



Mobilités, Énergies, Numérique, Économie...

LE COMITÉ CITOYEN

LA ROCHELLE TERRITOIRE ZÉRO CARBONE

AXE 2



CARBONE BLEU



Avec le soutien de :



CAPTATION ZONES HUMIDES

AMBITION DE L'ACTION : Évaluer et suivre la captation du carbone par le littoral et les marais le long du continuum océan-vasières intertidales-marais retro-littoraux.

L'ambition de cette action dans l'Axe Carbone bleu est de s'appuyer sur notre écosystème littoral et marais et ses composantes (habitats, biodiversité...) pour maximiser le piégeage de carbone sur le territoire.

Il est nécessaire de réaliser au préalable des mesures à grande échelle des bilans carbone des différentes interfaces d'échange terrestre-aquatique-atmosphérique au sein de ces écosystèmes hétérogènes et très dynamiques de l'Agglomération de La Rochelle. A partir de ce bilan, il sera possible d'agir au niveau des autres actions de cet Axe du point de vue, par exemple, de la modélisation et de l'optimisation des processus liés au piégeage de carbone. Les différents acteurs du territoire seront ainsi accompagnés au mieux en développant des outils d'aide à la décision en vue de futures stratégies d'aménagement et de valorisation du littoral.

FAS 2.1



Capter le CO₂ par le littoral et les marais



126 kt éq



séquestrées avec les actions 2.2, 2.3 et 2.4 en acquérant des connaissances sur les flux de carbone au sein des écosystèmes littoraux et des marais dans la perspective d'y maximiser la séquestration

DESCRIPTIF GENERAL DE L'ACTION

Les écosystèmes aquatiques continentaux et littoraux, comme ceux présents au sein de l'Agglomération de La Rochelle, représentent des zones d'interfaces d'échanges clés dans le couplage des cycles biogéochimiques entre les continents, les océans et l'atmosphère (Bauer et al., 2013). Ces zones « critiques » ne se limitent pas seulement au transfert horizontal de matières (nutriments, carbone) depuis le domaine terrestre vers le domaine océanique. Elles sont également le siège de flux significatifs et de processus métaboliques complexes aux différentes interfaces d'échanges (air-eau, air-sédiment et sédiment-eau) (Cole et al., 2007 ; Aufdenkampe et al., 2011). La dynamique du carbone y est contrôlée par une multitude de facteurs et processus biogéochimiques, i.e. l'activité biologique autochtone (balance production primaire/respiration), les processus physiques (contrôle de la température sur la solubilité du CO₂), les couplages benthos-pelagos, les échanges de CO₂ avec l'atmosphère ou encore l'advection horizontale de CO₂ avec le rythme tidal (échanges avec les domaines terrestre et océanique). Vu l'importance de ces systèmes dans les cycles biogéochimiques et leur sensibilité aux pressions naturelles et anthropiques, la dynamique du carbone nécessite d'être abordée, à l'échelle de l'écosystème et de manière intégrative aux différentes échelles temporelles caractéristiques (diurne, tidale, saisonnière et interannuelle) (Cai et al., 2011). Cependant à une échelle régionale, voire de l'Agglomération de La Rochelle, le manque de mesures *in situ* relatives à la dynamique du carbone (pressions partielles de CO₂ (pCO₂), carbone inorganique dissous (DIC), flux de CO₂ sédiment-air, eau-air, sédiment-eau) au sein des masses d'eau côtières (estuaires, zones intertidales, marais salés et doux, ...) entraînent de nombreuses incertitudes quant à leur statut, à savoir puits ou source de CO₂ vers l'atmosphère, et donc leur rôle au sein des budgets (régionaux et globaux) de carbone dans le contexte du changement global.

Cette action vise donc à appréhender au mieux les processus et flux de carbone aux différentes interfaces d'échange au travers des études *in situ* à grande échelle dans le but d'établir le premier budget de carbone du littoral et des marais au sein de l'ensemble des écosystèmes connectés représentatifs du territoire. Pour cela, une « unité pilote » sera suivie du bassin versant terrestre jusqu'à la mer afin d'avoir un continuum d'écosystèmes et effectuer ce bilan de carbone très complet (stocks des différents compartiments (vivant et non vivant) et flux de carbone aux interfaces air-eau, air-sédiment/sol, eau-sédiment/sol sur l'unité pilote en termes de carbone bleu mais aussi de carbone vert).

Cinq opérations liées les unes aux autres permettront de répondre aux objectifs de l'action 1 :

Opération 1 : Echanges de CO₂ atmosphérique à l'échelle du littoral, des marais et de la zone terrestre de l'Agglomération de La Rochelle

Cette opération est dédiée à la mesure des échanges de CO₂ avec l'atmosphère à l'échelle des zones humides (vasières intertidales et marais rétro-littoraux) et des bassins versants terrestres (cultures, prairies, ...) représentatifs de la CDA en utilisant la technique d'Eddy Covariance atmosphérique (EC). Les vasières littorales sont de plus en plus reconnues comme étant aussi productives que les forêts tropicales du fait de la forte production des microalgues (microphytobenthos) (Underwood and Kromkamp, 1999). Les marais d'une façon générale et plus particulièrement les marais tidaux présentent aussi une production primaire exceptionnelle, et contribuent ainsi de façon plus importante à la séquestration du carbone (Chmura et al. 2003, Artigas et al. 2015). Les surfaces terrestres présentent quant à elles des bilans de carbone très contrastés en fonction de l'occupation des terres (Stella et al., 2009 ; Béziat et al., 2009).

L'EC atmosphérique (Aubinet et al., 2000 ; Baldocchi, 2003) utilisée pour cette opération est une technique micrométéorologique, largement utilisée dans les écosystèmes terrestres, et qui est appropriée dans la mesure des flux de CO₂ dans des systèmes aquatiques hétérogènes et variables comme les systèmes littoraux de type marais salés, lagunes intertidales (Kathilankal et al., 2008 ; Artigas et al., 2015 ; Zemmeling et al., 2009 ; Polsenaere et al., 2012). La stratégie sera de déployer deux systèmes d'EC en simultanément le long de l'unité pilote terre-mer choisie, (1) au niveau de la vasière intertidale d'Aiguillon (flux air-eau et air-sédiment) (des prés salés en amont jusqu'au chenal subtidal en aval, en fonction de la direction du vent) et (2) au niveau d'un sous-bassin versant associé d'intérêt (rotation de cultures blé ou maïs, ...) représentatif de la CDA de La Rochelle. Des mesures par EC ont pu être réalisées au niveau d'une autre baie intertidale en France (Polsenaere et al., 2012), mais les déploiements prévus dans le cadre de l'Axe Carbone bleu/vert sur différents sites côtiers et terrestres seront donc une première à ces échelles spatiale et temporelle permettant une évaluation intégrée des fonctions puits/source de carbone des compartiments terrestre (carbone vert) et aquatique (carbone bleu).

