Impact du sédiment sur les proliférations de macroalgues sur vasières (IMPRO)

Synthèse
2022

OSUR Rennes (UMR Ecobio et Géosciences)
J. Louis, L. Jeanneau, N. Lebris, M. Chorin, M. Liotaud, E. Jardé, C. Petton, G. Bouger, P. Petitjean, A. Laverman

IFREMER Brest
F. Andrieux-Loyer, F. Caradec, E. Rabiller

Univiversité Bordeaux (UMR EPOC)
P. Anschutz, C Charbonnier, B. Deflandre

CEVA
S. Richier, M. Lasbleiz, P-E. Oms, S. Ballu

Avec l'appui des équipes des territoires de SAGE concernés

Avec le soutien financier de la Région Bretagne et de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne et la collaboration du Creseb

Référence :

J. Louis, L. Jeanneau, F. Andrieux-Loyer, P. Anschutz, C. Charbonnier, S. Richier, M. Lasbleiz, P-E. Oms, S. Ballu, J. Launay, A. Laverman (coord.), 2022. *Impact du sédiment sur les proliférations de macroalgues sur vasières (projet IMPRO)*. Synthèse du rapport d'étude. CNRS - Université Rennes1, Ifremer, Université Bordeaux, CEVA. 20 p.

Photo en page de couverture : ©S. Ballu, CEVA. Vasière du Lédano (Trieux, Côtes d'Armor)

Table des matières

Introduction 2
Rappel sur les processus biogeochimiques et les flux sédimentaires 3
Axe 1 - Diversité géographique des vasières bretonnes 4
Une forte variabilité des flux sédimentaires de N et P des vasières tant à l'échelle régionale que locale. 6
Une diversité de compositions physico-chimiques des sédiments, avec une signature d'apports anthropiques. 6
Des corrélations entre flux et caractéristiques du sédiment insuffisantes pour proposer un indicateur sédimentaire (proxy) facilement mesurable pour estimer les flux benthiques. 7
Axe 2 – Variabilité saisonnière et caractérisation des processus à l'échelle de deux estrans 8
Site vaseux du Lédano 9
Site sableux de Lancieux 11
Extrapolation des calculs de flux sédimentaires à d'autres vasières 12
Axe 3 – Processus d'absorption des nutriments par les macroalgues opportunistes de type ulves en zone intertidale 13
Impact de la photopériode sur l'absorption des nutriments 13
Impact des conditions d'émersion sur substrat sableux et vaseux sur l'absorption de nutriments 14
Calibration et validation du modèle 0D de croissance des ulves 15
Axe 4 – Modélisations de la contribution sédimentaire aux ulves de la vasière du Lédano 16
Modélisation EcoMARS3D-Ulves sur la vasière du Lédano 16
Modélisation biogéochimique via un modèle de diagénèse précoce : résultats préliminaires 17
Perspectives 19
L'impact de la microfaune et de la macrofaune sur les flux benthiques ? 19
Les nutriments dans les sédiments : un héritage pour combien de temps ? 19
Limites de la modélisation par EcoMARS3D-Ulves 19
Conclusion générale 20

INTRODUCTION

La Disposition 10A-2 du SDAGE Loire-Bretagne 2016-2021 prévoyait l'initiation d'études d'identification de l'origine des apports d'azote, et notamment la part issue du relargage sédimentaire sur les sites de vasières, contribuant au déclassement des masses d'eau au titre des marées vertes. Pour répondre à cette disposition et appuyer les porteurs de SAGE (Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux) dans la mise en œuvre de plan de gestion en vue de réduire les marées vertes, le CEVA exploite depuis plusieurs années l'outil de modélisation EcoMARS3D-Ulves. Ce modèle d'écosystème permet de tracer l'azote contenu dans les ulves donnant accès à la détermination de la contribution de chaque source de nutriment à la prolifération observée. Ce modèle permet, dans un second temps de proposer des objectifs de qualité de l'eau sur les sources terrigènes (azote) en procédant à des scénarios de réduction des flux de nutriments.

Actuellement, la prise en compte du flux sédimentaire dans le modèle EcoMARS-Ulve est basée sur des valeurs moyennes issues de la littérature et/ou mesurées très ponctuellement sur quelques sites bretons sablo-vaseux. Or, les données disponibles sur les flux issus de sédiments vaseux ou sableux (flux benthiques) montrent de très fortes disparités, suivant la nature du sédiment, les conditions locales et les saisons. L'absence de données fiables et représentatives de ces flux benthiques dans les vasières bretonnes concernées par les proliférations d'ulves constitue actuellement une source d'incertitude importante dans l'analyse des résultats produits par le modèle. En effet, les flux sédimentaires apparaissent comme des contraintes fixées du modèle EcoMARS-Ulve. Ces données impactent ainsi fortement la quantification des sources d'azote ainsi que l'évaluation *in fine* de la réponse de l'écosystème aux baisses des apports terrigènes.

Ce constat a débouché, sous l'impulsion et la coordination du CRESEB, à la mise en place d'un groupe de scientifiques (CEVA, IFREMER, CNRS-Univ Rennes1 UMR Ecobio et Géosciences Rennes, Univ Bordeaux UMR EPOC) pour faire un point sur l'état des connaissances et des lacunes sur ces flux. Cette concertation a abouti à la proposition du projet scientifique IMPRO pour acquérir de nouvelles données et connaissances locales sur la contribution du sédiment aux proliférations de macroalgues et permettre *in fine* une meilleure prise en compte de la dynamique sédimentaire dans les modèles.

Le projet IMPRO comprend quatre Axes d'étude (Figure 1). Tandis que l'Axe 1 du projet caractérise la variabilité régionale des flux benthiques de 10 vasières du littoral breton concernées par la disposition 10A-2, en lien avec les variations de propriétés des sédiments, l'Axe 2 permet la mesure des flux benthiques et la caractérisation des processus à l'échelle d'estrans types (site pilote vaseux du Lédano dans l'estuaire du Trieux et site sableux de la baie de Lancieux). En apportant un volet biologique aux approches des Axes 1 et 2, l'Axe 3 vise à acquérir de nouvelles connaissances sur l'écophysiologie des ulves sur estran et en particulier à déterminer l'impact du cycle jour / nuit et immersion / émersion sur l'absorption des nutriments par les algues. Enfin, dans le cadre de l'Axe 4, l'ensemble des résultats des Axes 1 à 3 seront intégrés dans le modèle EcoMARS-Ulves, afin de tester les potentialités du modèle actuel pour répondre spécifiquement à la disposition 10A-2 du SDAGE.

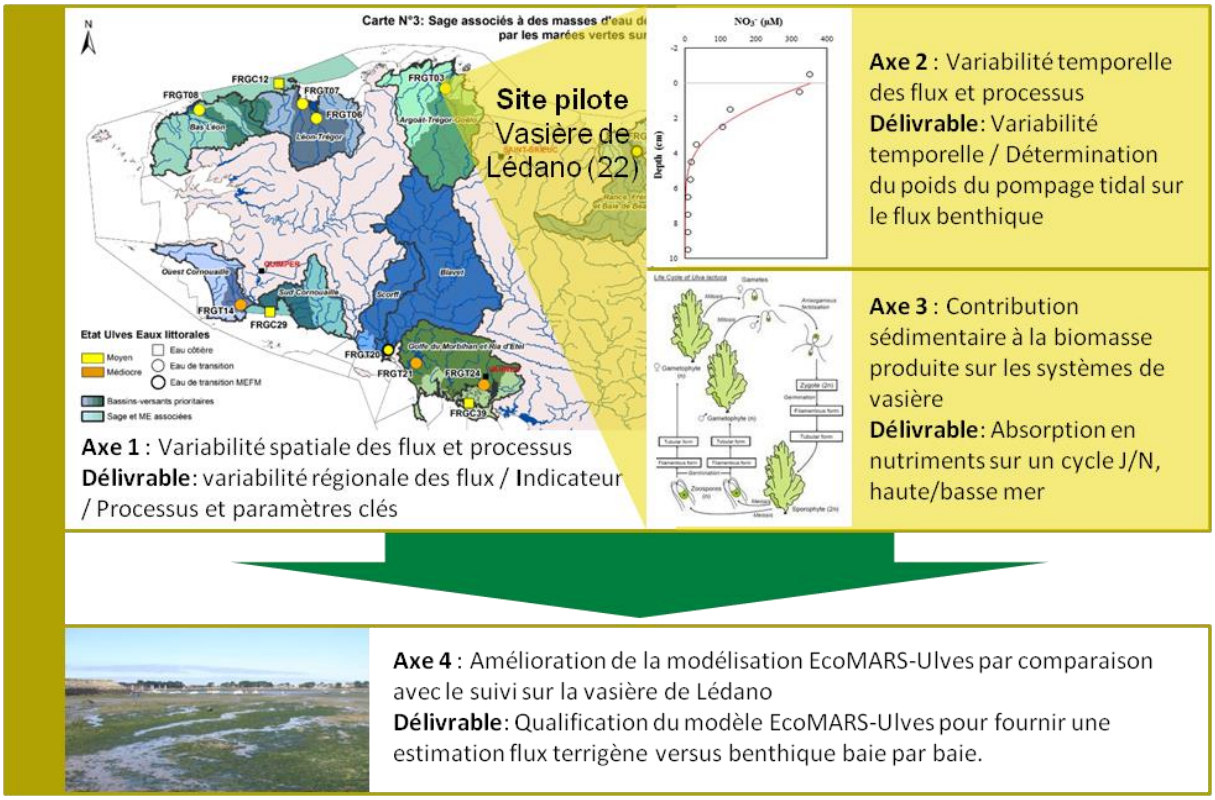


Figure 1 : Articulation des 4 axes de recherche du projet IMPRO.

