

COSELMAR



COMPRÉHENSION DES SOCIO-ÉCOSYSTÈMES LITTORAUX ET MARINS
POUR LA PRÉVENTION ET LA GESTION DES RISQUES

Un programme présenté par la fédération de recherche CNRS
Institut Universitaire Mer et Littoral



Bilan scientifique 2013-2017



UNIVERSITÉ DE NANTES





COSELMAR



Bilan scientifique 2013-2017

- p. 4 Présentation du projet
- p. 5 L'équipe de coordination de COSELMAR
- p. 6 COSELMAR en chiffres
- p. 8 Axe 1
Biodiversité et environnement littoral marin
- p. 17 Axe 2
Exploitation raisonnée des ressources marines
- p. 25 Axe 3
Nouveaux risques et nouveaux usages
de l'espace maritime et littoral
- p. 32 Axe 4
Axe intégrateur
- p. 40 OCEANEXT
- p. 42 Les Éclaireurs

COSELMAR



COMPRÉHENSION DES SOCIO-ECOSYSTÈMES LITTORAUX ET MARINS

*Un programme présenté par la fédération de recherche CNRS
Institut Universitaire Mer et Littoral.*

Le projet COSELMAR, financé par la Région des Pays de la Loire à hauteur de 2,1 M€ pour une durée de 4 ans, a commencé officiellement le 7 janvier 2013.

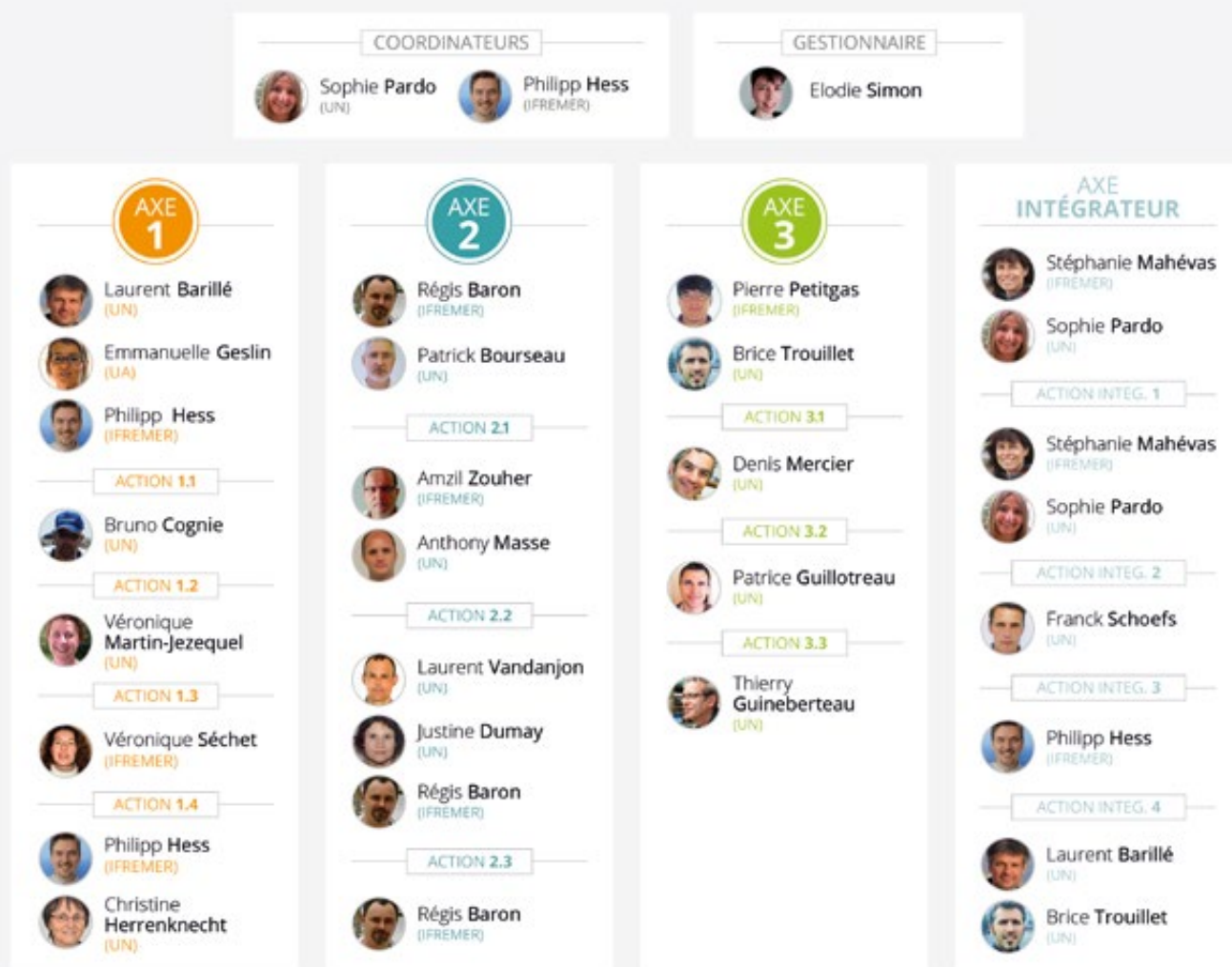
Cinq unités de recherche de l'IFREMER et onze laboratoires de l'Université de Nantes et un laboratoire de l'Université d'Angers, appuyés par des partenariats académiques et industriels français et internationaux collaborent afin d'apporter une meilleure compréhension des écosystèmes littoraux et marins

et des ressources associées, ainsi qu'une réflexion sur la gestion et la prévention des risques engendrés par les facteurs naturels et anthropiques.

L'objectif principal de COSELMAR est d'intégrer des travaux scientifiques interdisciplinaires des sciences humaines et sociales, environnementales et de l'ingénieur afin de construire une véritable expertise sur les risques en milieu littoral et marin.



L'Equipe de coordination de COSELMAR



Le présent rapport a été rédigé par l'équipe de coordination et par T. Lebeau (UN), V. Turpin (UN) et F. Mondeguer (Ifremer).

COSELMAR en chiffres

BUDGET
2,1 M€



DURÉE DU PROJET



4 ANS

IFREMER

5 LABORATOIRES



UNIVERSITÉ DE NANTES

11 LABORATOIRES



UNIVERSITÉ D'ANGERS

1 LABORATOIRE



PARTENAIRES ASSOCIÉS

12 LABORATOIRES





169

CHERCHEURS
impliqués



6 THÈSES



3 TECHNICIENS
OU INGÉNIEURS
embauchés sur le projet



10 CHERCHEURS
POST-DOCS



CONFÉRENCE
INTERNATIONALE
en juin 2016
OCEANEXT



ÉVÈNEMENTS ORGANISÉS
ET PRÉVUS À CE JOUR



SÉMINAIRES
INTER-DISCIPLINAIRES



ÉCOLES D'ÉTÉ
INTERNATIONALES
organisées en 2015



Biodiversité et environnement littoral marin

Les microalgues sont à la base du fonctionnement des réseaux trophiques pélagique et benthique. Elles jouent ainsi un rôle majeur dans les systèmes côtiers qui ont un fonctionnement complexe et des interactions multiples entre les organismes et les facteurs physico-chimiques. Elles sont utilisées par des organismes filtreurs comme les bivalves et représentent une part très significative de leur alimentation.

Cependant, les pressions anthropiques affectent ces écosystèmes côtiers par des changements de biomasse et de structure des communautés algales, par exemple des proliférations de microalgues toxiques, qui peuvent s'accumuler dans les espèces consommées par l'homme et présenter un risque pour la santé publique.

Dans le compartiment benthique, on rencontre dans les vasières intertidales des peuplements de microalgues regroupées sous le terme de microphytobenthos. Ces peuplements ont fait l'objet de premières approches descriptives, mais leur rôle fonctionnel et leurs interactions avec de nombreux maillons de l'écosystème restent à élucider.

Que ce soit pour les microalgues dans la colonne d'eau ou les vasières et les espèces microphytobenthiques, nous avons souhaité mettre l'accent sur la dimension fonctionnelle de ces organismes : rôle trophique, production de toxines, interactions biotiques (allélopathie, liens avec des espèces invasives comme les huîtres sauvages), interactions abiotiques (liens avec les flux de nutriments).

L'axe 1 était structuré en 4 actions complémentaires.

❖ ACTION 1.1

Rôle des microalgues dans le fonctionnement des vasières intertidales : interactions avec la biodiversité benthique

Cette action était basée sur de nombreuses campagnes de terrain, et son originalité reposait sur l'analyse des interactions spatiales structurant les organismes d'une vasière intertidale, et utilisant la télédétection satellitale. L'hypothèse de travail de cette action postulait que les récifs d'huîtres sauvages structureraient les peuplements de microalgues benthiques et le réseau trophique associé par un contrôle de type Top-down. Cette analyse a été complétée par celle des interactions biotiques microalgues/consommateurs primaires et l'étude des mécanismes de bio-turbation. Le statut de l'huître sauvage en tant qu'espèce invasive a également été pris en compte au niveau juridique.

SYNTHÈSE DE L'ACTION 1.1

Les écosystèmes exploités par l'Homme sont extrêmement complexes. Il est nécessaire de comprendre les effets des stress anthropiques sur la stabilité de ces écosystèmes et les services qu'ils rendent, à travers par exemple l'aquaculture et la pêche. Les espèces invasives sont souvent évoquées pour leurs effets (positifs ou négatifs) sur les communautés marines, mais les espèces ingénieurs (e.g. l'huître creuse *Crassostrea gigas*) ont des impacts particulièrement importants sur leur écosystème hôte. Par exemple, les élevages et récifs d'huîtres sont associés à des développements de biofilms de microalgues (microphytobenthos, MPB), pouvant atteindre de très fortes biomasses. Il s'agit des producteurs primaires dominants dans les vasières intertidales, bien que le lien exact avec les huîtres ne soit pas clairement compris.

Dans le cadre de l'action 1.1 du programme COSELMAR, nous avons réalisé une étude de type BACI (Before After Control Impact) avec élimination d'un récif d'huîtres sauvages. Un échantillonnage à haute résolution spatiale, correspondant à une zone de plus de 750 m² a été réalisé au voisinage immédiat d'un récif d'huîtres sauvages, dans la baie de Bourgneuf (France). Nous avons échantillonné la répartition spatiale des microalgues benthiques, de la macrofaune comme les bivalves, des gastéropodes et des annélides, ainsi que des paramètres environnementaux liés au sédiment. Nous avons alors utilisé la cartographie géostatistique et des tests de corrélation spatiale afin d'établir si les schémas de répartition étaient vrais ou non. Notre hypothèse était que la présence des huîtres permettait le développement de fortes biomasses de microalgues.

Initialement, les échantillons au voisinage des récifs d'huîtres révèlent de fortes biomasses de MPB (\rightarrow Fig. 1A) et des teneurs en matière organique du sédiment élevées. Cela suggère que les huîtres ont une influence directe sur les communautés des vasières, via un enrichissement du milieu par leur production de fèces et de pseudofèces. Ce mécanisme peut représenter un moyen par lequel les huîtres stimuleraient leur propre nourriture et par ce biais également leur propre biomasse. Cet aspect apparaît clairement comme favorable à l'ostréiculture. Cependant, d'autres processus semblent agir également. Par exemple, les huîtres peuvent perturber localement l'hydrologie, conduisant à une augmentation des dépôts de sédiment, de nutriments et de microalgues.

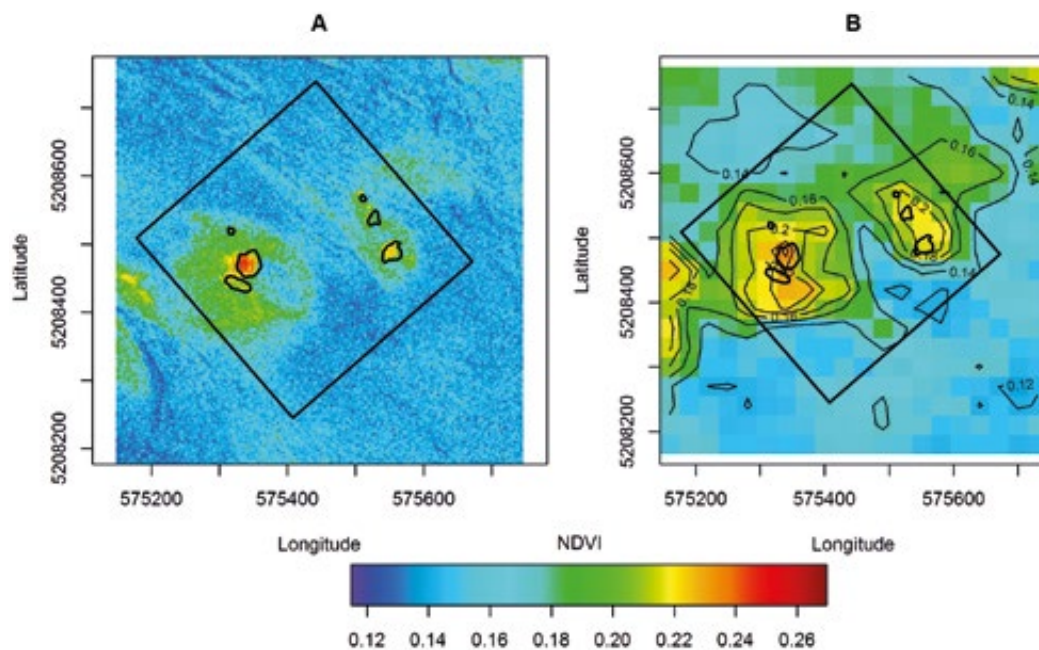


Figure 1. Biomasses microalgales estimées par un indice de végétation (NDVI) à partir d'images satellitales au cours de l'étude, A) été 2013, avant la manipulation expérimentale de destruction d'un récif d'huîtres et B) été 2014, après la manipulation. Les cartes de chaleur présentent les fortes valeurs en couleurs chaudes. Le carré noir délimite la grille d'échantillonnage sur le terrain. Dans ce carré les zones détournées en noir correspondent aux récifs d'huîtres. La projection est en WGS84 UTM30.

Les récifs d'huîtres affectent également la biodiversité et les biomasses animales de la vasière (\rightarrow Fig. 2A) dans un rayon de quelques dizaines de mètres. Il y a absence d'individus de grande taille de chaque espèce et il existe une relation négative entre les abondances d'espèces consommatrices de microalgues et celles des microalgues elles-mêmes, alors

que nous nous attendions au résultat contraire. Cela suggère que les huîtres exerceraient localement un contrôle des assemblages animaux. Nous faisons l'hypothèse qu'il s'agirait d'un contrôle indirect en fournissant un abri aux prédateurs (tels les crabes) de la macrofaune benthique des vasières.

Les huîtres convertiraient ainsi un système contrôlé par la disponibilité en microalgues (bottom-up) en un système contrôlé par des prédateurs efficaces (top-down). Cette modification de la chaîne trophique avec passage d'une prédation par les poissons et les oiseaux à une prédation par les crabes, pourrait constituer une menace pour les pêcheries locales et les efforts de conservation des oiseaux.

Etant donné que l'équilibre entre ces deux mécanismes d'impact des huîtres sur les communautés des vasières est important pour les parties prenantes, nous avons manipulé la zone d'échantillonnage afin de récolter des indices de l'existence de l'un ou l'autre des processus. Un récif d'huîtres (sur la droite de chaque figure, i.e. à l'est) a donc été éliminé par crémation avec de la paille, neuf mois après l'échantillonnage initial. Trois mois plus tard, le même design d'échantillonnage a été utilisé pour comparer toutes les variables avec un récif en moins.

Une augmentation globale de l'indice de végétation NDVI (estimateur de la biomasse de microalgues) suggère une augmentation globale des biomasses microalgales. Plus notablement, le pattern originel (2013) de répartition des biomasses microalgales décroissant avec la distance aux récifs (→ Fig. 2A) ne se maintient que pour le récif non manipulé. Cela suggère que l'élimination des huîtres en serait la cause. La relation entre la macrofaune benthique et les microalgues disparaît complètement, pour les deux récifs, alors qu'elle était très forte avant la crémation. Par exemple, un petit bivalve fouisseur *Macoma balthica*, voit sa biomasse passer de 70.3 à 0.7 g m⁻² et une espèce plus grosse, *Scrobicularia plana*, de 92.2 à 1.6 g m⁻² (dans les deux cas la différence est hautement significative). Ces changements indiquent que la biomasse de macrofaune a subi un effet global, probablement lié à la méthode d'élimination du récif.

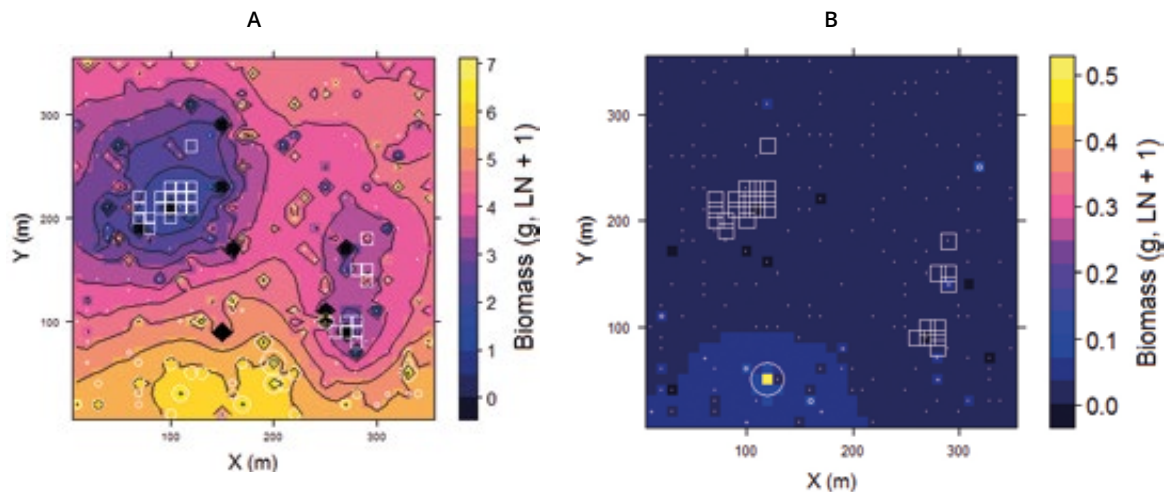


Figure 2. Cartes géostatistiques des biomasses du bivalve *Macoma balthica*, autour des récifs d'huîtres (les carrés blancs indiquent la localisation des récifs d'huîtres) A) avant (2013), et B) après (2014), l'élimination d'un récif. Les cartes de chaleur présentent les fortes valeurs en couleurs chaudes, avec une barre d'échelle log-transformée.

Nous avons conclu que l'huître Pacifique avait de multiples effets directs et indirects sur les communautés des vasières, avec à la fois des bénéfices et des menaces pour les systèmes anthropisés. Notre travail aide à mettre en évidence le réel impact pour l'Homme de l'invasion des vasières intertidales par l'huître Pacifique. En quantifiant la large influence

que cette espèce peut avoir sur le milieu et en clarifiant les processus, notre travail aide à informer les instances impliquées dans la gestion locale, nationale et internationale de l'impact de cette espèce invasive. Cet aspect est particulièrement important dans un contexte de changement global favorisant cette invasion.

❖ ACTION 1.2

Production primaire des compartiments pélagique et benthique en milieu côtier : autotrophie et hétérotrophie des diatomées

Cette action était basée sur des mesures de laboratoire portant sur l'hétérotrophie des microalgues benthiques. Elle est très complémentaire de la précédente dans la mesure où elle s'intéresse aux processus susceptibles d'expliquer les structures spatiales des organismes peuplant une vasière, en décrivant la nature de leurs interactions biotiques. Son originalité est notamment liée à la prise en compte de rétroactions entre les producteurs primaires du microphytobenthos et les consommateurs primaires, comme les bivalves suspensivores et les oiseaux limicoles. Des expériences ont été menées à partir des produits de l'excrétion particulaire et dissoute

d'huîtres et d'oiseaux limicoles, pour vérifier si les microalgues benthiques avaient la capacité d'utiliser directement des éléments organiques dissous rejetés par ces organismes.