La question des échanges de CO₂ atmosphérique à l'interface entre les sédiments (vasières et marais) ou le sol (bassins versants) et l'atmosphère et des relations existantes avec le métabolisme intertidal ou terrestre notamment des communautés de producteurs primaires pourra être appréhendée via le couplage entre ces mesures de flux de CO₂ par EC et le couvert végétal du carbone bleu (i.e. phanérogames marines, microphytobenthos, plantes pré-salés, ...) et du carbone vert (plantes prairies, cultures, arbres, ...) cartographié par télédétection multispectrale. A partir d'images à très haute résolution spatiale (SPOT, Pléiades, Sentinel), le couvert du sol sera identifié en utilisant une approche spectrale ou de classification orienté objet, selon la résolution des images. Un suivi sur 4 ou 5 dates annuelles permettra de suivre les changements phénologiques de la végétation selon les saisons. Ce travail permettra alors d'identifier au mieux la contribution relative des compartiments terrestre et aquatique aux flux mesurés ainsi que d'identifier des relations clés entre les flux mesurés et la dynamique biologique des compartiments benthique et pédologique selon les différentes échelles temporelles. De manière plus ponctuelle, spatialement et temporellement, un suivi du développement du microphytobenthos sur un site bien identifié pourra être réalisé par drone avec un capteur multi-spectral (capteur Sequoia, Parrot). Il s'agira de suivre son développement avec une fréquence temporelle élevée (un vol/heure) le temps d'une marée basse, dans des conditions spécifiques de marée et de saisons, plus ou moins favorables à son développement.

Opération 2 : Export terrestre et advection tidale de carbone le long du continuum terre-mer

Les systèmes tidaux et notamment les marais exportent de grandes quantités de carbone (organique et inorganique) aux systèmes aquatiques adjacents. L'hypothèse de « la pompe CO₂ des marais » (Odum, 1968 ; Wang and Cai, 2004) propose que la fixation de CO₂ atmosphérique par les plantes des marais et l'export du carbone (organique et inorganique) associé serait un des mécanismes majeurs rendant les eaux côtières et océaniques adjacentes sources de CO₂ pour l'atmosphère. Au regard de l'ensemble de ces processus et flux de carbone transitant au sein de ce littoral et marais, il apparaît essentiel de s'intéresser aussi aux flux horizontaux, i.e. à l'export de carbone depuis les bassins versants vers les sites côtiers de la CDA ainsi qu'aux échanges avec les masses d'eau océanique. Dans cette opération, des échantillonnages bimensuels seront réalisés au niveau de l'unité pilote citée ci-dessus aux principaux exutoires du Marais poitevin à la Baie de l'Aiguillon afin de suivre les concentrations de carbone (COP, COD, CID) en parallèle des mesures de flux par EC (Opération 1). Les mesures qualitatives (carbone, nutriments) mais aussi quantitatives (débits) menées en 2017-2018 dans le cadre du projet Aiguillon (Polsenaere et al., 2018) pourront être utilisées afin de calculer précisément l'export de carbone du bassin versant du Marais poitevin vers la Baie de l'Aiguillon.

En parallèle, des sondes multiparamètres et spécifiques immergées dans les eaux de sub-surface de l'unité pilote, ainsi que sur d'autres sites de la CDA à forts enjeux comme le marais de Tasdon (Favier et al. 2019) ou un marais salé, permettront de mesurer de façon autonome à haute fréquence (10 min.) les paramètres biogéochimiques

sédiment en tant que puits de CO₂ passe par la quantification de la part non recyclée du carbone qui sera donc enfoui. Cette opération est donc complémentaire des opérations 1 et 2. L'opération 3 propose de mieux comprendre les mécanismes qui régissent le recyclage/enfouissement du carbone et des sels nutritifs par une approche méthodologique permettant de documenter la dynamique spatiale et temporelle propre aux environnements soumis à la saisonnalité, à la marée et à la complexité du fonctionnement hydrosédimentaire de ces milieux. Cela passe par la quantification des flux à l'interface sédiment-eau/air de ces éléments et des éléments associés comme l'oxygène, le fer, le manganèse et le soufre. Les processus de transfert entre le sédiment et l'eau ou l'air sont dans les environnements intertidaux contrôlés par le microphytobenthos et la méiofaune qui s'en nourrit. Ces processus se déroulent à l'échelle sub-millimétrique et nécessitent la mise en œuvre d'outils méthodologiques de haute résolution (Jézéquel et al., 2007, Cesbron et al., 2014, Metzger et al., 2016, 2019). Ces processus de recyclage étant principalement liés à la minéralisation de la matière organique, la quantification et la qualification de celle-ci semblent indispensables ainsi que la description de la biodiversité de l'environnement sédimentaire (opérations 4 et 5).

Opération 4 : Dynamique des processus et stocks de carbone au sein des compartiments benthiques et pélagiques (cette opération est décomposée en deux parties dans le plan de financement)