RAPPEL SUR LES PROCESSUS BIOGEOCHIMIQUES ET LES FLUX SEDIMENTAIRES

Une fraction des sédiments est composée de **matière organique sédimentaire (MOS)** qui sert de nourriture pour les organismes vivants dans les sédiments et qui sont responsables de la biodégradation de cette MOS. Les produits finaux de cette biodégradation sont, entre autres, le gaz carbonique CO_2, l'ammonium NH_4^+ et le phosphate PO_4^{3-}, faisant des sédiments une source de nutriments.

La biodégradation de la MOS est réalisée en présence d'accepteurs d'électrons tels que l'oxygène. Dans les sédiments vaseux, l'oxygène est rapidement consommé dans les premiers mm. Au-delà de cette interface, le sédiment est en condition d'anaérobie. Dans ce cas, les microorganismes utilisent d'autres accepteurs d'électrons par ordre de gain énergétique. Les premiers sont les nitrates qui sont ainsi pompés dans la colonne d'eau et réduits en N_2O (oxyde nitreux) et enfin N_2 (diazote qui va s'échapper par volatilisation) quand ce processus de dénitrification est complet. Le sédiment peut ainsi être un puits en nutriments notamment pour l'azote. En deuxième, les microorganismes utilisent des oxydes de manganèse et de fer, ce qui provoque la libération du phosphore inorganique lié aux oxydes de fer. En troisième, le sulfate, ion majeur de l'eau de mer, est utilisé à travers la sulfato-réduction contribuant à la production du gaz H_2S dans le sédiment. Le bilan entre les sources et les puits de nutriments détermine les flux benthiques, c'est-à-dire les flux provenant du sédiment et pouvant entretenir la production primaire.

Les contrôles sur la biodégradation de la MOS sont de deux types. Le premier concerne son accessibilité qui peut être gouvernée par la granulométrie des sédiments. Le deuxième type concerne sa

biodégradabilité qui est liée à sa composition chimique qui dépend de son origine. La MOS est issue des apports autochtones (algues et bactéries au sein de la vasière) et allochtones, c'est-à-dire provenant du bassin versant (végétaux terrestres, érosion des sols) ou des océans. Les apports allochtones peuvent être naturels ou issus de pollutions (rejets de stations d'épuration ou d'assainissement, contaminations fécales, résidus de combustion, produits pétroliers, xénobiotiques...). Qu'elle soit autochtone ou allochtone, naturelle ou anthropique, la MOS est incorporée au sédiment via la sénescence des organismes vivants (ex. algues), la sédimentation des matières en suspension et la bioturbation[1].

Les nutriments produits par les mécanismes biogéochimiques sont susceptibles d'être transférés vers la colonne d'eau par différents processus physiques intervenant à l'interface eau-sédiment. **Les flux peuvent être dus à des processus diffusifs** contrôlés par des différences de concentrations : les espèces chimiques se déplacent selon un gradient de la zone la plus concentrée vers la zone la moins concentrée. Ils peuvent aussi être dus **à des processus advectifs** contrôlés soit par la bioturbation, soit par des différences de pression qui génèrent un mouvement d'eau et ainsi des composés dissous. C'est le cas pendant les marées basses avec le phénomène de pompage tidal.

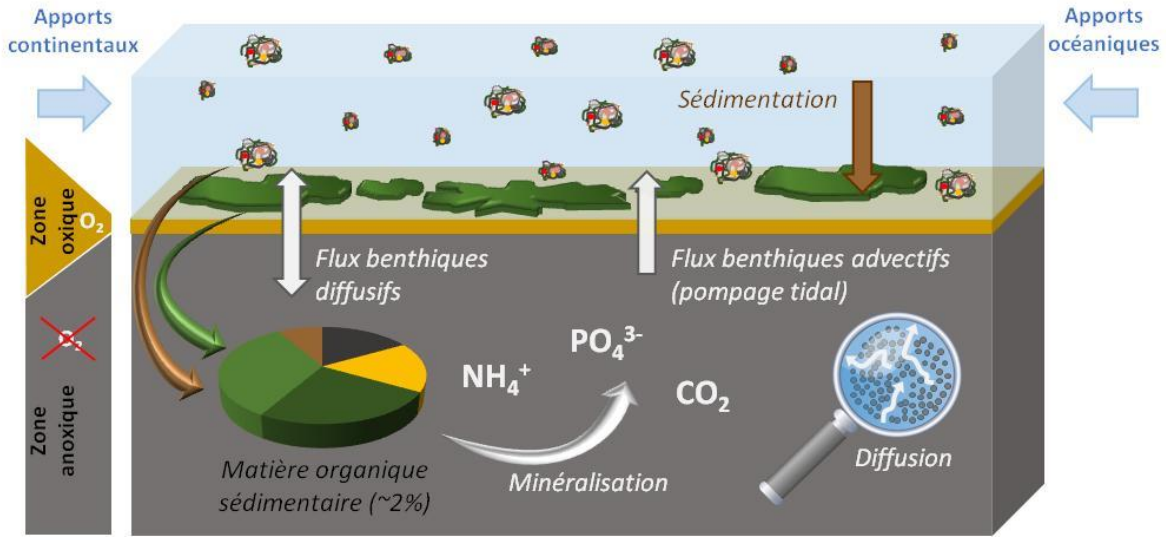


Figure 2 : Représentation schématique des processus biogéochimiques et physiques contrôlant la production de flux benthiques diffusifs et advectifs.

AXE 1 - DIVERSITE GEOGRAPHIQUE DES VASIERES BRETONNES [2]

Objectifs

Les objectifs de cet axe ont été d'étudier la diversité géographique des vasières bretonnes, en s'intéressant en parallèle (i) à la capacité des sédiments à produire des flux benthiques diffusifs de

[1] Remaniement du sédiment vaseux par les activités des organismes vivants présents dans ce milieu.

[2] Axe 1 développé à travers une collaboration entre l'Ifremer de Brest (Unité Dyneco/Pelagos) et l'Université de Rennes 1 - CNRS (UMR Ecobio-OSUR et UMR Géosciences-OSUR)

nutriments et (ii) à leurs caractéristiques physico-chimiques. Ces deux jeux de données ont été utilisés pour (iii) déterminer si un paramètre simple permettant une estimation des flux pouvait être proposé.

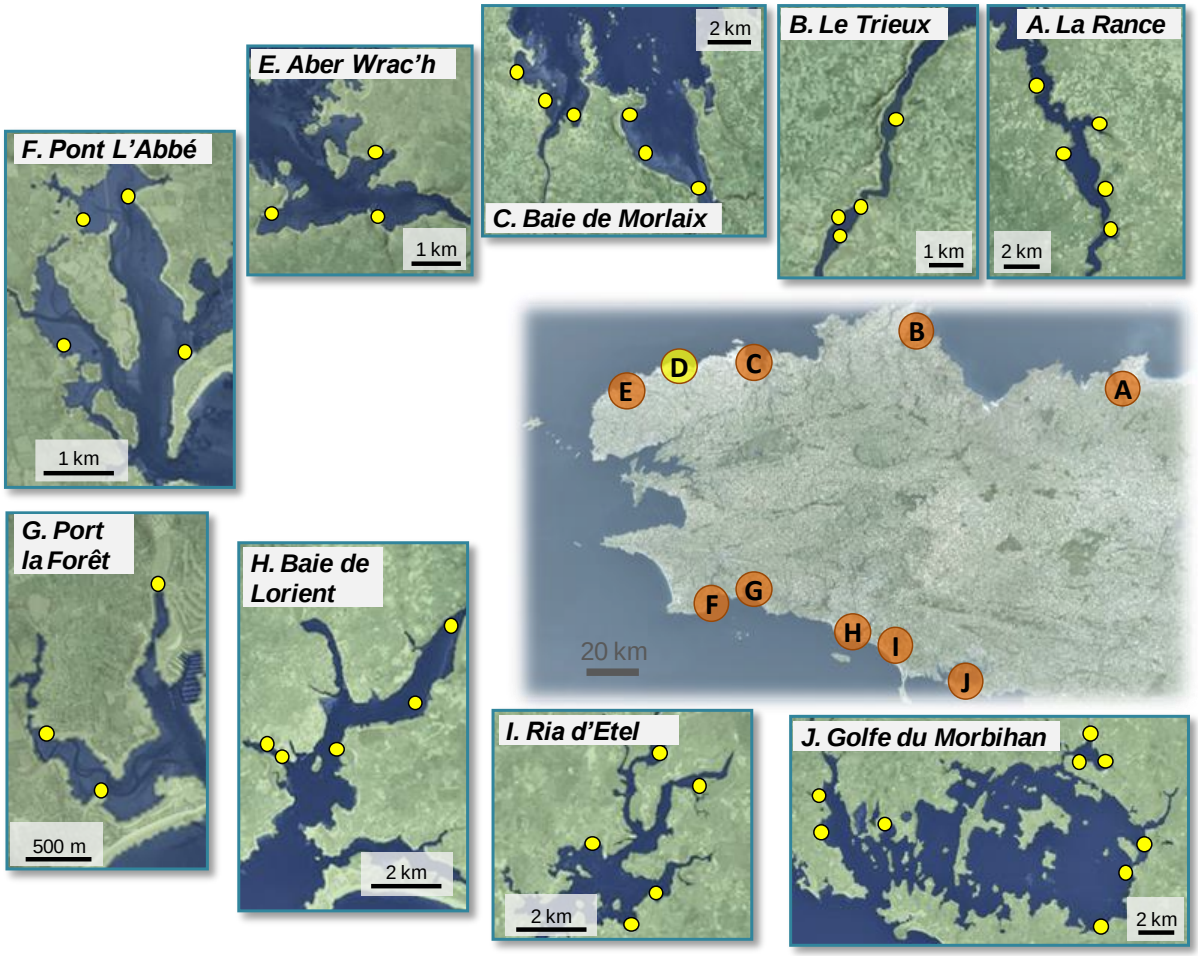


Figure 3 : Localisation des 45 stations étudiées dans le cadre de l'axe 1 du projet IMPRO. Ces stations sont réparties sur 12 sites « vasières » et 4 à 5 échantillons ont été analysés par stations, soit un total de 200 échantillons. Trois sites « vasières » différents sont répartis dans le Golfe du Morbihan : à l'ouest la Rivière d'Auray, au nord la Rivière de Vannes et au sud-est les 3 stations associées au Golfe du Morbihan. Le cercle jaune marqué D correspond à la station de l'Anse de Goulven, associée au site de l'Aber Wrac'h. Cette station est représentée à part pour des raisons d'échelle.

