



RAPPORT DE PRÉSENTATION DE PROJET

RESTAURATION DE L'HABITAT

LAMINAIRES

SECTEUR ESTUAIRES LOIRE ET VILAINE

Rédaction : ALARCON Amélie

Tuteur : MENARD Jean-Claude
Association Estuaires Loire et Vilaine
9 bis bd des Korrigans 44510 LE POULIGUEN

École de Gestion et Protection de la Nature
16, bd Gabriel Guist'hau, 44000 NANTES



Sauf mention contraire, les crédits photographiques, cartographiques et figuratifs sont attribués à ALARCON Amélie

TABLE DES MATIÈRES

1. Entrée en matière	1
1.1. Introduction	1
1.2. Résumé	1
1.3. Définitions essentielles à la compréhension	2
1.4. Localisation du site d'étude	4
2. Contexte	7
2.1. ELV	7
2.2. Contexte écologique et réglementaire	8
2.2.1. Zonages environnementaux	8
2.2.2. OSPAR	10
2.2.3. Europe et restauration de la nature	11
2.3. Contexte physico-chimique général de la zone d'étude	12
3. Etat de la recherche sur l'écologie et la restauration des laminaires	14
3.1. L'étagement phytal	14
3.2. Les laminaires	15
3.2.1. Généralités	15
3.2.2. Rôle écosystémique	16
3.3. Laminaria hyperborea	17
3.3.1. Cycle de vie	17
3.3.2. Distribution et évolution des populations	19
3.3.3. Services écosystémiques	23
a. Régulation climatique et Séquestration du carbone atmosphérique (maintien du pH)	23
b. Perte de biodiversité	24
c. Défense naturelle des côtes	24
d. Régulation des nutriments et de l'eutrophisation	24
3.4. Etat des lieux de la recherche – restauration d'habitats naturels côtiers	25
3.4.1. Comparaison - projets de restauration de laminaires	25
a. Green gravel	25
b. Sussex Kelp Recovery Project	27
3.4.2. Comparaison - projets de restauration de posidonies	28
3.4.3. Comparaison - projets de restauration de coraux	29
3.5. Menaces	30
3.5.1. Broutage	30
3.5.2. Modifications et augmentation de la turbidité	31
a. Généralités	31
b. Dragage	32
c. Blooms	32
3.5.3. Changement et réchauffement climatique	33
a. UV – trous couche ozone	33
b. Réchauffement des eaux	33
c. Baisse de la salinité	33
3.5.4. Qualité des eaux	34
a. microplastiques	35
b. Agriculture et pesticides	35
c. Métaux lourds	36
d. Affluence estivale	37
4. Présentation du projet	38
4.1. Descriptif du projet et de la mission	38
4.1.1. Objectifs principaux	38
4.1.2. Financement	38
4.1.3. Justification du choix d'espèce	39
4.1.4. Demandes et autorisations	39

4.2. Méthodologie.....	40
4.2.1. Orientation générale de la méthodologie	40
4.2.2. Prélèvement des lamineaires parents	41
4.2.3. Culture ex situ.....	42
4.2.4. Inventaire initial sur site.....	43
a. DCE, protocole ECBRS et indice EQR	43
b. Méthode	44
4.2.5. Réinsertion en milieu naturel	45
a. transport.....	45
b. Opération de réinsertion.....	45
4.3. Effets attendus	47
4.4. Communication autour du projet.....	48
4.4.1. Conférences et réunions	48
4.4.2. 1Ocean	48
5. Discussion.....	49
6. Conclusion	51
7. Bibliographie	52
7.1. Rapports, thèses et documents	52
7.2. Ressources en ligne	56
8. Liste des annexes	57

1. Entrée en matière

1.1. Introduction

Laminaria hyperborea (Gunnerus, Foslie, 1884), aussi appelée Laminaires nordique ou rugueuse, est une espèce d'algue brune endémique des mers tempérées à froide des côtes Atlantique européennes (SLMALE D.A et al., 2014). Les laminaires peuvent former une canopée végétale de plusieurs centaines d'hectares et couvrent environ 25% des côtes mondiales (WERNBERG et al., 2019), chaque pied offrant un abri à plus d'un millier d'autres espèces floristiques et faunistiques.

Les forêts de laminaires sont un habitat riche, d'une productivité primaire comparable aux mangroves tropicales. Malgré leur capacité à séquestrer le carbone, réduire l'impact de la houle sur les côtes, maintenir un pH marin favorable à la biodiversité calcifiante, ou encore à abriter des milliers d'individus faunistiques, ces habitats ne sont pas protégés par une réglementation forte en France métropolitaine. Les COmité de PILotage (COFIL) des différentes zones Natura 2000 de la presqu'île de Guérande émettent toutefois le souhait de déployer une voire plusieurs aires marines protégées (AMP) sur le littoral afin de préserver les cœurs de population de *L. hyperborea*. La croissance des activités humaines côtières et de leur impact sur la qualité des eaux océaniques est la principale source d'une diminution alarmante de la densité et de la biomasse de cet habitat naturel dans le monde entier (DAYTON et al., 1999 ; STENECK et al., 2002 ; CONNELL et al., 2008 ; WEAR et al., 2023), avec un déclin mondial d'abondance de -2% par an (WERNBERG et al., 2019). La convention OSPAR a intégré en 2021 les forêts de laminaires à la liste d'habitats naturels menacés et/ou en déclin, ouvrant la voie vers de futures réglementations pour protéger voire restaurer cet habitat.

Dans le cadre d'appel à projet mené par l'Agence de l'Eau, l'Association Estuaires Loire et Vilaine (ELV) propose un projet de restauration écologique en partenariat avec la station biologique de Roscoff. Cette étude se positionne en complémentarité des suivis des laminaires réalisés par l'association, ainsi que des actions menées pour limiter les activités induisant une baisse de la qualité des eaux côtières (dragage, pollutions, ...). Ce projet consiste ainsi à la **restauration des forêts de laminaires des Evens** (Baie du Pouliguen) **par réintroduction de pieds de *L. hyperborea* reproduits en bassins** (ex situ).

Cette expérimentation a pour but de coloniser des hectares de substrats rocheux subtidiaux en Loire Atlantique par l'établissement de cœurs de populations de *L. hyperborea* en bonne santé et fertiles. A la différence de la méthode de restauration de laminaires la plus répandue dans le monde : Green Gravel, ce projet se focalise sur la création d'îlots concentrés en laminaires, capables de coloniser le milieu environnant de manière naturelle. Ce projet a également pour objectif de concevoir une méthode de restauration de l'habitat utilisable et reproductible à grande échelle, afin de restaurer les populations de cette espèce ainsi que d'autres laminaires sur l'ensemble des côtes françaises où ces forêts sous-marines ont disparu, a décliné voire en lieu où elles n'ont jamais été observées.

1.2. Résumé

Des *Laminaria hyperborea* adultes ont été extraites de leur milieu naturel sur la côte sauvage, leur reproduction a été suivie en bassin de culture à la Station Biologique de Roscoff - Sorbonne Université, associée au Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS). Les plantules produites ont été fixés en bassin sur deux supports : des roches (galets) ainsi que des sections de corde de coco.

En coopération avec le bureau d'étude Bio-littoral, les substratsensemencés ont ensuite été réinsérés en milieu naturel, le site étant l'îlot des Evens au large de La Baule (Loire-Atlantique). Un suivi, basé sur des inventaires type DCE, sur trois ans sera effectué pour étudier le développement, la validité des supports et l'évolution de la biosphère associée à cet habitat. Ce suivi permettra de déterminer la viabilité de cette méthode de transplantation pour la restauration de l'habitat.

1.3. Définitions essentielles à la compréhension

Selon la Société de Restauration Ecologique (SER), la « **restauration écologique** » réfère à un procédé de remise en bon état écologique d'un habitat ou écosystème ayant été dégradé, endommagé ou détruit (SER, 2024). La restauration écosystémique n'effectue pas le travail de **rétablissement**, l'objectif est de créer des conditions favorables au rétablissement naturel de l'écosystème endommagé, afin que les plantes, animaux et micro-organismes puissent effectuer eux-mêmes le travail de rétablissement.

Ce procédé englobe ainsi les actes de restauration des fonctions de l'écosystème comme la réintroduction d'individus d'espèce disparues ou en mauvais état écologique sur le site de restauration, la restauration d'éléments structurants (mares, modification du relief, ...) ou encore des actes de suppression d'une voire plusieurs Espèces Exotiques Envahissantes (EEE) pour ne citer que quelques exemples.

Le terme de **rétablissement** (Re-Establishment) **écologique** utilisé dans ce rapport est celui défini par Akeroyd et Wyse Jackson en 1995. C'est ainsi un plan de conservation impliquant une restauration d'une voire plusieurs populations floristiques jusqu'à retour à son/leur état écologique « initial » défini par une référence historique, après dégradation ou destruction. L'objectif est ainsi que l'habitat restauré retrouve graduellement son état d'origine en termes de composition, de structure, de richesse et de fonctionnalité (figure 1). Wyse Jackson définit également dans ce document le principe de **renforcement écologique**, technique consistant à la réintroduction de plants reproduits et cultivés ex situ (dont les plants parents proviennent d'un site naturel ou d'une culture contrôlée) afin de renforcer une population existante.