SYNTHÈSE DE L'ACTION 1.2

Les milieux côtiers anthropisés sont caractérisés par des flux importants et diversifiés de nutriments qui soutiennent la production primaire. Divers contrôles de cette production existent par ailleurs avec la prédation par les échelons secondaires, ou par l'interférence d'autres microorganismes. Nous avons ainsi montré la complexité de la prédation des microalgues en présence de leurs consommateurs principaux (oiseaux limicoles, huîtres, foraminifères) (Jauffrais et al. 2015, 2016a&b) et les régulations de leur croissance par les bactéries commensales (Jauffrais et al. 2017). L'ensemble de ces flux et relations détermine le succès et le maintien des microalgues dans ces systèmes (→ Fig. 3).

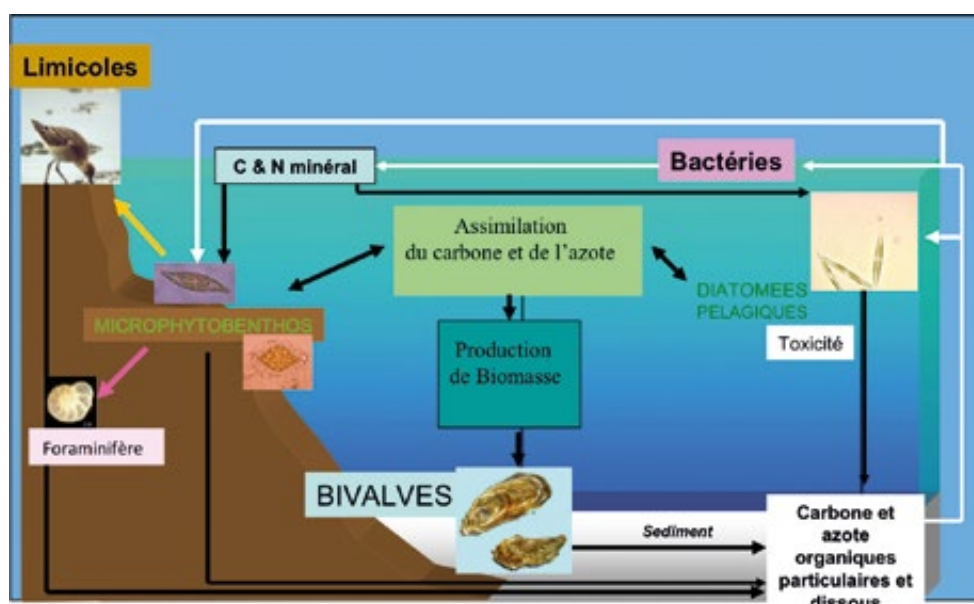


Figure 3. Représentation schématique des flux de carbone et d'azote entre les échelons primaires et secondaires, en zone côtière marine.

Parmi les nutriments de ces systèmes, l'azote tient une place primordiale pour la croissance des microalgues, et on considère classiquement que les nitrates et l'ammonium en sont les composantes majeures. Pourtant de nombreuses sources organiques sont susceptibles d'être assimilées et sont aussi présentes en quantité non négligeable dans

ces milieux. Nous avons ainsi montré la diversité et l'importance des sources d'azote minérales ou organiques qui peuvent soutenir la croissance du microphytobenthos (Jauffrais et al. 2015, 2016a ; Rodriguez, 2015) (→ Fig. 4). Outre les sources minérales (nitrates et ammonium), les sources organiques comme l'urée et divers acides aminés (glycine, glutamine, sérine,

arginine) peuvent permettre une production non négligeable de biomasse (→ Fig. 4A). Certaines formes (urée) accélèrent par ailleurs le taux de croissance en comparaison du taux obtenu avec la source classique (nitrates) (→ Fig. 4B). Nous avons aussi montré que des phénomènes de rétroaction des prédateurs (oiseaux limicoles, huîtres) sur le microphytobenthos peuvent exister, par la stimulation de la croissance. Les microalgues benthiques utilisent l'azote provenant des fèces d'oiseaux pour leur production de biomasse. De même les fèces et pseudo-fèces et certains composés produits par les huîtres (telle la taurine) sont des sources non négligeables

d'azote pour la croissance. Ces sources peuvent même être aussi/plus performantes que les nitrates, pour la biomasse produite (taurine → Fig. 4A) et le taux de croissance (fèces d'oiseaux limicoles → Fig. 4B)

Ces résultats dessinent un schéma des relations entre les échelons primaire et secondaire des systèmes côtiers plus complexe que la simple régulation bottom-up de la biomasse microalgale par ses prédateurs, puisqu'un potentiel de régulation top-down existe aussi, grâce aux composés azotés produits par les producteurs secondaires et utilisés par l'échelon primaire pour sa croissance.



Figure 4. Pourcentages de la biomasse (A) et du taux de croissance (B) obtenus chez la diatomée *Entomoneis paludosa* cultivée avec différentes sources d'azote minérales ou organiques. La biomasse et le taux de croissance obtenus avec les nitrates sont considérés comme les standards à 100%.

❖ ACTION 1.3 Toxicité de *Dinophysis acuminata* et mixotrophie.

Cette action s'est intéressée au dinoflagellé *Dinophysis acuminata* responsable d'intoxications de type diarrhéique chez des consommateurs de moules et qui produit des efflorescences régulières sur le littoral des Pays de la Loire. Cette espèce est caractérisée par une physiologie très particulière puisqu'elle acquiert sa capacité de photosynthèse en séquestrant les plastides que sa proie, un cilié *Mesodinium rubrum*, a acquis en capturant des petites microalgues des cryptophytes du genre *Teleaulax*. L'originalité de cette action a été de mettre en culture ces organismes afin de pouvoir nourrir *Dinophysis* avec sa proie principale et d'étudier l'effet de cette mixotrophie et de la variation de l'irradiance sur la physiologie et la production de toxines.

SYNTHÈSE DE L'ACTION 1.3

Détermination des profils toxiques de *D. acuminata* et *D. sacculus* en culture. Les profils toxiques sont très différents entre les deux espèces puisque notre clone de *D. acuminata* ne produit que de l'acide okadaïque (28.8pg par cellule) alors que l'acide okadaïque n'a été retrouvé qu'en très faible quantité chez *D. sacculus* qui synthétise majoritairement de la pecténotoxine-2 (→ Fig. 5). Ce profil constitué en majorité de pecténotoxines a été retrouvé dans les nouveaux isollements de 2016 de *Dinophysis sacculus* provenant du bassin d'Arcachon mais également dans *D. sacculus* de l'étang de Thau.

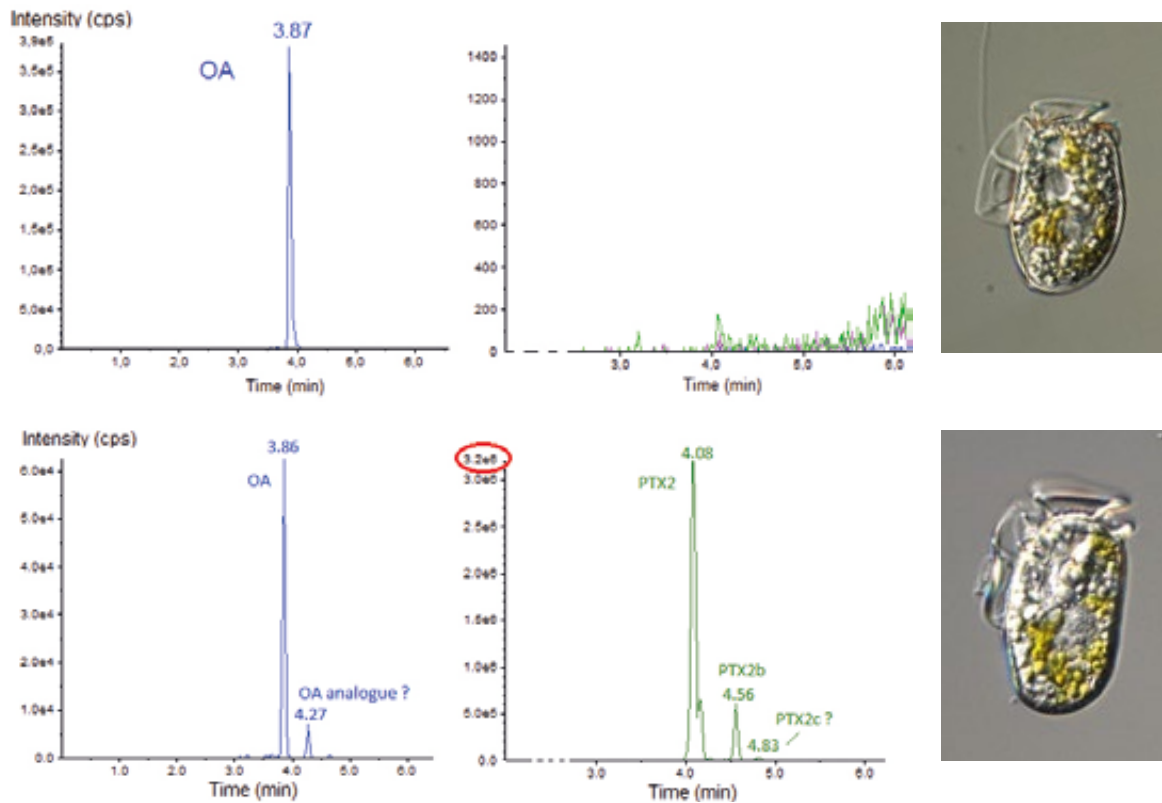


Figure 5. LC-MS/MS Chromatogrammes de culots cellulaires de *Dinophysis acuminata* (haut) et *D. sacculus* (bas).

Croissance et photo-acclimation du cryptophyte *Hemiselmis* sp. Les conditions de croissance contrôlent la physiologie des différents organismes. Nous avons cultivé le cryptophyte *Hemiselmis* sp. de la Baie de Vilaine à différents niveaux de limitation azotée en chémostat et à 3 intensités lumineuses en culture semi-continue. Nous avons étudié plusieurs aspects de la physiologie de ce cryptophyte (taux de croissance, taille, composition pigmentaire, carbone et azote organique, activité du photosystème 2, PSII). Les réponses physiologiques à la disponibilité en azote et en lumière sont très différentes. L'activité du PSII augmente avec l'intensité lumineuse alors qu'elle n'est pas affectée par la disponibilité en azote, ce qui montre que ce n'est pas un bon indicateur de la limitation azotée, de l'activité photosynthétique ou même de la croissance. La limitation azotée provoque une

diminution massive du contenu en phycoérythrine (PE) alors que celle-ci n'est pas affectée par la lumière.

Influence de la nutrition sur la croissance et la physiologie de *Dinophysis sacculus*. Nous avons aussi étudié l'influence de la nutrition sur la croissance et la physiologie de *Dinophysis sacculus*. Nous avons montré que *Dinophysis sacculus* n'est pas capable de croître en l'absence de proie (→ Fig. 6). Pourtant, cette espèce conserve des plastides fonctionnels en absence de proie. Nous avons aussi montré que *Dinophysis* était capable de survivre de très longues périodes sans proie, et de croître à nouveau dès que les proies redeviennent disponibles. Ces résultats permettront de mieux comprendre la répartition spatio-temporelle de *Dinophysis* dans le milieu naturel.

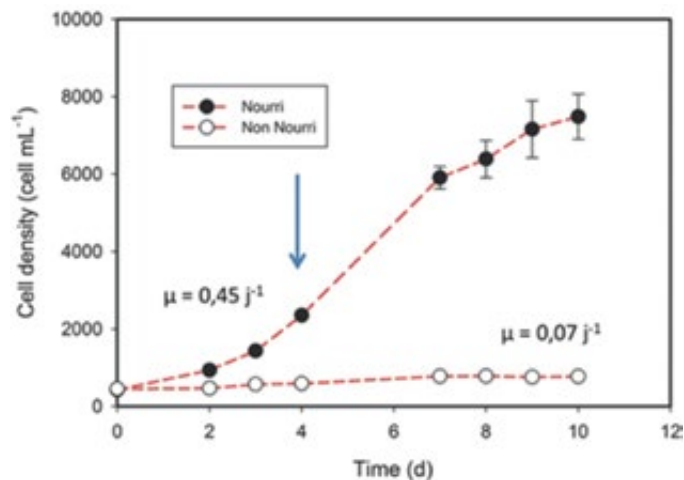


Figure 6. Croissance de *Dinophysis sacculus* en fonction de la présence de proie.

Influence de la lumière sur la croissance et la physiologie de *Dinophysis sacculus*.

À ce jour deux niveaux d'irradiance sont testés 80 (LL) et 200 (HL) $\mu\text{mole m}^{-2} \text{s}^{-1}$, sur les trois organismes de la chaîne trophique de *Dinophysis sp.* Après une période d'acclimatation de deux semaines, les cultures de *Dinophysis* ont été inoculées à une concentration de 500 cellules mL^{-1} et ont été nourries tous les jours pendant cinq jours avec un ratio d'une cellule de *Mesodinium* pour une cellule de *Dinophysis*. (Ces conditions étant identiques à celles de l'expérience nutrition précédente). Désirant étudier plusieurs aspects de la physiologie de *Dinophysis sacculus* (taux de croissance, taille, composition pigmentaire, carbone et azote organique, activité du photosystème 2, PSII), des échantillons ont été prélevés pour l'analyse des pigments liposolubles (chlorophylle a, c2, alloxanthine, monadoxanthine, crocoxanthine et alpha-carotène), des phycobilliprotéines, des toxines (acide okadaïque et pecténotoxines) mais également des métabolites cellulaires. L'activité du photosystème 2 des trois organismes de la chaîne trophique de *Dinophysis* est également suivie à basse et haute lumière afin d'améliorer la compréhension de ce mécanisme complexe de kleptoplastidie et sa temporalité.

❖ ACTION 1.4

Chimiodiversité des phycotoxines

Cette action a traité de la chimiodiversité appréhendée à l'aide d'outils métabolomiques qui ont été développés en s'appuyant sur les techniques de la chromatographie liquide couplée à la spectrométrie

de masse haute résolution (LC/HRMS), sur l'échantillonnage passif et le criblage des banques de données des composés naturels marins. Une méthode multitoxines LC/HRMS a été mise au point pour comparer l'impact de différentes matrices environnementales sur ce criblage. Une base de données a été spécifiquement créée pour les toxines algales afin de faciliter le criblage rapide de ces toxines dans une diversité de matrices (échantillons passifs, mollusques bivalves, poissons et autres fruits de mer). Cette approche a contribué à mieux estimer les risques posés par les métabolites algaux bioactifs.

SYNTHÈSE DE L'ACTION 1.4

Développement d'une base de données sur les toxines algales.

Une revue systématique de la littérature sur les évolutions à l'échelle mondiale des micro-algues toxiques a été conduite et publiée en tant qu'ouvrage (Lassus et al., 2016). Sur cette base, les toxines produites par ces organismes ont été répertoriées et entrées dans une base de données. Cette base de données permet de confronter des résultats d'analyse non-ciblée décrite ci-dessous à des connaissances de la littérature à l'échelle mondiale. La base contient les données sur les composés (toxines) telles que leur masse exacte, leur structure et des données spectrales autant que possible. La base de données contient plus de 500 toxines et existe également dans un format de logiciel intégré avec le fournisseur d'instruments AGILENT, ce qui permet de cribler un échantillon rapidement pour sa teneur en toxines algales.

Développement d'une méthode d'analyse non-ciblée pour les toxines algales basée sur la spectrométrie de masse haute résolution. La méthode développée dans le cadre de ce projet est basée sur la chromatographie liquide couplée à la spectrométrie de masse haute résolution (technologie hybride quadripôle - temps-de-vol), une technique reconnue

pour sa spécificité et pour permettre d'analyser un échantillon sans connaissance préalable, c'est-à-dire dans un mode non-ciblé. Cette méthode a été validée en interne pour les toxines lipophiles connues (Zendong et al, 2014 et 2015), les étalons disponibles sont bien séparés et détectés par cette méthode (→ Fig. 7).

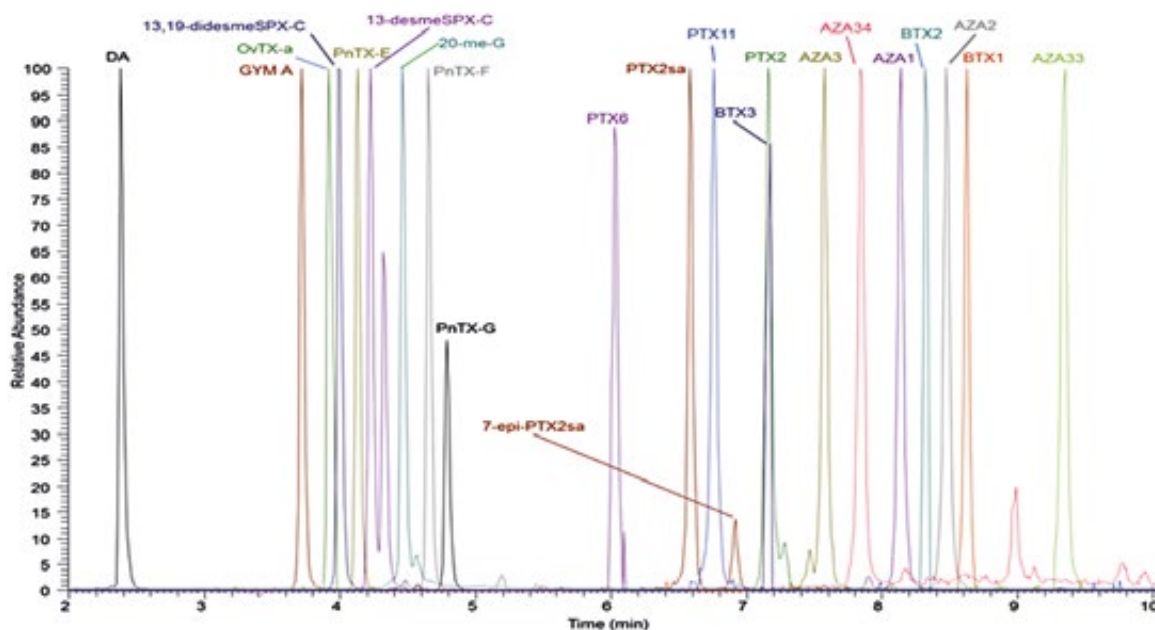


Figure 7. Séparation chromatographique des toxines lipophiles connues par la méthode d'analyse non-ciblée basée sur la spectrométrie de masse haute résolution.

Comparaison de spectromètres de masse et des effets de matrice pour les matrices biologiques et celles d'échantillonneurs passifs. La comparaison de différents spectromètres de masse a montré que les spectromètres de masse haute résolution de dernière génération ont maintenant une sensibilité suffisante pour détecter la plupart des toxines lipophiles, en tout cas celles réglementées explicitement en Europe (Zendong et al., 2015). La méthode a été appliquée pour l'analyse de différents échantillons, elle a notamment été mise au point pour l'analyse des échantillons de captage passif des toxines dans l'eau de mer. Cette approche de captage passif permet de simplifier la matrice de deux manières : (i) l'échantillonneur passif contient moins de composés de matrice que les matrices biologiques, telles que les moules ou les huîtres et (ii) les métabolites algaux ne sont pas transformés dans les échantillonneurs passifs alors qu'ils le sont par les mollusques bivalves traditionnellement analysés. Ce dernier point permet

de plus facilement relier les toxines trouvées aux organismes producteurs, ainsi le projet a pu mettre en évidence l'occurrence de toxines à action rapide dans l'étang d'Ingril, en Méditerranée (Zendong et al., 2014). La simplification de la matrice résulte également dans des effets de matrice réduits par rapport à l'analyse classique des mollusques bivalves, ce qui augmente la fiabilité de cette approche. Une dernière étude sur les facteurs de réponse des analogues de toxines lipophiles en spectrométrie de masse reconforte également cette approche (Zendong et al., 2017).