Le vivant contribue aussi bien aux flux de carbone verticaux (organismes photosynthétiques – pompe à carbone) qu'horizontaux (espèces mobiles). La connaissance du fonctionnement trophique et de sa dynamique sur les sites d'étude permettra d'évaluer la pérennité de la captation de carbone dans la biosphère et les verticalités et horizontalités des flux par le biais des vecteurs biotiques (relations proies prédateurs / espèces mobiles). Cette opération nécessite de (1) mettre à jour la cartographie des habitats littoraux pour l'ensemble des sites d'étude, (2) déterminer les peuplements (richesses et diversités spécifiques de la macrofaune benthique et pélagique), et (3) d'établir le fonctionnement des réseaux trophiques des continuums considérés. Les stocks et flux de carbone au sein des compartiments pélagiques et benthiques sur le littoral et les marais sur le point SOMLIT (observatoire national) représentatif des conditions océaniques à l'entrée des Pertuis et sur l'unité pilote de l'opération 1 seront évalués. L'observatoire SOMLIT au centre du Pertuis d'Antioche, depuis près de 10 ans, suit de façon bimensuelle 16 composants hydro-biologiques dont les concentrations de carbone particulaire (COP) tant en quantité qu'en qualité (traceur isotopique) en parallèle de mesures quantitatives de nutriments et biomasse phytoplanctonique. La part relative des apports phytoplanctoniques océaniques relativement aux exports de carbone depuis les bassins versants vers les sites côtiers de la CDA sera évaluée conformément à Liénart *et al.* (2017, 2018) pour le Pertuis d'Antioche, principalement influencé par les échanges avec les estuaires de la Charente et de la Gironde. L'échantillonnage du compartiment benthique annuel de fin d'hiver acquis par SOMLIT sera complété par un échantillonnage d'automne afin d'estimer les stocks et flux de carbone transitant saisonnièrement pour ce compartiment et les sédiments associés (taux de matière organique, concentration en COP). L'équipement prévu dans l'opération 2 en termes de mesures de pCO₂ dans l'eau sera pris en compte à la station SOMLIT avec les autres mesures effectuées.

Sur l'unité pilote, l'estimation des stocks de carbone et des flux de carbone dans les compartiments biologiques sera aussi estimée (i) dans la colonne d'eau avec l'étude de l'ensemble des communautés planctoniques (captation carbone par les producteurs primaires et transfert vers les producteurs secondaires...), (ii) dans le sédiment via l'étude de l'ensemble de la flore/faune benthique (comme la macrofaune), (iii) dans le transfert et export de carbone horizontaux vers les prédateurs (oiseaux et poissons sur vasières et mizottes) qui seront caractérisés par espèce, les guildes écologiques (espèces résidentes-marines-migratrices) influençant saisonnièrement le piégeage du carbone dans les sédiments et traits fonctionnels associés pour définir le stock de carbone associé et estimer les flux potentiels (par contenus stomacaux et analyses des isotopes stables). Une étude sera menée par l'effet de l'enrichissement du milieu et contribution à la production primaire des fèces produites par les oiseaux et poissons sur cette production primaire. Les flux détritiques conduisant à un enrichissement en carbone du milieu et contribuant à la production primaire via les fèces produites, notamment par les espèces de vasières qui excrètent du carbonate de calcium inorganique au niveau intestinal est ensuite séquestré sous forme de carbone dans les marais salés (Wilson et al. 2009). Toutes ces données permettront de construire un modèle de flux de carbone des écosystèmes (ex. modèle ecophat).

Opération 5 : Dynamique et stocks de carbone au sein des compartiments sédimentaires et pédologiques

Le piégeage du carbone dans le littoral et les marais littoraux, incluant les zones rétro-littorales, les parties végétalisées (schorre) ou non végétalisées (slikke) des estrans, est lié à la fois à la productivité biologique et à la capacité de ces systèmes littoraux à retenir la matière organique produite et provenant du bassin versant et de l'océan. C'est à travers le processus de sédimentation que ce piégeage peut s'opérer et en particulier quand la sédimentation rapide de particules cohésives (vases) induit des conditions anaérobies qui préviennent de l'oxydation de la matière organique et ainsi le piégeage du carbone. Des exemples de résultat obtenus dans la Baie de l'Aiguillon :

d'études du fonctionnement et de la qualité des écosystèmes marins en transition. Enfin, plusieurs partenaires sont déjà identifiés pour réaliser les opérations 4 et 5 : le laboratoire des sciences de l'environnement marin (LEMAR) de l'Université de Brest et l'Université de Rennes participeront aux travaux grâce à leurs connaissances approfondies des écosystèmes, depuis le nano-micromètre jusqu'au paysage global. Le Port de plaisance mettra, lui, à disposition un site d'expérimentation, tandis que le Parc Marin soutiendra les démarches engagées, notamment grâce à son expérience technique sur le territoire.

Dimension(s) innovante(s) par rapport à l'état de l'art

L'innovation est présente à différents stades au sein de cette Action, dans :

- L'utilisation de technologies de pointe (présentes dans d'autres domaines) pour faire le bilan carbone des zones étudiées ;
- L'approche intégrée et interdisciplinaire pour réaliser une évaluation intégrée des fonctions puits/source de carbone des compartiments terrestre (carbone vert) et aquatique (carbone bleu) ;
- Les études des effets d'actions anthropiques (dragage et curage de sédiment) sur le bilan carbone, jamais réalisées jusqu'à présent, et non prises en compte dans les bilans actuels.

Verrous techniques, organisationnels, sociaux, ... identifiés

Plusieurs verrous techniques ont été identifiés à ce jour pour la réalisation de cette Action. Les premiers concernent des éléments de connaissances aujourd'hui non disponibles et les échéances de leur clarification. En effet, pour réaliser les études prévues, une connaissance approfondie des puits/sources de carbone du littoral et des marais de la CDA est nécessaire. Un premier bilan carbone du continuum terre-mer sera effectué mais il est probable que nous rencontrions des verrous techniques lors de l'étude de ces écosystèmes, non-prévus actuellement.

Ensuite, l'utilisation de la technique d'Eddy Covariance atmosphérique sur la bande des marais et de la côte n'est pas quelque chose d'habituel. En effet, cette technique est surtout utilisée pour l'étude d'écosystèmes terrestres, tels que les forêts par exemple. Son adaptation au milieu marin entrainera certainement quelques difficultés techniques, car les modèles actuels ne permettent pas d'intégrer à la fois le carbone vert/marron et le carbone bleu.

Solutions développées

Les solutions développées viseront avant tout la pertinence par rapport aux verrous identifiés. Pour cela, nous utiliserons toutes les méthodologies de pointe et innovantes pour réaliser les opérations citées et ceci en parallèle d'approches interdisciplinaires pour effectuer un bilan carbone extrêmement complet sur un continuum terre-mer, et analyser en profondeur l'influence de certaines activités humaines.

Nous chercherons à obtenir des niveaux de performance quantifiables pour assurer un suivi de l'Action, notamment à l'aide de bilans chiffrés des puits et des sources de carbone provenant du littoral et des marais.