Méthode

Pour répondre à ces objectifs, une campagne a été réalisée durant le printemps 2019 de mi-avril à mi-juin afin de collecter 200 échantillons répartis sur un total de 45 stations de prélèvement réparties dans les 10 sites du littoral breton identifiés comme vasières déclassées à cause de la prolifération d'algues vertes et donc concernées par la disposition 10A2 du SDAGE Loire-Bretagne (Figure 3). Pour chaque échantillon, les flux benthiques potentiels en ammonium NH_4^+ et en phosphate PO_4^{3-} ont été déterminés via des incubations, et les caractéristiques sédimentaires via des analyses au laboratoire. Ces analyses ont porté sur la granulométrie et la porosité des sédiments, leur composition élémentaire (carbone COT, azote N, phosphore P) ainsi que les différentes formes du phosphore, la composition de la matière organique à travers les isotopes stables du carbone et de l'azote et la distribution des biomarqueurs lipidiques.

Résultats

Une forte variabilité des flux sédimentaires de N et P des vasières tant à l'échelle régionale que locale.

A l'échelle régionale, les flux benthiques moyens de NH_4^+ et PO_4^{3-} étaient respectivement, de 1.42 ± 1.64 mg $N.m^{-2}.h^{-1}$ (moyenne ± écart type) et de 0.53 ± 0.62 mg $P.m^{-2}.h^{-1}$, ce qui est du même ordre de grandeur que ceux trouvés dans la littérature scientifique. A cette échelle, l'écart type est supérieur à la moyenne, ce qui met en avant la forte variabilité spatiale de ces flux. Cette variabilité se visualise figure 4 via la représentation des écarts types en valeur absolue et des écarts types relatifs pour toutes les échelles spatiales depuis celle de la région (bleu), celle des sites (orange) et à l'échelle des stations (jaune). Ces données mettent en avant la diversité des écosystèmes de type vasière en Bretagne. De plus cette variabilité spatiale confirme l'idée que l'absence de données de flux benthiques fiables et représentatives des secteurs concernés par les proliférations d'ulves constitue à l'heure actuelle une source d'incertitude dans l'analyse des résultats produits par le modèle EcoMARS-Ulve.

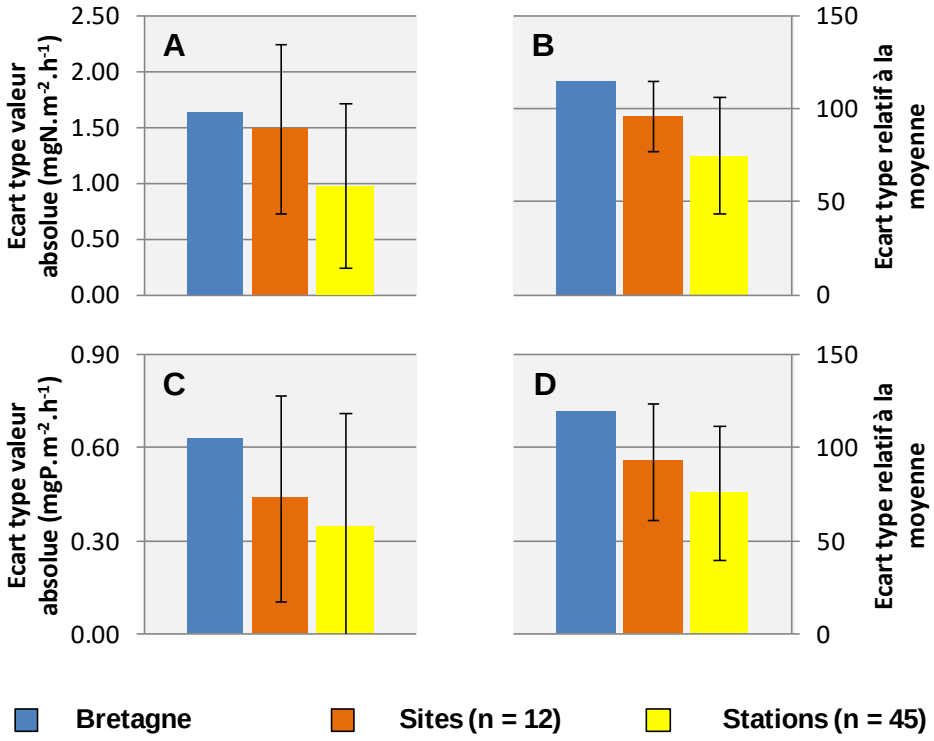


Figure 4 : Variabilité des flux de NH_4^+ (A, B) et PO_4^{3-} (C, D) à l'échelle de la région Bretagne (bleu), des sites (orange) et des stations (jaune) illustrée par les valeurs absolues des écarts types (A, C) et par les écarts types relatifs à la moyenne (B, D).

Une diversité de compositions physico-chimiques des sédiments, avec une signature d'apports anthropiques.

Dans un second temps, ce travail a mis en évidence la diversité des paramètres physico-chimiques sédimentaires. Cette diversité concerne non seulement la granulométrie et les teneurs en éléments (N, P, COT) des sédiments mais aussi les sources de MO sédimentaires déterminées via l'étude de molécules organiques de la classe des lipides qui leur sont spécifiques.

Dans la plupart des vasières, les molécules organiques d'origine naturelle sont majoritaires et sont principalement issues des apports terrigènes soulignant ainsi l'importance des apports de MO via l'érosion des sols.

Cependant, certaines vasières, notamment dans le Golfe du Morbihan, la rivière d'Auray et à Pont L'Abbé, présentent une majorité de marqueurs anthropiques mettant en avant la présence, parfois non négligeable, dans les sédiments de molécules issues de sous-produits pétroliers (69 ± 23 % des molécules anthropiques analysées). Deux signatures pétrolières sont retrouvées sur l'ensemble du littoral breton. Une signature de brut pétrolier majoritaire au nord et une signature de diesel majoritaire au sud. Si les différents échouages de navires et les déballastages en pleine mer sont très probablement la source de la signature de brut pétrolier, il n'est pas possible en l'état actuel des connaissances de différencier les sources terrestres des sources marines pour la signature de type diesel. Enfin, les vasières bretonnes contiennent une proportion variable de molécules marquant des matières fécales (3.0 ± 1.8 % des molécules analysées). La distribution de ces molécules permet de souligner les apports de déjections bovines et porcines via l'érosion des sols ainsi que des rejets des stations d'épuration et des installations non connectées aux réseaux d'eau usée.

Cette diversité des compositions physico-chimiques confirme le fait qu'il n'y a pas une vasière type en Bretagne mais des vasières aux compositions variées.

Des corrélations entre flux et caractéristiques du sédiment insuffisantes pour proposer un indicateur sédimentaire (proxy) facilement mesurable pour estimer les flux benthiques.

Enfin, dans un troisième temps, l'objectif était de hiérarchiser les caractéristiques sédimentaires vis-à-vis des flux benthiques et d'identifier si possible des corrélations entre ces paramètres. Les données de flux et de compositions physico-chimiques ont ainsi été analysées conjointement à l'échelle régionale, via un traitement statistique par analyse canonique de redondance dont la robustesse a pu être assurée via le nombre important d'échantillons. Cette analyse a permis de mettre en avant les principaux paramètres physico-chimiques corrélés aux flux benthiques de NH_4^+ et PO_4^{3-}. Elle a permis de souligner le fait que ces deux flux sont corrélés à des paramètres physico-chimiques différents.

Les flux en NH_4^+ se sont avérés corrélés à la porosité des sédiments, aux rapports isotopiques $\delta^{13}C$ et $\delta^{15}N$ et aux marqueurs moléculaires des microalgues et du diesel. Les flux d'ammonium seraient ainsi les plus importants pour les vasières se développant dans des écosystèmes présentant un hydrodynamisme faible (porosité, marqueurs du diesel) dans lesquels un développement de microalgues dans la colonne d'eau absorberait l'azote anthropique ($\delta^{13}C$, $\delta^{15}N$) et le stockerait dans les sédiments. A l'échelle régionale, aucune corrélation entre les flux d'ammonium et la proportion des marqueurs des macroalgues vertes n'a pu être mise en avant. Cependant à l'échelle des stations, les deux sites aval de la Rade de Lorient sont caractérisés par des flux d'ammonium et des proportions des marqueurs des macroalgues vertes parmi les plus importants de l'étude.

Les flux en PO_4^{3-} se sont avérés corrélés aux teneurs en phosphore organique et inorganique (lié aux oxydes de fer) et aux marqueurs des contaminations fécales. Les flux de phosphate seraient ainsi les plus importants pour les vasières se développant dans des écosystèmes recevant le plus de phosphore issus d'effluents urbains ou domestiques et de l'érosion des surfaces agricoles amendées par des produits résiduaires organiques dérivés des déjections animales.

Cependant, la combinaison de ces variables n'a permis d'expliquer la variance des flux NH_4^+ et PO_4^{3-} qu'à hauteur de 30 et 34 % respectivement. L'hypothèse émise à ce jour serait que les paramètres biologiques (abondance et diversité de la micro et macrofaune des sédiments) qui n'ont pas été considérés dans le projet IMPRO, pourraient avoir un rôle dans la variabilité spatiale des flux benthiques en nutriment.

