 2017. Chapter 2.4.4. — Infection with *Marteilia refringens*.
- ONCFS, SRC Normandie-Mer du Nord, 2005a. Les oiseaux prédateurs de moules dans le département de la Manche. Synthèse technique, Analyse des moyens de lutte. 8-36.
- Oxborough, K., & Baker, N. R. 1997. Resolving chlorophyll a fluorescence images of photosynthetic efficiency into photochemical and non-photochemical components—calculation of qP and Fv/Fm-; without measuring Fo. *Photosynthesis research*, 54(2), 135-142.
- Regoli, F., Principato, G., 1995. Glutathione, glutathione-dependent and antioxidant enzymes in mussel, *Mytilus galloprovincialis*, exposed to metals under field and laboratory conditions: implications for the use of biochemical biomarkers. *Aquat. Toxicol.* 31, 143–164.
- Ritchies J., 1927. Reports on the prevention of the growth of mussels in submarine shafts and tunnels at the Westbank Electric Station, Portobello. *Trans. R. Scott. Soc. Arts* 19. (29 Dec. 1921), 1-20.
- Robert, S., & Le Moine, O. 2003. Expertise des élevages de moules après la canicule estivale: rapport final.
- Parvez, S., Venkataraman, C., & Mukherji, S. 2006. A review on advantages of implementing luminescence inhibition test (*Vibrio fischeri*) for acute toxicity prediction of chemicals. *Environment international*, 32(2), 265-268.
- Pérez-Cataluña A., Lucena T., Tarazona E., Arahal D.R., Macián M.C., Pujalte M.J., 2016. An MLSA approach for the taxonomic update of the Splendidus clade, a lineage containing several fish and shellfish pathogenic *Vibrio* spp. *Syst. Appl. Microbiol.*, 39(6): 361-369, doi:10.1016/j.syapm.2016.03.010
- Pernet, F., Lagarde, F., Le Gall, P, D'Orbcastel, E.R. 2014. Associations between farming practices and disease mortality of Pacific oyster *Crassostrea gigas* in a Mediterranean lagoon. *Aquac Environ Interact* 5:99–106.

- Pérez, K.B. 2012. Développement et validation de microbiotests en phase solide pour l'évaluation écotoxicologique de sédiments. Université de Lorraine, 2012. Français. ffNNT : 2012LORR0219ff. fftel-01749312
- Pepin, J. F. 2019. Mortalités massives de moules bleues dans les secteurs mytilicoles: description et facteurs liés. IFREMER.
- Petinay, S., Chataigner, C., & Basuyaux, O. 2009. Standardisation du développement larvaire de l'oursin, *Paracentrotus lividus*, pour l'évaluation de la qualité d'une eau de mer. *Comptes Rendus Biologies*, 332(12), 1104-1114.
- Petty, J. D., Huckins, J. N., Alvarez, D. A., Brumbaugh, W. G., Cranor, W. L., Gale, R. W., Furlong, E. T. 2004. A holistic passive integrative sampling approach for assessing the presence and potential impacts of waterborne environmental contaminants. *Chemosphere*, 54(6), 695-705.
- Poitras, E., & Houde, A. 2002. La PCR en temps réel: principes et applications. *Reviews in biology and biotechnology*, 2(2), 2-11.
- Quick, W. P., & Horton, P. 1984. Studies on the induction of chlorophyll fluorescence in barley protoplasts. II. Resolution of fluorescence quenching by redox state and the transthylakoid pH gradient. *Proceedings of the Royal society of London. Series B. Biological sciences*, 220(1220), 371-382.
- Romero A., Costa M., Forn-Cuni G., Balseiro P., Chamorro R., Dios S., Figueras A., Novoa B., 2014. Occurrence, seasonality and infectivity of *Vibrio* strains in natural populations of mussels *Mytilus galloprovincialis*. *Dis. Aquat. Organ.*, 108(2): 149-163, doi: 10.3354/dao02701
- Rocq, S. 2020. Etude sanitaire de la zone 50.04 « Utah Beach – Quinéville » - groupes 2 et 3 (coquillages bivalves fousseurs et non fousseurs). Rapport IFREMER.
- SAFEGE, ACTIMAR, & GINGER. 2013. Élaboration des profils de vulnérabilité des zones de production de coquillages de la baie des Veys. Phase 1 : Etat des lieux, Rapport général. 1-288.
- Samain, J.F., McCombie, H. 2008. Summer mortality of Pacific oyster *Crassostrea gigas*, the Morest project. Ifremer/Quæ Éditions, Versailles.
- Soletchnik P., Robert S., 2016. Éléments de connaissance sur la mortalité et la reproduction de la moule bleue (*Mytilus edulis*) sur la façade atlantique. Ifremer
- Stohs, S.J., Bagchi, D., 1995. Oxidative mechanisms in the toxicity of metal ions. *Free Radic. Biol. Med.* 18 (2), 321–336.
- Stohs, S.J., Bagchi, D., Hassoun, E., Bagchi, E., 2000. Oxidative mechanisms in the toxicity of chromium and cadmium ions. *J. Environ. Pathol. Toxicol. Oncol.* 19, 201–213.
- Timourian, H. , Watchmaker, G. 1977. Assay of sperm motility to study the effects of metal ions, in: H. Drucker, E. Wildung (Eds.), *Biological Implications of Metals in the Environment*, Proc. 15th Annual Hanford Life Sciences Symposium, Richland, Washington, in: ERDA Symposium Series, vol. 42, 1977, pp. 523-535.
- Thompson, R. J. 1984. Production, reproductive effort, reproductive value and reproductive cost in a population of the blue mussel *Mytilus edulis* from a subarctic environment *MARINE ECOLOGY-PROGRESS SERIES*. 22(16), 249-257.

- Travers M.A., Morga B., Godfrin Y., Garrigues M., Garcia C., Dubreuil C., Tourbiez D., Chollet B., Osta Amigo A., Lupo C., Renault T., 2016a. A bacterial suspect implicated in *M. edulis* mortalities in France ? 1st International Symposium on the Advances in Marine Mussel Research (AMMR).
- Tripp, M. R., & Turner, R. M. 1978. Effects of the trematode *Proctoeces maculatus* on the mussel *Mytilus edulis*. In *Invertebrate Models for Biomedical Research*, 73-84.
- Venter JC, Remington K, Heidelberg JF, Halpern AL, Rusch D. 2004. Environmental genome shotgun sequencing of the Sargasso Sea. *Science* 304:66–74
- Vezzulli L., Stagnaro L., Grande C., Tassistro G., Canesi L., Pruzzo C., 2018. Comparative 16SrDNA Gene-Based Microbiota Profiles of the Pacific Oyster (*Crassostrea gigas*) and the Mediterranean Mussel (*Mytilus galloprovincialis*) from a Shellfish Farm (Ligurian Sea, Italy). *Microb. Ecol.*, 75(2): 495-504, doi: 10.1007/s00248-017-1051-6
- Viarengo, A., Canesi, L., Pertica, M., Poli, G., Moore, M.N., Orunesu M., 1990. Heavy metal effects on lipid peroxidation in the tissues of *Mytilus galloprovincialis*. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Comparative Pharmacology*, 97(1), 37-42.
- Walne, R., and R. Mann, 1975. Growth and biochemical composition in *Ostrea edulis* and *Crassostrea gigas*. *Proc. 9th Europ. Mar. Biol. Symp*, 587-607.