Analyse des risques (juridiques notamment) et plan de gestion des risques

Risque	Description	Pondération (note sur 5)	Actions préventives ou correctives
Adaptation impossible de la technique d'Eddy Covariance aux milieux de la CDA	La technique d'Eddy Covariance atmosphérique est connue mais elle est encore peu utilisée en milieux littoraux qui seront la base des études menées dans cette Action.	1	Approfondir la connaissance de cette technique et s'appuyer sur l'expertise des acteurs pour construire les passerelles entre les milieux étudiés actuellement et les écosystèmes littoraux et marais du territoire.
Réticences de certains acteurs quant au changement de méthodes	Les études menées sur les actions de dragage pourraient mettre en lumière la nécessité de changer de méthode pour diminuer l'impact carbone. Les acteurs concernés seront alors peut-être réticents à l'idée d'engager des coûts importants pour modifier leurs usages habituels.	3	Les différents Ports du territoire rochelais ont déjà été sensibilisés à cette éventualité. Un bilan très précis et explicite de l'impact carbone de cette activité permettra de renforcer la nécessité de procéder à des changements. Un accompagnement sera proposé pour les faciliter.

PROTECTION DES COTES

AMBITION DE L'ACTION : Protéger les côtes dans un contexte de submersion et d'érosion

L'objectif général de cette action est de doter le territoire d'une stratégie intelligente d'adaptation au changement climatique pour atténuer les risques de submersion et d'érosion par des stratégies innovantes, afin de préserver le littoral et les marais qui correspondent à des puits importants de carbone bleu. Afin d'atteindre cet objectif, nous allons d'abord réaliser des mesures et des prédictions de l'évolution morphologique des estrans (vasières littorales et estrans rocheux) et barrières naturelles (cordons dunaires et de galets) (opération 1).

Nous quantifierons la plus-value de solutions de défense de côte « douces », comme la préservation voire le développement des herbiers en haut d'estran et la création de zones tampon pour limiter l'étendue des submersions lors des événements extrêmes (opération 2). Enfin, nous renforcerons les défenses de côtes en favorisant les dépôts calco-magnésiens (opération 3).

FAS 2.2



Protéger les côtes de la submersion et de l'érosion



126 kt éq



séquestrées avec les actions 2.1, 2.3 et 2.4 en développant des stratégies innovantes de défense des côtes contre l'érosion et la submersion

DESCRIPTIF GENERAL DE L'ACTION

Description détaillée de l'Action :

Le territoire de la CDA est caractérisé par la présence de nombreuses zones humides et marais identifiés comme des puits à carbone et séparés de l'océan par des barrières naturelles (cordons de galets, dunes) ou artificielles (digues). Dans un contexte d'élévation du niveau marin et de possibles modifications des régimes de tempêtes liées au changement climatique, des modifications du trait de côte seront à prévoir. D'après une étude de 2018 du Cerema [<http://www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr/indicateur-national-de-l-erosion-cotiere-r473.html>], près de 20 % du trait de côte naturel français est en recul et environ 30 km² de terre ont disparu au niveau des secteurs en recul sur une période de 50 ans. Cette érosion s'accompagne souvent d'effets particulièrement désastreux. Pour la côte atlantique française, en Aquitaine en particulier, depuis la Gironde et jusqu'à Biarritz, le processus d'érosion est particulièrement rapide et irréversible : la disparition progressive de la plage est suivie d'un recul de la dune puis d'un nouveau glissement de la plage, dans un processus sans fin.

Cette action vise à mieux comprendre et prédire la dynamique hydro-sédimentaire et les évolutions à long terme des estrans et des cordons naturels et à proposer des stratégies innovantes de défense des côtes.

Opération 1 : Dynamique hydro-sédimentaire et évolution des estrans et des barrières naturelles

La dynamique à long terme des estrans vaseux et cordons littoraux est mal connue, si bien qu'il est actuellement impossible de prévoir leur évolution face à une élévation du niveau de la mer et à une modification des régimes de tempêtes. L'une des questions clés au niveau international est de savoir si les estrans vaseux vont s'adapter à l'élévation du niveau de la mer grâce à une sédimentation accrue ou s'ils seront submergés. En effet, les estrans vaseux présentent à l'heure actuelle des pentes très faibles (de l'ordre de 1/1000) et des hauteurs d'eau maximales limitées, qui entraînent une forte dissipation des vagues lors des tempêtes, ce qui limite l'érosion des cordons dunaires. Le premier travail que nous proposons ici est d'améliorer les connaissances sur la dynamique hydro-sédimentaire de ces estrans vaseux et barrières littorales, en combinant l'observation *in situ* (vagues, courants, hauteur d'eau et topographie grâce à la photogrammétrie par drone) et la modélisation numérique à très haute résolution. Une attention particulière sera portée aux événements extrêmes, qui induisent les évolutions morphologiques les plus importantes alors que les observations *in situ* font cruellement défaut dans la littérature. Dans un second temps, nous réaliserons des simulations morphodynamiques à long terme (i.e. plusieurs décennies) de l'évolution des estrans vaseux afin, d'évaluer l'évolution de leur altitude par rapport au niveau marin dans un contexte de changement climatique. Ces travaux de modélisation numérique seront réalisés grâce aux systèmes de modélisation SCHISM (Zhang

des minéraux couplés à la protection cathodique des métaux. Trois sites en bord de mer (port de Plaisance, plage d'Angoulins, marais du Chay) sont déjà opérationnels pour des expérimentations en conditions naturelles et une zone de la plage de Châtelailon est déjà un site pilote.

Le procédé électrochimique concernant le renforcement des digues est maintenant bien maîtrisé et industrialisé suite aux études pilotes réalisés sur la plage de Châtelailon (commune de la CDA de La Rochelle), et des solutions de consolidation de digues et de peyrés seront mises en œuvre. D'autres solutions, basées sur ce principe sont également à l'étude, tel que l'utilisation de géotextile incorporant des fils métalliques, qui une fois rempli par des sédiments marins, permet de réaliser des brises-houles qui se consolident au cours du temps.