Etant donné qu'une part importante de la variance des flux benthiques n'est pas expliquée par les caractéristiques des sédiments vaseux étudiées ici, il n'est pas possible de proposer un "proxy" sédimentaire à l'échelle régionale (par exemple le ratio C:N des sédiments) facilement mesurable qui permettrait une estimation simplifiée des flux benthiques. La variabilité des flux à toutes les échelles depuis celle de la région jusqu'à celle des stations compromet aussi la recherche d'un tel proxy à l'échelle locale.

AXE 2 – VARIABILITE SAISONNIERE ET CARACTERISATION DES PROCESSUS A L'ECHELLE DE DEUX ESTRANS [3]

Objectifs

Les objectifs de cet axe étaient (i) d'identifier les processus majeurs responsables des flux benthiques et d'évaluer leur variabilité saisonnière et (ii) d'intégrer la caractérisation de ces flux dans leurs écosystèmes en les comparant aux flux issus des bassins versants et des rivières connectées directement aux estrans.

Méthode

Pour répondre à ces objectifs, deux sites ont été suivis aux 4 saisons : printemps (avril 2019), automne (octobre 2019), hiver (février 2020) et été (juillet 2020 vasière du Lédano ; septembre 2020 baie de Lancieux). Le premier est un site vaseux impacté par les marées vertes : la vasière du Lédano sur l'estuaire du Trieux (Côtes d'Armor - SAGE Argoat-Trégor-Goëlo). Le deuxième est un estran sableux qui a connu des marées vertes par le passé : la Baie de Lancieux (Côtes d'Armor - SAGE Rance-Frémur-Baie de Beaussais). Pour ces deux sites, et pour les quatre saisons, les compositions chimiques des sédiments, des eaux interstitielles de carottes sédimentaires, des eaux des chenaux de drainage et des petits cours d'eau adjacents ont été analysées. Pour le site vaseux du Lédano, des carottes ont été incubées pour estimer les flux totaux.

Ce protocole a permis de quantifier la part relative des flux benthiques diffusifs et totaux en lien avec les processus et les variables qui les contrôlent, ainsi que les flux advectifs dus au pompage hydraulique lié à l'action des marées, le pompage tidal.

[3] Axe 2 développé par l'UMR EPOC de l'Université de Bordeaux

Figure 5 : A gauche, localisation des stations de prélèvement des carottes sédimentaires (lettres violettes) et des eaux des cours d'eau et des chenaux drainant la vasière (étoiles vertes) du Lédano. A droite, localisation des stations de prélèvement des carottes sédimentaires (cercles violets), du profil longitudinal (trait bleu) et des eaux des cours d'eau et des chenaux drainant l'estran de la baie de Lancieux (étoiles vertes). Photos : S. Ballu

Résultats

Pour les deux sites étudiés, les résultats ont permis d'identifier les processus de dégradation de la matière organique responsables des flux d'azote et de phosphore entre le sédiment et la colonne d'eau pour les quatre saisons.

Ils montrent par exemple que les flux d'azote sont gouvernés par deux processus biogéochimiques : d'une part, la minéralisation de l'azote de la matière organique contenue dans le sédiment qui génère une source d'ammonium pour la colonne d'eau et d'autre part, la dénitrification des nitrates présents dans la colonne d'eau (mélange d'eaux douces et marines) qui est responsable d'un flux d'azote de la colonne d'eau vers le sédiment. Selon l'intensité de chacun de ces deux processus, le sédiment peut donc être une source (apports) ou un puits (pertes) d'azote pour la colonne d'eau.

Site vaseux du Lédano

Les valeurs moyennes annuelles des flux benthiques de NH_4^+ et PO_4^{3-} étaient de 0,94 mg $N.m^{-2}.h^{-1}$ et de 0,043 mg $P.m^{-2}.h^{-1}$, ce qui est proche des valeurs mesurées indépendamment pour ce site dans l'axe 1. Les flux massiques saisonniers à l'échelle de la vasière ont été calculés en considérant qu'ils avaient lieu à l'immersion, soit en moyenne 12 h par jour et concernaient une surface totale de vasière de 1,51 km^2 et en faisant l'hypothèse d'une homogénéité saisonnière.

Les flux benthiques d'azote inorganique dissous vers la colonne d'eau représentent près d'1,5 tonnes N pour les trois mois d'été et ceux de l'automne. Le flux est trois fois plus petit au printemps parce que la consommation de nitrate est proche du flux d'ammonium. En hiver, la dénitrification domine et le sédiment consomme près de 8 tonnes N de nitrate pour un flux d'ammonium vers la colonne d'eau de 1,3 tonnes N. Au bilan sur l'année, la dénitrification hivernale est le processus qui pèse le plus sur les flux : **le sédiment est un puits annuel de 3,5 tonnes d'azote**.

Les flux benthiques annuels de phosphate représentent 286 kg P par an. Les deux tiers de ce flux ont lieu en été.

Lorsque la marée descend, il se crée un gradient hydraulique entre les eaux des chenaux tidaux et les eaux interstitielles qui génère un flux d'eau salée qui s'exfiltre du sédiment auquel s'ajoute de l'eau qui percole à la surface du sédiment : **flux lié à la pompe tidale**.

Les flux en azote associés à la pompe tidale ont lieu aux quatre saisons étudiées, principalement sous forme d'ammonium, sauf en hiver où le nitrate domine. Extrapolés à l'échelle de la vasière, **la pompe tidale représente un flux annuel d'environ 11 tonnes d'azote**. L'essentiel de ces flux a lieu en automne et en hiver. Le flux de nitrate de la pompe tidale est de près de 5 tonnes en hiver, soit une valeur qui compense le flux benthique de nitrate dû à la dénitrification. Au cours des 6 mois du printemps et de l'été, le flux tidal d'azote est de l'ordre de 3 tonnes, soit une valeur équivalente aux flux benthiques durant la même période.
Pour le phosphore, le flux annuel est de 358 kg P, soit une valeur du même ordre de grandeur que les flux benthiques diffusifs. Cependant, les flux benthiques sont les plus élevés en été, alors que la valeur est la plus faible pour le flux tidal à cette saison. Ceci est probablement dû au fait que le P, tout comme N, est utilisé en été dans la colonne d'eau des chenaux par les algues vertes.

La vasière du Lédano est donc caractérisée par l'existence de deux types de flux sédimentaires : les flux benthiques à marée haute à l'interface eau-sédiment et ceux advectifs liés à la pompe tidale, qui ont lieu à marée basse. Regardés conjointement à l'échelle annuelle, **ces flux sédimentaires totaux représentent un flux d'azote et de phosphore pour la colonne d'eau, avec un bilan annuel respectif de 7,6 tonnes N et de 0,64 tonne P**. A l'échelle saisonnière, les flux benthiques sont du même ordre de grandeur et seule la saison hivernale présente une grande différence qui pèse sur le bilan annuel. En effet en hiver, le sédiment est un puits de N à marée haute, en raison de la dénitrification, et une source de N à marée basse en lien avec le pompage tidal. En été, durant la saison de prolifération des algues vertes, les flux sédimentaires d'azote et de phosphore proviennent majoritairement des flux benthiques diffusifs.

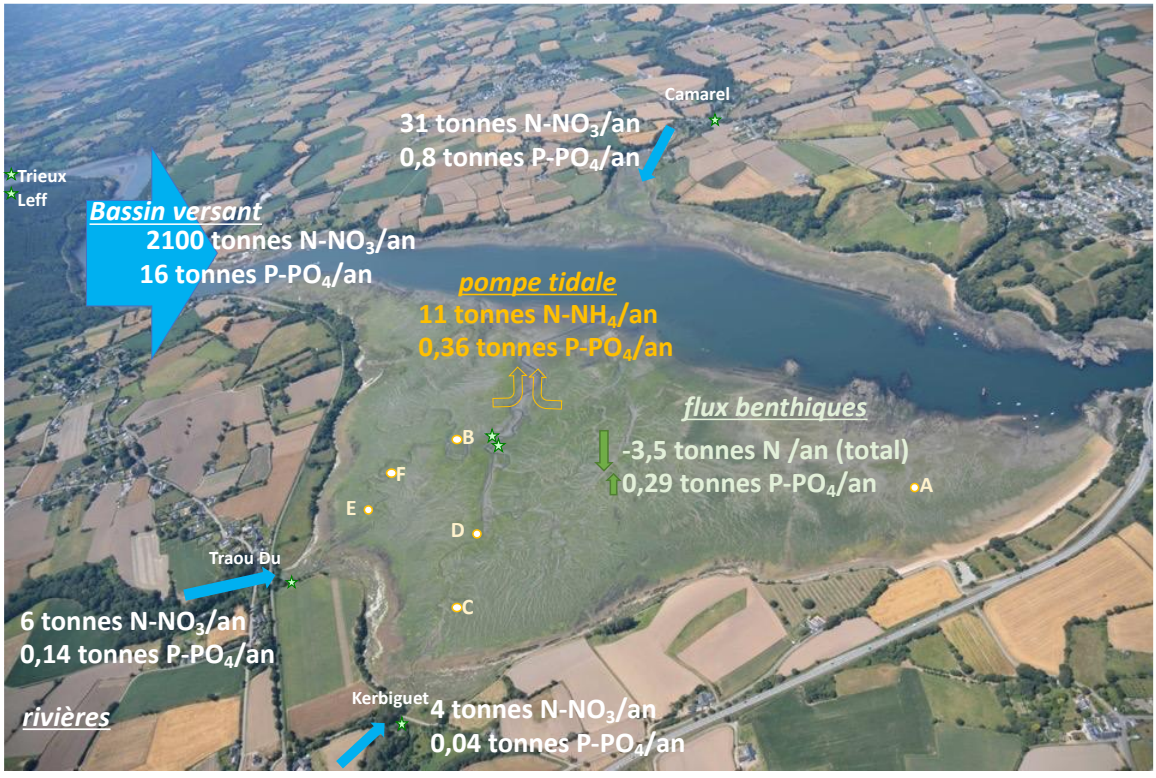


Figure 6 : Bilan annuel des flux d'azote et de phosphore à l'échelle de la vasière du Lédano

Pour comprendre l'impact de ces flux sédimentaires sur l'écosystème de la vasière du Lédano, il est intéressant de **les comparer aux flux terrigènes issus des bassins versants** que l'on peut calculer grâce aux données de débit et de chimie existant sur les trois petits affluents directs de la vasière (Traou Du, Kerbiguet et Camarel, données fournies par le SAGE ATG) et les deux affluents principaux de l'estuaire du Trieux (Leff et Trieux, données disponibles sur la banque de données Naïades). Si les flux sédimentaires de N sont du même ordre de grandeur que ceux qui proviennent directement du Traou Du et du Kerbiguet, les flux issus du Leff et du Trieux sont, quant à eux, deux à trois ordres de grandeurs supérieurs (Figure 6). Les flux terrigènes de phosphate dissous sont près de 25 fois supérieurs aux flux sédimentaires.