Figure 1: Rétablissement écologique à la suite de la destruction d'un aménagement de rétention d'eau sur le sar, Morbihan (A. MARTIN 2018)

La technique de renforcement utilisée dans le cadre de cette étude est la mise en **culture et reproduction ex-situ** (hors milieu naturel) de plants sauvages, suivi d'une **réintroduction des plantules produits in-situ** (en milieu naturel). Cette technique est employée notamment pour la conservation et le renforcement de populations d'espèces floristiques terrestres menacées afin de ralentir voire d'empêcher leur extinction. L'application de cette technique est encore rare sur le domaine marin, cette recherche se présente ainsi novatrice en France.

L'Ifremer définit la **turbidité** comme étant un paramètre descriptif de la colonne d'eau, correspondant à « l'obstruction à la pénétration de la lumière dans l'eau » (CAYOCCA F., 2012). Ce terme est ainsi synonyme de la clarté de l'eau, représentation visible de la quantité de particules solides en suspension, telles que les sédiments, micro-organismes et autres matières organiques et inorganiques. La turbidité dépend donc de la concentration en matières en suspension (MES) et des caractéristiques optiques et géométriques de ces particules. La turbidité varie selon les apports terrigènes (ici venant de la Loire ainsi que de la Vilaine principalement), mais également en fonction de la courantologie, des conditions météorologiques ainsi que de la houle. La faune et flore marine jouent également un rôle important sur les variations de la turbidité. Exemple des périodes de fraie des harengs, causant des volutes blanchâtres de plusieurs kilomètres de long, mais également les blooms (ou efflorescences) de phytoplanctons, générant des patches de plusieurs dizaines de milliers de kilomètres carrés à la surface des eaux, visibles depuis nos satellites orbitaux. Ces deux événements sont des exemples d'événements organiques source d'une forte augmentation temporaire de turbidité.

Un **bioindicateur** est une espèce ou un groupe d'espèces dont la présence, l'absence, l'abondance, la composition ou les variations physiologiques et comportementales fournissent des informations sur l'état écologique d'un environnement ou sur l'impact de perturbations environnementales comme la pollution. Les bioindicateurs permettent d'obtenir des informations qualitatives sur l'état d'un écosystème, et sont ainsi utilisés pour détecter les signes d'un déclin environnemental. Plus une espèce est exigeante en termes de facteurs physico-chimiques, plus elle sera sensible aux perturbations de ces facteurs et sera ainsi un bioindicateur plus fort et représentatif des changements ayant eu lieu sur le milieu naturel. Sur le domaine aquatique, les bioindicateurs majoritairement sélectionnés sont les macroinvertébrés benthiques tels que les mollusques ou les crustacés, mais les zoo/phytoplanctons ainsi que les macroalgues peuvent également permettre d'estimer la qualité écologique d'un écosystème

Les algues brunes de grande taille telles que les laminaires (ou varech, kelp) forment des relations biologiques avec d'autres organismes floristiques, bactériens et faunistiques, qui viennent à coloniser et vivre sur leur surface. Cette relation se nomme **l'épibiose**, les organismes colonisateurs les **épibiontes**. Les organismes fixés venant à « pousser » sur l'algue sont nommés **épiphytes**. Les épibiontes peuvent être des bactéries ou cyanobactéries, formant des biofilms à la surface des laminaires, des algues de petite taille telles que les diatomées ou algues rouges, ainsi que de nombreux invertébrés tels que les balanes, hydroïdes, bryozoaires, ascidies et autres petits crustacés et mollusques.

Certains de ces organismes peuvent influencer la santé et la croissance des laminaires (exemple de l'helcion pellucide, *Patella pellucida*), en affectant leur capacité photosynthétique. Ils sont toutefois également source d'une forte richesse biologique, ces organismes sont en effet des producteurs et consommateurs primaires, bases de la chaîne alimentaire. De plus seuls quelques rares espèces détruisent directement la laminaire hôte, la grande majorité des organismes épibiontes prolifèrent sous la canopée formée par la fronde des laminaires.

Les courants de marée, comprenant le **flot** (flux) et le **jusant** (reflux), jouent un rôle crucial dans la dynamique des écosystèmes marins. Le flot désigne la phase ascendante de la marée, où l'eau monte et avance vers la côte. Le jusant représente la phase descendante, où l'eau se retire vers la mer ouverte. Ces mouvements d'eau sont essentiels non seulement pour la navigation maritime, mais également pour la distribution et les échanges de nutriments entre terre et mer, et la régulation des habitats côtiers. Les courants de marée peuvent atteindre des vitesses significatives, particulièrement dans les zones où le relief sous-marin canalise le flux, créant des environnements dynamiques voire turbulents. De plus, ces courants influencent les échanges thermiques et salins entre les masses d'eau, jouant un rôle clé dans les cycles biogéochimiques marins (PUGH D.T, 2004).

1.4. Localisation du site d'étude

Les études et suivis de la santé des laminaires ainsi que de la qualité des eaux effectués par ELV concernent une zone côtière s'étendant du large de Piriac-sur-Mer au sud de l'embouchure de la Vilaine à la presqu'île de Noirmoutier au sud de l'embouchure de la Loire. Le périmètre intègre les zones océaniques influencées par les deux estuaires. Cet ensemble a été défini par ELV considérant l'hétérogénéité des autres ensembles côtiers tels que la baie de Bourgneuf ou encore le Golfe du Morbihan, dont le fonctionnement diffère de manière conséquente du reste de la côte. Cette vaste zone est recoupée en plusieurs sites où les populations de laminaires sont suivies par ELV (points bleus sur la figure 2 ci-dessous).

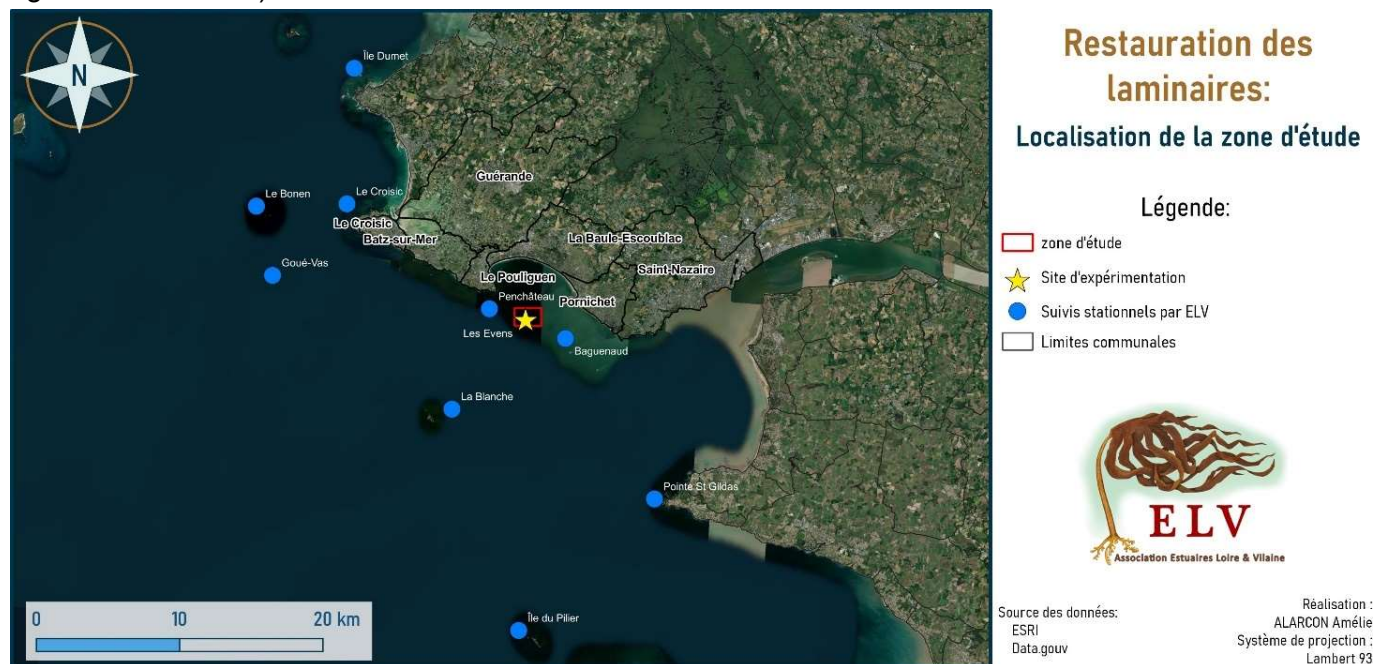


Figure 2: Localisation des sites de suivis ELV

La zone d'étude concernée par ce projet de restauration de l'habitat laminaire par transplantation de pieds cultivés ex situ se situe en baie du Pouliguen, face à la plage de la Baule, aux abords de l'îlot des Evens (étoile jaune sur la figure 2, détail en figure 3). Le site se trouve au sud-est de l'îlot, face Atlantique, sur un platier rocheux (encadré bleu, figure 3).