Applications de la technologie développée en France et en Afrique. L'approche combinée d'analyse non-ciblée (HRMS) et échantillonnage passif a été appliquée à différents environnements côtiers, notamment en France (→ Fig. 8) et au Nigéria.

Les études en France et au Nigéria sont cohérentes et montrent que chaque site peut être différencié

chimiquement de sites voisins et que chaque semaine se différencie chimiquement de la précédente. Cela met en évidence les changements rapides de la colonne d'eau dans les environnements côtiers (Zendong et al., 2016a et b). Au Nigéria on a pu très nettement distinguer avec ces analyses non-ciblées la saison de pluie de la saison sèche et

les eaux côtières influencées par l'effluent du Niger des environnements plus salins. L'acide okadaïque a été pour une première fois mis en évidence au Nigéria (Zendong et al., 2016a). Grâce à l'échantillonnage en parallèle de la colonne d'eau, cette toxine a pu être reliée à la présence de *Dinophysis caudata*.

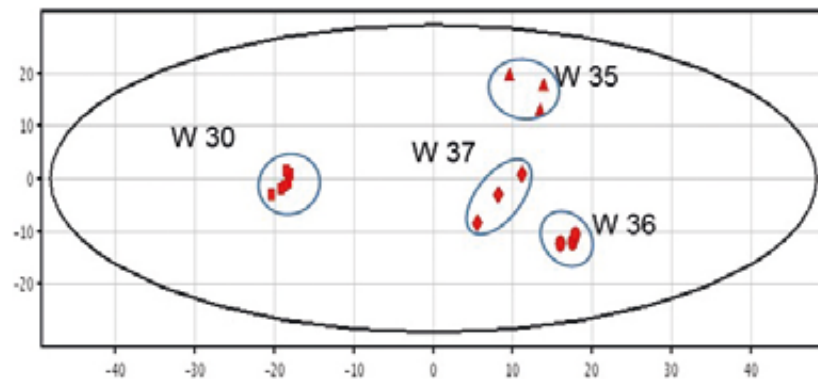


Figure 8. Analyse des composantes principales de données issues d'analyse non-ciblée par spectrométrie de masse haute résolution d'échantillonneurs passifs en provenance du Scoré (près de Concarneau, Bretagne). Les analyses de multiples échantillons de chaque semaine (été 2013) montrent que les eaux côtières de chaque semaine se différencient à cet endroit (dû à une efflorescence de *Dinophysis* en semaine 35).

Figure 9. travaux pratiques sur la vasière lors de l'école d'été de septembre 2015 pour illustrer différentes méthodes d'échantillonnage.



AXE 2

Exploitation raisonnée des ressources marines

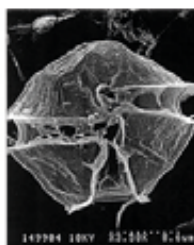
Le contexte de l'axe 2 est l'exploitation raisonnée des ressources marines, l'effort de recherche au sein de COSLEMAR ayant porté sur la prévention de risque pour la santé ou pour l'environnement (actions 2.1 et 2.2) ou à développer des outils d'analyse de ces risques (actions 2.3).

❖ ACTION 2.1 Production d'eau de mer salubre en période d'efflorescence algale

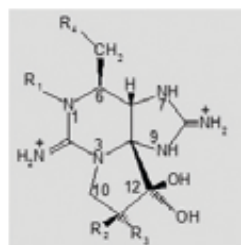
En période d'efflorescence algale, l'eau de mer peut être particulièrement chargée en matières particulaires, colloïdales et polymériques (cellules microalgues, polysaccharides excrétés). Elle peut également contenir des toxines dans le cas de certaines souches comme *Alexandrium sp.* (→ Fig. 10A) qui produisent et relarguent des toxines de type saxitoxine également appelées PSP (toxines paralysantes, → Fig. 10B) à l'origine de nombreuses interdictions de

commercialisation de coquillages. On cherche donc ici à prévenir un risque pour la santé dans le cadre de la production d'eau douce ou d'eau d'alimentation de bassins aquacoles à partir d'eau de mer contaminée. Il s'agit donc d'étudier les performances de rétention des microalgues toxiques ou de leurs toxines, ainsi que le colmatage des membranes et des filtres granulaires qui ont pour rôle le prétraitement de l'eau contaminée. Ce colmatage pourrait entraîner une perte d'exploitation et engendrer également un coût économique pour les filières concernées, voire un risque de désorganisation dans le cas de la conchyliculture.

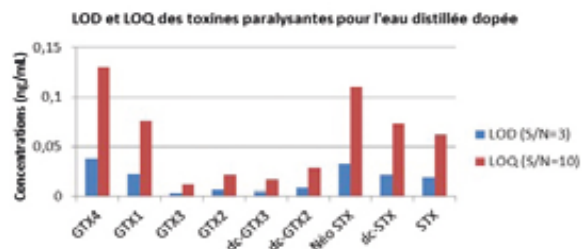
Le travail a été mené en collaboration entre les laboratoires PHYC de l'Ifremer (analyse et mise en œuvre des toxines) et GEPEA de l'Université de Nantes (filtration granulaire et filtrations membranaires. Il a porté d'abord sur la mise au point d'une méthode de quantification de toxines PSP dissoutes dans de l'eau de mer, afin de pouvoir mesurer les concentrations en toxines tout au long de la chaîne de dessalement de l'eau de mer. Il s'agissait d'un point critique de



a) *Alexandrium spp.*
microalgues toxiques



Les toxines paralysantes PSP du
groupe des Saxitoxines,
hydrosolubles et thermostables



Limites de détection LOD et de quantification LOQ
des analogues PSP testées

Figure 10. A) une espèce de micro-algue toxique, B) une de leurs toxines et C) les limites de détection et de quantification des toxines paralysantes.

l'action, très peu documenté dans la littérature, l'analyse étant techniquement rendue difficile par le caractère hydrophile des PSP et par leur forte dilution dans l'eau de mer. La méthode repose sur une concentration des toxines par lyophilisation suivie d'une analyse (identification et quantification) par chromatographie à fluorescence. Une dizaine d'analogues PSP a été testée, les limites de détection LD et de quantification LQ obtenues variant pour chacune des analogues et étant dans tous les cas très faibles (LD et LQ de 0,01 et 0,3 µg/L pour l'analogue la plus toxique, STX → Fig. 10C). Une méthode de concentration par adsorption a également été testée. Si elle ne permet pas de doser quantitativement les toxines, les essais effectués sur une quinzaine de matériaux adsorbants ont montré l'intérêt de cette méthode, non seulement sur le plan analytique mais aussi pour la récupération de toxines dans l'eau de mer en période de bloom, ces toxines pouvant intéresser des applications pharmaceutiques (vaccins) ou médicales (neurologie).

La chute des performances des différentes étapes de la chaîne de dessalement (→ Fig. 11) a ensuite été

évaluée sur des modèles d'eau de mer en période de bloom intense. Dans les conditions testées, les deux prétraitements d'élimination des fractions particulaire, colloïdale et polymérique par filtration granulaire et ultrafiltration (UF) continuent d'assurer leur rôle protecteur, mais difficilement. Ainsi, le colmatage des membranes d'UF augmente, entraînant une baisse des flux d'eau traitée, et la qualité de l'eau en sortie de l'UF fluctuant autour de la valeur limite préconisée par les fabricants pour l'alimentation des modules d'osmose inverse (OI) (soit un indice DSI « silt density index » de 3). En période de bloom intense, les protocoles de nettoyage des membranes d'UF par rétro-lavage devront donc probablement être intensifiés. Par ailleurs, la capacité de rétention des membranes d'osmose inverse (membrane Dow Fimtec SW 30 en module spiralé 2540) artificiellement vieillies par une exposition à une eau fortement chargée en chlore, a été testée en filtrant une eau de mer enrichie fortement en toxines PSP (0,06 à 0,20 µmol/L). Les teneurs en toxines dans le perméat en aval de la membrane d'OI restent en dessous des limites de détection. Ainsi, dans les conditions testées tout au moins,

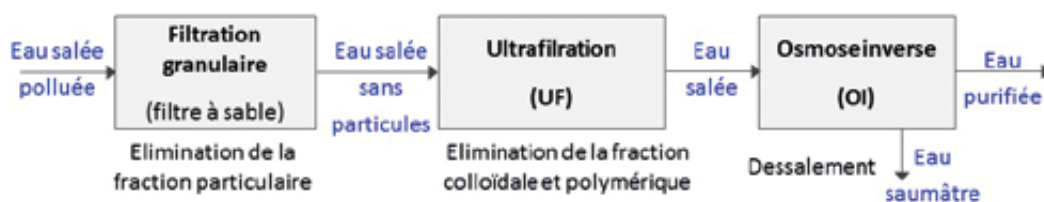


Figure 11. Une unité typique de dessalement d'eau de mer.

il semble que les membranes d'osmose inverse puissent retenir efficacement les toxines STX même après des durées de fonctionnement importantes.

Le dernier volet abordé a porté sur la faisabilité de la concentration et de la pré-purification par des techniques membranaires des composés présents dans l'eau de mer en présence de blooms, toxines et exopolysaccharides, en vue de leur valorisation. Les toxines ont été concentrées par une cascade de 3 opérations, UF en mode diafiltration, puis OI « lâche » en mode concentration puis diafiltration. Les toxines ont pu être pré-purifiées de manière satisfaisante mais leur concentration doit encore être optimisée notamment en augmentant le nombre de diavolumes lors de la première étape de récupération.

Par ailleurs, les Exopolysaccharides (EPS) contenus dans un surnageant de culture de la microalgue

rouge *Porphyridium cruentum* (0,26 g EPS/L) ont été concentrés par microfiltration (membrane tubulaire TAMI, MF 0,14 µm) puis dessalés par diafiltration. Les résultats sont encourageants puisqu'un facteur de concentration des EPS de 8 à 10 fois a été obtenu avec des flux de perméation et des rétentions en EPS relativement élevés, et une qualité correcte (taux de protéines inférieur à 6 %, et réduction de 95 % de la conductivité après diafiltration).

• ACTION 2.2 Valorisation d'espèces invasives, macro-algues ou crustacés

On cherche ici à prévenir un risque environnemental en valorisant des espèces invasives pour limiter leur prolifération en l'absence de solutions préventives.

Les espèces considérées sont deux algues rouge et brune et un crustacé (resp. *Grateloupia turuturu*, *Sargassum muticum* et *Polybius henslowii* → Fig. 12). La valorisation consiste à produire à partir des biomasses traitées différentes fractions valorisables dans les secteurs de la cosmétique, de l'alimentation et de la nutrition humaine et animale, ainsi que de l'agriculture et l'énergie.

Pour les trois espèces, la démarche a consisté (i) à mettre en place les outils analytiques pour la caractérisation biochimique de la biomasse afin d'identifier et de quantifier les composés d'intérêt, puis de déterminer les propriétés physico-chimiques et les propriétés nutritionnelles, biologiques ou technofonctionnelles des composés ou fractions produits ; et (ii) à développer le procédé (→ Fig. 13). La stratégie retenue était de maximiser la solubilisation de la



Figure 12. Les espèces invasives traitées, les macro-algues *Grateloupia turuturu* et *Sargassum muticum*, et le crustacé *Polybius Henslowii*, et leur composé principal d'intérêt.

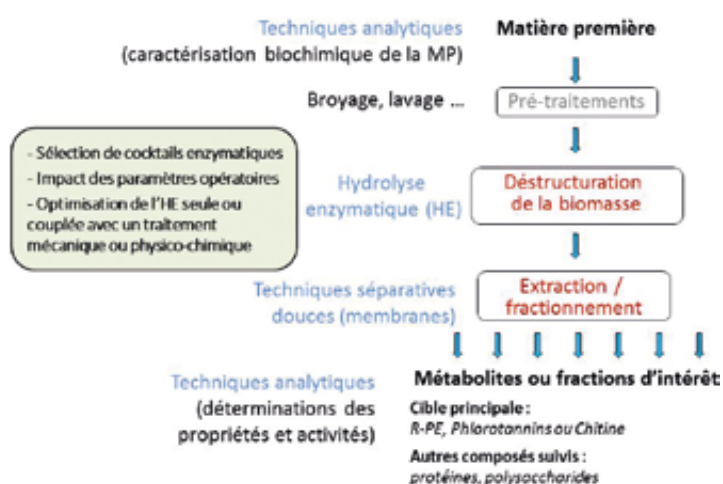


Figure 13. La démarche mise en œuvre dans l'action 2.2.

biomasse pour fractionner ensuite les composés d'intérêt en phase aqueuse. On a privilégié la mise en œuvre de procédés doux et éco-respectueux (hydrolyse enzymatique, filtrations membranaires) en s'inscrivant dans une logique de bioraffinage, où les conditions d'extraction du principal composé valorisable (composé « cible ») ne doivent pas hypothéquer la valorisation des autres composants de la biomasse. Les cibles sont ici la R-Phycocérythrine (R-PE) de *G. turuturu*, un pigment pourpre utilisé comme marqueur fluorescent pour différentes techniques analytiques, les phlorotannins de *S. muticum*, des composés phénoliques dotés de

fortes activités anti-oxydantes, et la chitine de *P. henslowii*. Les autres composés suivis sont les protéines et les polysaccharides (sucres).

MACRO-ALGUES

Les travaux sur *G. turuturu* ont été menés en collaboration entre les laboratoires BRM de l'Ifremer et MMS de l'Université de Nantes, dans le cadre de la thèse de Cécile Le Guillard, et ceux sur *S. muticum* au GEPEA et à MMS, en collaboration avec le LEMAR (UBO) et le LBCM (UBS). Des échanges réguliers ont eu lieu entre les 3 partenaires de l'action, sur les protocoles de

solubilisation par hydrolyse enzymatique et sur l'analyse comparative des performances de l'hydrolyse d'une algue rouge et d'une algue brune. Le travail a consisté principalement à compléter le pool de techniques analytiques déjà disponibles et à développer et à optimiser l'étape de déstructuration de la biomasse par hydrolyse enzymatique. Outre ces deux aspects qui seront seuls détaillés ici, des essais ont été menés aussi sur l'influence des pré-traitements (lavage des algues, technique de broyage) sur le rendement de l'hydrolyse, sur le fractionnement des composés en phase aqueuse par filtration membranaire, sur l'intensification de l'hydrolyse de *S. muticum* en extrudeuse, et sur la déstructuration d'une microalgue verte, *Parachlorella kesleri*.

CARACTÉRISATION DE LA MATIÈRE PREMIÈRE

La mise en place de schémas de bioraffinage performants et robustes nécessite de bien connaître la composition biochimique de l'algue ainsi que ses variations saisonnières ou au cours du cycle de vie. Les méthodes de dosages biochimiques sont précises mais nombreuses et fastidieuses (matières sèches et minérales, polysaccharides totaux et acides uroniques, lipides, composés sulfatés ou phénoliques...). Aussi, une méthode qualitative plus rapide par Spectrométrie Infra Rouge (infra-rouge moyen, 400 – 4000 cm^{-1}) a été développée dans le but d'évaluer les variations saisonnières de la composition de *S. muticum*. La méthode fournit des spectres représentatifs d'une composition biochimique globale de l'algue. Un traitement statistique multi-

dimensionnel des données par ACP des spectres IR permet de regrouper les algues par classes de compositions biochimiques voisines, qui correspondent aux saisons de récolte. En outre, on peut mettre en évidence, pour certains métabolites d'intérêt comme les composés sulfatés, une corrélation entre la composition biochimique de l'algue et le stade physiologique (\rightarrow Fig. 14). La méthode a également permis d'évaluer qualitativement la performance de l'extraction de deux familles de polysaccharides d'intérêt de *S. muticum*, les alginates et les fucoïdanes : la comparaison des spectres IR de ces composés extraits de *S. muticum* avec ceux de composés purs commerciaux a montré des degrés de similitude proches de 80 %, signifiant une très bonne sélectivité de l'extraction.

Vu l'intérêt de l'approche, une perspective intéressante serait de développer une méthode quantitative permettant de doser rapidement en phase liquide les principaux composés de la biomasse (protéines, carbohydrates ...), comme cela a déjà été fait sur des microalgues (Pistorius 2009, Wagner 2010, Mayers 2013).

HYDROLYSE ENZYMATIQUE (HE)

La méthodologie a été développée sur *G. turuturu*, puis transposée à d'autres algues rouges dont *Chondrus crispus* ainsi qu'à *S. muticum*. Les premiers essais sur *G. turuturu* ont permis de sélectionner des enzymes de type glycosidases permettant de maximiser l'extraction de la R-Phycocérythrine non dénaturée (la R-PE étant une molécule thermosensible) et la solubilisation de la matrice algale. Le couplage du

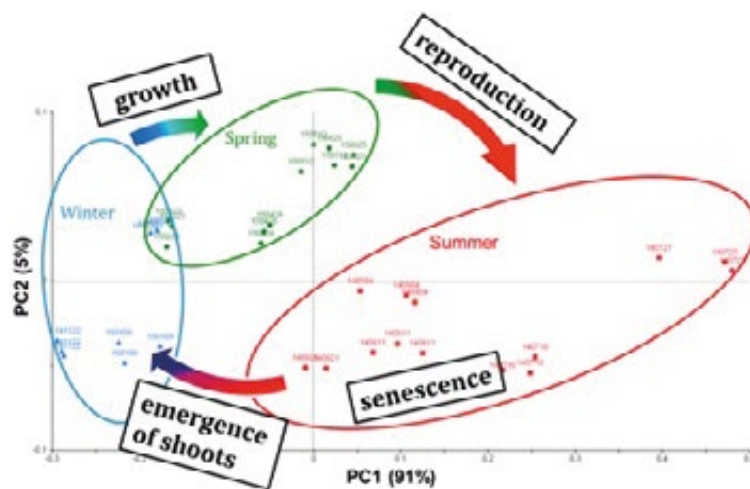


Figure 14. *Sargassum muticum* : mise en évidence de classes de compositions biochimiques voisines correspondant aux saisons de récolte, et de leur relation avec le stade physiologique de l'algue.

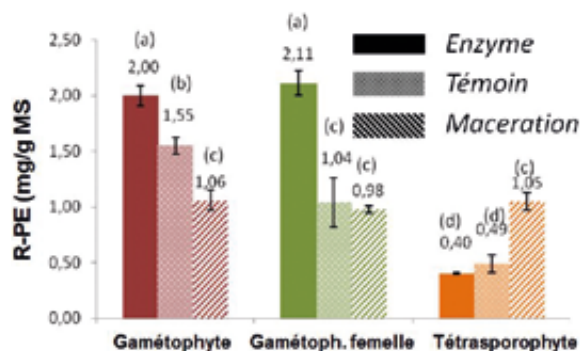


Figure 15. *Chondrus crispus* : le cocktail enzymatique sélectionné pour solubiliser les gamétophytes (k-carraghénase + cellulase) est incapable de solubiliser les tétrasporophytes (cette figure), alors qu'un cocktail (cellulase + protéase) y parvient (résultats non montrés) – Procédé de solubilisation : Enzyme = hydrolyse enzymatique ; Macération = Extraction aqueuse à chaud (procédé classique) ; Témoin : Extraction à chaud dans les conditions de l'hydrolyse (température et pH).

traitement enzymatique (HE) avec un traitement physique, les ultrasons (US) a amélioré les rendements d'extraction, probablement parce qu'il limite la viscosité induite par la libération des polysaccharides pariétaux contenus dans les algues. Le couplage HE-US a ensuite été optimisé par plans d'expériences, en jouant sur 4 paramètres opératoires (température T de l'HE, puissance P_{US} des ultrasons appliqués, débit Q de circulation entre le réacteur enzymatique et le tube à ultrasons, durée D de traitement). Les tendances dégagées montrent que les conditions favorables à l'extraction de la R-PE sont différentes de celles maximisant la solubilisation de la matière sèche (MS) : la solubilisation de l'algue est ainsi favorisée par des températures d'hydrolyse, puissance d'US et durée de traitement élevées (T = 40 °C, P_{US} = 400 W, D = 360 min) alors que ces conditions dénaturent la R-PE. Les conditions optimales d'extraction de la R-PE non dénaturée sont donc plus douces (T = 20 °C, P_{US} = 300 W, D = 210 min). Ces résultats remettent en cause la stratégie initiale (maximiser la solubilisation) et suggèrent d'envisager plutôt un traitement en 2 étapes, une extraction non dénaturante de la R-PE à faible température et puissance modérée, suivie d'une extraction des autres composés (protéines et sucres) à température et puissance plus élevées.