Site sableux de Lancieux

Les flux moyens diffusifs de NH_4^+ et PO_4^{3-} étaient de 0,04 mg $N.m^{-2}.h^{-1}$ et de 0,002 mg $P.m^{-2}.h^{-1}$, ce qui est 25 fois inférieur aux valeurs retrouvées sur le site vaseux du Lédano. Extrapolés à l'échelle de la baie (6 km^2), les flux correspondent à une source annuelle d'environ 1430 kg d'azote et 40 kg de phosphore. A ces flux benthiques diffusifs ayant lieu à marée haute, s'ajoutent les flux advectifs liés à la pompe tidale qui représentent un export annuel de 3824 kg d'azote et de 383 kg de phosphore.

Pour comprendre l'impact de ces flux sédimentaires sur l'écosystème du site sableux de Lancieux, il est intéressant de les comparer aux flux issus des bassins versants. Deux petites rivières se jettent dans la baie de Lancieux, le Drouet et le Floubalay. Les flux annuels terrigènes sont évalués à 53 tonnes d'azote et de 1,3 tonne de phosphore (Figure 7) dont les deux tiers proviennent du Drouet. Les rivières restent le flux majeur d'azote à l'échelle annuelle. L'apport par les sédiments est faible mais proportionnellement dominant en été quand les cours d'eau sont en étiage. Les sédiments sableux de la baie sont une source de phosphore proportionnellement importante, avec un apport d'environ 400 kg par an, essentiellement lié au flux estival de la pompe tidale.

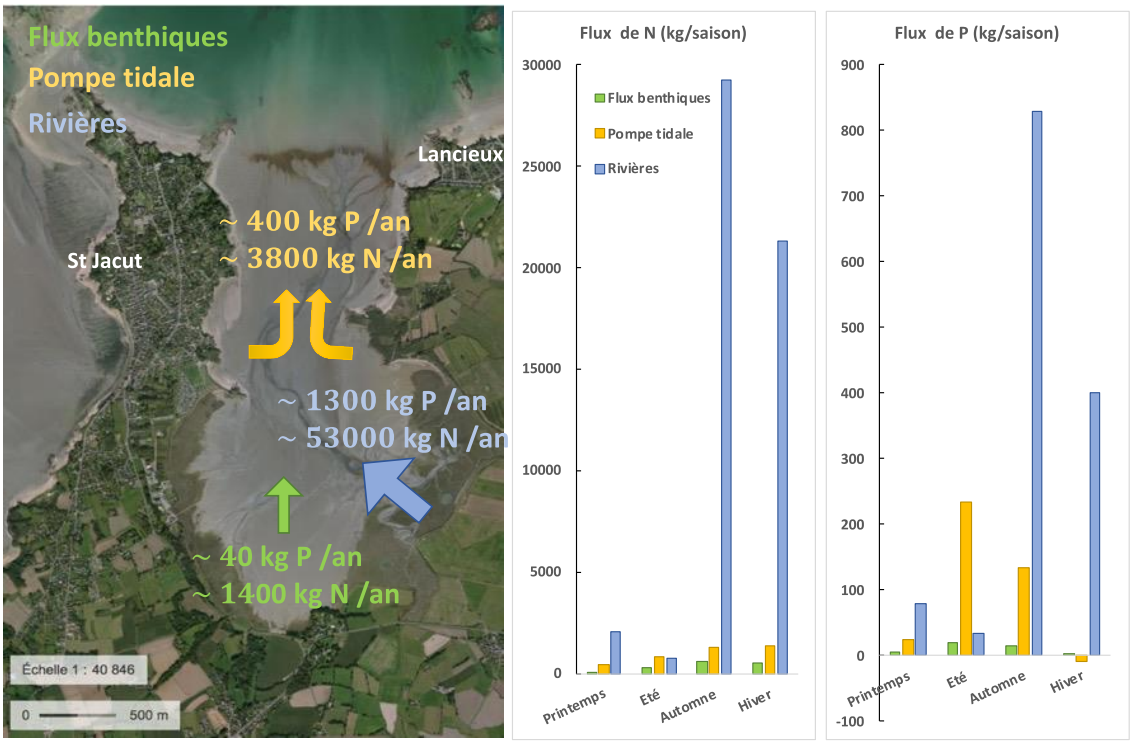
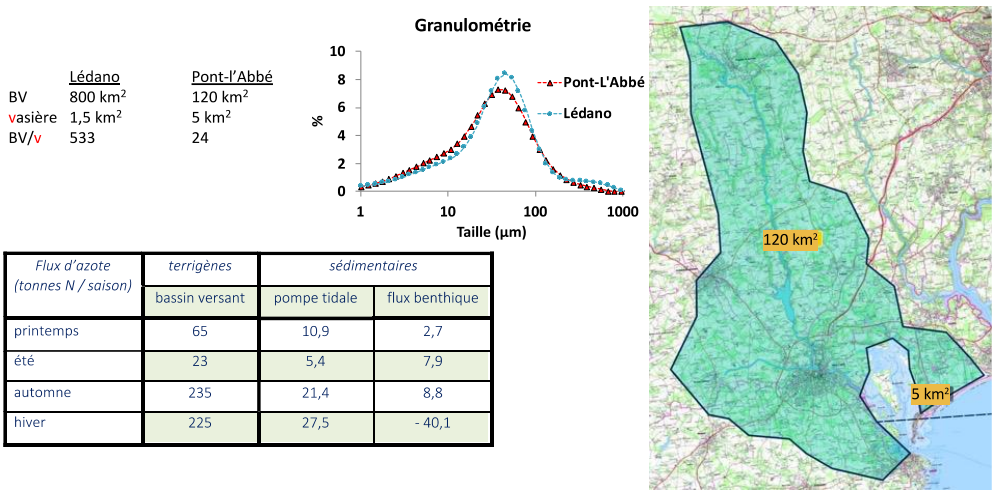


Figure 7 : Estimation des flux annuels d'azote et de phosphore arrivant à la baie de Lancieux (flux benthiques, flux liés à la pompe tidale et flux issus du bassin versant). Le détail des flux saisonniers est donné dans le rapport complet du projet IMPRO.

Extrapolation des calculs de flux sédimentaires à d'autres vasières

Les flux sédimentaires d'ammonium et de phosphate ont été mesurés au printemps dans de nombreuses baies bretonnes (Axe 1). Ces données permettent d'extrapoler les flux mesurés au Lédano aux autres vasières en prenant en compte la surface de chaque vasière, le rapport des flux printaniers entre les vasières et le rapport des flux entre les saisons. Il s'agit d'une extrapolation qui permet d'obtenir un ordre de grandeur de l'importance que peuvent jouer les vasières dans les flux d'azote, mais qui ne remplace pas des études de terrain qui prendraient en compte la diversité des milieux. Les données de l'Axe 1 permettent toutefois de faire cet exercice d'extrapolation.

Cet exercice d'extrapolation a été effectué pour la vasière de Pont L'Abbé (29) qui présente des vases similaires au Lédano en termes de granulométrie mais un rapport « surface de bassin versant / surface d'estran » beaucoup plus petit. Les flux d'azote extrapolés sur cette vasière montrent une importance relative des flux sédimentaires en été : à cette saison, les sédiments apportent environ 13 tonnes d'azote à la colonne d'eau, contre 23 tonnes d'azote issues du bassin versant (Figure 8). Si les flux printaniers d'azote à l'origine du développement des algues vertes restent majoritairement issus des bassins versants, l'importance relative des flux benthiques en été peut jouer un rôle dans le maintien de la biomasse algale, en « prenant le relais » des rivières pour les apports en azote et en phosphore.



Flux d'azote (tonnes N / saison)	*terrigènes*	*sédimentaires*	
	bassin versant	pompe tidale	flux benthique
printemps	65	10,9	2,7
été	23	5,4	7,9
automne	235	21,4	8,8
hiver	225	27,5	- 40,1

Figure 8: Extrapolation des flux d'azote pour la vasière de Pont L'Abbé (29) à partir des données obtenues sur la vasière du Lédano.

Les données acquises sur les axes 1 et 2 montrent que le sédiment des vasières peut être considéré comme une source de nutriments dans la colonne d'eau mais que cette source est très inférieure aux apports issus des bassins versants. Les proportions respectives de ces deux sources sont notamment contrôlées par le rapport entre les surfaces des bassins versants et des vasières. Dans ce contexte, des connaissances plus précises sur l'aptitude des algues à absorber de l'azote et du phosphore étaient nécessaires.