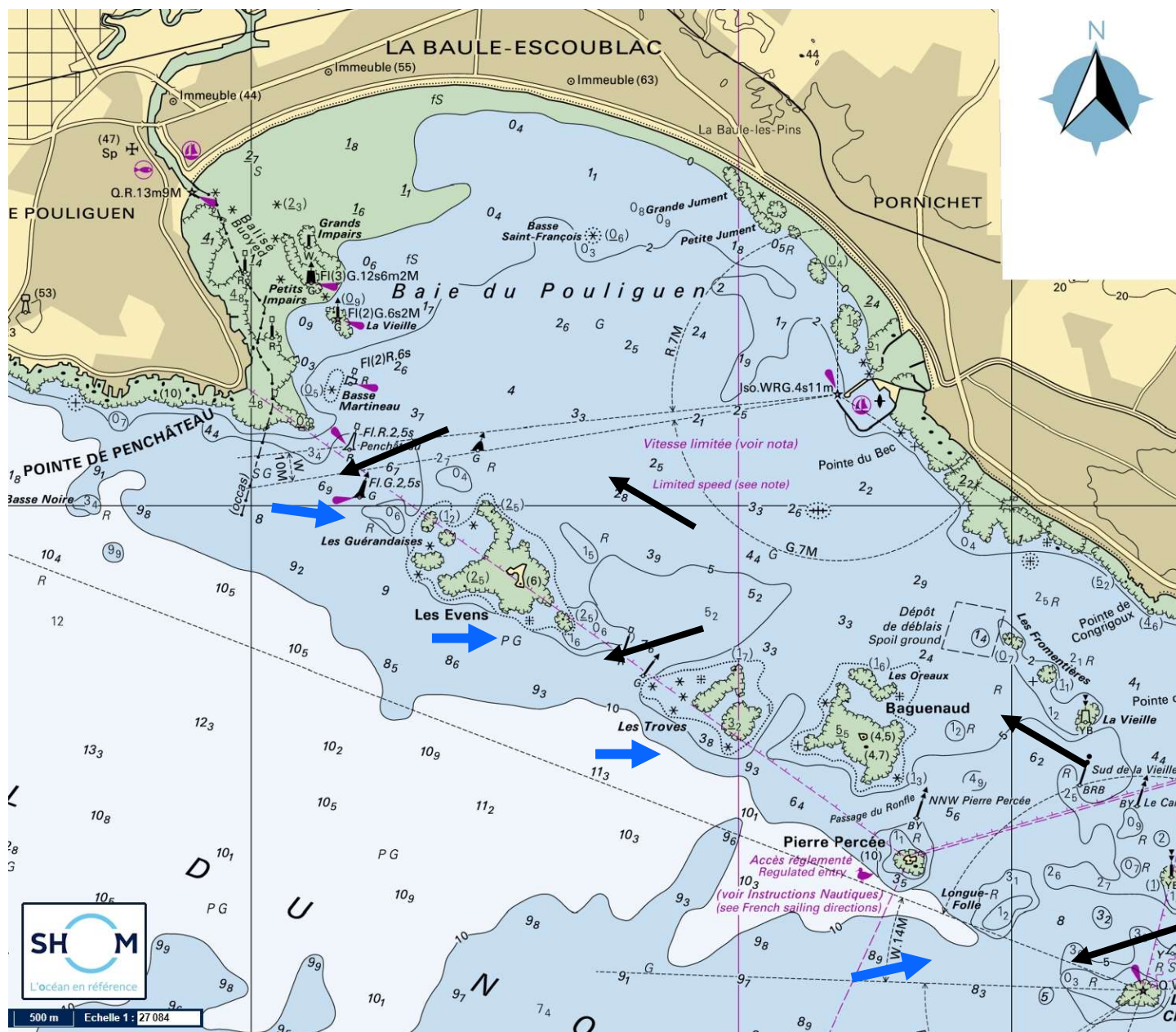
Figure 3: Localisation du site d'expérimentation

D'à peine quelques centaines de mètres carrés, l'îlot des Evens (communément appelé « les Evens ») est composé d'un récif rocheux exposé Atlantique, ainsi qu'un cordon sableux faisant face à la côte. Sous le zéro des cartes marines, les Evens apparaissent comme un plateau rocheux triangulaire entrecoupé de zones sableuses. Cette exposition à la houle et aux vents océaniques fait de la face ouest des Evens un récif en mode battu, soumis à une forte activité hydrodynamique. Le platier s'enfonce jusqu'à environ 9-10m de profondeur (USII-F, 2012) avant de laisser place à une zone de sables et sables à graviers (voir cartographie de la nature du substrat, figure 9).

Le site d'expérimentation est à une bathymétrie de 1-8m et représente une superficie d'environ 600m². Il a été sélectionné pour la variété de reliefs qu'il présente, ainsi que pour ses conditions physiques propices à l'implantation de laminaires (substrats rocheux). En effet le platier rocheux sélectionné présente une grande variété d'éléments structurants tels que des têtes de roches, crevasses, éboulements et failles. Cette variété représente des emplacements stables pour les galets ensemencés qui y seront placés lors de l'étape de réinsertion des cultures. L'îlot est dominé par des vents d'Ouest, et est relativement abrité des courants turbides de la Loire lors du jusant. L'îlot reçoit également des apports en eaux claires depuis l'océan Atlantique aux flots (figure 5). Les roches émergeant à marée basse forment également une barrière naturelle au nord du site d'expérimentation, limitant les apports en eaux turbides des dragages stationnaires du GPMNSN (port de Saint-Nazaire) et ceux effectués dans la baie du Pouliguen (Ports de La Baule-Pouliguen et de Pornichet). Cette situation hydrologique permet de conserver une visibilité légèrement supérieure sur la face sud-ouest des Evens comparément au reste de la baie. Enfin, le site présente encore quelques laminaires nordiques et *sacchoriza sp.*, témoignant de ses conditions encore favorables à l'implantation de laminaires (figure 4).

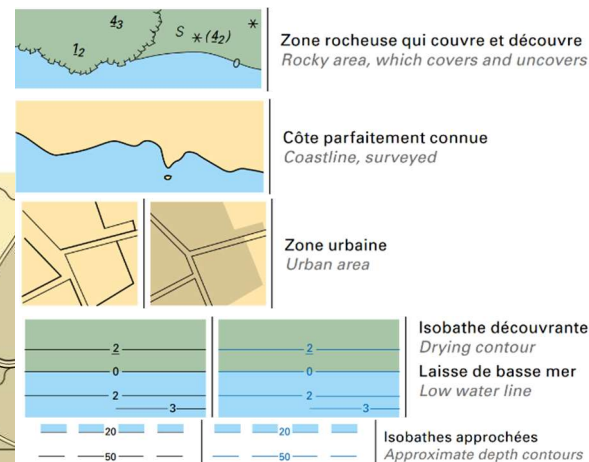


Figure 4: Photographies de *Laminaria hyperborea* sur le site des Evens, (J.C. MENARD, 2023 et A. RUY, 2024)

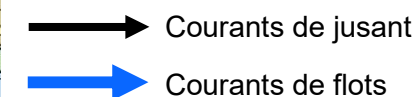


Légende :

Carte marine (SHOM) :



Courants de marée (SHOM, ELV) :



Sources :

SHOM : fond de carte, légende (Ouvrage 1D INT1, 2019) et données courants de marée (affinées par ELV)

Réalisation : ALARCON Amélie

Figure 5: Contexte hydrologique (courantologie) du site de réintroduction : Les Evens (SHOM, ELV)

2. Contexte

2.1. ELV

L'association Estuaires Loire et Vilaine (ELV) a été fondée en 2008 par deux plongeurs de la presqu'île de Guérande, Jean-Claude Ménard et Éric Lauvray.

Ces derniers ont observé au fil des années, dans le cadre de leurs activités nautiques de loisir sur les côtes de Loire Atlantique, une forte dégradation des milieux aquatiques, ainsi que de l'état de la faune et flore, mais également de la qualité des eaux globalement.

Cette érosion de la biodiversité s'est révélée particulièrement flagrante sur les habitats de forêt de laminaires, ayant sur certains secteurs complètement disparu ces dernières dizaines d'années. Afin de comprendre et améliorer l'état des eaux et de la biodiversité des côtes entre les estuaires de la Loire et de la Vilaine, ces deux plongeurs ont fondé l'association avec pour objectifs :

« L'étude, la préservation et la réhabilitation des fonds marins et de la qualité des eaux dans les estuaires et l'espace côtier entre Loire et Vilaine »

Le premier programme scientifique déployé par l'association est SLMLV (Santé Littoral Mer Loire Vilaine), qui a démarré en 2009, visant à qualifier et quantifier la qualité des eaux côtières sur la zone d'étude entre les deux estuaires, puis caractériser et suivre l'état de santé des champs de laminaires avec des suivis stationnels. Cette recherche a permis d'établir une cartographie complète permettant de visualiser l'étendue et la qualité des champs de laminaires du sud du Golfe du Morbihan au Nord de Noirmoutier. Au fil des multiples études menées par ELV en collaboration avec des partenaires tels que le bureau d'étude Bio-littoral, le Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN) de Concarneau ou encore la DDTM, ces algues se sont révélées être de puissants bio indicateurs de la qualité des eaux côtières. Les macroalgues structurantes telles que les laminaires ont donc été intégrées dans les protocoles d'évaluation et de suivi de la qualité des eaux, dont la Directive Cadre sur l'Eau (DCE).