Le travail prospectif sur *C. crispus* a montré que la variation biologique de la composition pariétale jouait un rôle important sur l'efficacité de l'hydrolyse enzymatique (→ Fig. 15). La figure montre également la supériorité de l'hydrolyse enzymatique par rapport à la macération à chaud, méthode classique de solubilisation.

Pour la solubilisation de l'algue brune *S. muticum*, c'est un mix d'activités de types polysaccharidase,

protéase et alginate lyase qui a été utilisé, ce choix résultant du fait qu'une partie des phlorotannins de *S. muticum* sont insolubles car liés aux protéines ainsi qu'aux polysaccharides cellulosiques de la paroi, aux fucoidanes et alginates. Cependant, l'optimisation de l'hydrolyse enzymatique seule n'a permis de solubiliser que très faiblement les phlorotannins et les sucres totaux, même avec des doses conséquentes d'enzymes (5 % w/w → Fig. 16 colonnes c). Des différentes solutions testées pour accroître la solubilisation, c'est principalement l'utilisation d'un détergent qui a permis de « booster » l'action des enzymes. Des 4 détergents anioniques testés, seul le Triton X 100 a eu un effet marqué (→ Fig. 16 colonnes e ; d'après la bibliographie, ce détergent bloquerait les liaisons improductives de l'enzyme et du substrat lors de l'hydrolyse des polysaccharides, accroissant ainsi l'efficacité de l'hydrolyse enzymatique). Les taux de solubilisation restent cependant faibles, même pour des concentrations d'enzymes et des durées élevées (resp. 10 % w/w et 6 h → Fig. 16 colonnes f), ce qu'on peut attribuer à la très grande robustesse des tissus d'algues brunes.

Conclusions et perspectives : Si les enjeux industriels sont pour l'instant peu développés en région Pays de la Loire, les macro-algues sont cependant une ressource d'avenir en tant que source potentielle de composés d'intérêt d'origine marine, en particulier de protéines pour l'alimentation humaine ou animale ainsi que de molécules marines dotées de propriétés spécifiques. Leur bioraffinage recouvre des enjeux scientifiques forts, et des compétences sont disponibles au sein de l'IUML sur Nantes et Saint-Nazaire. Sur la dynamique de l'action menée dans COSELMAR, 2 sujets ont été définis dont l'un,

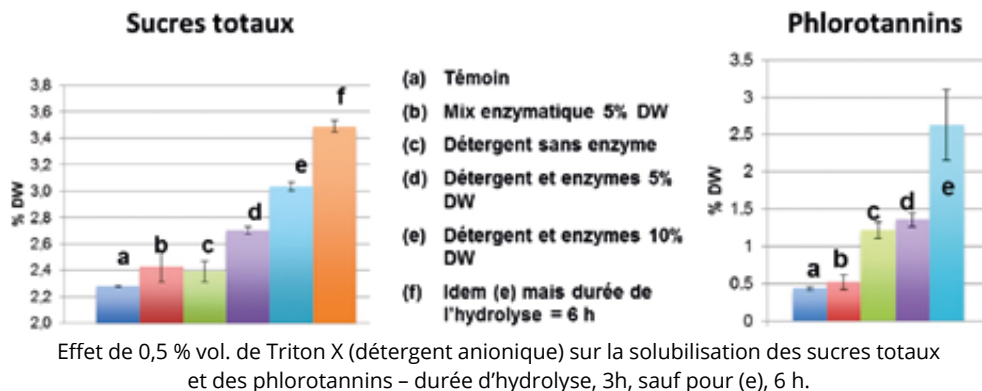


Figure 16. Synergie du couplage hydrolyse enzymatique – détergents (*S. muticum*)

financé dans le cadre d'un AAP Smidap, débutera en septembre 2017.

CRUSTACÉS

Cette partie de l'action avait pour objectif de comprendre certains aspects génériques de la bio-raffinerie par hydrolyse pour un support « carapaces de crustacés » ayant, tout comme les macro-algues, un agencement complexe polysaccharides – protéines et minéraux. Les travaux s'appuyaient sur la connaissance de l'Ifremer et du GEPEA du bio-raffinage de carapaces de crevettes. Plusieurs crustacés ont été travaillés dont deux espèces de crustacés invasifs. Le premier, initialement programmé dans le projet COSELMAR, est *Polybius henslowii*, crabe invasif nageur de nos côtes qui crée une gêne pour les pêcheurs, et le second *Lubinia dubia*, crabe invasif du golf de Gabès (Tunisie), étudié par un laboratoire tunisien, ce qui a permis d'accueillir une doctorante tunisienne (W. Rijba) pendant 3 mois.

Les travaux ont majoritairement été réalisés dans le cadre du travail post-doctoral de M. Socol et pendant l'accueil de la doctorante tunisienne. Le travail post-doctoral comprenait à la fois un travail expérimental de transposition des travaux sur crevette au crabe et un travail important de modélisation des cinétiques de déminéralisation et de déprotéinisation, en incluant la notion de distribution des poids moléculaires des peptides de la fraction aqueuse. Ce travail a conduit à deux publications. Les travaux ayant porté sur l'analyse, la formulation et la comparaison des cinétiques de déminéralisation et de déprotéinisation des carapaces de crevettes et de crabes ont montré une différence notable entre crevette et crabes, avec un taux de minéralisation plus

important des carapaces de crabes, qui requiert une purification plus poussée de la chitine solubilisée, avec un taux de déprotéinisation légèrement moindre et une quantité relative de minéraux accrue même avec le même taux de déminéralisation.

• ACTION 2.3 Estimation des dynamiques de croissance microbienne

L'objectif initial de l'action était de développer des modèles d'estimation des dynamiques de croissance microbienne, pour des monocultures ou des co-cultures microalgues-bactéries, en exploitant des mesures simples et automatisables, notamment des lectures de densités optiques en micropuits sur plaque (système Bioscreen C). Après la réalisation de quelques expérimentations préliminaires (stage d'A. Lamer), une amélioration des pratiques a été proposée en monoculture. *A contrario*, l'utilisation en co-culture du Bioscreen s'est avérée plus que délicate dans la plupart des cas. Ainsi, l'acquisition rapide d'un très grand nombre de données destinées à la modélisation dynamique des interactions microbiennes ne pouvait plus constituer l'objectif principal de ce travail. Ce dernier a donc été réorienté au cours du projet.

Le choix a été fait de focaliser notre attention sur l'obtention de données complémentaires en vue de travaux de modélisation sur le cas de la co-culture d'une diatomée (*Haslea ostrearia*) associée à une bactérie promotrice de croissance de la diatomée et issue de son environnement. La détermination de la bactérie la plus favorable faisait partie intégrante du travail. Ce point a nécessité de nombreuses

investigations car la connaissance incomplète des caractéristiques écologiques de cette diatomée marine complique sa culture. Plus spécifiquement, l'écosystème bactérien dans les claires ostréicoles où se développe *H. ostrearia* reste inconnu. La diatomée est une microalgue importante pour l'ostréiculture régionale puisqu'elle est responsable du verdissement des huîtres en lien avec la production de son pigment, la marénnine. Ce travail a été réalisé dans le cadre du CDD d'Alexandra Lepinay.

La structure de cette communauté bactérienne a été analysée au moyen de PCR-TTGE avant et après l'isolement des bactéries associées à *H. ostrearia* (issues du biofilm associé à la microalgue) et présentes dans la colonne d'eau. Ces dernières provenaient de 4 localisations différentes afin de distinguer les parts relatives du biotope et de la biocénose, et de décrire la dynamique temporelle de la structure de la communauté bactérienne à deux échelles de temps (2 semaines vs 9 mois). La structure bactérienne de la phycosphère diffère fortement de celle du sédiment des claires ostréicoles (→ Fig. 17). Par ailleurs, le degré de similitude entre des bactéries issues du biofilm et celles en suspension dans la colonne d'eau (milieu de culture) n'excède pas 10 %. En revanche, les similarités au sein de la communauté bactérienne issue du biofilm sont supérieures à 90 % indépendamment de l'origine géographique de l'isolat, tandis que les similarités sont inférieures pour les bactéries en suspension. À l'échelle du cycle de culture dans des conditions de laboratoire, la communauté bactérienne dépend du stade de croissance. Quand la culture d'*H. ostrearia* est entretenue par repiquage pendant 9 mois, un changement dans la structure bactérienne est observé à partir de 3 mois, avec ensuite une stabilisation de cette dernière (70 à 86 % de similarités). Sur la base de ces résultats, un

premier aperçu des relations entre *H. ostrearia* et ses bactéries environnantes a pu être esquissé, menant à une meilleure compréhension de la fonction écologique de cette diatomée marine.

Les bactéries isolées de cultures monospécifiques de *H. ostrearia* ont donc été testées en co-culture afin d'évaluer leur influence éventuelle sur les paramètres de croissance de la diatomée. Plusieurs souches bactériennes ont montré en co-culture qu'elles pouvaient augmenter de façon notable par rapport à une monoculture le taux de croissance maximal ainsi que la biomasse maximale produite. (e.g. augmentation de 15 % de la biomasse maximale pour l'isolat B22 (→ Fig. 18). Ainsi, sur ces critères de performance, plusieurs souches ont été retenues pour identification taxonomique. Les isolats B5, B10 ont été identifiés comme étant des *Saccharospirillum* sp. et B22 comme appartenant au genre *Rhodobacter*. L'origine géographique d'*H. ostrearia* n'influence pas les performances de croissance de l'algue et un isolat bactérien donné entraînera les mêmes performances de croissance de l'algue indépendamment de l'origine de cette dernière. Seules 8 bactéries parmi la trentaine d'isolats produisent de l'acide indole acétique (AIA) et ont accru les performances de croissance de l'algue. Mais d'autres bactéries ne produisant pas d'AIA sont également capables d'augmenter la croissance algale. L'empreinte métabolique (approche non-ciblée) a été mise en œuvre pour observer le profil métabolique des composés extracellulaires synthétisés par l'algue en présence ou non d'un isolat bactérien. Le nombre de composés spécifiques aux différentes associations est d'une dizaine environ et seulement trois sont spécifiques d'un effet positif sur la croissance d'*H. ostrearia* en présence d'un isolat bactérien.

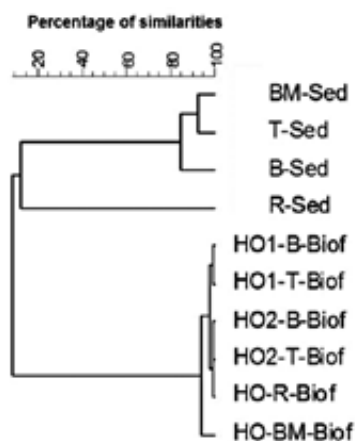


Figure 17. Analyse par PCR-TTGE de la structure de la communauté bactérienne d'échantillons de sédiments (Sed) prélevés dans les claires ostréicoles et de la structure de la communauté bactérienne provenant de prélèvements de biofilms (Biof) après isolement à partir de plusieurs localités (B: Bouin, BM: La Barre-de-Monts, R: Ré island, T: La Tremblade) d'*H. ostrearia* cultivée en laboratoire dans du milieu ES 1/medium.

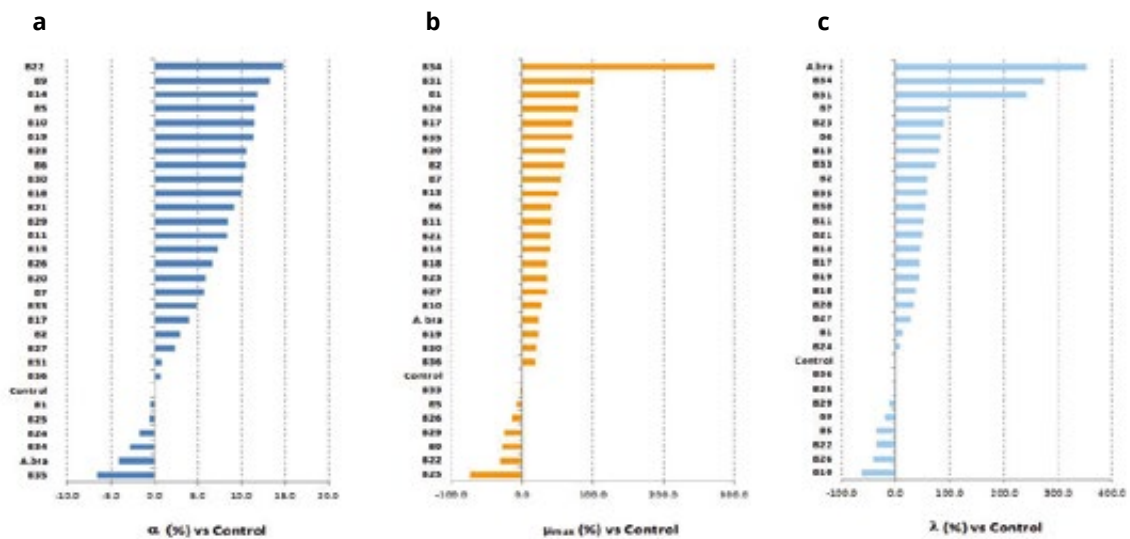


Figure 18. Temps de latence (λ) (a), taux de croissance maximum (μ_{max}) (b), et biomasse maximale en phase stationnaire de croissance (c) d'*H. ostrearia* (La Barre-de-Monts) co-cultivée avec chacun des isolats bactériens ou *A. brasilense* (A.bra). Les valeurs moyennes sont données en % par rapport au contrôle (*H. ostrearia* monoculture).

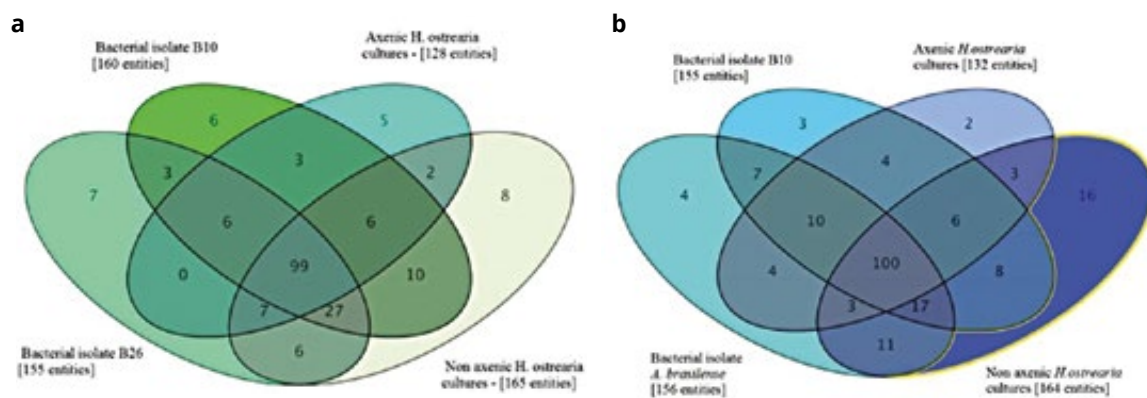


Figure 19. Diagrammes de Venn montrant les composés communs et spécifiques : a/ des cultures d'*H. ostrearia* provenant de l'île de Ré associées avec la bactérie promotrice de croissance (B10) ou la bactérie inhibitrice de croissance (B26) et comparée avec les mono-cultures axéniques ou non b/ des cultures d'*H. ostrearia* provenant de La Barre-de-Monts associées avec la bactérie promotrice de croissance (B10) ou la bactérie inhibitrice de croissance (*A. brasilense*) et comparée avec les mono-cultures axéniques ou non.



Nouveaux risques et nouveaux usages de l'espace maritime et littoral

La méconnaissance des risques liés ou amplifiés par les multiples changements affectant l'espace maritime et littoral (apparition de nouveaux usages, changement climatique, etc.), tant dans leurs formes que dans leurs effets pour les territoires côtiers, tout comme les questions posées par l'actuelle mise en place de mesures d'aménagement de l'espace maritime affectant notamment les pêches maritimes dont le fonctionnement complexe nécessite un abord interdisciplinaire, ont été à l'origine de la formalisation de cet axe du projet COSELMAR.

Ainsi, l'objectif de cet axe a été d'appréhender et de chercher à comprendre ces risques qualifiés de « nouveaux » dans la mesure où ils sont liés à un ou plusieurs changements s'exerçant à l'échelle d'un système territorial donné. Plus particulièrement, il s'agissait de chercher à identifier de manière intégrée et interdisciplinaire les éléments de définition des risques et à modéliser les mécanismes-clé d'émergence et de contrôle des risques, dans la perspective de gestion de l'espace maritime et littoral. Cette posture impliquait donc un large éventail de disciplines (administration publique, droit, économie, géographie, histoire, sociologie, ainsi que la biologie et l'écologie), pour lequel cet axe avait l'ambition de structurer les approches et les apports.

Au terme d'un peu plus de quatre années, les résultats déclinés dans chacune des actions ci-après, montrent que les objectifs scientifiques comme ceux en matière de structuration de la recherche, ont été atteints. En témoignent un certain nombre de jalons importants qui ont émaillé la vie de cet axe :

- ❁ *au plan de valorisation académique : plus de 30 articles de revues à comité de lecture en langue anglaise, une douzaine de chapitres d'ouvrages, près de 100 communications dans des colloques scientifiques internationaux pour la plupart, une vingtaine de mémoires de thèses et de masters, un reversement des produits de la recherche dans un large éventail de formations, notamment de niveau master au sein de l'IUML, le montage d'une école d'été sur la planification de l'espace maritime (cf. axe intégrateur) ;*
- ❁ *au plan de la valorisation non-académique : un très grand nombre d'actions de diffusion (colloques « grand public », interviews dans des émissions de télévision ou de radio, animation de tables rondes, cafés des sciences ou encore rencontres publiques...), une participation active aux activités de diffusion de l'axe intégrateur (les Éclaireurs, 3 minutes pour COSELMAR) ;*
- ❁ *au plan de la structuration de la recherche : de nombreux séminaires et ateliers ayant permettant de travailler les questions à l'interface entre plusieurs disciplines, plus de la moitié des publications impliquant des chercheurs de plusieurs disciplines, le montage et/ou la participation à des projets périphériques qui découlent de collaborations tissées ou densifiées dans le cadre de COSELMAR, la co-direction de travaux universitaires (thèses, masters) ;*
- ❁ *au plan des relations avec la « société civile » : les travaux menés dans le cadre de cet axe ont systématiquement associé les professionnels (pêcheurs notamment), les collectivités, les services de l'Etat et divers organismes gravitant*

autour des questions travaillées au sein de cet axe (ex. : comités ZIP au Québec) et, ce faisant, ont contribué à densifier les relations avec la société civile, comme à intégrer le plus en amont possible leurs besoins et leurs attentes.

De manière à apprécier plus concrètement les nombreuses réalisations issues des travaux menés au sein de cet axe, celles-ci sont détaillées action par action ci-après.