AXE 3 – PROCESSUS D'ABSORPTION DES NUTRIMENTS PAR LES MACROALGUES OPPORTUNISTES DE TYPE ULVES EN ZONE INTERTIDALE [4]

Objectifs

Les objectifs de cet axe sont d'améliorer la prise en compte de l'écophysiologie des ulves dans le modèle biologique EcoMARS3D-Ulves. Les deux voies d'amélioration identifiées portent sur la capacité des ulves à absorber des nutriments (nitrates et phosphates) en fonction de l'alternance (i) jour/nuit et (ii) émersion / immersion. La finalité étant d'intégrer à la fois une composante de photopériode et de cycle des marées dans le modèle existant et d'approfondir les connaissances quant à l'impact du substrat sur la disponibilité des nutriments pour l'ulve.

Méthode

Deux types d'expérimentations d'écophysiologie ont été mis en place pour étudier (i) l'impact de la photopériode et (ii) l'impact des conditions d'immersion/émersion et de la présence/absence de sédiment, sur l'absorption de nutriments par les ulves. Pour la première série d'expérimentation (action 1), les ulves ont été incubées sans sédiment et selon les conditions de photopériodes (jour/nuit) suivantes : 24h/0h, 16h/8h, 8h/16h et 0h/24h dans des aquariums de 15L thermostatés à 19°C. Pour la deuxième série d'expérimentation (action 2), les ulves ont été incubées sous les conditions suivantes : immersion/+vase ; immersion/-vase ; émersion/+vase ; émersion/- vase. Ces deux expérimentations ont été menées avec des ulves prélevées sur la vasière du Lédano et la Baie de Saint-Brieuc.

Pour ces deux expérimentations, le taux de croissance des ulves a été déterminé par pesée des biomasses, l'absorption des nutriments a été évaluée par (i) le suivi des concentrations en nitrates, ammonium et phosphates dans les eaux d'incubation et (ii) les quantités d'azote et de phosphore dans les tissus de l'algue.

Résultats

Impact de la photopériode sur l'absorption des nutriments

Le suivi des concentrations en nitrates, ammonium et phosphates dans les eaux d'incubation a mis en évidence une absorption diurne et nocturne des nutriments. Néanmoins, l'absorption en nitrates et phosphates reste prépondérante en condition de lumière. Cela suggère une meilleure performance des processus d'absorption (e.g. cortège enzymatique) à la lumière.

Le suivi des taux de croissance des ulves en parallèle des concentrations en nutriments dans le milieu d'incubation a permis de mettre en évidence que la croissance des ulves était découplée des processus d'absorption en azote et phosphore inorganique. En condition d'obscurité pendant 24h, les ulves ont en effet continué à absorber les nutriments, sans augmenter leur biomasse.

Dans la présente étude, les ulves collectées en baie de Saint-Brieuc et incubées sous les cycles de photopériode jour/nuit 16/8 et 8/16 ont montré des taux de croissance supérieurs à ceux des ulves

[4] Axe 3 développé par le CEVA

incubées pendant 24h à la lumière. Cette observation suggère que la phase nocturne peut avoir un effet positif sur les processus de croissance des ulves de la baie de Saint-Brieuc. En comparaison, les ulves de la vasière du Lédano n'ont pas montré de différences significatives de croissance entre les trois conditions de photopériode. Cette variabilité des réponses de croissance aux différents cycles de photopériode entre les ulves de Saint-Brieuc et du Lédano semble indiquer que l'impact du cycle de photopériode sur la croissance des ulves est spécifique à chaque espèce / population d'ulves. Plusieurs études antérieures ont mis en évidence que les vitesses de croissance des ulves pouvaient être rythmées par l'horloge circadienne. Cette hypothèse conforterait la variabilité des réponses de croissance entre les ulves de la vasière du Lédano et les ulves de la baie de Saint-Brieuc mise en évidence dans cette étude. Par ailleurs, elle pourrait expliquer pourquoi les taux de croissance ne sont pas positivement corrélés à la durée d'exposition à la lumière pour les deux populations d'ulves.

Impact des conditions d'émersion sur substrat sableux et vaseux sur l'absorption de nutriments

Les résultats des expérimentations conduites dans cette étude, confirment une absorption en nutriments optimale des ulves en condition immergé. Néanmoins, une légère augmentation des quotas azotés observée en début d'expérimentation pour les ulves de la baie de Saint-Brieuc met en évidence un phénomène d'absorption qui se poursuit lorsque l'ulve est émergée sur l'estran dans une fine pellicule d'eau de mer. Les ulves émergées sur l'estran pourraient donc continuer à bénéficier d'une source sédimentaire en nutriments.

Comme attendu, les ulves de la vasière du Lédano et de la baie de Saint-Brieuc ont montré de plus forts taux de croissance en condition d'immersion qu'en condition d'émersion. Ces observations confortent le fait que l'émersion des thalles ne constitue pas la condition optimale pour la croissance des ulves des deux sites d'étude. En plus de la dessiccation, l'émersion des thalles induit une limitation en éléments inorganiques (carbone, azote et phosphore) pour la croissance algale. Lorsque les périodes d'émersion sont associées à des phases de fort ensoleillement, la température du milieu peut atteindre des valeurs élevées, affectant les processus photosynthétiques.

La présente étude s'intéressait également à l'impact de la présence/absence de sédiment et de sa nature (i.e. vase, sable) sur la disponibilité des nutriments pour les ulves. Les résultats obtenus n'ont pas permis d'établir une corrélation entre la présence/absence du sédiment et les paramètres écophysiologiques des ulves. À partir des flux benthiques diffusifs mesurés sur la vasière du Lédano en juillet dans le cadre de l'Axe 2, il a été estimé que le sédiment a apporté environ 17 $\mu mol.L^{-1}$ d'ammonium et pris environ 36 $\mu mol.L^{-1}$ de nitrates dans le milieu d'incubation en 48h d'expérimentation. Les flux sédimentaires étaient donc très faibles comparativement aux concentrations en nitrates (150 $\mu mol.L^{-1}$) du milieu d'incubation. Ces données sont en accord avec des expérimentations précédentes, menées dans la cadre du programme CIMAV P3 sur la vasière du Lédano de 2016 à 2018. Il avait été montré que l'apport sédimentaire en azote aux algues devenait significatif lorsque les concentrations en nitrates de la colonne d'eau devenaient limitantes. Concernant les conditions d'émersion continue pendant 48h, l'absence d'impact du sédiment sur la disponibilité en nutriments pour les ulves s'explique soit par le fait que l'absorption en nutriments est tellement faible qu'elle n'est pas perceptible à partir de l'expérimentation mise en place, soit que d'autres facteurs (tel que le mouvement de l'eau lié aux cycles des marées), conditionnent l'apport sédimentaire aux thalles. Le mouvement de l'eau pourrait notamment favoriser une remise en suspension des particules sédimentaires, améliorant la disponibilité des nutriments. Tandis que le

bénéfice du flux sédimentaire en nutriments pour la croissance d'*Ulva* sp. a été démontré par diverses études antérieures, la part d'azote sédimentaire dans le processus reste à déterminer.

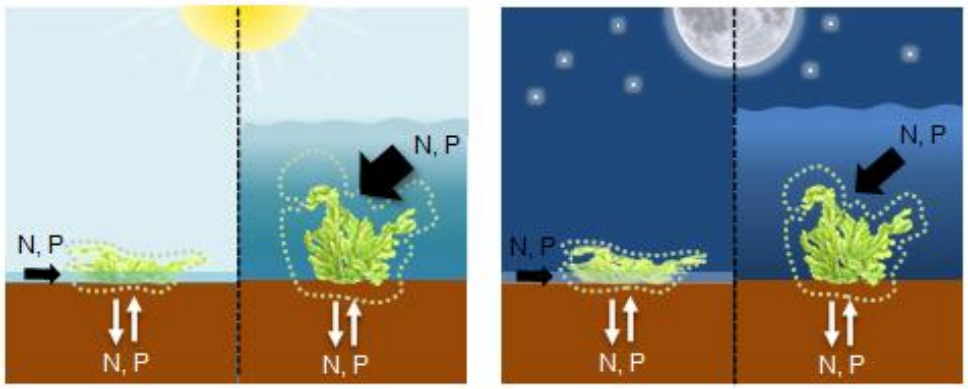


Figure 9: Comparaison qualitative des capacités d'absorption en nutriments (N, P) et de croissance des ulves en zone estuarienne selon la période de jour/de nuit et selon les conditions d'immersion/d'émersion imposées par le cycle de marée. Les flèches noires et blanches indiquent les flux de nutriments N et P issus respectivement de la colonne d'eau et du sédiment. La taille des flèches noires est proportionnelle à l'importance de l'absorption en nutriments. Les pointillés verts illustrent l'importance relative de la croissance de l'algue.

Calibration et validation du modèle 0D de croissance des ulves

Les résultats expérimentaux de cet axe ont été utilisés pour calibrer et valider un modèle 0D (dimension temporelle uniquement) de croissance des ulves. L'intérêt de tels modèles est d'être peu coûteux en temps de calcul et ainsi de pouvoir tester rapidement différents jeux de paramètres intervenant dans la croissance de l'algue étudiée et de confronter directement les prédictions aux données expérimentales. Une bonne reproduction des données expérimentales par le modèle se traduit par une bonne superposition des courbes ce qui signifie que les paramètres du modèle permettent de reproduire les données expérimentales.

Concernant l'impact de la photopériode, l'exercice de modélisation a permis de reproduire les contenus algaux en nutriments ainsi que les quotas en azote et en phosphore, ce qui se traduit par une estimation correcte des densités d'ulves modélisées. Concernant l'impact de la présence du sédiment, aucun flux sédimentaire supplémentaire n'a dû être ajouté à la modélisation pour expliquer les résultats expérimentaux, soulignant l'impact faible du sédiment sur la croissance des ulves, dans ces conditions expérimentales.