Les recherches menées par ELV visent à étudier les champs de laminaires de nos côtes, leur évolution, les raisons de leur disparition ainsi qu'à rechercher des moyens de restaurer cet habitat nourricier en déclin. ELV a également pour objectif d'étudier et améliorer l'état écologique des masses d'eaux côtières essentielles à la prospérité de cet habitat riche, ainsi que de la faune et flore associée aux laminaires.



© A. RUY

2.2. Contexte écologique et réglementaire

2.2.1. Zonages environnementaux

Les champs de laminaires font partie des écosystèmes marins les plus riches au monde. Essentiels pour l'accomplissement du cycle de vie de nombreuses espèces aquatiques, ils servent les rôles de nourricerie, frayère, mais aussi d'abri. Les côtes de la Loire Atlantique, plus particulièrement entre les estuaires de la Loire et de la Vilaine, ont une inestimable valeur patrimoniale et écologique. Des champs de laminaires y sont présents, en densité et fréquence variable, globalement plus faibles que sur les côtes Bretonnes. La richesse spécifique et naturelle des côtes de la presqu'île de Guérande a été reconnue de nombreuses fois par la mise en place de zonages environnementaux (figure 6) tels que des sites d'intérêt communautaire Natura 2000, des Zones Naturelles d'Intérêt Faunistique et Floristique (ZNIEFF type I et II), des parcs et réserves naturelles, ainsi que des zones humides d'importance internationale classées Ramsar pour leur capacité d'accueil d'oiseaux d'eau, ou encore des zones justifiant la mise en place d'arrêtés de protection de biotope.

Le premier site sélectionné pour la transplantation de laminaires dans le cadre du projet de restauration de l'habitat, l'îlot des Evens, au large de la Baie du Pouliguen, est concerné directement par trois zonages :

- **Zone spéciale de conservation (ZSC)**, n°FR5202011 : Estuaire de la Loire Nord

Les zonages ZSC sont issus de la directive européenne Natura 2000 dite Habitats, Faune, Flore. Ces zonages ont pour vocation de conserver voire restaurer l'état écologique du patrimoine naturel. Cette gestion passe par l'établissement de documents d'objectifs et d'opérations de conservation tels que des restrictions sur les activités de loisir ou encore la gestion d'espèces exotiques envahissantes.

- **Zone spéciale de conservation (ZPS/SIC)**, n° FR5212014 : Estuaire de la Loire - Baie de Bourgneuf

Les ZPS sont issues de la directive Natura 2000 « Oiseaux », avec pour objectifs d'étudier et protéger les sites accueillant des populations d'oiseaux exceptionnelles par leur rareté, leur quantité ou leur qualité.

- **ZNIEFF de type I**, n°520016271 : îlots de la baie de la baule
- **ZNIEFF de type II**, n°520006654 : îlots de la baie de la baule et réserve de chasse périphérique

Les ZNIEFF ont pour objectifs de réaliser des inventaires naturalistes (espèces patrimoniales, inventaires qualitatifs principalement) afin de constituer une base de connaissance utilisable pour une meilleure intégration de l'enjeu environnemental dans les décisions d'aménagement et de gestion du territoire.



Figure 6: zonages environnementaux proches du site d'étude

La ZSC de l'estuaire de la Loire (Nord/externe) englobe l'extrémité marine de l'estuaire, à partir de Saint-Nazaire/Saint-Brévin. La proposition de site Natura 2000 a été formulée afin de conserver l'importante variété de substrats et d'habitats naturels marins de cette zone, ainsi que sa richesse faunistique vulnérable de poissons migrateurs, cétacés et oiseaux. Le site est fortement influencé par le panache de l'estuaire de la Loire et par les activités anthropiques multiples et diverses, la zone étant proche de plusieurs stations balnéaires et industrielles.

La richesse de ce site Natura 2000 prend autant source dans la diversité des espèces vulnérables voire menacées qu'elle abrite, qu'en la forte variété d'habitats naturels et substrats marins qui la composent. Le site comprend des zones sableuses favorables aux échinodermes, annélides de mollusques, entrecoupées de plateaux rocheux peuplés d'une grande diversité algale, en particulier par des ceintures de laminaires et des centaines d'espèces épibiontes qui les colonisent.

Ce site Natura 2000 joue un rôle crucial dans la conservation de nombreuses espèces de poissons amphihalines, effectuant une partie de leur cycle de vie en eau douce, l'autre en milieu marin.

Les espèces amphihalines d'intérêt communautaire dont la conservation est prioritaire sur le zonage sont la grande alose (*Alosa alosa*), l'aloise feinte atlantique (*Alosa fallax*), le saumon atlantique (*salmo salar*), la lamproie marine (*Petromyzon marinus*) et la lamproie de rivière (*Lampetra fluviatilis*).

La zone héberge également l'anguille d'Europe (*Anguilla anguilla*), en danger critique d'extinction à l'échelle mondiale.

Le site représente un enjeu important pour la conservation du grand dauphin (*Tursiops truncatus*), du marsouin commun (*Phocoena phocoena*), tous deux en état de conservation défavorable en France (SOURCE), ainsi que du phoque gris (*Halichoerus grypus*) et du veau marin (*Phoca vitulina*), espèces quasi-menacées en France. Ces espèces fréquentent régulièrement les abords ouest (voir l'intérieur ouest) du zonage pour leur alimentation, ils sont particulièrement menacés sur le site de la Loire externe par les activités de pêche. Les espèces proies pour ces mammifères sont en effet recherchées par les pêcheurs, les pêches accidentelles de ces espèces sont observées chaque année sur ce site. D'autres espèces ont été observées de manière plus occasionnelle sur le site, telles que la baleine de Minke (*Balaenoptera acutorostrata*), le globicéphale Noir (*Globicephala melas*) ou le dauphin commun (*Delphinus delphis*, figure 7). L'estuaire de la Loire abrite également des nurseries importantes à l'échelle de tout le Golfe de Gascogne pour les espèces de poissons plats tels que la sole commune (*Solea solea*) (MNHN, 2008-2023).



Figure 7: Dauphin commun (*deplinus delphis*) filmé dans la Loire (FDC44, 2024)

2.2.2. OSPAR

L'habitat de champs de laminaires est depuis 2021 sous la protection de la convention OSPAR (convention OSlo-PARis), convention pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du Nord-Est. Cette convention évalue périodiquement l'état écologique et physico-chimique du milieu marin des zones qu'elle couvre (côtes sud de l'Espagne au nord de la Norvège, Islande comprise). L'objectif principal de cette convention est de prévenir et d'éliminer la pollution marine en Atlantique Nord-Est, afin d'améliorer la qualité des eaux et la richesse biologique des eaux face à aux effets néfastes des activités humaines (EUR-Lex.europa.eu). En France, cette convention est appliquée à travers des projets de protection d'espèces et habitats menacés ou en mauvais état, de lutte contre la dispersion de déchets et polluants en mer, ou encore la gestion des activités humaines néfastes.

Les observations, actions et recommandations émises par les instances de cette convention permettent d'améliorer les mesures prises en faveur de la protection des habitats marins par les pays signataires, ainsi que d'améliorer leur coopération dans le cadre de la Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM), cherchant le bon état écologique des masses d'eau européennes. Le réseau OSPAR permet de faciliter et assister le déploiement d'Aires Marines Protégées (AMP), pouvant mettre en place sur des zonages définis des mesures de gestion concrètes en faveur de la conservation de la biodiversité (suivis scientifiques, réglementation et surveillance, sensibilisation ou encore décisions de gestion en faveur d'une exploitation durable des ressources marines). La convention OSPAR a porté de nombreux projets de déploiement d'AMP, la commission de 2018 estimant une surface de 6,1% de sa zone d'influence protégée par des AMP (milieumarinfrance.fr).

Depuis l'application de la convention OSPAR, la France a intégré les recommandations émises pour protéger les habitats et espèces en danger, par le déploiement de plans et programmes d'action afin de lutter face à la pollution, notamment d'origine nucléaire.