Cette opération 3 sera découpée en 2 tâches :

- **Tâche 1** : Restauration des falaises par couplage biominéralisation - électrochimie : réalisation d'un prototype en laboratoire permettant de mener de nombreux tests (choix du support cathodique, type d'arrosage, intensité du courant, sable, débris de coquilles, microorganismes isolés, consortium microbien...). Mise en place d'un système grandeur nature sur un site pilote (falaise des Minimes par exemple). L'apport de matériaux de démolition sera également étudié comme source de calcaire et piège à CO2.
- **Tâche 2** : Consolidation de digues et peyrés subissant une très forte érosion et installation de brise-houles incorporant des déchets coquillés. Test grandeur nature de la consolidation d'une partie des falaises des Minimes. Cette tâche sera réalisée par des procédés innovants de consolidation et se fera en concertation avec la CDA de La Rochelle et la DDTM.

Calendrier de réalisation de l'Action

Opérations	S1 2020	S2 2020	S1 2021	S2 2021	S1 2022	S2 2022	S1 2023	S2 2023	S1 2024	S2 2024
1										
2										
3										

Références :

- Bertin, X., Li, K., Roland, A., Breilh, J.F., Zhang, Y.L. et Chaumillon, E., 2014. A modeling-based analysis of the flooding associated with Xynthia, central Bay of Biscay. *Coastal Engineering* 94, 80-89.
- Huguet, J.-R., Bertin, X. et Arnaud, G., 2018. Managed realignment strategies to mitigate storm-induced flooding: a case study in La Faute-sur-mer, France. *Coastal Engineering*.
- Möller, I., Kudella, M., Rupprecht, F., Spencer, T., Paul, M., van Wesenbeeck, B.K., Wolters, G., Jensen, K., Bouma, T.J., Miranda-Lange, M. and Schimmels, S., 2014. Wave attenuation over coastal salt marshes under storm surge conditions. *Nature Geoscience* 7, 727-721.
- Van Rooijen, A.A., Van Thiel De Vries, J.S.M., McCall, R.T., Van Dongeren, A.R., Roelvink, J.A., Reniers, A.J.H.M. 2015. Modelling of wave attenuation by vegetation with xbeach. E-proceedings of the 36th IAHR World Congress.
- Zhang, Y.J., Ye, F., Stanev, E.V., Grashorn, S., 2016. Seamless cross-scale modeling with SCHISM. *Ocean Modelling* 102, 64-81.

PILOTAGE DE L'ACTION

L'Université de La Rochelle sera le pilote de cette Action. En particulier, le laboratoire LIENSs (spécialiste du littoral) sur les opérations 1 et 2, et le LASIE (sciences de l'ingénieur pour l'environnement) pour l'opération 3 seront les experts techniques chargés des développements et des études opérationnelles sur le terrain. Un autre partenaire territorial sera essentiel pour la réalisation de cette Action : l'UNIMA. En effet, l'Union des Marais de la Charente-Maritime connaît parfaitement les zones humides de la CDA de La Rochelle et les processus de gestion de l'eau. L'UNIMA participera donc aux campagnes de mesures hydro-sédimentaires et aux travaux de modélisation numérique des opérations 1 et 2. Pour l'opération 3, la CDA sera évidemment un partenaire important puisqu'elle mettra à disposition des zones d'expérimentation et notamment des digues et peyrés pour tester les solutions développées à taille réelle.

Dimension(s) innovante(s) par rapport à l'état de l'art

Cette action permettra de développer et de mettre en œuvre plusieurs innovations :

- La dynamique hydro-sédimentaire des estrans vaseux en période de tempête est très mal connue au niveau international. La combinaison de campagnes de mesures extensives et de simulations numériques à l'aide d'un des systèmes de modélisation 3D correspondant à l'état de l'art permettra de lever de nombreux verrous scientifiques.

	ouvrages) et publics (manque de confiance en ces procédés naturels).		échelle réelle ont déjà été réalisés et les résultats sont positifs.
Difficultés pour réaliser les expérimentations sur sites réels	Les sites d'expérimentation sont gérés par des acteurs publics et il s'agit de respecter les actions déjà menées et de bien faire comprendre la démarche pour éviter des incompréhensions sur les tâches qui seront réalisées.	2	La présentation de l'Action et de son ambition a été faite auprès des acteurs concernés et certains ont d'ores et déjà signé des lettres d'engagement.
Comprendre des phénomènes lors de tempêtes	Pour tester les développements réalisés dans cette Action, il faudra acquérir des données sur le terrain sur les phénomènes climatiques extrêmes. Une absence de ces phénomènes sur une période donnée pourrait « fragiliser » la validation des développements effectués.	2	La CDA de La Rochelle a connu des épisodes climatiques importants ces dernières années (Xynthia et Martin) et n'a pas oublié de capitaliser sur un maximum d'informations disponibles grâce à des relevés, des observations terrains, etc...
Comprendre des phénomènes lors de tempêtes	La complexité inhérente à la réalisation de mesures lors des tempêtes est un risque pour collecter des données importantes pour alimenter les modèles et les valider.	2	Le laboratoire LIENSs a prouvé ses capacités pour réaliser de telles mesures au cours de la décennie passée.

Méthode de suivi et évaluation de l'Action

Le système d'évaluation et des indicateurs du projet LRTZC se base sur le cadre méthodologique de la norme ISO 37101. Au-delà de l'impact carbone présenté en haut de cette page et compte tenu du caractère systémique les différents indicateurs sont à retrouver au point 5.1 du dossier de candidature.

Valorisation des résultats

Les travaux effectués seront valorisés par des dépôts de brevets et dans des revues scientifiques internationales (publications de Rang A). Les travaux feront également l'objet de présentations dans les congrès internationaux et nationaux dans les thématiques. La communication au grand public sera effectuée par des interventions dans des dispositifs récurrents comme les Journées « Science en Fête », ou Journées Portes Ouvertes des Universités et établissements d'enseignement. Localement, les partenaires de l'action partageront les résultats des travaux au grand public lors de conférences organisées par des acteurs locaux. Les principaux résultats de ce projet seront régulièrement relayés via le site internet des laboratoires et du CNRS.

Les réflexions, études et développements au sein de cette action comprendront à chaque étape une notion de répliquabilité. L'objectif sera de pouvoir transférer les connaissances et compétences sur toutes les typologies de côte vulnérable trouvée sur la façade atlantique.