AXE 4 – MODELISATIONS DE LA CONTRIBUTION SEDIMENTAIRE AUX ULVES DE LA VASIERE DU LEDANO [5]

Un premier développement d'outils de modélisation a consisté à utiliser les données acquises dans les 3 premiers axes du projet IMPRO pour améliorer le modèle EcoMARS3D-Ulves et tester sa sensibilité aux variations spatio-temporelles des flux benthiques. Le modèle a été appliqué sur la vasière du Lédano en définissant un forçage sédimentaire basé sur ces données nouvellement acquises. Une fois validé via les observations des dépôts algaux sur cette vasière, ce modèle a été utilisé pour (i) tracer les sources d'azote contenu dans les ulves et (ii) appliquer des scenarii de réduction des flux de nutriments pour répondre à la disposition 10A2 du SDAGE Loire Bretagne 2016-2021.

Un deuxième développement d'outils de modélisation a été engagé. Il porte sur la simulation explicite des mécanismes biogéochimiques des sédiments via un modèle de diagénèse précoce et de transport réactif, appliqué aux flux benthiques d'azote. Cette action repose préalablement sur les travaux en cours dans les projets DIETE (Baie de Vilaine) et PHARE-SEE (Seine Aval) ayant pour objectif d'améliorer Eco-Mars3D en couplant le module de dynamique sédimentaire MUSTANG avec un module simplifié de diagenèse améliorant la prise en compte de la minéralisation de la matière organique dans les sédiments. En attente des résultats de ces projets de recherche, le développement d'une telle modélisation n'était donc pas prévu dans le projet IMPRO. Toutefois, les équipes en charge des Axes 1 et 2 ont initié un travail pour valoriser les résultats obtenus dans ces axes et identifier les processus clés à introduire dans un futur module sédimentaire à grande échelle d'Eco-Mars3D.

Modélisation EcoMARS3D-Ulves sur la vasière du Lédano

Le modèle existant EcoMARS3D-Ulves a été appliqué sur le site pilote de la vasière du Lédano en utilisant un forçage sédimentaire basé sur les données nouvellement acquises en 2019 dans les Axes 1, 2 et 3 du programme IMPRO. L'ensemble des paramètres mesurés *in situ* (biomasse, concentration algale en azote et phosphate) a pu être correctement modélisé sur l'année 2019, malgré des différences côte/large de la densité algale expliquées par la résolution spatiale du modèle et le fait qu'il ne reproduise pas les processus dynamiques d'échouage.

Le traçage par modélisation de l'origine de l'azote contenu dans les ulves de la vasière du Lédano, montre que les différentes sources d'azote se répartissent de façon équivalente dans les apports à la vasière et dans les teneurs contenues dans la biomasse algale simulée. Ainsi, les apports d'azote combinés des cours d'eau du Leff et du Trieux comptant pour plus de 98% des apports terrigènes se retrouvent à peu près dans ces mêmes proportions dans les ulves (~90%), auxquels il faut ajouter les sources d'azote océaniques (~8%) et sédimentaires (~2%).

Le développement de scenarii de réduction des flux de nutriments inorganiques provenant des rivières indique que malgré des abattements théoriques des flux terrigènes de nitrate inorganique dissous de 25% à 50%, aucune diminution significative des biomasses algales n'est observée. Cela indique que le flux d'azote retranscrit par la modélisation reste suffisant pour une bonne croissance des ulves sur la vasière (quotas azotés > au quota critique de 20g.kg^{-1} MS). De tels abattements correspondraient à des concentrations moyennes pour le Leff et le Trieux de 34 ± 4 et 23 ± 3 mg/L, respectivement, ce qui

[5] Axe 4 développé d'une part par le CEVA et d'autre part, par une collaboration entre l'Université de Bordeaux (UMR EPOC), l'Ifremer de Brest (Unité Dyneco/Pelagos) et l'Université de Rennes 1- CNRS (UMR Ecobio-OSUR et UMR Géosciences-OSUR)

serait encore 7 à 5 fois supérieur aux 5 mg/L rapportés pour l'année 1971. En supprimant l'ensemble des flux d'azote inorganiques terrigènes à la vasière (scénario 100% d'abattement), les autres sources qui permettraient la croissance d'ulves sont, par ordre d'importance, l'azote provenant des eaux marines, l'azote organique terrigène et en dernier les flux sédimentaires.

Modélisation biogéochimique via un modèle de diagénèse précoce : résultats préliminaires

A travers une collaboration entre l'Université de Bordeaux (UMR EPOC), l'Ifremer de Brest et l'Université de Rennes 1 (UMR Ecobio-OSUR et UMR Géosciences-OSUR), cette seconde partie du volet modélisation du projet IMPRO a pour objectif d'identifier les processus et forçages clefs contrôlant les flux benthiques en NH_4^+ et PO_4^{3-}.

Pour y parvenir, un modèle de diagénèse précoce « MEDIALAB », développé à l'Université de Waterloo, est utilisé. Ce modèle permet, à l'état stable, de simuler des flux à l'interface eau-sédiment en prenant en compte (i) le transport des substances dissoutes et particulaires par diffusion, advection, bioirrigation et bioturbation et (ii) les réactions biogéochimiques (e.g. dissolution, précipitation, minéralisation de la matière organique).

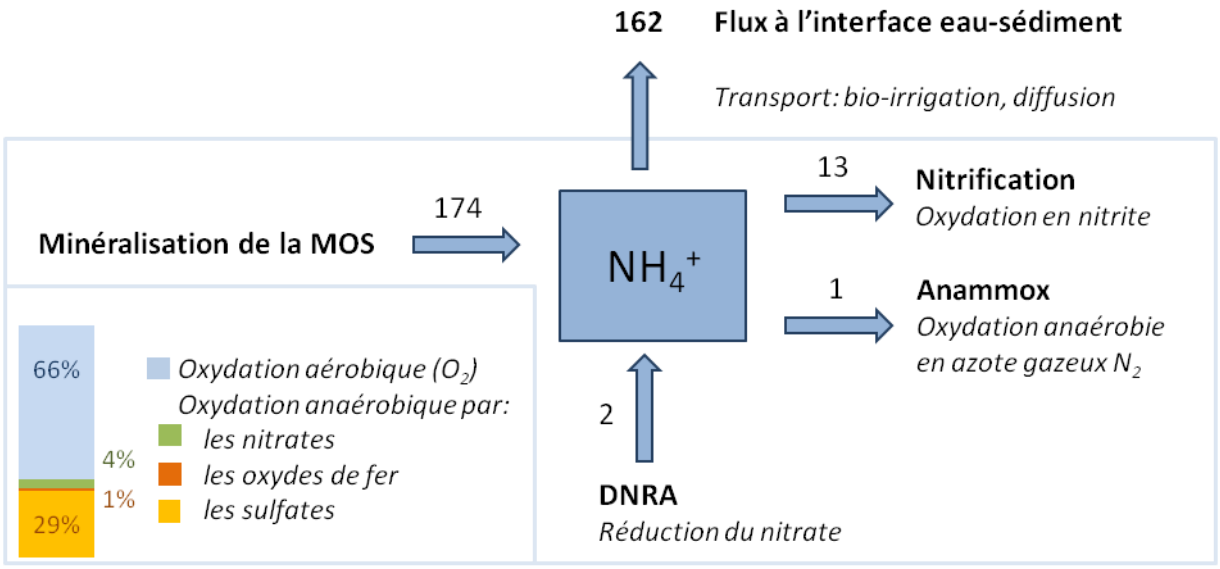


Figure 10 : Bilan en NH_4^+ ($\mu mol.m^{-2}.h^{-1}$) avec les taux de réaction dans le compartiment sédimentaire et le flux à l'interface eau-sédiment pour la vasière du Lédano au mois d'avril obtenu via l'utilisation du modèle MEDIALAB.

L'application de ce modèle aux flux benthiques d'azote a déjà pu être valorisée pour l'estuaire de la Seine. A ce jour, l'ensemble des réactions biogéochimiques contrôlant le cycle du phosphore dans le sédiment sont en cours d'intégration dans ce modèle. Afin de vérifier que celui-ci fonctionne correctement, une étape de calibration est nécessaire. Il s'agit de vérifier que les données obtenues via le modèle (flux et profils verticaux) soient cohérentes avec celles obtenues par mesure *in situ*. Pour réaliser cette calibration, les flux et profils des eaux porales acquis au site du Lédano dans le cadre de l'Axe 2 sont utilisés. Une fois l'étape de calibration validée, une analyse de sensibilité a pu être réalisée afin d'évaluer la réponse des flux benthiques à des modifications de paramètres d'entrée du modèle (e.g. dépôt de matière organique, concentrations en nitrates de l'eau surnageante).

A l'heure actuelle, la calibration du modèle pour les profils verticaux et flux en PO_4^{3-} est en cours de validation ; les résultats présentés concernent uniquement la calibration pour les profils verticaux et flux de NH_4^+. Le bilan en NH_4^+ effectué montre que la minéralisation de la matière organique joue un rôle clef dans le recyclage de NH_4^+ dans le sédiment (Figure 10).

Les analyses de sensibilité indiquent qu'en doublant les flux de matière organique déposée à la surface du sédiment, les flux en NH_4^+ augmentent de 3 à 97 % selon la qualité de la MOS. Les variations appliquées sur les concentrations en nitrate dans l'eau surnageante impactent faiblement les flux en NH_4^+. Néanmoins indirectement, une augmentation des concentrations en nitrate dans la colonne d'eau engendre une prolifération d'algues qui constitue une source potentielle de matière organique et donc induit une augmentation du recyclage de NH_4^+ dans le sédiment. Enfin, cette modélisation a permis de tester l'hypothèse de l'impact de la bioturbation sur la variabilité géographique des flux de NH_4^+. La modification des coefficients de bioturbation et de bioirrigation ne modifie pas les flux benthiques de NH_4^+, ce qui, en l'état actuel de cet outil de modélisation, semble infirmer l'hypothèse formulée dans l'Axe 1.