L'espace maritime entre les estuaires de la Loire et de la Vilaine, ne contient à ce jour **aucune AMP portée par la convention OSPAR** (figure 8). Toutefois, compte tenu du statut « en déclin » de l'habitat de forêts de laminaires sur la façade atlantique française (OSPAR, Région IV), la mise en place d'une voire plusieurs AMP sur les côtes de Loire-Atlantique et du Morbihan semble tout à fait pertinente, notamment en vue de répondre à l'objectif de la convention de mettre sous protection 30% de la surface marine qu'elle couvre. (Ospar.org, kelp forest)

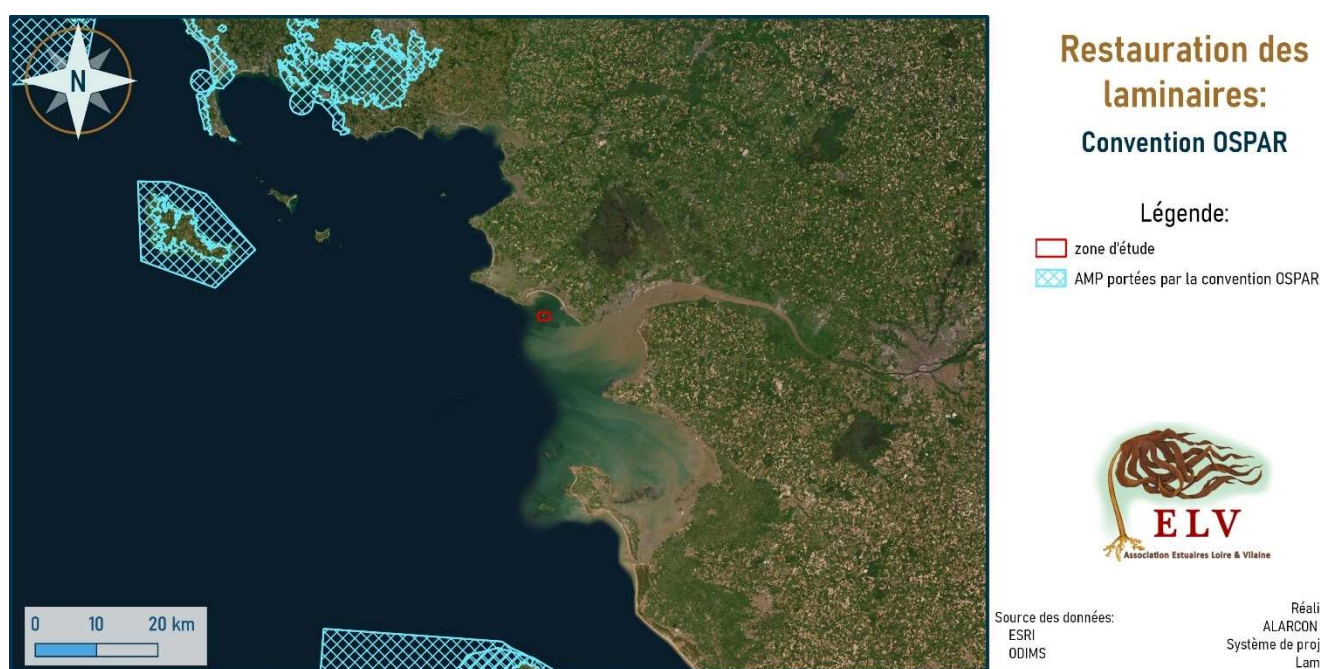


Figure 8: Zonages OSPAR

2.2.3. Europe et restauration de la nature

Les instances de l'union européenne suivent l'évolution de la biodiversité depuis des décennies, de nouveaux moyens de protection et de restauration de la nature ont émergé au fil des débats et votes. Pour autant le constat en 2020 était alarmant : plus de 80% des habitats naturels en Europe sont à minima dégradés. Cet état de fait est largement documenté, notamment dans les rapports du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) et de la Plateforme Intergouvernementale scientifique et Politique sur la Biodiversité et les Services Ecosystémiques (IPBES) (Proposition de règlement du parlement européen et du conseil relatif à la restauration de la nature, 2022).

Après plusieurs années de débats, en juillet 2024, le parlement européen a adopté la loi concernant la restauration de la nature, pilier majeur du pacte vert.

Cette loi a pour but de retranscrire dans le droit européen l'accord de Montréal de 2022, visant à lutter contre l'effondrement évident du vivant. Ce par la mise en place de mesures d'urgence pour protéger 30% de la surface de notre planète, restaurer 30% des écosystèmes et doubler les ressources destinées à la protection du biotope avant 2030.

Cette loi a pour objectifs :

- De **restaurer** au moins **20%** des **terres et des mers** de l'UE, ainsi que **30% des habitats prioritaires** (forêts, récifs coralliens, zones humides, ...) d'ici **2030**, au moins **60%** d'ici **2040**, et au moins **90%** d'ici **2050**
- De **restaurer** puis conserver les « **particularités topographiques à haute biodiversité** » comme les haies, zones humides ou fossés sur **10% des surfaces agricoles avant 2030**, mais également prendre des mesures pour augmenter l'indice des oiseaux communs des milieux agricoles,
- De restaurer au moins **30% des tourbières drainées** d'ici **2030**, **40% d'ici 2040** et **50% d'ici 2050**,
- De restreindre, en situation exceptionnelle, les activités agricoles et sylvicoles,
- De rétablir, au moins partiellement, l'écoulement naturel des cours d'eau par la **destruction de structures type barrages**, afin que chaque état membre restaure au moins **25 000km de cours d'eau libre**,
- D'imposer aux états membre l'adoption et la mise en place de **plans nationaux de restauration**, précisant les objectifs et la manière de les accomplir.

Les zones prioritaires jusqu'en 2030 pour ce projet de renaturation de nos espaces sont les zonages Natura 2000. Les zones dont l'état écologique est de nouveau en bon état seront par la suite entretenus, afin de prévenir toute détérioration.

Ce projet ELV visant à restaurer et conserver à long terme l'habitat riche et en déclin des forêts de laminaires s'intègre tout à fait à cette volonté européenne.



© Europe.eu

2.3. Contexte physico-chimique général de la zone d'étude

La cartographie ci-dessous (figure 9) permet de visualiser les unités géologiques qui composent les fonds marins de la zone d'étude. Les données cartographiques compilées sur le réseau européen d'observation et de données marines (EMODNet) sont issues de deux documents concernant le Golfe de Gascogne : la Directive-Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM, SHOM) et la carte des sédiments superficiels du plateau continental (BRGM et IFREMER).

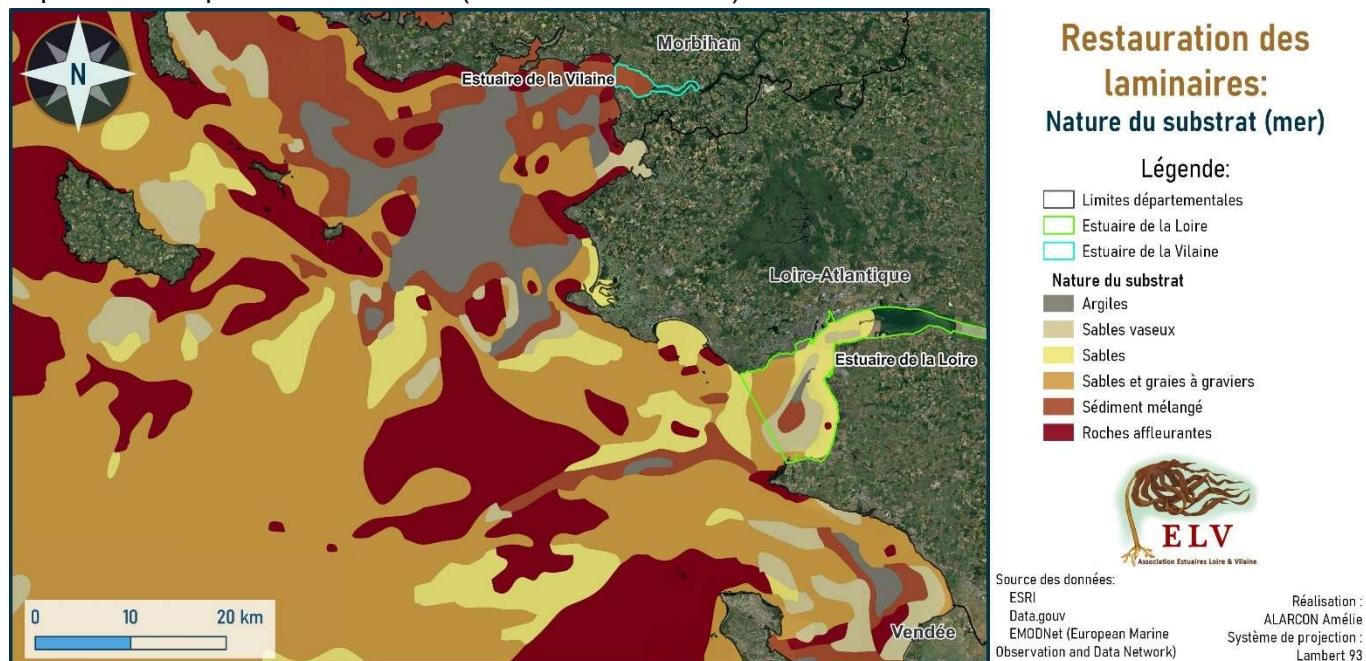


Figure 9: Nature du substrat du littoral Atlantique Nord-Est (EMODNet)

La zone d'étude est majoritairement composée de fonds rocheux et de zones sédimentaires grossières. Les socles rocheux épars sur toute la zone sont majoritairement métamorphiques (granit, gneiss et schistes). Les zones rocheuses principales sont situées sur les côtes proches de Piriac-sur-Mer, du Croisic (côte sauvage), la pointe de St Gildas et le vaste plateau rocheux s'étendant au nord et à l'ouest de Noirmoutier (plateau du pilier). On note également des plateaux rocheux au large de la baie de la Baule (petit archipel d'îles dont Les Evens), à 9km au sud du Pouliguen (plateau de La Blanche), ainsi qu'un plus vaste socle rocheux parallèle à la presqu'île du Croisic, à 14km de distance, formant au large à l'ouest du Croisic le Goué Vas, et un peu plus au nord un plus petit plateau (Bonnen). Ces plateaux sont propices à l'installation de laminaires s'accrochant aux roches, et ont ainsi été étudiés par ELV dans le cadre de suivis stationnels. Une cartographie de la nature des substrats plus précise contenant des données SHOM est retrouvable en annexe 1.