SYNTHESE DES OPERATIONS DE L'ACTION

Opération	Bénéficiaire de la subvention	Coût total de l'opération	Co-financements	Montant demandé au PIA	Intensité d'aide (en %)
Opération 1	Université	241 500,00 €	120 750,00 €	120 750,00 €	50%
Opération 2	Université	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0%
Opération 3	CDA	200 000,00 €	100 000,00 €	100 000,00 €	50%
Opération 4	Université	390 000,00 €	195 000,00 €	195 000,00 €	50%

Opération 3 : Un modèle échanges verticaux/horizontaux entre eaux des marais et eaux souterraines (nappes phréatiques) et hydraulique des eaux de surfaces

Cette opération est consacrée au développement d'une nouvelle approche pour la simulation couplée de la dynamique des écoulements et des espèces chimiques en solution dans les aquifères côtiers : réaliste, elle évalue l'impact des principaux phénomènes influençant la nappe phréatique, qu'ils soient d'origine géologique, hydrochimique, biologique, climatique ou humaine ; numériquement efficace, elle apporte des réponses fiables et rapides pour répondre aux besoins de gestion des nappes ; globale, elle assure un véritable outil d'aide à la décision et protège de l'écueil de la non-reproductibilité des résultats.

Il existe des briques de modèles pour chacune des spécificités décrites ci-dessus. Leur couplage, s'il est précis, implique inévitablement des temps de calcul prohibitifs. De plus il nécessite une architecture très complexe pour respecter les contraintes physiques fondamentales telles que les lois de conservation. L'originalité de l'opération est de construire un modèle global localisant proprement les informations nécessaires. Illustrons sur deux exemples :

- Chimie et biologie, co-existence des cinétiques et des réactions instantanées. Les mécanismes biologiques sont classiquement décrits par cinétique chimique. Mais, pour les microorganismes consommateurs de carbone, selon la teneur en oxygène du milieu, les voies métaboliques activées peuvent être aérobie, dénitrificatrice, mangano-réductrice, ferro-réductrice, sulfato-réductrice ou méthanogène. Oxygène, manganèse, fer, sulfate sont des éléments dont les interactions avec le fond géochimique sont classiquement décrites par équilibre instantané. En développant des algorithmes capables d'inclure ou d'exclure des phénomènes chimiques, nous devrions obtenir des gains d'efficacité très significatifs.
- Échanges entre surface et nappe. Eaux de surface et eaux souterraines seront envisagées comme un continuum. Le gain en temps de calcul nécessaire à la simulation en temps long (jusqu'à l'échelle climatique) sera atteint en superposant des modèles prédictif et déterministe.

Opération 4 : Typologie et cartographie du bilan carbone selon les états et les modalités de gestion et des outils interactifs : Web-map interactive

Un premier objectif est d'identifier les écosystèmes source ou puits de carbone, leur état et leur évolution en fonction des modalités de gestion des milieux. Le but est d'arriver à optimiser des puits de carbone et d'en adapter la gestion. Un deuxième objectif est la mise à disposition en ligne d'un outil de cartographie interactif pour donner à voir les résultats des actions 1 et 2 de l'Axe (l'identité/fonction de chacune des zones d'études) et mettre en discussion des scénarios de gestion sur l'évolution des écosystèmes. Le premier temps est d'élaborer une base de données contrôlée et structurée conformément aux normes en vigueur, intégrant les différentes composantes (données, indicateurs) de l'identité/fonction de chacune des zones d'études. Un outil web cartographique sera mis en place, dans l'objectif de permettre à l'utilisateur de visualiser, d'appréhender et de comprendre au mieux les données, indicateurs et les scénarios envisagés et mesurer ainsi l'influence et l'impact de différentes alternatives de gestion des écosystèmes. Les fonctionnalités de l'outil web et des différents niveaux d'échelle seront discutées et validées au fil des réunions d'avancement du projet, et notamment lors d'ateliers réunissant les partenaires et futurs utilisateurs de l'outil, afin de répondre aux besoins (e.g. requêtes d'interrogation d'entités, affichage différencié des fonctions et indicateurs). Des maquettes (Interfaces Hommes Machines) successives seront modélisées, proposées et validées par les groupes de travail afin de tendre vers la version définitive de l'outil. Des développements informatiques seront enfin effectués afin de mettre en place l'outil. En fonction de la complexité des besoins, ces développements se baseront soit sur une interface HTML5 associée aux langages PHP et Javascript/JQuery, soit sur l'utilisation d'un framework Python (Django) ou PHP (Symfony), dans les deux cas associés à la base de données du projet et à un serveur cartographique. L'outil web et la base de données seront déployés sur un serveur web hébergé sur un serveur sécurisé.

Opération 5 : Un modèle bioéconomique mobilisant les fonctionnalités du littoral et des marais

Il est proposé ici de développer une approche fonctionnelle du littoral et des marais en lien avec les besoins du territoire. Cette perspective permet de discuter la pertinence du concept de service écosystémique, de proposer une lecture originale de "l'offre" et de la "demande" de services écosystémiques en considérant notamment l'existence ou non de complémentarités à différentes échelles (locale, régionale). L'intérêt de cette approche est de caractériser la durabilité - capacité à fournir des services écosystémiques de façon durable dans le temps – du littoral et des marais étudiés ainsi que leur potentiel de résilience - capacité d'adaptation face à des pressions anthropiques. Elle offre ainsi une représentation globale du socio-écosystème à la fois en termes de fonctionnalités, de services, mais aussi en termes de résilience ou de capacité d'adaptation. Elle intègre une analyse des réponses du milieu physique, de ses composantes naturelles et des fonctions biogéochimiques et écologiques qui découlent de pressions anthropiques. Pour cela, un modèle bioéconomique mobilisera les fonctionnalités du littoral et des marais avec l'identification des

Dimension(s) innovante(s) par rapport à l'état de l'art

Une étude approfondie des outils existants sur les problématiques liées au territoire a été réalisée. Cela nous a permis de comprendre les manques/limites de ces outils et d'identifier les aspects innovants nécessaires à la réalisation de cette Action :

- Sur les vasières intertidales, établissement d'un tout premier modèle de CO₂ du microphytobenthos à l'échelle internationale ;
- Sur les relargages de vase et de carbone associé dans les ports, établissement d'un tout premier modèle qui sera utilisé pour aider les gestionnaires des ports ;
- Modélisation nappes/surfaces : développement d'un modèle unique efficace et rapide, grâce à la mobilisation de résultats d'informatique théorique et d'IA inédite pour un outil de simulation ;
- Réalisation de cartes de bilan carbone pour les écosystèmes : source ou puit de carbone ;
- Mise en discussion par des cartes interactives de scénarios de gestion sur l'évolution des écosystèmes ;
- Evaluation de la durabilité du socio-écosystème (sa capacité à fournir des services écosystémiques dans le temps, et en particulier la captation carbone) par un modèle bioéconomique ;
- Développement d'un modèle qualitatif pour évaluer les chemins futurs pour une meilleure gestion de territoire.