PERSPECTIVES

L'impact de la microfaune et de la macrofaune sur les flux benthiques ?

L'étude conjointe des flux benthiques potentiels et des caractéristiques physico-chimiques des 200 échantillons de sédiments a permis d'expliquer entre 30 et 34% de la variabilité des flux benthiques de NH_4^+ et PO_4^{3-}, respectivement. La part inexpliquée de variabilité pourrait être due à l'activité des micro et macrofaunes modulant la capacité à biodégrader la matière organique sédimentaire mais aussi les flux d'éléments dans les sédiments à travers les mécanismes de bioturbation et de bioirrigation. Ces hypothèses ont aussi été formulées et sont actuellement étudiées dans le cadre de travaux de recherche visant à comprendre les flux benthiques de nutriments par les sédiments de mangrove en Guyane française. L'utilisation de l'outil de modélisation biogéochimique MEDIALAB semble infirmer cette hypothèse, cependant, en l'état actuel des connaissances scientifiques, il est possible que les mécanismes en jeu ne soient que partiellement représentés dans le modèle.

Les nutriments dans les sédiments : un héritage pour combien de temps ?

Le projet IMPRO met en avant la capacité des sédiments à produire des flux benthiques diffusifs et advectifs de nutriments vers la colonne d'eau. Il a aussi mis en avant le rôle important des activités humaines dans les bassins versants amont dans le contrôle de ces flux sédimentaires. Cependant, étant donné les apports de nutriments dissous très importants en provenance des bassins versants, le rôle joué par les apports sédimentaires dans les efflorescences d'algues vertes reste marginal. Par contre, dans l'hypothèse d'une diminution très significative des apports dissous en provenance des bassins versants, les apports sédimentaires pourraient devenir en proportion plus importants et soutenir des efflorescences d'algues vertes s'ils s'avéraient en mesure de les déclencher. Ceci pose la question du stock sédimentaire, de ses origines et de ses cinétiques de constitution et de biodégradation en prenant en compte la différence de réactivité entre matière organique allochtone, apportée par les bassins versants et la matière organique autochtone issue des algues et bactéries au niveau des sédiments.

Limites de la modélisation par EcoMARS3D-Ulves

Les modèles actuels ne pouvant représenter correctement les mouvements des algues, la modélisation des ulves proposée implique des ulves qui sont fixées dans des mailles de calculs sélectionnées (en fonction de l'occurrence des ulves observées depuis 2008). Par conséquent, les ulves ne sont pas soumises à l'advection et aux processus d'échouages et de remises en suspension qui en résultent. Ainsi, les gradients de biomasse côte-large observés sur la vasière ne sont pas simulés dans le modèle, comme ne peuvent l'être les exports d'algues de la zone de croissance.

La résolution spatiale des mailles de calcul (60*60 m²) ne permet pas de représenter les chenaux de vidange qui se forment à la surface des vasières en drainant les reflux sédimentaires lors du pompage tidal. Ces tailles de mailles impliquent aussi une dilution des apports dans de grands volumes d'eau impliquant des teneurs dissoutes issues des « sources secondaires » (petits cours d'eau ou apports par la pompe tidale) qui sont faibles, ce qui n'est pas le cas des teneurs issues des grands exutoires (ou de la limite marine). Par conséquent, le flux sédimentaire lié au processus de pompe tidale est prescrit dans le cadre de la présente étude, dans des mailles uniques représentant approximativement le centre des « différentes zones contributrices » de la vasière.

C'est une simplification de ce processus qui a lieu sur l'ensemble de la vasière à marée basse et dont le flux est en réalité probablement drainé vers le large en surface de la vasière puis par de micro-chenaux qui rejoignent ensuite des chenaux plus importants. Cette simplification peut provoquer une sur-représentation de la contribution du pompage tidal autour de ces zones (mailles recevant ce flux) ainsi qu'en parallèle, une sous-estimation des teneurs issues de la pompe tidale en s'éloignant de ces « points de relargage », d'autant que les mailles de 60 m de côté engendrent une dilution très rapide de ces « petits apports ».

L'étude de modélisation (2019-2020) menée en baie de Saint-Brieuc a mis en avant une dynamique croissance/mortalité du modèle potentiellement moins rapide que celle observée de manière pluriannuelle dans cette baie. L'analyse des résultats de ce programme avait permis de déduire que l'ajout de termes « puits » de la biomasse créée est indispensable pour mieux représenter les phénomènes. Des études d'amélioration du modèle sont actuellement en cours. Il est notamment prévu d'ajouter un terme d'export de biomasse algale afin de compenser l'absence d'advection vers le large, d'échouage en haut de plage et la non prise en compte des phénomènes de prédation ou de ramassage modérant la croissance de début de saison, période durant laquelle les flux d'azote sont très élevés. La biomasse algale une fois installée peut se maintenir par l'inertie du modèle, et limiter les effets sur l'abattement des flux.

Les 9 mesures de biomasse réalisées en 2019 sur la vasière du Lédano extrapolées aux mesures de surface sur l'ensemble de la masse d'eau côtière FRGT03 sur les photos du 20 août 2019 conduit à une biomasse totale de 2164 ± 891 tonnes d'algues (égouttées 1 minute) contre 6450 tonnes estimée par la modélisation. Cette surévaluation de la biomasse par le modèle confirme l'intérêt d'ajouter ce terme puits (broutage, exportation de biomasses par advection) pour une représentation plus réaliste des proliférations dans le contexte nutritionnel actuel. L'ajout d'un terme « puits » devrait amener à des diminutions de biomasse algale plus importantes, suite aux premiers abattements de flux.

CONCLUSION GENERALE

Le projet IMPRO qui s'est déroulé entre 2019 et 2021 a permis d'étudier l'impact des sédiments sur la prolifération des macroalgues et une meilleure prise en compte dans la modélisation de la croissance algale en Bretagne.

Les résultats d'IMPRO mettent en évidence **une grande variation spatiale des flux benthiques en NH_4^+ et PO_4^{3-} à l'échelle locale et régionale**, mesurée sur 45 stations vasières du littoral breton réparties sur les 10 sites concernés par la disposition 10A-2). A l'échelle de la Bretagne, ces flux d'azote et de phosphore ne sont que faiblement corrélés entre eux. Cette étude a également montré **une grande diversité de paramètres physico-chimiques sédimentaires**. Cette diversité concerne la granulométrie, les teneurs en éléments (N, P, COT) des sédiments ainsi que les sources et l'origine de la matière organique (MO) sédimentaire. Dans la plupart des vasières, la matière organique résiduelle d'origine naturelle est terrigène, donc apportée par les cours d'eau, via notamment le ruissellement et l'érosion des sols. La diversité des compositions physico-chimiques souligne le fait qu'il n'y a pas de vasière typique en Bretagne mais des vasières aux compositions variées.

Les travaux réalisés sur les sites du Lédano et de Lancieux montrent que les sédiments jouent un rôle dans le cycle de l'azote et du phosphore via **les processus de minéralisation de la matière organique** qui s'y déroulent. Les flux sont émis à l'immersion à l'interface eau-sédiment par diffusion et bioturbation ou à l'emersion par l'exfiltration d'eaux interstitielles à marée basse via le mécanisme de **pompe tidale**. Les données obtenues sur la vasière du Lédano montrent que pendant **l'hiver**, les vasières **peuvent être un puits d'azote** (dénitrification). Elles constituent toutefois **une source d'azote à l'échelle annuelle en raison d'un flux d'ammonium important lié à la pompe tidale**. En valeur absolue, ces flux d'azote issus du sédiment sont du même ordre de grandeur que les flux issus de petites rivières, mais restent très faibles comparés aux apports terrigènes d'affluents plus importants tels que le Leff et le Trieux.

Des expérimentations d'écophysiologie en laboratoire sur les ulves ont montré que **l'absorption en nutriments se poursuit en période nocturne** de façon plus ou moins atténuée et que **les algues émergées sont capables d'absorber et d'assimiler des éléments azotés dans la fine pellicule d'eau de mer** persistant à la surface du sédiment à marée basse. Toutefois, l'absorption en nutriments ainsi que le processus de croissance des algues restent plus performants en condition de pleine eau. Même si les flux d'azote sédimentaires sont bien inférieurs aux flux d'azote terrigènes provenant des bassins versants du littoral breton, ils peuvent constituer une source utilisable par les ulves. **Des estimations approximatives suggèrent que les flux sédimentaires en azote pourraient contribuer au soutien de la croissance des ulves**.

Le modèle EcoMARS3D-Ulves a été appliqué sur le site pilote de la vasière du Lédano en utilisant un forçage sédimentaire basé sur les données nouvellement acquises au sein du projet IMPRO. L'ensemble des paramètres mesurés *in situ* ont pu être modélisés sur l'année 2019. Le traçage par modélisation de l'origine de l'azote contenu dans les ulves de la vasière du Lédano, montre que **les apports d'azote combinés des cours d'eau se retrouvent dans les mêmes proportions dans les ulves**. **L'apport d'azote d'origine sédimentaire aux biomasses simulées d'algues (Ulva *spp.*) reste relativement faible, avec une contribution de l'ordre de 2 %, malgré la proximité des algues au sédiment**.

Les résultats préliminaires de l'utilisation du modèle de diagénèse précoce montrent que les données acquises permettront de quantifier la contribution de l'ensemble des processus biogéochimiques qui contrôlent le recyclage de N et de P.