Les eaux au large de la presqu'île de Guérande sont grandement influencées par deux apports d'eau douce majeurs : la Loire (au sud) et la Vilaine (au nord).

La Vilaine est le fleuve le plus important de Bretagne, avec une longueur de 230km, drainant un bassin versant couvrant plus de 11 000km², et un débit moyen de 71m³.s⁻¹ (hautement variable selon les périodes et le tronçon observé). Elle apporte en mer (depuis le barrage situé à environ 10km de l'embouchure) des sédiments vaseux composés majoritairement de limon et d'argile (IAV, 2015), mais également diverses pollutions liées aux activités agricoles continentales telles que des nitrates, phosphore, pesticides ou encore rejets d'assainissement. Les échanges de salinité et de nutriments avec l'amont sont très limités par le barrage d'Arzal-Camoël, la Vilaine a un bassin de marée quasi non-existant. Les éclusages du barrage apportent de manière soudaine d'importantes quantités d'eau douce chargées en nutriments et sédiments. Cette irrégularité provoque un appauvrissement général de la biodiversité sur l'estuaire.

La Loire est le plus long fleuve pseudo-sauvage (peu aménagé par l'Homme, de l'amont à Angers) de France, avec une longueur totale de 1 006 km. Sa source se situe dans le département de l'Ardèche pour enfin rejoindre la mer en Loire-Atlantique. La Loire traverse ainsi 12 départements et 361 communes. Le bassin versant que la Loire draine presque 120 000 km² soit plus d'un cinquième du territoire national. La Loire déverse à son estuaire de grandes quantités de vases fines, formant en mer des plaines vaseuses sous-marines de plusieurs kilomètres de long. Le bassin de marée (zone d'influence marine) de la Loire s'étend jusqu'à environ 100 km de l'estuaire, à Saint-Florent-le-Vieil (une dizaine de kilomètres à l'est d'Ancenis), où, dans les années 80, a été construite une digue de 14 km de long (GIP Loire Estuaire, 2018). La Loire transporte des terres vers l'océan entre 500 000 et 1 000 000 de tonnes de sédiments en suspension, 80 000 à 650 000 tonnes de nitrates, 1 500 à 14 000 tonnes de phosphates et 1 400 à 25 000 tonnes de phosphore (GIP 2018), à un débit moyen à Nantes de 850 m³/s (valeur hautement variable selon les conditions météorologiques, bilan du GIP en annexe 2). La mer apporte également des sédiments fins dans l'estuaire, les deux sources de MES forment dans l'estuaire ce que l'on nomme le bouchon vaseux. Cette accumulation de sédiments engendre des concentrations en MES de 0,5 à 30 g/L, rendant l'eau extrêmement turbide (GIP Loire Estuaire, 2023).

Les rapports de l'agence de l'eau Loire Bretagne font état d'une qualité écologique bonne au large de la presqu'île de Guérande, mais moyenne sur l'estuaire de la Loire, et médiocre à l'embouchure de la Vilaine (figure 10). Les motifs principaux suspectés de baisse de qualité écologique des eaux côtières de surface sur ces secteurs sont l'état chimique médiocre des cours d'eaux aboutissant à ces estuaires. Cet état s'explique par de fortes concentrations en nitrates et autres résidus pesticides, en lien avec l'importante activité agricole du territoire. Des surplus en nitrate en mer peuvent causer des marées vertes et blooms phytoplanctoniques. Les diverses Stations de Traitement des Eaux Usées (STEU) et industries proches du fleuve y rejettent en faibles quantités des métaux lourds et micropolluants mais également des plastiques tels que les biomédias servant de support aux bactéries effectuant le traitement secondaire (biologique) des eaux usées (BENCIVENGO P. et al. 2023) et microplastiques. La Loire est également influencée par les rejets ainsi que l'état de conformité de la station Seveso (site de stockage de produits toxiques à l'homme et l'environnement) de Montoir, où sont produits et entreposés environ 600 000 tonnes d'engrais azotés chaque année.

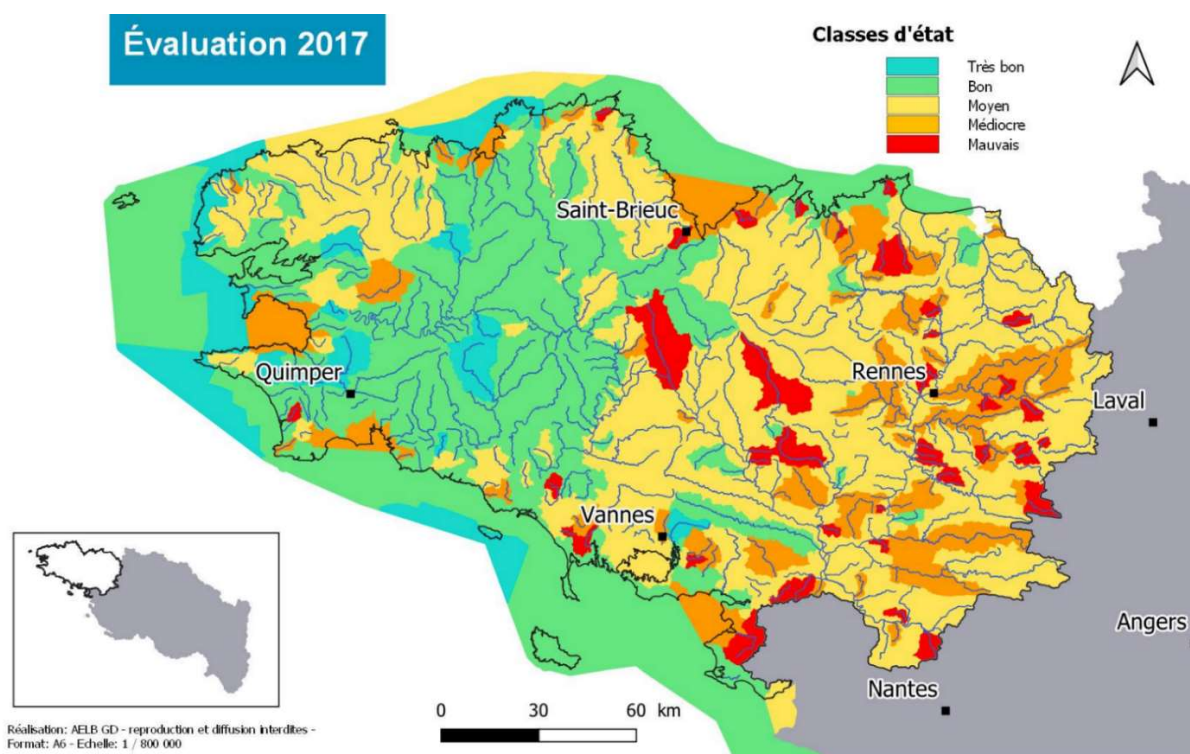


Figure 10: Etat écologique des eaux de surface, secteur Loire Bretagne (source : agence de l'eau, évaluation 2017, carte 2020)

3. Etat de la recherche sur l'écologie et la restauration des laminaires

3.1. L'étagement phytal

En substrat rocheux, la flore marine (surtout algale) est distribuée verticalement, selon plusieurs facteurs de répartitions, le principal étant le degré de pénétration de la lumière. La turbidité ainsi que la latitude jouent ainsi un rôle essentiel dans la répartition verticale de la flore aquatique et la faune qui leur est associée. La répartition verticale des algues est également influencée par l'agitation des eaux, leur degré de pollution ou encore leur température.

En littoral Manche et Atlantique, il est possible de discerner quatre zones, caractérisées par des cortèges d'algues spécifiques. Ces niveaux sont organisés en **étages** et permettent une description aussi générale que claire des paysages sous-marins (figure 11).

Cette catégorisation, l'**étagement phytal**, a été défini par Annie Castric-Fey, chercheuse à l'Observatoire Océanologique de Banyuls, dans plusieurs de ces publications (de 1970 à 2000). Il se compose ainsi :

- Le **supralittoral**, étage se situant au-dessus de la zone de balancement des marées (l'estran), n'est atteint que par les embruns ou immersions exceptionnelles, s'y localisent des lichens pouvant se contenter de cette humectation, ainsi que des organismes exigeant une émergence continue.
- L'**intertidal** (ou Médiolittoral, estran, zone de marnage, zone de balancement des marées, ...) se situant dans la zone immergée et émergée par alternance des marées, étage peuplé de ceintures fucales ainsi que de populations de mollusques et crustacés fixés.
- L'**infralittoral**, zone perpétuellement immergée (ou émergences exceptionnelles), sa limite inférieure correspond à limite de l'implantation des grandes algues photophiles comme les laminaires, fucales sous-marines, etc...
- Et le **circalittoral**, découpé en deux par le circalittoral supérieur, vide de laminaires mais présence d'algues sciaphiles (rouges et brunes) et dominance de la faune fixée (coraux, spongiaires, ...), et par l'inférieur, composé exclusivement d'espèces animales.