❁ ACTION 3.1

L'action 3.1 (Effets des changements globaux sur les territoires côtiers) a permis d'analyser les risques de submersion marine dans le cadre des effets des changements globaux sur les territoires côtiers. Une délimitation spatiale des zones d'aléa de submersion marine a été réalisée en partant des connaissances des événements anciens et récents ayant affecté le littoral des Pays de la Loire. Elle intègre les scénarios d'élévation du niveau de la mer de +60 cm d'ici à 2100. Elle se poursuit surtout par une cartographie multi-échelle des enjeux dans les zones submersibles et une analyse économique coût efficacité. Elle se termine par des propositions de stratégie pour réduire la vulnérabilité des territoires. Les résultats cartographiques sont publiés à l'échelle communale ou infra-communale, à l'échelle du bâti résidentiel pour certaines communes. Des résultats quantitatifs sur les coûts des mesures de réduction de la prévention, de la protection et de l'adaptation sont donnés.

L'avancée la plus significative est la soutenance le 13 novembre 2015 de la thèse de doctorat d'Axel CREACH intitulée « Cartographie et analyse économique de la vulnérabilité du littoral atlantique français au risque de submersion marine », travail en deux volumes de 321 p. et 249 p., sous la direction de Denis Mercier, avec un co-encadrement de Sophie Pardo. La tempête Xynthia (2010) à l'origine d'une importante submersion marine ayant provoqué la mort par noyade de 41 personnes, a été au cœur de ce travail. Au-delà de l'aléa, les retours d'expérience ont pointé plusieurs causes à ce bilan : vieillissement de la population des communes littorales, urbanisation des zones basses, inadaptation du bâti au risque de submersion marine. Face à ce bilan dramatique, l'État décide de racheter et de détruire 1 628 constructions jugées trop dangereuses (zones noires). L'objectif de la thèse était double : (i) identifier a priori les zones de danger pour la population,

(ii) réfléchir sur l'intérêt de différentes mesures de réduction de la vulnérabilité. Un indice est créé afin d'identifier les zones où la configuration du bâti peut présenter une exposition potentiellement mortelle pour les occupants. L'indice de Vulnérabilité Intrinsèque Extrême (V.I.E.) est basé sur quatre critères : (i) hauteurs d'eau potentielles à l'intérieur des bâtiments, (ii) proximité aux digues, (iii) type architectural et (iv) distance aux zones refuges. L'indice permet de dresser un premier constat de la vulnérabilité de sept communes du littoral atlantique français et confirme l'exposition des territoires impactés en 2010.

Deuxièmement, une évaluation économique est menée afin de comparer différentes stratégies possibles de réduction de la vulnérabilité : (i) protection, (ii) adaptation du bâti, (iii) prévention et sensibilisation et (iv) relocalisation. À travers l'utilisation de l'Analyse Coût-Efficacité (ACE), la pertinence de chacune des mesures est évaluée en nombre de vies humaines préservées. Cela permet d'insister sur l'intérêt de la prévention dans la politique de réduction de la vulnérabilité sur les communes littorales. Ces travaux ont fait l'objet d'une intense activité de valorisation académique, avec un effort porté particulièrement sur des supports de diffusion internationaux, ainsi que non-académique (interviews télé-radio, conférences « grand public »).

L'action 3.1 a également permis d'associer un travail de thèse (Elie Chevillot-Miot), financé par une allocation ministérielle (bourse ED-DEGEST), portant sur la résilience des territoires littoraux face au risque de submersion marine. Il fait suite à son stage de M2 sur la vulnérabilité de la région Pays de la Loire (financé par COSELMAR), et des conclusions portant sur les notions de perception, d'acceptation et de résilience du risque de submersion. L'objectif de ces travaux était d'approfondir la notion de résilience territoriale et d'aboutir à un indicateur de résilience. Les terrains d'étude retenus étaient la Charente-Maritime et la Somme, compte tenu d'une collaboration avec le CEREMA et de leurs caractéristiques historique, géoéconomique et d'occupation du sol. Ces travaux se sont ainsi intéressés au vécu et aux adaptations consécutives à un événement de submersion marine et aux changements climatiques, de l'acceptation et de la perception initiale du risque, au savoir-faire en cas de crise, et l'accès à l'information sur le risque de submersion marine. Cet éclairage complémentaire, davantage centré sur l'aspect sociétal, a permis de construire une connaissance et une compréhension plus globale du risque de submersion marine.

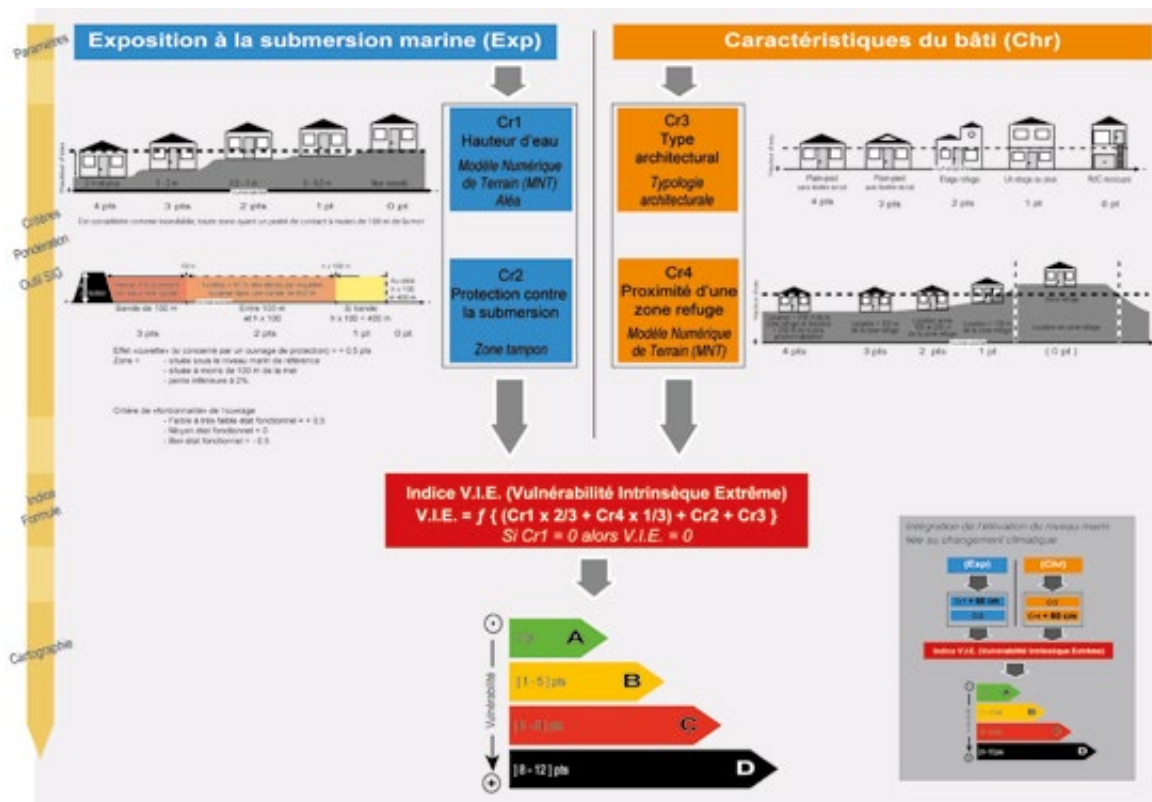


Figure 20. Méthodologie de l'indice V.I.E., présentant les critères retenus et leur définition et leur pondération, la formule utilisée ainsi que les classes de vulnérabilité.

Bien que pilotée par la géographie, cette action a été l'occasion de développer et d'intensifier des collaborations fructueuses avec d'autres disciplines : avec les économistes (S. Pardo et P. Guillotreau ; LEMNA, Université de Nantes) dans le cadre du travail de thèse d'Axel Creach sur les aspects statistiques et les analyses Coûts-Efficacité, avec le génie civil (E. Bastidas-Arteaga ; GEM, Université de Nantes), sur le chiffrage des scénarios sur la partie économique du travail de thèse d'Axel Creach, ou encore avec l'histoire (T. Sauzeau, Université de Poitiers), pour des recherches historiques sur l'île de Noirmoutier et l'analyse diachronique de l'évolution du bâti en zones à risque.

❁ ACTION 3.2

L'action 3.2 (Changements et risques dans le secteur des pêches maritimes) du projet COSELMAR a permis de répondre à de nombreuses questions scientifiques posées à l'origine du projet, ce qui a occasionné, au cours de la durée de vie du projet, la production d'un grand nombre d'articles scienti-

ifiques (29), de chapitres d'ouvrage (10) et de communications aux conférences (87), ainsi que plusieurs actions de valorisation à destination du grand public (15), mémoires de recherche en Master (15) et 4 thèses de doctorat, dont une financée par le programme COSELMAR et non encore soutenue.

Parmi l'ensemble des résultats obtenus dans le cadre de l'action 3.2, citons quelques contributions majeures aux différentes questions soulevées.

La recherche sociologique menée sur les temporalités professionnelles et les ajustements domestiques a permis de mettre en évidence le lien entre les particularités du travail de pêcheur artisan via deux types d'arrangements familiaux spécifiques. Le regard porté sur les dynamiques organisationnelles et professionnelles s'est intéressé particulièrement au processus de socialisation et à l'apprentissage des risques, attestant d'un renforcement du crédit accordé aux porteurs de savoir-être et de savoir-faire traditionnels de la pêche. Appréhendée comme une ressource pour faire face aux incertitudes et s'assurer de la meilleure marée possible, la survalorisation

du crédit professionnel devient néanmoins discriminante pour ceux qui n'en sont pas porteurs, à savoir les moins intégrés au milieu de la pêche maritime. Le mode singulier du rapport salarial dans le secteur de la pêche – le salaire à la part – avec des prises de risques collectivement acceptées par les équipages dans le but de maintenir un niveau satisfaisant de rémunération répond à l'intensification du travail à bord, la généralisation de pratiques de pêche plus risquées, la réduction des équipages embarqués, ces risques s'accompagnant de taux d'accidentologie et de mortalité très supérieurs à l'ensemble des secteurs d'activités terrestres, y compris celui du bâtiment.

Le salaire à la part et la variabilité des revenus dépend étroitement de la formation des prix. Le projet COSELMAR a permis de décomposer cette variabilité des prix pour 46 espèces de pêche fraîche vendues dans les 40 halles à marée françaises au cours de la période 2002-2008, ce qui constitue un travail empirique d'une ampleur inégalée internationalement (environ 15 millions de données transactionnelles sont contenues dans la base traitée).



Figure 21. La criée de St Gilles Croix de Vie.

L'un des résultats met en exergue le rôle individuel du vendeur et de l'acheteur dans les écarts de prix, qui varie selon les espèces, ainsi que leur appariement, en sus des traditionnelles caractéristiques du produit (espèce, taille, présentation, qualité) et de leur saisonnalité. Un test original de mesure de la Loi du prix unique (convergence des prix entre halles à marée pour un produit identique) a été construit pour identifier les contours de la répartition spatiale des marchés régionaux. Des regroupements régio-

naux ont été ainsi construits sur la base de ce test original, démontrant la remarquable convergence en prix de 8 espèces (baudroie, langoustine, sole, Saint Pierre, seiche...) pour une majorité de halles à marée entre les ports de la façade Atlantique, à l'exception notable de Dieppe et Fécamp. Ces criées se démarquent sensiblement des prix affichés sur la façade méditerranéenne, montrant ainsi un effet-frontière entre les deux principales façades. La vente aux enchères a évolué significativement depuis une dizaine d'années et la vente à distance par Internet a beaucoup contribué au raffermissement des prix grâce aux acheteurs distants. La vente physique tend ainsi à régresser au profit de cette vente dématérialisée et certains ports vendent ainsi l'intégralité de leurs apports aux acheteurs distants. Cette tendance se renforcera vraisemblablement dans les années à venir, avec la création de hubs dans la zone rétro-littorale qui massifieront la logistique de distribution pour gagner encore en efficacité dans la distribution territoriale des produits de la pêche. Néanmoins, le paradoxe du déclin des prix en cours de journée pour un même produit vendu aux enchères perdure et constitue un risque pour le marin selon son passage dans l'ordre des ventes. Le projet COSELMAR a permis d'expliquer l'origine de ce déclin grâce aux effets décomposés du temps (influence des saisons, du jour de la semaine) et des catégories d'acheteurs représentées (mareyeurs, centrales d'achat, poissonniers détaillants). Parallèlement à cette organisation du marché aux enchères, des formes nouvelles de commercialisation via des circuits courts voient le jour et ont été étudiées par les chercheurs de COSELMAR. À l'aune des singularités de ces circuits courts, l'enquête réalisée met aussi l'accent sur le caractère d'exception de l'AMAP Yeu-Continent qui, pour l'heure, ne semble pas constituer un modèle transférable à partir duquel les circuits-courts à la pêche pourraient se développer en Région Pays de la Loire en vue d'une sécurisation des revenus des pêcheurs artisans.

Un enjeu majeur pour l'avenir de la profession de marin-pêcheur concerne la gouvernance des pêches et le changement climatique relativement à ses effets sur les socio-écosystèmes marins. Un exercice de géoprospective a été réalisé pour susciter du débat autour de devenir possibles de la gouvernance des pêches du golfe de Gascogne. L'intérêt de la prospective pour la recherche-action a été démontré dans les sciences de l'environnement et dans les sciences sociales. En revanche, la question des possibilités et des modalités de spatialisation de la pros-

pective avec les acteurs restait, malgré les récents développements, une question ouverte. Une série de cycles d'entretiens individuels et d'ateliers collectifs ont été menés respectant les différentes étapes de la prospective (i.e. diagnostic, hypothèses sur l'avenir, discussion des futurs possibles). Aussi, des temps de spatialisation ont été proposés aux acteurs au cours desquels des outils d'expression participatifs, tels que des cartes mentales ou des représentations graphiques, ont été mobilisés. Par ailleurs, le discours et les débats d'acteurs ont été analysés à l'aide de grilles mettant en évidence les contenus spatiotemporels du récit (Tissière et al 2017, Tissière et al 2017b, Tissière et al soumis). Enfin, les scénarios ont fait l'objet de simulations dans le modèle halieutique ISIS-Fish caractérisé par la flexibilité des hypothèses, des mailles spatiales et du pas de temps (Provot et al soumis). Parallèlement, un outil original (nommé I-ADApT) d'évaluation des réponses apportées aux problèmes de changements globaux affectant les écosystèmes marins a été conçu et appliqué à une vingtaine de socio-écosystèmes marins dans le monde, grâce à l'appui de collègues internationaux (groupe Human Dimensions du programme IMBeR-*Integrated Marine Biosphere Research*). La synthèse des cas étudiés est présentée dans un ouvrage à paraître chez Routledge en 2017, et la base générée devrait s'enrichir de nouveaux cas dans les années à venir afin de proposer une typologie utile aux décideurs. Une telle typologie leur permettra d'identifier et évaluer les chances de succès des options stratégiques envisageables face à une crise majeure impactant les socio-écosystèmes marins exploités.

Des rencontres interdisciplinaires ont marqué les temps forts de l'action de recherche 3.2, comme la tenue de séminaires, colloques, ateliers et universités d'été : citons le séminaire de la Maison des Sciences de l'Homme Ange-Guépin du 15 juillet 2014 sur l'intégration des recherches sur le changement et les risques dans le secteur des pêches, l'Ecole d'été internationale sur l'aménagement de l'espace maritime, en collaboration avec le *Marine Spatial Planning Research Network*, qui a réuni 23 participants de 17 nationalités différentes du 1^{er} au 5 juin 2015, la conférence *moving2gather* en écologie marine en décembre 2015, les 4 ateliers sur la prospective dans le domaine de la gestion des pêches dans le golfe de Gascogne en 2015 et 2016 (thèse de Laurie Tissière), le colloque OCEANEXT des 8-10 juin 2016, les deux colloques de l'Association Française d'Halieutique (Montpellier en juin 2015, Nantes en juin 2017), dont le thème du colloque nantais organisé à l'Ifremer par

l'équipe EMH s'intitule « Pêche et changements globaux », les Journées d'études de l'Observatoire des Droits des Marins en janvier 2016 « Pêche et pêcheurs, évolutions et transformations: Approches interdisciplinaires » et celles de juin 2017 sur les conditions sociales à la pêche, le séminaire international du LEMNA sur les réponses sociétales apportées aux problèmes de changement global impactant les socio-écosystèmes marins en mai 2017, le colloque organisé par le CENS sur « La mer convoitée : métiers, usages et régulations » des 8-9 juin 2017, le séminaire international « pêcheries, pêcheurs et planification spatiale marine » organisé par le LETG-Géolittomer les 14-15 juin 2017.

✿ ACTION 3.3

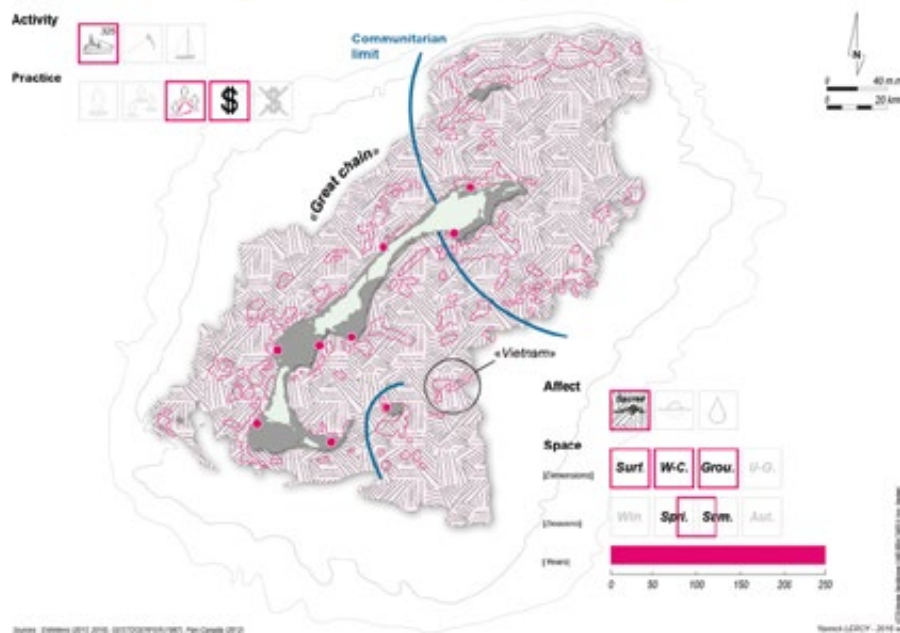
L'action 3.3 (Analyse comparée France-Canada de la gouvernance face aux nouveaux risques et usages littoraux et maritimes), transversale aux 3.1 et 3.2, a permis d'analyser, dans le cadre d'une comparaison internationale France-Canada, les processus de gouvernance à l'échelle de territoires confrontés aux deux principaux risques étudiés : les effets des changements globaux sur les territoires côtiers et l'appréhension des changements et des risques auxquels est confronté le secteur des pêches maritimes. La dimension comparative internationale de cette action s'appuyait en premier lieu sur l'existence d'un réseau francophone (UQAR, ENAP, UMCS) lié à l'Université de Nantes, avec un objectif d'élargissement à d'autres universités et provinces canadiennes, et le constat de la pertinence des similitudes comme de l'intérêt des différences constatées. Cette action a par ailleurs bénéficié d'un financement complément (CPCFQ), qui a légèrement précédé le projet COSELMAR, et qui a permis d'organiser pendant plusieurs années des sessions de travail impliquant chercheurs québécois et ligériens. Outre l'ambition d'ouverture et de structuration internationales, l'objectif de cette action était notamment de bâtir une méthodologie partagée d'analyse des processus de gouvernance et de leurs transformations éventuelles dans ce contexte de « nouveauté » des risques et usages, en s'appuyant prioritairement sur deux entrées thématiques (autres actions de l'axe 3) : submersion et activité halieutique.