Verrous techniques, organisationnels, sociaux, ... identifiés

Comme précisé auparavant, un certain nombre de partenaires sur le territoire possède des outils d'aide à la décision. Une des difficultés de cette Action sera de ne pas réinventer des solutions existantes et d'intégrer à chaque étape de développement une réflexion sur l'interopérabilité de ces outils. Malgré ces outils existants, des manques sont présents quant au caractère exhaustif des cartes et des bases de données utilisées. Des verrous techniques seront certainement rencontrés dans le développement des nouveaux outils. De plus, il n'existe actuellement aucun modèles numériques développés à l'échelle d'un territoire afin de simuler des scénarios de fonctionnement des écosystèmes et de leurs évolutions du point de vue du carbone.

Ensuite, il existe un verrou important concernant le modèle qualitatif (opération 6) : si l'élaboration de ce modèle ne devrait pas poser de difficultés conceptuelles, quelques défis techniques intéressants seront levés. Le principal d'entre eux est certainement celui de la taille du système du territoire de La Rochelle. Pour le contourner, nous devons adopter une architecture de modélisation modulaire et multi-échelle. Cela suppose de modéliser d'abord chacun des sous-écosystèmes du territoire pour s'assurer de les comprendre individuellement. Puis, un modèle plus englobant, s'appuyant sur un graphe multi-échelle arborescent qui capture les interactions spatiales entre ces sous-écosystèmes, les réunira de façon cohérente et plus facilement manipulable.

Enfin, la modélisation des nappes et surfaces sera également une étape importante soumise à des difficultés techniques. En effet, le couplage entre les deux formulations de la chimie, cinétique et équilibre instantané, est reconnu actuellement comme un verrou scientifique fort dans la littérature scientifique. De plus, prendre en compte dans les modèles les échanges verticaux/horizontaux entre eaux des marais et eaux souterraines est vraiment important pour une meilleure gestion de la ressource en eau du territoire en lien avec le carbone bleu.

Solutions développées

En ce qui concerne le dernier verrou évoqué ci-dessus, une solution innovante sera développée pour la modélisation des nappes et surfaces. Les modèles de transport les plus légers en terme de coût de calcul ont été développés dans les années 70 et ne sont valables qu'à des échelles de temps et d'espace très limitées. Pour cette Action, nous inclurons de façon inédite des travaux récents en informatique théorique pour superposer des modèles prédictif et déterministe, le gain en temps de calcul permettant d'utiliser des modèles de transport valables à toute échelle de temps et d'espace.

De manière globale, une diversité de modèles numériques au service d'un territoire sera développée dans cette Action. Des cartes seront disponibles pour l'ensemble des gestionnaires de zones littorales, ainsi que des outils numériques innovants d'aide à la décision.

Les innovations proposées auront atteint un TRL compris entre 7 et 8 à la fin de l'action (les divers outils auront été testés et validés en situation réelle).

Analyse des risques (juridiques notamment) et plan de gestion des risques

SYNTHESE DES OPERATIONS DE L'ACTION

Opération	Bénéficiaire de la subvention	Coût total de l'opération	Co-financements	Montant demandé au PIA	Intensité d'aide (en %)
Opération 1	Université	180 000,00 €	90 000,00 €	90 000,00 €	50%
Opération 2	Université	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0%
Opération 3	Université	216 400,00 €	108 400,00 €	108 000,00 €	50%
Opération 4	Ville	200 000,00 €	200 000,00 €	0,00 €	0%
Opération 5	Université	13 000,00 €	6 500,00 €	6 500,00 €	50%
Opération 6	Université	265 000,00 €	132 500,00 €	132 500,00 €	50%

une vision claire de leurs relations, compétences et actions sur ces milieux. Il est pourtant essentiel de connaître ces parties prenantes, leurs actions et interactions afin d'identifier les blocages à une prise en compte de la fonction de captage de CO₂ dans la gouvernance du territoire. Ce travail évaluera les modalités de gouvernance des différents marais et du littoral en précisant les schémas décisionnels dans lesquels pourront être impulsés les résultats des 3 précédentes actions. C'est pourquoi, nous conduirons une analyse du réseau des acteurs, des services et compétences, ainsi que des instruments de gestion et de suivi de la santé des zones humides. Nous chercherons à identifier les cloisonnements entre services et compétences, ainsi que les absences et inadéquations des instruments de suivi et de gestion. Nous proposerons alors de nouvelles modalités de gouvernance pour lever ces verrous. La mutualisation de ces résultats sur le fonctionnement de la gouvernance et les échanges de points de vue sur les intérêts défendus par les différentes parties prenantes, permettront de déterminer des objectifs partagés, d'améliorer la connaissance du territoire et d'appuyer sur les compétences des différents acteurs.

Il est important de rappeler que « l'Axe Carbone bleu » s'inscrit principalement dans le champ d'application de la compétence GEMAPI (gestion des milieux aquatiques et la prévention des inondations) où la loi MAPTAM (loi de modernisation de l'action publique territoriale et d'affirmation des métropoles) a induit une réorganisation complète de la gouvernance territoriale. Cette étape permettra d'identifier les acteurs cibles du territoire et leurs besoins afin de s'approprier la problématique « carbone » et de l'intégrer dans leur domaine d'activité. Ensuite, une analyse prospective avec des scénarios d'évolution des services écosystémiques et l'étude de l'influence des différentes stratégies d'acteurs sur le territoire soumis à l'aléa de submersion pourront être menées. Elles permettront d'évaluer et d'optimiser la place hiérarchique du « stockage du carbone » par rapport aux autres fonctions écosystémiques du littoral.