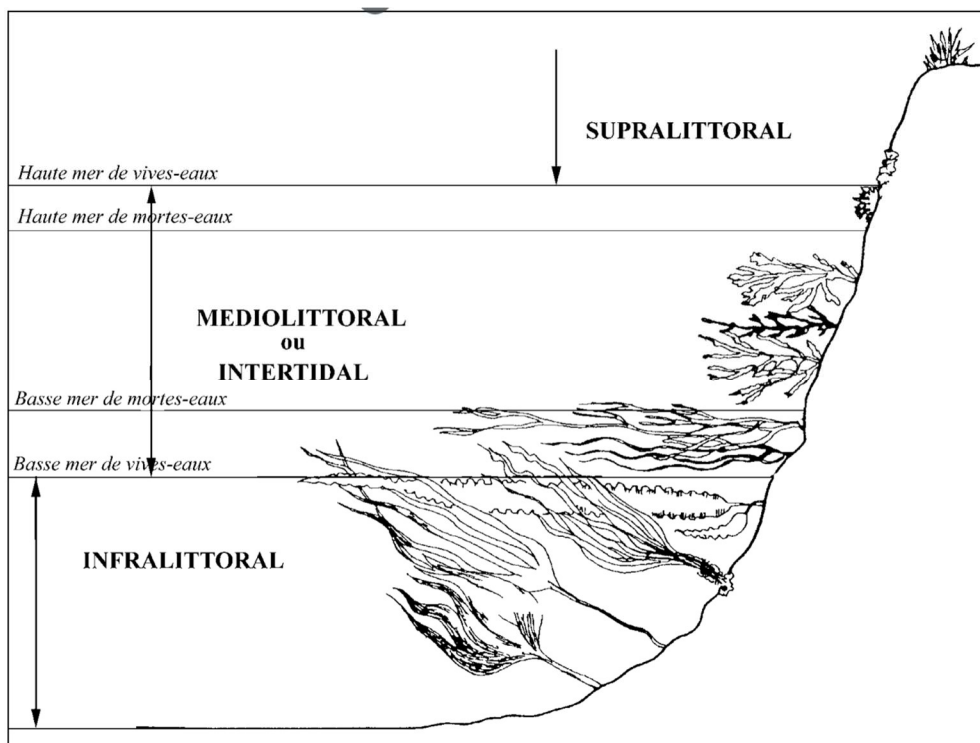


Figure 11: Etagement phytal (source : Castric-Fey et al. 2001)

Les laminaires colonisent les limites inférieures de zone intertidale ainsi que tout l'étage infralittoral. Ces étages ne peuvent être associés à des profondeurs, car dépendants de l'incidence de lumière locale.

3.2. Les laminaires

3.2.1. Généralités

Les laminaires, ou « kelps », correspondent aux *Phaeophyceae* de l'ordre des Laminariales *sensu stricto* (Bolton 2010). Les laminaires sont en premier lieu (XVIII^{ème} siècle) classés en tant que fucales, puis reclassées sous le nom scientifique de « Laminaria » courant XIX^{ème} (T. BELSHER et al. 1986).

Dans son essai de 1812, le biologiste français Jean Vincent Félix Lamouroux classe dans le genre « Laminaria » les macroalgues brunes caractérisées par leurs « racines » se ramifie en nombreux petits crampons, permettant à ces algues de se fixer à un substrat rocheux pour « résister aux mouvements des vagues auxquelles elles sont toujours exposées » (J-V-F. LAMOUREUX, 1812).

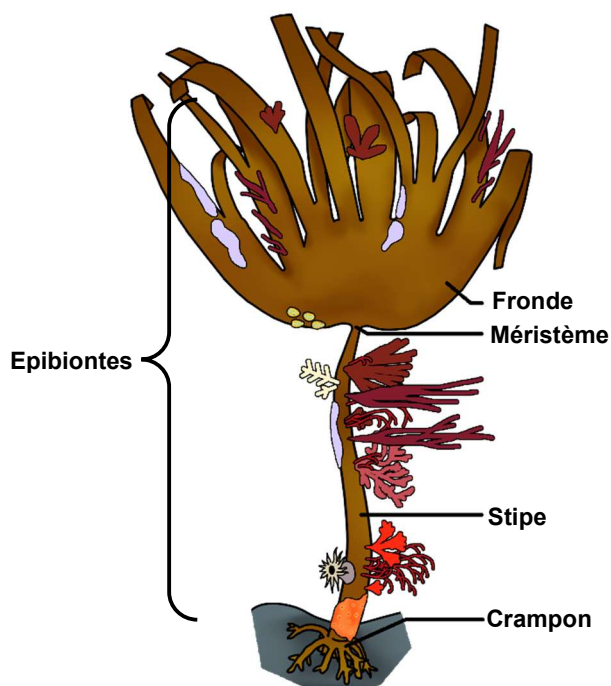


Figure 12: Morphologie des laminaires, exemple de *Laminaria digitata*

Ce genre est aisément identifiable par la présence d'un ou plusieurs longs rubans marron-olive dits lames, formant ensemble la fronde, pouvant chez certaines espèces mesurer près de 60 mètres de long. Ces lames sont reliées par un stipe à un substrat grâce à des crampons (dit « haptères »). Selon leur exposition à la lumière, les laminaires peuvent paraître marron rougeâtres à noires lorsqu'exposées à l'air libre. Les laminariales sont caractérisées par leur cycle de vie alternant entre un stage gamétophyte microscopique, et d'un stage de sporophyte macroscopique.

Les laminaires sont fréquemment associées à une faune et flore fixée sur sa surface : l'épibiose ou épiphytes. Sont ainsi fixés sur sa surface d'autres algues (rouges majoritairement), mais également de la faune benthique comme des bryozoaires (proches des coraux), mollusques, petits crustacés, anémones, éponges ou encore des bactéries et cyanobactéries, formant une pellicule gélatineuse autour de la plante (figure 12).

Les laminaires, et plus généralement les algues, sont des végétaux chlorophylliens simples sans racines, feuilles, vaisseaux ni graines. Elles réalisent leur photosynthèse à partir d'éléments simples tels que le dioxyde de carbone (CO_2), les sels minéraux, l'eau et la lumière.

Ces algues ont des besoins importants en lumière, elles colonisent les substrats rocheux, tant en profondeurs faibles immergées (étage infralittoral) qu'en zones plus profondes si la turbidité est suffisamment faible (elles peuvent être retrouvée jusqu'à 60m), la quantité de lumière incidente étant le facteur majeur d'implantation. Les laminaires poussent 30 fois plus vite que les arbres.

Leur tolérance thermique se situe entre 5 et 20 °C, on retrouve ces algues majoritairement dans des eaux tempérées à froides des deux pôles, sur les côtes des régions tempérées et boréales. Ce type d'algue brune colonise les côtes de presque tous les pays du globe (figure 13).