La thèse de Yannick Leroy sur la « Gouvernance des territoires côtiers soumis aux changements : analyse comparée franco-canadienne » constitue l'une des productions majeures de cette action. Réalisée en

co-direction (Nantes, B. Trouillet – Rimouski, C. Rioux), elle a contribué à consolider l'analyse croisée et le partenariat, avec des recherches qui se sont déroulées pleinement de part et d'autre de l'Atlantique. Les communications et articles démontrent déjà la pertinence de ce comparatif, la thèse elle-même devant

être terminée pour la fin de l'année 2017. Cette thèse tout comme les travaux engagés dans le cadre de la CPCFQ (Commission permanente de coopération franco-québécoise) et les partenariats avec des universités francophones du Québec (UQAR, ENAP) et du Nouveau-Brunswick (UMCS) ont favorisé les

The "Sensitive" into Magdalen Islands - Canada [Lobster fishing]



The "Sensitive" into Bay of Biscay & Yeu Island - France [Offshore fishing]

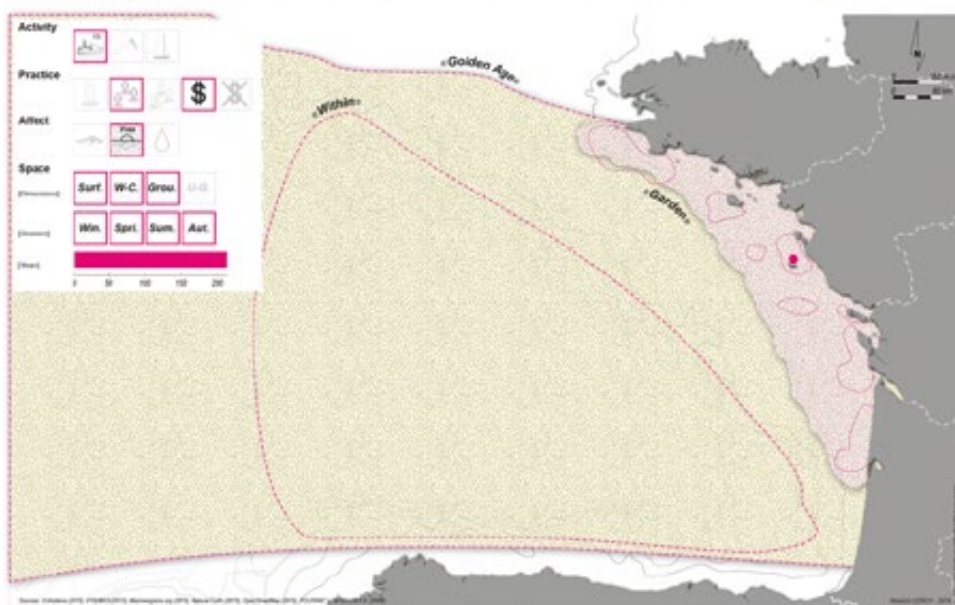


Figure 22. Analyse comparée France-Canada : la pêche offshore dans le Golfe de Gascogne, au large de l'île d'Yeu et la pêche aux homards au large des îles de la Madeleine.

recherches associant des chercheurs des deux pays et une implication des acteurs de la gestion des territoires côtiers. Ainsi, deux sites privilégiés ont tout particulièrement permis de mener ces analyses à regards croisés : l'île d'Yeu en France et les Iles-de-la-Madeleine au Canada. Ces deux sites sont « soumis » à de nouveaux usages (projets) en mer qui agissent comme révélateur et perturbateur des systèmes de gouvernance (éolien off-shore pour l'île d'Yeu, hydrocarbures off-shore pour les îles de la Madeleine), des processus en cours qui permettent de pointer les permanences et les différences notables entre les deux socio-systèmes. Parallèlement, l'action 3.3 a contribué à mieux appréhender les mécanismes propres au système québéco-canadien, à l'image de la thèse soutenue (mai 2016) par Anne Fauré, l'une des partenaires canadiennes, sur la GIZC au Québec.

Outre la recherche, cette coopération se traduit aussi par un volet formation, depuis la mobilité étudiante jusqu'au projet de double-diplomation entre l'UQAR (Rimouski) et l'Université de Nantes (Maîtrise GRM – Gestion des ressources marines – et Master GAEM – Géographie et aménagement des espaces maritimes). Cette dynamique franco-québécoise liée à l'action 3.3 a par ailleurs contribué au bon positionnement de l'IUML nantais lors de la mise en place de l'IFQM (Institut France-Québec pour la coopération scientifique en appui au secteur Maritime), institut scientifique « lancé » lors des premières Assises de l'IFQM qui se sont déroulées à Montréal les 8/9 mai 2017. Cette coopération pourrait se concrétiser prochainement autour d'actions liées à la gouvernance portuaire (T. Guineberteau) : participation à l'étude liée à l'extension du port de Québec dans l'anse de Beauport (discussion en cours avec Port-Québec) ; participation à l'organisation d'une journée scientifique associée aux Rencontres de l'AIVP (Association internationale villes-ports) qui se tiendront à Québec en juin 2018.

Au-delà du cas emblématique du Québec, l'action 3.3 a permis de mener des recherches ciblées ou résolument comparatives à une autre échelle. Ainsi, les recherches comparées d'A. Gallais-Billaud (2014 – T. Guineberteau, LETG) sur les démarches participatives et de P. Deschamps (2015 – O. Delfour, CDMO) sur les droits maritimes ont produit des résultats très pertinents sur le Provincial/Fédéral mis en résonance avec le National/Européen, comme l'ont montré les présentations et débats lors du Congrès Europe-Canada qui s'est tenu à Nantes en juin 2015. De même, les travaux menés par I. Fortier (ENAP) sur

le concept de bien commun appliqué à la gestion des zones côtières, en lien avec les chercheurs nantais (T. Guineberteau, B. Trouillet) lors de son accueil à la MSH Ange-Guépin (2015) s'inscrivent pleinement dans cet objectif de mise en comparaison. Sans que le comparatif soit l'entrée de recherche retenue, l'étude réalisée par M. Coulibaly (2016 – P.-A. Mahieu, LEMNA, en partenariat avec C. Rioux, UQAR) sur l'évaluation environnementale d'un projet d'énergie marine au Canada s'articule parfaitement avec une partie des observations réalisées sur les sites de l'île d'Yeu et des îles de la Madeleine où la question énergétique est omniprésente dans les projets de nouveaux usages en mer. Enfin, la recherche que termine actuellement L. Trichet (2017 – T. Guineberteau, LETG) vise l'analyse comparée des modalités de gestion des zones côtières sur le pourtour du golfe du Saint-Laurent. Ce comparatif interne au Canada croise donc les situations des différentes provinces de l'Est Canadien, les maritimes, avec des méthodes et résultats qui devraient a priori pouvoir être remobilisés au-delà de ce seul secteur géographique. Par contre, force est de constater que nous ne sommes pas parvenus à intégrer la côte Ouest dans nos travaux, c'est-à-dire la Colombie Britannique, la distance constituant en soi un premier handicap.

Conformément aux objectifs établis lors du lancement du programme COSELMAR, l'action 3.3 se termine dans une logique d'élargissement et de perspectives en dépassant le seul cadre du comparatif franco-canadien, tout comme des thématiques privilégiées de l'axe 3. D'une part, la recherche que termine actuellement J. Dilasser, chercheur contractuel du programme COSELMAR, constitue un retour d'expérience et un point méthodologique essentiels sur le comparatif international pour les recherches à venir. D'autre part, l'atelier international « gouvernance côtière » programmé à la MSH de Nantes les 12 et 13 juin 2017 va associer au côté du binôme initial France-Canada des partenaires de Côte d'Ivoire, Gabon, Maroc, Sénégal. Une vingtaine d'experts travailleront durant ces deux journées sur ce thème de la gouvernance au regard des trois cibles prédéfinies – recherche (yc recherche-action), formation (yc formation continue), publication (yc vulgarisation) – et contribuant ainsi à l'émergence d'un réseau international, francophone à ce stade, sur la gouvernance des zones côtières.



Axe intégrateur

L'axe intégrateur du projet COSELMAR avait pour objectif d'accroître la structuration du consortium et son rayonnement international, au travers de trois actions : une réflexion sur la transdisciplinarité et la création d'une plateforme d'intégration des connaissances sur les risques, la gouvernance des ressources et des espaces marins ; la mise en réseaux des chercheurs de la fédération Institut Universitaire Mer Littoral ; le rayonnement au niveau des formations. Parmi ces actions transversales, deux ont également abouti à des résultats scientifiques significatifs.

❖ ACTION 4.1 Prospective

Objectif : Proposer une représentation transdisciplinaire du socio-écosystème du Golfe de Gascogne et identifier des questions de recherche future.

L'un des objectifs scientifiques de COSELMAR était de mener une réflexion afin d'améliorer l'intégration pluridisciplinaire et d'esquisser les prémices d'une réelle transdisciplinarité. Pour ce faire, plusieurs actions ont été mises en place : une animation scientifique pluridisciplinaire tout au long du projet sous forme de workshops, la construction d'un langage commun autour des notions fondatrices du projet (risques, gouvernance, socio-écosystème, modèle etc...), la création d'une plateforme informatique d'intégration des connaissances. Une réflexion autour de l'ontologie comme outil d'aide à cette intégration pluridisciplinaire des connaissances a été initiée mais n'a pas abouti à l'échelle du projet, faute de temps et de compétences suffisantes au sein du consortium. Dans ce cheminement, la prospective s'est imposée comme une démarche pertinente et constructive afin de mener à bien cette réflexion et d'être capable d'initier de nouvelles questions de recherche transdisciplinaire. Le thème de la prospective lancée à l'échelle du projet est le suivant : « quel est l'avenir de la recherche sur les milieux marins et littoraux et notamment dans le Golfe de Gascogne ? »

ETAPES DE TRAVAIL ET PRODUCTIONS

La prospective COSELMAR a été construite en trois étapes : 1) formation des chercheurs à la prospective ; 2) application à une question de recherche du projet, bien définie, pertinente pour un exercice de prospective et qui formalisait un enjeu majeur du Golfe de Gascogne (la gouvernance des pêches dans le Golfe de Gascogne [Laurie Tissière, action 3.2]) ; 3) exploitation des scénarios produits durant la géo-prospectivité de la gouvernance des pêches du golfe de Gascogne comme point de départ de la prospective à l'échelle du projet. La particularité de cet exercice à l'échelle du projet de recherche est la déconstruction de scénarios (et non la construction) pour faire émerger des thèmes/questions de recherche. En 2017, trois ateliers de prospective ont réuni les chercheurs responsables d'axes de COSELMAR. Au cours du second atelier, des chercheurs extérieurs à COSELMAR, historiens et coordinateurs de projets en sciences humaines ont été associés aux discussions pour ouvrir les débats et apporter des visions disciplinaires manquantes au projet.

Les scénarios construits lors de la géo-prospectivité de la gouvernance des pêches dans le Golfe de Gascogne ont été modifiés et élargis pour appréhender plus globalement le socio-écosystème du golfe de Gascogne. Les discussions sur l'avenir de la recherche autour de ce socio-écosystème ont abouti à la définition de nouvelles évolutions à long terme de ses compartiments et de ruptures incertaines de ses dynamiques. Une série d'enjeux ont été identifiés portant d'une part sur la recherche (méthode, éthique, financement...), et d'autre part sur le socio-écosystème marin et littoral. À l'issue des trois ateliers, nous avons réuni les éléments suivants :

- ❖ Une représentation graphique transdisciplinaire du socio-écosystème du Golfe de Gascogne (→ Fig. 23)
- ❖ Une liste de sept variables (appelées incertitudes critiques en prospective) qui caractérisent le socio-écosystème et sur lesquelles reposent différentes hypothèses d'évolution possible. Ces hypothèses sont ici assez grossières pour permettre des accroches transdisciplinaires. Elles peuvent être réinterrogées de façon plus précise selon la thématique du projet et les disciplines impliquées.

- Trois scénarios relatant trois histoires possibles d'évolution du golfe de Gascogne à l'horizon 2050 : ces trois scénarios s'appuient sur des combinaisons d'hypothèses relatives aux incertitudes.
- Une liste d'enjeux, qui ressortent de la lecture des scénarios en termes de risques et opportunités d'avenir. Cette liste n'est certainement pas exhaustive mais suffisamment riche et diversifiée pour nourrir un large panel de questions de recherche.

De là, ont émergé des thèmes de recherche transdisciplinaires et des pistes d'innovations. Les résultats de cette prospective ont été débattus en public lors d'un Jeu Sérieux clôturant la web-série des Eclaireurs (action de vulgarisation et diffusion grand public des résultats COSELMAR).

RÉSULTATS INTERMÉDIAIRES DE LA PROSPECTIVE « QUEL EST L'AVENIR DE LA RECHERCHE SUR LES MILIEUX MARINS ET LITTORAUX ET NOTAMMENT DANS LE GOLFE DE GASCOGNE ? »

Une représentation graphique du socio-écosystème du golfe de Gascogne

Pour amorcer les discussions sur les enjeux du socio-écosystème du golfe de Gascogne il a été nécessaire de bien définir les différents compartiments de cet objet d'étude. La figure 23 se lit dans un premier temps de la gauche vers la droite, bien que les interactions inhérentes au système, les échanges avec les systèmes marins et socio-écosystèmes connexes et les hétérogénéités spatiales du système, n'imposent pas une dynamique unidirectionnelle de fonctionnement. La ligne de côte suggérée, symbolisant les interactions au sein du littoral fait ressortir une densité croissante d'activités humaines le long d'un gradient large-cote. L'océan (en blanc), structuré autour de sa composante biotique, abiotique et de ses facteurs régulant le socio-écosystème, est à la base (en bleu

Figure 23. Une représentation du socio-écosystème du Golfe de Gascogne.



foncé) de la production des bio-ressources, des ressources minérales, des ressources physiques et offre un espace de vie et d'activité pour les hommes. Se dégage ensuite (en vert) ce que l'homme valorise de ce milieu en termes d'usages potentiels, émergents ou traditionnels, qui sont à l'origine de filières (en orange). Tout cet ensemble est au cœur d'enjeux de gouvernance et d'inter-relations spatio-temporelles imprégnées d'un imaginaire collectif et individuel.

Liste des variables

Sur la base de la figure 23, une première étape a consisté à identifier des évolutions déjà engagées du socio-écosystème (tendances lourdes en prospective) : changement climatique et autres évolutions environnementales ; évolution des comportements et des pressions anthropiques sur l'écosystème ; évolution des modes de gouvernance. Dans un second temps, les participants aux ateliers ont imaginé des événements susceptibles de créer des ruptures dans ces dynamiques. Ils ont été classés dans sept variables différentes :

Variable 1 → Politiques publiques et participation ; **Variable 2** → État du milieu marin ; **Variable 3** → Filières économiques maritimes ; **Variable 4** → Suivi scientifique des écosystèmes marins et des sociétés maritimes ; **Variable 5** → Organisation des usages en mer ; **Variable 6** → Qualité de vie et bien-être social ; **Variable 7** → Gestion des risques.

Les scénarios

Ils ont été construits à l'horizon temporel de 2050 comme des **scénarios exploratoires** (ni souhaitables, ni repoussoirs) et s'appuient sur deux types de dynamiques :

- des tendances lourdes : dynamiques que l'on imagine stables à l'horizon étudié (coup parti) ;
- des incertitudes critiques : dynamiques ou variables très incertaines et qui soulèvent des enjeux cruciaux pour la question débattue.

Ces éléments ont été retenus de manière « conjoncturelle » ou arbitraire (contingence liée aux personnes présentes lors des ateliers, au contexte environnant, à l'actualité...), pour nourrir la question de la prospective. L'espace dans lequel se déclinent les scénarios est le Golfe de Gascogne non pas pour restreindre le champ des questionnements mais pour se donner une étude de cas concret facilitant les questionnements et l'exploitation des résultats et

limites du projet. La nature ouverte sur le monde et plus particulièrement sur des espaces marins connexes et la diversité de ses habitats d'espèces, formes de gouvernance, usages, etc., font du golfe de Gascogne une socio-éco-région pertinente pour interroger les socio-écosystèmes au sens large.

Liste des enjeux

Cette liste a été établie sur la base des données précédentes : scénarios, tendances lourdes, incertitudes critiques. Non exhaustive, elle s'organise à ce jour autour de sept thèmes :

Enjeux sur **les changements globaux** ; Enjeux sur **les filières maritimes** ; Enjeux des **multi-usages de la mer et du littoral** ; Enjeux sur **la reconquête des milieux dégradés et les milieux artificiels** ; Enjeux sur **l'imaginaire de la mer et nos représentations** ; Enjeux sur **le bien commun et le bien être** ; Enjeux **méthodologiques, de veille et d'éthique** de la recherche.

UNE PREMIÈRE FORMULATION DE THÈMES/QUESTIONS DE RECHERCHE

Un exercice d'association entre les incertitudes critiques, les enjeux sur l'avenir des socio-éco-systèmes marins, les questions de recherche et les disciplines à mobiliser, propose un chemin innovant et euristique pour construire de nouvelles problématiques transdisciplinaires, et ainsi étendre la dynamique de travail de COSELMAR. Cela a abouti à la formulation de 5 grands thèmes :

- **Conception des structures en mer** : quelles seraient les durabilités de ces structures (usure, cycles de vie, réversibilité) ? Quels sont les impacts/risques environnementaux et sociaux (emplois, patrimoine...) de la mise en place de larges plateformes multi usages en mer ? Quelles diversités d'usages peuvent-elles accueillir ? Quelle serait leur rentabilité économique ? quelle capacité auraient les territoires à produire, maintenir et transformer ces structures (disposition de navire de maintenance, de navires spécialisés pour leur conception, savoir-faire) ? Quelle acceptabilité sociale sur leur émergence et développement en mer ?
- **Développement d'une nouvelle filière d'aquaculture en mer** (algues, macro-algues) à l'échelle d'une région : quels nouveaux métiers ? Comment cela pourrait être une voie de diversification pour les activités traditionnelles (pêche, aquaculture) ?

Quels espaces pourraient être concernés et quels modèles économiques imaginés : de la cueillette à la culture intensive ? Quels liens construire avec le monde de la santé et de l'alimentaire ? Quels impacts/retombées sur la qualité de l'eau, les paysages et les autres usages ? là aussi, quelle acceptabilité sociale sur leur émergence et développement en mer ?

❖ **Le multi usage de la mer**, les politiques régionales et la planification maritime. Comment planifier les usages en intégrant des notions d'évolutions ? comment s'expriment les rapports de domination des usages en mer ? La mer est-elle pourvoyeuse de justice sociale, écologique et spatiale ? Quelle intégration des politiques entre les régions ? Jusqu'où les processus participatifs sont-ils mobilisés/mobilisables pour gérer la mer ? quel type de démocratie se déploie en mer (qui sera « riverain », citoyen de la mer) ? Comment les filières peuvent être coopératives entre elles ? Quel outil de décryptage et d'analyse des conflits ?

❖ **Les changements à venir** concernant l'état des milieux marins et des sociétés maritimes au regard des changements globaux (climat, géopolitique, densité de population) : observer les changements climatiques sur une région marine en lien avec les changements globaux du climat, observer les changements écologiques passés et actuels, et les changements sociaux passés et actuels : évolution des usages et des pratiques au regard des changements globaux, les changements des postures politiques, de la réglementation en lien direct ou indirect avec les changements globaux et du contexte économique et géostratégique.