Opération 2 : Sensibilisation/pédagogie des citoyens/acteurs/gestionnaires au carbone bleu

Le littoral et les marais intègrent la trame verte et bleue des territoires. C'est un outil d'aménagement du territoire qui vise à (re)constituer un réseau écologique cohérent, à l'échelle du territoire national, pour permettre aux espèces animales et végétales de circuler, de s'alimenter, de se reproduire, de se reposer... Elle contribue dans le même temps au maintien des services que nous rend la biodiversité : qualité des eaux, pollinisation, prévention des inondations, amélioration du cadre de vie. Des programmes pédagogiques et des interventions de sensibilisation auprès de différents publics seront construits :

- * Des formations spécifiques conçues et destinées aux parties prenantes du territoire (élus, agents de collectivités et l'ensemble des professionnels intervenants sur le territoire) seront organisées afin de favoriser l'appropriation des connaissances par les décideurs et la mise en œuvre d'actions de préservation des milieux (ex. Dispositif land art du type des arbres bleus du PAPI Gabut/VeB, Géant Bleu...).
- * Des démarches de conscientisation des citoyens (habitants et touristes) seront mises en œuvre au travers d'un dispositif participatif de connaissance et de préservation du littoral et des marais. Cette étape comprendra la conception et la mise œuvre de cycles de sortie nature et le déploiement de démarches de sciences participatives (relevés d'observations sur le terrain par les citoyens et transfert des données d'observation par les citoyens vers les organismes scientifiques tels que le Muséum d'Histoire Naturelle). Cela comprendra la réalisation d'outils et d'animations spécifiques adaptés aux publics.
- * La conception du programme pédagogique à destination des scolaires sera réalisée, afin de rendre les enfants acteurs de la préservation du littoral et des marais. Ce point sera mené et répliqué sur différentes classes et écoles de l'agglomération rochelaise, en permettant à chaque classe de voir les actions des autres classes, dans le but de renforcer la dynamique collective. L'opération comprendra des études de l'environnement proche (sorties de terrains et inventaires), l'identification des enjeux de gestion écologique du territoire par les élèves au travers de rencontres et d'échanges avec des professionnels, la réalisation d'actions de connaissance, de restauration ou d'aménagement et la valorisation des actions mises en œuvre au travers de restitution à différents publics et d'échanges entre les établissements scolaires.
- * Les différentes opérations de sensibilisation et de conscientisation menées auprès des citoyens, des scolaires et des décideurs seront suivies et évaluées afin de mesurer leur efficacité. Le suivi/évaluation sera réalisé au travers d'enquêtes qualitatives basée sur une approche sociologique pour identifier l'état des connaissances, la compréhension des mécanismes et leur implication (méthode des entretiens semi-directifs individuels). Les enquêtes seront réalisées au début, au milieu et à la fin du projet. De même, des synthèses seront produites sur les données collectées à l'aide d'outils existants de sciences participatives (Visionature, Biolit et Objectif plancton).

Dimension(s) innovante(s) par rapport à l'état de l'art

Des démarches pédagogiques sont mises en œuvre depuis plusieurs années sur les zones littorales et les marais. Pour autant, elles n'intègrent pas de méthodes de sensibilisation propres à ces zones, d'évaluation des impacts et se réduisent le plus généralement à un type de public (les usagers). L'innovation de cette Action portera donc sur :

- La conscientisation du carbone bleu avec pour cible, les élus, les collectivités, les citoyens au sens large, ainsi que les scolaires ;
- La création d'un référentiel national sur le bilan carbone par type d'habitat naturel, permettant de faire évoluer les modalités de gestion des zones humides avec les décideurs, afin d'optimiser les captations de carbone sur le littoral et les marais ;
- La mesurer de l'efficacité des différentes opérations de sensibilisation et de conscientisation menées en début, milieu et fin du projet.

Verrous techniques, organisationnels, sociaux, ... identifiés

Le principal verrou social est la capacité d'appropriation de la notion de carbone bleu par les acteurs du territoire pour une meilleure gestion de notre littoral et des marais. En effet, les capacités de captation du carbone du littoral et des marais ne sont pas encore connues de tous et avant de procéder à la sensibilisation des usagers sur ces éléments, il faut au préalable que les structures gestionnaires de ces zones soient tout à fait conscientes de la nécessité d'optimiser leur gestion.

Ce verrou social sera directement lié à des verrous d'ordres techniques, puisque devant le caractère nouveau des démarches qui seront mises en place, des manques de savoir-faire seront présents au sein de l'ensemble des partenaires impliqués.

Solution développée

A la vue du pouvoir de captation du carbone important du littoral et des marais du territoire rochelais, il semble indispensable que la notion de carbone bleu soit partagée au plus grand nombre. Des démarches pertinentes de sensibilisation seront mises en place pour faire comprendre au plus grand nombre l'aspect pertinent et novateur de l'ensemble des opérations portées par l'Axe carbone bleu au sein du projet LRTZC.

Un accompagnement précis et approfondi des acteurs cibles du territoire sera réalisé pour comprendre leurs besoins et leur permettre d'intégrer la problématique du carbone bleu au sein de leurs activités.

Enfin, un point novateur concerne la mesure de l'efficacité des différentes opérations de sensibilisation et de conscientisation menées, qui sera évaluée en début, milieu et fin du projet, afin de conserver une cohérence constante des actions de terrains réalisées.

Analyse des risques (juridiques notamment) et plan de gestion des risques

Risque	Description	Pondération (note sur 5)	Actions préventives ou correctives
Ne pas réussir à développer une gouvernance commune et acceptée par tous.	Il est indispensable que la gouvernance des zones humides du territoire soit pensée de manière globale pour optimiser la gestion de ces zones et leur pouvoir de captation du carbone. Cependant, la multitude des acteurs engagés peut conduire à des « conflits » quant au rôle de chacun.	3	Des réflexions approfondies seront menées sur cette gouvernance en présence de tous les acteurs concernés. Des phases de concertation seront réalisées pour permettre à chacun de trouver un rôle correspondant à ses compétences et capacités.
Réticences de certains acteurs quant au changement de méthodes	Certains acteurs du territoire réalisent déjà des actions de sensibilisation auprès des usagers. Il ne faut pas se couper de ces acteurs en imposant de nouvelles méthodes de façon arbitraire.	3	Un accompagnement sera proposé pour faciliter la mise en place de ces nouvelles méthodes. De plus, les acteurs concernés sont déjà sensibilisés aux actions de l'Axe carbone bleu et ont compris les enjeux liés aux changements de comportements.