❖ **Étudier les logiques de prises et déprises dans l'espace marin** : la mer, espace par nature mouvant et impermanent, engage à penser la réversibilité et l'évolutivité des usages. Le trait littoral est fluctuant, les usages traditionnels évoluent dans l'espace selon la disponibilité des ressources (ostréiculture, pêche). Il existe déjà des friches en mer (exemple tables ostréicoles abandonnés dans le bassin Arcachon) : comment sont-elles valorisées ? Par ailleurs de nouveaux usages pourraient s'installer plus durablement et des volontés de planifier spatialement les activités pourraient induire des facteurs d'immobilisme en mer. Comment penser les logiques de prises et déprises en amont de la planification ? Comment penser ces logiques dans nos manières d'aménager la mer et le littoral ? Quels seront les futures

friches industrielles (pieds d'éoliennes...) ? comment intégrer la notion d'impermanence dans la planification maritime ? Quelle place pour des analyses spatiales et des modèles de gestion en temps réel ?

Cet exercice de prospective qui finalise quatre années de réflexion pluridisciplinaire, a ainsi permis de conforter des problématiques déjà engagées, de préciser certaines questions s'y rapportant et également de faire émerger des pistes plus innovantes issues d'un questionnement réellement transdisciplinaire. En particulier, le thème (Em)prise et déprise de l'espace maritime a suscité l'engouement du plus grand nombre de participants et constitue une perspective de recherche transdisciplinaire future.

❖ ACTION 4.2 Bio-colonisation

La bio-colonisation de structures en mer est définie comme la fixation et la croissance d'espèces marines végétales ou animales sur une structure offshore. Ce sujet, lors d'un séminaire international organisé à l'Université de Nantes au sein de COSELMAR en 2015, a été pointé comme l'un des principaux enjeux de maintenance et de conception des **structures d'Energies Marines Renouvelables, en particulier les futures éoliennes flottantes.**

En s'appuyant sur l'Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique, le laboratoire Mer Molécules Santé et la société Biolittoral, le projet COSELMAR a permis de réunir des acteurs dont la complémentarité peut, seule, répondre à cet enjeu interdisciplinaire.

Concrètement sur ce vaste sujet, il s'agit plus particulièrement dans cette action d'initier des travaux sur les scénarii de croissance de la bio-colonisation et d'optimiser les procédures de maintenance préventive et curative, et surtout d'initier la création d'un réseau national et international de réflexions et d'échanges (tant en données expérimentales et en moyens qu'en conceptualisation des démarches) afin de constituer un réseau de premier plan au niveau européen sur cette question. Ces travaux sont situés dans un double contexte d'analyse des risques : risque technologique lié à l'arrêt de fonctionnement ou à la rupture d'une structure, risque environnemental lié à la biomasse produite lors de nettoiyages.

SYNTHÈSE DES RÉSULTATS ET EFFET DE LEVIER DE COSELMAR

Pour répondre à cette question trois axes prioritaires ont été définis: (1) les méthodes de mesure *in situ* pour la quantification de l'épaisseur de bio-colonisation, cofinancé par une étude avec la société TOTAL (2) la modélisation du processus de colonisation (3) l'expertise in-situ pour l'identification et la quantification des espèces dominantes en vue de la colonisation d'éoliennes offshore au large de St Nazaire.

• (1) : ce travail jusqu'alors exploratoire et qualitatif est entré en phase de développement scientifique avec un post-doc de 18 mois co-financé par l'Université de Nantes et le projet Irlandais MAREI. Le protocole de mesure 3D de la biocolonisation est maintenant disponible. Des premiers tests ont été réalisés et sont concluants pour la mesure de bio-colonisation de type cône (→ Fig. 24, extrait d'une vidéo réalisée lors du projet) : les bio-colonisations simulées sont faites de cônes de géométrie connue visant à représenter des tailles de l'agglomérat de balanes à la moule. On pourra alors accéder à l'erreur de mesure du protocole en laboratoire et dans des conditions réelles de plus en plus difficiles.

Perspectives et effet de levier de COSELMAR : dans le cadre du projet ANR ABIOP, piloté par l'Université sur la mise en place opérationnelle de protocoles, une plaque témoin (→ Fig. 25) sera utilisée pour calibrer les appareils en conditions de turbidité et de luminosité réelles (passage TRL 4-5 à 6-7).



Figure 24. Essais en bassin Ifremer (Boulogne) – Financés par la société TOTAL pour la validation du protocole développé dans COSELMAR dans le cas d'une rugosité mono-couleur et absence de turbidité.



Figure 25. Reconstitution 3 D à partir de 2 images dans le cas de la plaque « biocolmar » avec couleurs variées et sans turbidité (Université de Nantes – GeM-MMS-IXEAD-Biolittoral/MAREI (Irlande))

• (2) : le modèle stochastique par processus Gamma a été finalisé. Il permet aussi de simuler l'accroissement d'épaisseur et la variation de rugosité.

Perspectives et effet de levier de COSELMAR : l'analyse des résultats a montré une forte dépendance à la mesure (point précédent) et à la définition

de la rugosité. Une faille est apparue dans les définitions normalisées, ce qui a donné l'idée du projet WEAMEC LEHERO-MG, réalisé en partenariat avec les hydrodynamiciens du LHEEA. Le logiciel finalisé est utilisé dans le cadre du projet FSI SURFFEOL avec STX.

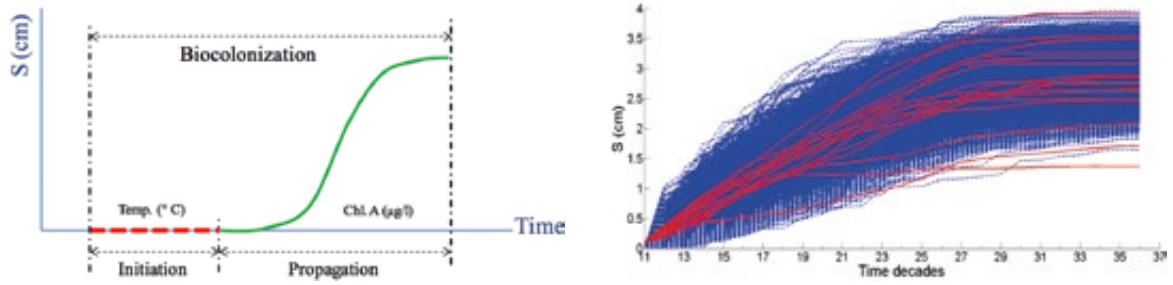


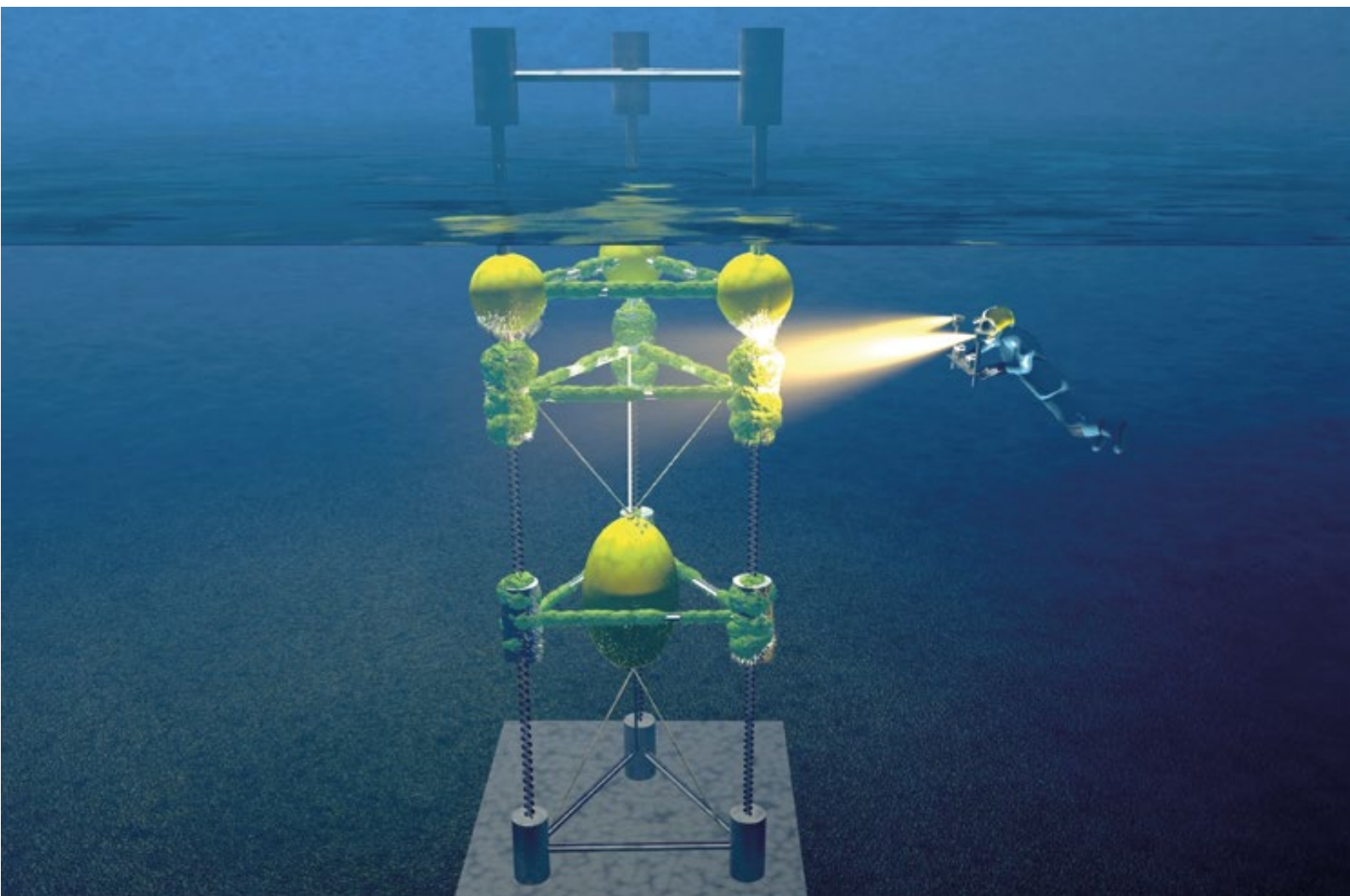
Figure 26. Assimilation de la bio-colonisation à un modèle de dégradation tri-phasique et représentation par un processus Gamma dépendant de l'état : comparaison avec quelques trajectoires DEB.

• (3) : une analyse d'implantation du brevet Biocolmar® a été réalisée dans le projet COSELMAR de même que la conception des collecteurs, en partenariat avec Biolittoral. Cette station de mesure sera mise en place dans le projet SURFFEOL et les partenaires de COSELMAR bénéficieront des mesures environnementales de ce projet (deux sondes NKE) permettant à chacun des consortium

de tirer partie des avancées de l'autre.

Perspectives et effet de levier de COSELMAR : cette structure est mise en place en juin 2017 sur le site de la base Michaud, bien référencé historiquement et permettra à tout l'IUML de compléter les données de sites (biologistes, physico-chimistes, hydrodynamiciens...).

Figure 27. Brevet Biocolmar® et ses collecteurs analysés dans le cadre de COSELMAR.



• ACTION 4.3 Écoles d'été

PLANIFICATION ET GESTION DES ESPACES MARITIMES

Du 1^{er} au 5 juin 2015, 24 étudiants (en doctorat, post-doctorat ou master 2) ont été sélectionnés et se sont réunis autour d'experts internationaux sur le thème de la planification et la gestion des espaces maritimes. Cette école d'été s'est appuyée sur le Marine Spatial Planning Research Network (MSPRN).

Les participants

Pas moins de 10 nationalités différentes pour ces 24 étudiants, dont 2 d'entre eux poursuivent actuellement leurs études à Nantes. Ils proviennent d'horizons aussi variés que la Colombie, la Crête, l'Espagne, l'Irlande, l'Afrique du Sud, l'Allemagne, l'Italie, le Portugal, l'Inde et la France.

Les intervenants quant à eux viennent du Portugal, de France, d'Espagne, de Suède, d'Allemagne, du Royaume Uni et d'Irlande. Merci à Andréa MORF, Andreas KANNEN, Gillian GLEGG, Holger JANSSEN, Stephen JAY, Thomas KLENKE, Cathal O'MAHONY, Helena CALADO, Maria DE FATIMA LOPES ALVES, Juan Luis SUAREZ DE VIVERO, et Brice TROUILLET.

Le programme

Le premier après-midi a été consacré à une excursion sur le terrain (St Nazaire, Le Croisic). Les matinées suivantes ont commencé par des discussions croisées, suivies d'interventions des experts invités, et des exercices pratiques ont clôturé chaque journée.



Discussions croisées à la MSH Ange-Guépin.



Excursion sur le terrain.

ÉCOLOGIE DES MICRO-ALGUES ET DES MOLLUSQUES DES ZÔNES CÔTIÈRES

Du 1^{er} au 4 septembre 2015, 16 étudiants (en doctorat, post-doctorat ou master 2) ont été sélectionnés et se sont réunis autour d'experts internationaux sur le thème de l'écologie des micro-algues et des mollusques des zones côtières.

Les participants

Pas moins de 12 nationalités différentes pour ces 16 étudiants, dont 3 d'entre eux poursuivent actuellement leurs études à Nantes. Ils proviennent d'horizons aussi variés que la Tunisie, le Maroc, l'Indonésie, l'Allemagne, l'Italie, la Biélorussie, l'Autriche, la Chine, l'Écosse, le Portugal, l'Inde et la France.

Les intervenants quant à eux provenaient du Portugal, du Danemark, du Canada, de France, d'Espagne et des USA. Merci à Lourenço RIBEIRO, Michaël KÜHL, Cédric HUBAS, André MALLET, Nicolas CHOMERAT, Santiago FRAGA, Philippe SOUDANT, Patricia TESTER, Romain GASTINEAU, Sébastien LEFEBVRE, Véronique SECHET, Philipp HESS, Bruno JESUS, Vona MELEDER, Laurent BARILLE, Priscilla DECOTTIGNIES et Bruno COGNIE.

Le programme

Les matinées ont été consacrées aux cours théoriques, tandis que les après-midis ont permis d'initier les étudiants à des techniques de pointe grâce à des travaux pratiques en laboratoire. Une sortie de terrain lors du dernier jour leur a permis de tester leurs nouvelles connaissances en conditions réelles !



TP sur le terrain.



TP dans les labos de MMS.

• Action 4.4 Création d'un GdR sur les algues toxiques et leurs impacts

Cette action était issue d'une volonté de créer une dynamique à l'échelle nationale sur la recherche concernant les algues toxiques, leurs métabolites et impacts sur les socio-écosystèmes littoraux et marins. Ainsi cette action était d'emblée en forte connexion avec l'action 1.4 sur la chimiodiversité des toxines algales ainsi que le fil rouge du rayonnement national et international de notre fédération de recherche à travers ce projet COSELMAR.

SYNTHÈSE DE L'ACTION 4.4 CRÉATION DE GDR SUR LES ALGUES TOXIQUES

Créé début 2014 et coordonné par Hélène Hégaret (CNRS, UMR LEMAR) et Philipp Hess (Ifremer, Laboratoire Phycotoxines – Unité Littoral), le groupement de recherche national PHYCOTOX « Des microalgues aux risques pour l'homme et l'écosystème » s'intéresse aux efflorescences algales toxiques et leurs impacts sanitaires et socio-économiques.



26 équipes pour un réseau aux compétences complémentaires

Le GDR fédère 26 équipes françaises de différents organismes, instituts ou UMR : CNRS, Ifremer, ANSES, UBO, IRD, Universités de Nantes, Caen, Lille, Bordeaux, Montpellier, Paris 6, Université du Littoral Côte d'Opale, L'Institut Louis Malardé de Polynésie française. Le GDR implique 14 laboratoires de l'Ifremer. L'objectif est de créer un réseau structuré autour des compétences portées dans les différentes équipes, diversifiées et complémentaires. Il a ainsi vocation à faciliter la pluridisciplinarité des approches.

Les objectifs spécifiques de ce GdR PHYCOTOX sont à la fois scientifiques et opérationnels :

- Continuer à structurer la recherche française sur les algues nuisibles et toxiques et leurs toxines. Ceci permettra de mieux intégrer nos projets dans les démarches structurées à l'échelle internationale GLOBALHAB (2014 - 2023) et ainsi augmenter

la visibilité de la recherche française à l'échelle européenne et internationale.

- Continuer à améliorer la recherche interdisciplinaire afin de mieux préparer les équipes françaises à la participation dans les projets européens et internationaux.
- Mieux appréhender par la recherche les questions fondamentales posées par des événements exceptionnels ou par des efflorescences de nature récurrente, en vue de :
 - Améliorer la connaissance de la diversité et de la distribution des micro-algues nuisibles et toxiques sur le littoral français ;
 - Améliorer la compréhension du déterminisme des efflorescences de micro-algues nuisibles et toxiques, qu'elles soient pélagiques ou benthiques, afin d'identifier les facteurs qui favorisent leurs proliférations et l'invasion dans des écosystèmes sensibles ;
 - Mieux appréhender le lien entre phénologie et production toxinique ;
 - Identifier et caractériser les phycotoxines, réglementées ou émergentes, qui posent des problèmes à l'heure actuelle en France, ou qui émergent dans nos pays voisins et qui pourraient poser des problèmes dans un futur proche ;
 - Apporter de nouvelles connaissances sur la toxicité des différentes toxines observées en France métropolitaine ou outre-mer ou dans les écosystèmes marins voisins ;
- Mieux identifier et caractériser les risques pour les écosystèmes et la santé humaine, tels que :
 - Améliorer les connaissances sur l'impact des phycotoxines sur les consommateurs primaires et secondaires et sur l'écosystème ;
 - Mieux évaluer les transferts de toxines au sein du réseau trophique de l'écosystème marin ;
 - Apporter, par la modélisation mathématique, une meilleure compréhension des mécanismes et facteurs impliqués dans les risques sanitaires potentiels associés aux efflorescences de micro-algues toxiques ;
 - Mieux identifier l'impact socio-économique des efflorescences de microalgues nuisibles et toxiques.

Pour atteindre ces objectifs, il apparaît à l'heure actuelle nécessaire d'améliorer et de renforcer encore les interactions entre les équipes et avec les laboratoires internationaux en favorisant les échanges et les collaborations entre laboratoire et faisant participer

les étudiants formés par la recherche. C'est ce que le GdR s'est efforcé de faire lors de ces quatre années et a pour objectif d'améliorer encore lors de ces quatre années à venir.

Activités et rayonnement du GDR durant la période 2014-2017

Ce réseau vise à formuler des priorités de recherche et à identifier de futures collaborations pour des projets de recherche. Quatre réunions annuelles et une 12aine de réunions du comité de pilotage ont facilité cette démarche. Pour les 4 réunions, une vingtaine de personnalités internationales ont été invitées, ce qui a permis d'augmenter la visibilité de la communauté française dans ce domaine. La création du site web en début 2014 (<http://www.phycotox.fr>) a permis d'informer les 140 membres et autres internautes sur 52 pages sur les activités du réseau et les généralités concernant les algues toxiques. Une quinzaine de pages ont été rajoutées depuis. Via une liste de diffusion email les membres ont été informés de plus de 600 nouvelles (dont les annonces de 10 stages M2, 13 thèses de doctorat et 6 post-doctorats directement disponibles au sein du réseau). Le comité de direction du GdR a présenté sa candidature auprès de la société savante internationale sur les algues toxiques (ISSHA) en octobre 2014 lors de ce colloque en Nouvelle-Zélande afin d'être hôte du colloque international sur les algues toxiques ; **cette candidature a été retenue et la conférence ICHA aura lieu à Nantes en 2018**. Le GdR a également fait une demande de renouvellement (accordé par l'Ifremer et en cours pour le CNRS).

Le GdR incubateur de collaborations

Depuis 2015, les collaborations entre équipes sont fortement encouragées par des appels à projet. Ces mini-projets sont financés à hauteur de 2 500 à 7 000 € afin de faciliter l'achat de consommables. Neuf mini-projets ont été financés et ont permis le rapprochement entre équipes.

Le GdR incubateur de projets

Le GdR a en effet réellement permis à de nombreux projets de voir le jour. Il a favorisé les échanges et les rencontres propices à la recherche de financement à l'échelle régionale, nationale ou encore internationale, ce qui a ainsi permis et continue de permettre de faire vivre toutes les thématiques de recherche autour des microalgues toxiques et nuisibles. Une 40aine de projets ont été proposés entre équipes du

GdR, mais aussi avec des chercheurs internationaux, grâce aux différentes actions mises en place par le GdR. Sur l'ensemble de ces projets, 50% sont actuellement en cours ou acceptés, 20% en cours d'évaluation, 25% ont été refusés jusqu'à présent, mais seront pour la plupart re-soumis, et 5% sont en cours d'incubation. **Ocean-15** est un des exemples de projets phares d'intégration à l'échelle nationale qui ont été montés dans le cadre du GdR, regroupant trois instituts du GdR PHYCOTOX (Ifremer/PHYC, UPMC/LOOV et Anses, Fougères) et un nouveau partenaire, le laboratoire GéoAzur (UMR CNRS, UNS, OCA et IRD). Le projet Ocean-15 vise de clarifier l'écologie chimique des espèces *Ostreopsis* spp., émergentes en Méditerranée, et aux effets des différents composés produits par ces espèces ; il fait ainsi appel aux axes 1, 2 et 4. Le projet **CoClima** (ERANET for climate services) est un exemple phare de projets européens acceptés. CoClima vise à anticiper les effets des changements climatiques et globaux sur les algues toxiques, et par la suite les secteurs principaux touchés par ces phénomènes (la conchyliculture et le tourisme).

INTERVIEW

Philipp Hess Laboratoire Phycotoxines, Ifremer



La prolifération de certaines espèces de microalgues unicellulaires, provoquant parfois des eaux colorées brunes, rouges ou vertes, peut être toxique pour les coquillages et pour des poissons. Chez l'homme, l'ingestion de coquillages contaminés peut provoquer des symptômes de type gastro-intestinal ou même neurologiques selon la nature des toxines. Les phycotoxines (toxines issues des « algues ») sont produites notamment par des dinoflagellés et des diatomées.

Y aurait-il autant de toxines que de micro-algues toxiques ?

Non, une espèce (ou genre) de micro-algue toxique peut produire plusieurs types de toxines. On connaît plus de 5 000 micro-algues dont 174 espèces sont toxiques ou nuisibles (décrites dans notre ouvrage*). Il est important de surveiller et prévoir de possibles proliférations ou efflorescences (blooms) du phytoplancton marin par un suivi régulier et d'analyses systématiques (mis en place sur tout le littoral en France et de par le monde) et bien sûr d'identifier les toxines présentes dans l'eau de mer.

Nous avons répertorié plus de 500 toxines (y compris celles produites par des cyanobactéries marines) à l'échelle mondiale, même si la structure chimique n'est pas encore connue pour toutes ces molécules. Cependant, le nombre de toxines observées va croissant. En effet, l'intensification du transport maritime augmente les apports d'espèces « exotiques » via les eaux de ballast. Le changement climatique et le phénomène de réchauffement des eaux côtières favorisent également leur prolifération en zones subtropicales et tempérées.

Vous développez une nouvelle approche d'analyse des toxines. En quoi cette méthode est-elle innovante ?

La méthode des bio-essais, antérieure à 2011, restait peu spécifique, des souris servaient alors de tests (pour connaître 24 h plus tard si les coquillages étaient consommables). Depuis, la méthode d'analyse officielle est basée sur la spectrométrie de masse. Cette méthode quantitative est « ciblée » sur des molécules connues pour leur toxicité mais seulement sur 12 molécules en ce qui concerne les toxines lipophiles.

Dans le cadre du projet régional Coselmar, nous avons montré la faisabilité d'une nouvelle méthode¹ qui complète les techniques de prélèvements d'eau de mer réguliers ainsi que cette analyse ciblée. Nous avons travaillé sur une approche combinée de deux techniques : l'échantillonnage passif (1) et la spectrométrie de masse haute résolution (2). La première

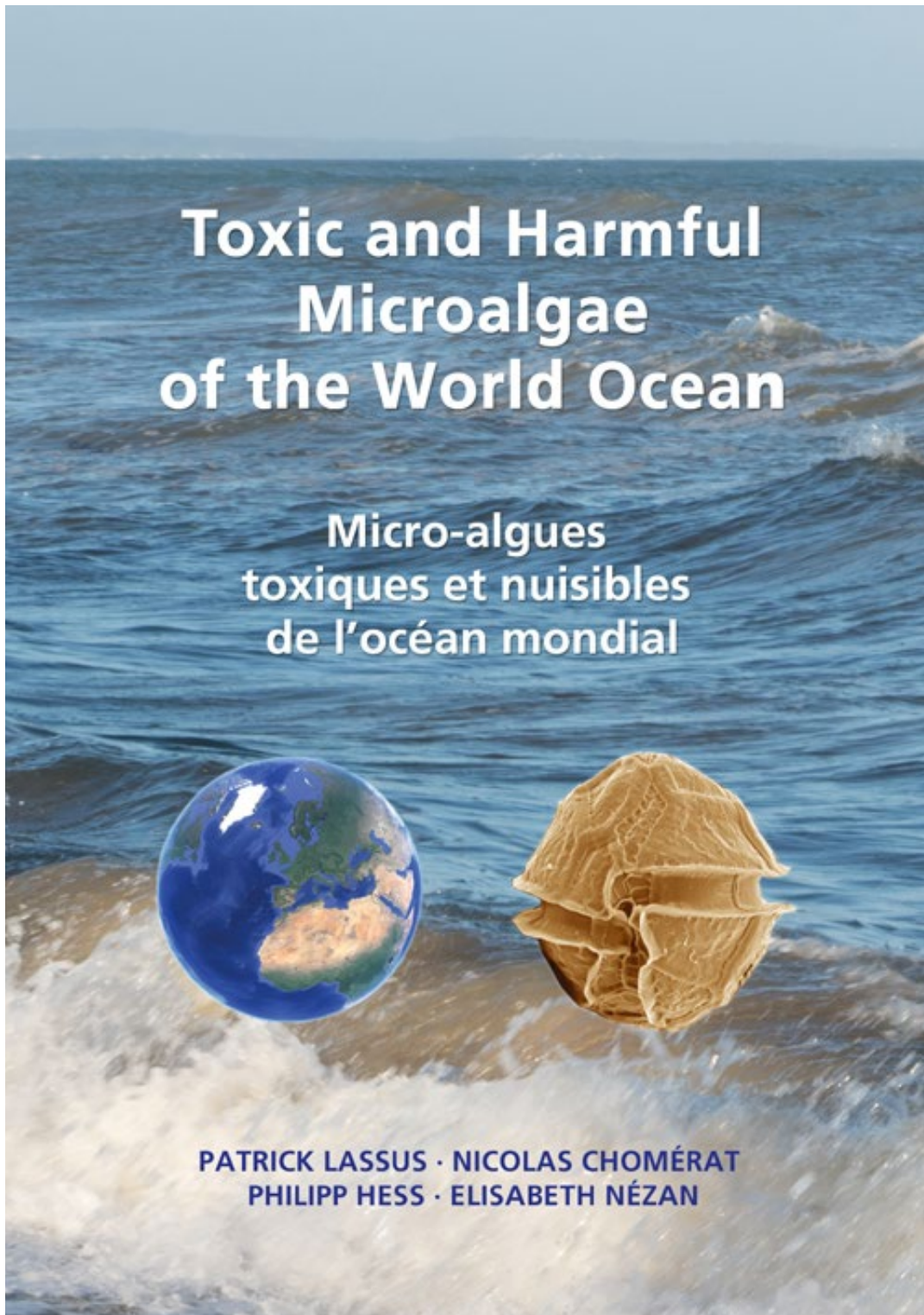
technique permet d'accumuler tous les composés lipophiles dissous dans l'eau de mer, sorte « d'empreinte chimique » laissée par les micro-organismes (dont les micro-algues), alors que la seconde mesure simultanément un nombre massif de composés chimiques, sans avoir à cibler une molécule (analyse non-ciblée). Nous détectons ainsi un nombre important de composés dissous et, en particulier, les toxines algales. Une fois les données acquises, on crible notre base de données pour voir si l'une ou l'autre des 500 toxines, répertoriées mondialement, serait présente. Nous ne sommes qu'au début de nos recherches dans ce domaine car peu de métabolites produits par les micro-algues sont connus. Beaucoup d'autres composés organiques et de toxines émergentes, issus du phytoplancton ou de cyanobactéries, restent à découvrir en milieu marin et saumâtre.

MICROALGUES TOXIQUES ET NUISIBLES DE L'OCÉAN MONDIAL

Avec le soutien de la Région des Pays de la Loire (via le projet COSELMAR), des chercheurs de l'Ifremer ont publié un ouvrage compréhensif sur les micro-algues toxiques.

Cet ouvrage met à jour et complète les données internationales disponibles sur les espèces toxiques et nuisibles du phytoplancton et du micro-phytobenthos. Il fait l'inventaire des occurrences régionales à l'échelle de la planète : localités, densités cellulaires, niveau de toxicité des animaux contaminés, intoxications humaines et animales, isolement des principes actifs et/ou des toxines identifiées, sources documentaires. Enfin, cet ouvrage aborde la distribution géographique des producteurs de phycotoxines à partir de données récentes. L'objectif est d'analyser l'évolution des épisodes toxiques et nuisibles sur les 30 dernières années afin de dégager des tendances et d'introduire une discussion sur la réalité d'une augmentation du nombre d'espèces et de toxines connues au cours du temps.

1. Zendong Z. et al. 2016. Environ. Sci. Technol.



Toxic and Harmful Microalgae of the World Ocean

Micro-algues
toxiques et nuisibles
de l'océan mondial

**PATRICK LASSUS · NICOLAS CHOMÉRAT
PHILIPP HESS · ELISABETH NÉZAN**

Toxic and Harmful Microalgae of the World Ocean / Micro-algues toxiques et nuisibles de l'océan mondial, par Patrick Lassus, Nicolas Chomérat, Philipp Hess et Élisabeth Nézan Denmark, International Society for the Study of Harmful Algae / Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO. IOC Manuals and Guides, 68 pages (Bilingual English/French) octobre 2016. <http://www.issaha.org/Welcome-to-ISSHA/Web-shop/Toxic-and-Harmful-Microalgae-of-the-World-Ocean>

OCEANEXT



La conférence pluridisciplinaire OCEANEXT, qui s'est déroulée à Nantes les 8, 9 et 10 juin 2016, a connu un franc succès !

QUELQUES CHIFFRES

Plus de 220 inscrits, des chercheurs représentant des laboratoires de 18 nationalités différentes (Afrique du Sud, Allemagne, Belgique, Canada, Chili, Espagne, Finlande, France, Grande Bretagne, Ghana, Irlande, Maroc, Nouvelle Calédonie, Pays Bas, Norvège, Nouvelle Zélande, Portugal, USA), 4 sessions plénières, 14 keynotes, 65 présentations orales, 19 flash présentations, 20 posters, 4 tables rondes et 9 binômes pour « 3 minutes pour COSELMAR » !



DES SESSIONS PLÉNIÈRES PASSIONNANTES

Dorothy DANKEL et la transdisciplinarité, Chris BOWLER et l'expédition TARA, Thierry CHOPIN et l'IMTA, Luc Van HOOFF et la prospective... Tous auront su nous faire réfléchir, rire, rêver, avec cette faculté de s'adresser aussi bien aux biologistes, aux géographes, aux économistes, aux sociologues ou aux ingénieurs.

DES KEYNOTES DE QUALITÉ

Antonio Alvarez ALONSO (CSIC, Espagne), Elisa BERDALET (CSIC, Espagne), Allan CEMBELLA (Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research,

Allemagne) Gilbert DAVID (IRD, France), Michael DEPLEDGE (Université d'Exeter, ECEHH, Royaume Uni), Marcel JASPARS (Université d'Aberdeen, Royaume Uni), Stephen JAY (Université de Liverpool, Royaume Uni), Darren LUMBROSO (HR Wallingford, Royaume Uni), Katie LYNCH (Université de Cork, Irlande), Alan O'CONNOR (Trinity College Dublin, Irlande), Erik OLSEN (IMR Bergen, Norvège), Koen SABBE (Université de Gand, Belgique), Jean-François SASSI (CEA Cadarache, France), Benoit SCHOEFS (Université du Maine, France)... ont tous répondu présents, et ont présenté leurs travaux en ouverture de chaque session.

DES TABLES RONDES... RONDEMENT MENÉES !

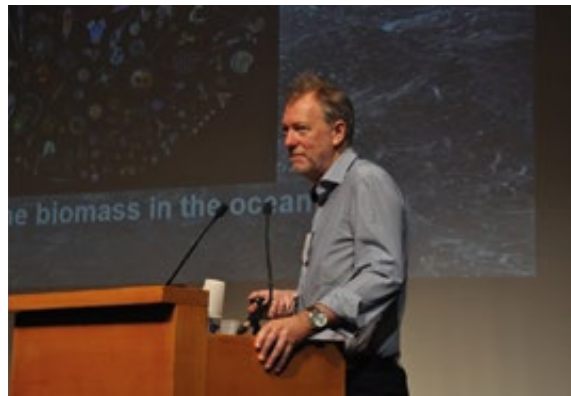
Frédéric DENHEZ a su mener le dialogue entre chaque intervenant, puis avec le public, sur des sujets aussi variés que « L'Océan, nourricier ? », « Quel avenir pour l'aquaculture offshore ? », « Energies marines renouvelables, quel défi ? », et « La mer à partager ».

UN EXERCICE DE VULGARISATION DRÔLE ET INSTRUCTIF

Les 9 équipes de « 3 minutes pour COSELMAR » ont de toute évidence réussi leur exercice de vulgarisation scientifique en nous faisant rire et en permettant à chaque spectateur d'appréhender des sujets aussi ardues que la kleptoplastidie ou la métabolomique.

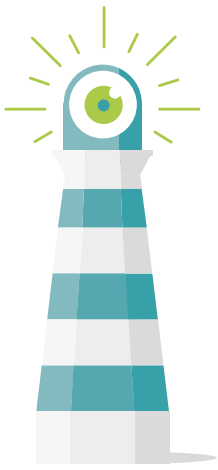
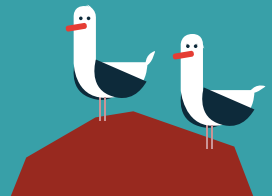
DES SOCIAL EVENTS TRÈS APPRÉCIÉS

De l'Ice Breaker du 8 juin au dîner de gala du 9 juin, chacun a pu profiter des douceurs gastronomiques, climatiques et musicales de notre belle région nantaise. De nombreux contacts ont été noués, et de futures collaborations régionales, nationales et internationales verront sans aucun doute le jour !





La websérie interactive dont des chercheurs sont les héros



LES ÉCLAIREURS

MER & LITTORAL

EMBARQUEZ DANS LE DÉFI CITOYEN

À PARTIR DU 27 AVRIL

EN TOURNÉE PRÈS DE CHEZ VOUS **GRATUIT**

27 AVRIL - Nantes
4 MAI - Les Sables d'Olonne
11 MAI - Le Croisic
18 MAI - Notre-Dame-de-Monts
1^{er} JUIN - Nantes

EN LIGNE

[W leseclaireurs.coselmar.fr](http://leseclaireurs.coselmar.fr)
[f facebook.com/LesEclaireursCOSELMAR](https://facebook.com/LesEclaireursCOSELMAR)
[Y youtube.com/user/UnivNantes](https://youtube.com/user/UnivNantes)

COSELMAR

Un projet  Avec le soutien de :



UNIVERSITÉ DE NANTES



Ifremer



PAYS DE LA LOIRE



INSTITUT UNIVERSITAIRE
MER ET LITTORAL



UNIVERSITÉ
ANGERS



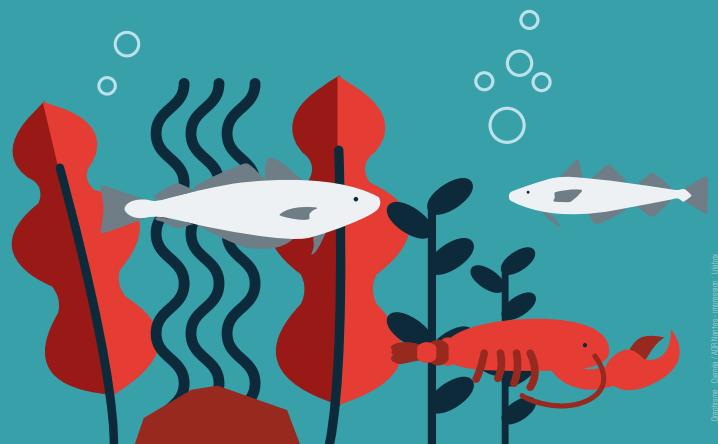
MSH
ANGERS-GEOGEO

Avec le concours du journal

lejournal.com

les Sables
d'Olonne...
ACCOMMODATION

Les Jardins de la Mer Biotopia



Les Éclaireurs

Des chercheurs héros d'une web-série

Pour une fois, ils ne sont pas derrière leur microscope mais bien derrière la caméra. Une dizaine de scientifiques nantais viennent, en effet, de créer leur propre web-série humoristique. Ils espèrent modestement rendre leur travail plus compréhensif.

UNE VITRINE POUR LEURS RECHERCHES

À l'image de leur teaser plein d'ironie, « Les Éclaireurs » ne se prennent pas du tout au sérieux comme l'explique Sophie Pardo, coordinatrice scientifique pour l'Université de Nantes : « En 2013, on a créé un projet pluridisciplinaire (COSELMAR) avec la participation de 169 chercheurs et on a rapidement voulu diffuser nos études et surtout les vulgariser. » Des études autour de la mer réalisées en collaboration avec l'Ifremer et 17 laboratoires nantais et angevins.

Le but était de trouver « un support innovant qui s'adresse au plus grand nombre. On a tout de suite pensé à Internet et au bout de quelques exercices, l'idée d'une web-série a émergé », raconte Justine Dumay. Elle fait partie de l'équipe qui a travaillé à l'élaboration du projet avec l'aide du cabinet nantais, Cyanea, spécialisé dans la production audiovisuelle.

QUATRE ÉPISODES INTERACTIFS DE QUELQUES MINUTES

Un travail de deux ans avec des heures d'échanges entre le metteur en scène, les acteurs et les chercheurs. « C'était assez complexe notamment pour construire les dialogues mais ils nous ont laissé les mains libres », selon Jérôme Fihey de Cyanéa. Et pour faire comprendre au mieux leurs recherches, les scientifiques ont choisi d'aborder des sujets grand public.

Mais attention Sophie Pardo rappelle qu'il « y a des choses pointues dans les différents épisodes. En revanche, ils sont toujours reliés à des problématiques de la vie quotidienne. » Par exemple, la web-série aborde le sujet des huîtres et de leurs relations avec les micro-algues aux travers la question de la consommation.

DES RENCONTRES AVEC LE PUBLIC

La web-série est aussi interactive, c'est-à-dire que « l'on peut faire des choix pendant un épisode pour en changer sa fin », à en croire Justine Dumay. Au-delà des quatre épisodes qui seront disponibles au fur et à mesure sur Internet, les scientifiques organisent ce qu'ils appellent, « La tournée des Éclaireurs. » Après Nantes ce jeudi soir, ils seront aux Sables d'Olonne, au Croisic, à Notre-Dame-de-Monts et enfin, de nouveau à Nantes au début du mois de juin pour rencontrer le public.

Ils ont, en tout cas, trouvé ça « très enrichissant » et se voient déjà en faire une autre.

Extrait d'un article du journal *20 minutes* (<http://www.20minutes.fr/nantes/2058155-20170427-video-nantes-chercheurs-heros-web-serie>).



COSELMAR



www.coselmar.fr

leseclaireurs.coselmar.fr

plateforme.coselmar.fr

oceanext.sciencesconf.org