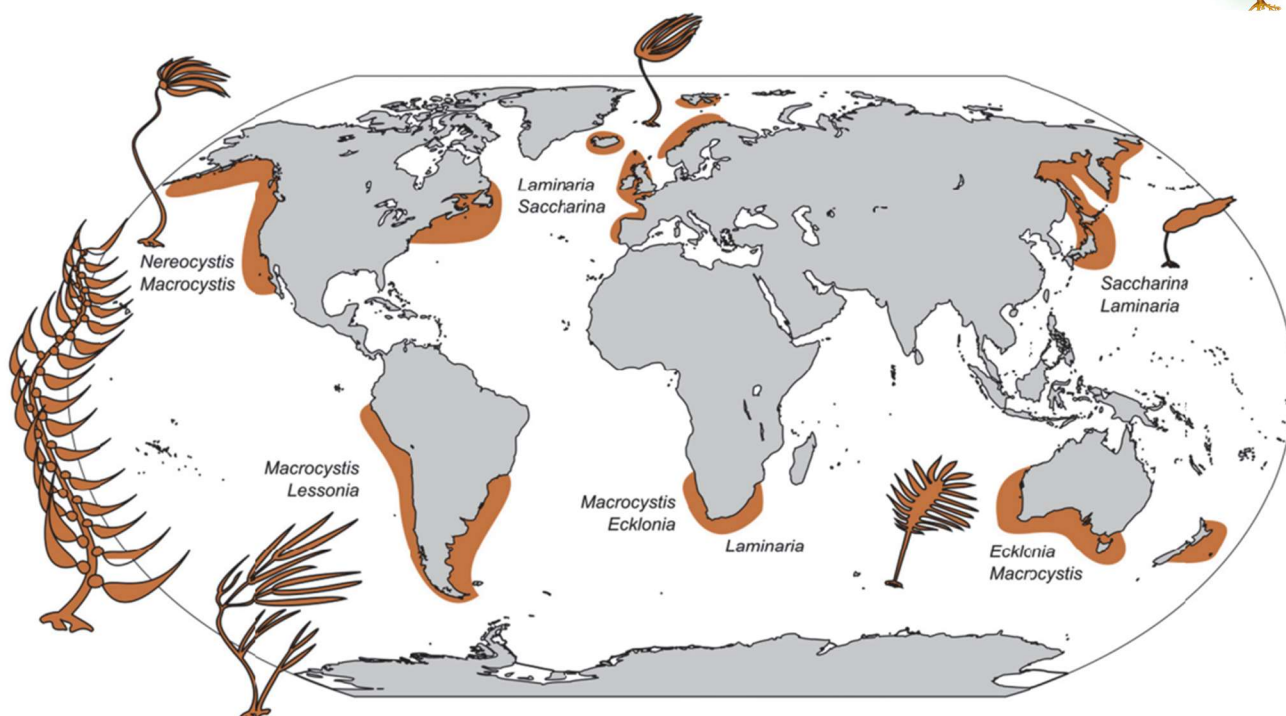


Figure 13: Distribution mondiale des champs de laminaires et espèces dominantes (J-C. LECLERC, 2015)

La représentation précédente ne tient toutefois pas compte de leur présence en zones profondes (jusqu'à 200m) ou d'upwellings des régions tropicales (J-C. LECLERC, 2015), une cartographie plus précise de la répartition mondiale des laminaires ainsi qu'un tableau présentant les espèces majeures est consultable en annexe 3.

3.2.2. Rôle écosystémique

Les champs de laminaires sont un des habitats naturels marins les plus riches au monde, au même titre que les forêts de mangroves ou les herbiers de posidonie/zostère. Ces forêts sous-marines peuvent croître rapidement et produire de grandes quantités de biomasse (KRUMHANS� et SCHEIBLING, 2012). Ce sont des organismes structurants, leur étendue en trois dimensions permettant à nombre d'autres espèces de trouver refuge, lieu de frayère et d'alimentation. Cette organisation stratifiée a valu aux sites riches en laminaires le nom d'habitat en « forêt », par analogie avec le milieu terrestre.

Chaque linaire peut abriter et/ou nourrir plusieurs centaines d'espèces de macrofaune mobile (C. HARTVIG et al. 2003. K. SCHULTZE et al. 1990) et être associée une centaine d'espèces végétales (LECLERC, 2013). Une forêt de laminaires nordiques peut ainsi être associée à plus de 1000 espèces faunistiques, les crampons seuls abritant plus d'une centaine d'espèces (J-C. LECLERC, 2015). Les recherches menées par l'université de Cambridge en 2003 ont déterminé qu'une seule linaire accueille et nourrit régulièrement plus de 8000 individus de macrofaune mobile. Cette richesse spécifique reflète l'importance des forêts de laminaires dans les réseaux trophiques côtiers et leur contribution significative à l'alimentation des organismes suspensivores, alimentant à leur tour les organismes prédateurs dans la chaîne trophique (J-C. LECLERC, 2013). Cet habitat joue ainsi le rôle d'abri, de support, de site d'alimentation, de chasse et de frayère pour de nombreuses espèces animales et végétales. Elles accueillent une grande variété d'espèces éloignées taxonomiquement, incluant poissons, cnidaires, tuniciers, crustacés, éponges, concombres de mer, bryozoaires, étoiles de mer, mais également des bactéries. Nombre de mollusques et crustacés passent les premières années vulnérables de leur vie sous la canopée des laminaires. Les forêts de laminaires à nos latitudes tempérées ont une productivité primaire, soit la quantité de matière organique produite, de **1000 à 2000 gC/m² chaque année**. Soit **l'équivalent de la productivité d'une mangrove**, plus de **6 fois la production primaire des herbiers de zostère** (Bio-littoral, ELV, 2011., EFSE, 2018., ELV 2013) et presque **3 fois la production primaire des herbiers de posidonie méditerranéens les plus productifs** (E. Vela, 2024).

3.3. Laminaria hyperborea

3.3.1. Cycle de vie

Les laminaires ont la capacité de se reproduire de manière sexuée ou asexuée. Dans le cas de l'espèce ciblée dans le cadre de ce projet de restauration, *Laminaria hyperborea*, chaque individu, à la manière des fougères terrestres, a un cycle de vie en deux parties : le sporophyte et le gamétophyte (figure 14).

Le sporophyte correspond à la forme mature, macroscopique et asexuée de l'algue, alors de grande taille. Lorsque les conditions climatiques sont propices (températures plus fraîches de l'hiver), ces adultes développent sur des frondes spécialisées dans la reproduction des tissus, des tâches sombres et denses : les sporocystes, qui vont libérer des microscopiques spores sexuées, les méiospores.

Ces spores différenciés (femelles et mâles) vont se fixer sur un substrat dur en développant des pseudo-crampons, puis produire à leur tour les gamètes nécessaires à la fécondation après s'être fixés sur un substrat (ELV, 2023). Il est essentiel que les gamétophytes mâles et femelles libèrent les gamètes en même temps, sans quoi la fécondation ne pourra se produire (J.M. KAIN, N.S. JONES, 2009).

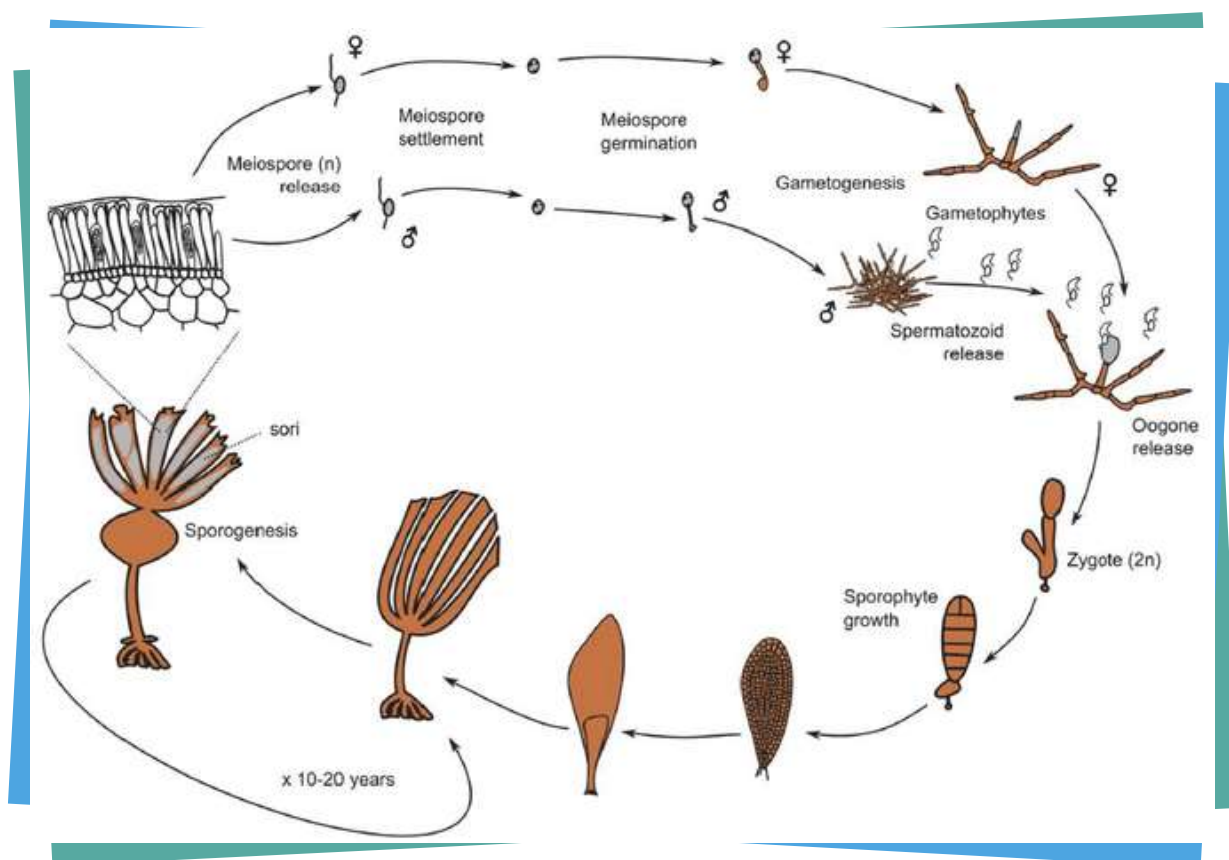


Figure 14: Cycle de vie des laminaires (J-C. LECLERC, 2013)

Les jeunes sporophytes ainsi produits n'ont en premier lieu qu'une seule lame, qui s'élargit et se sépare en plusieurs frondes après plusieurs mois de croissance. *Laminaria hyperborea* peut avoir adulte une lame qui se scinde en 5 à 20 lames, l'ensemble pouvant mesurer jusqu'à 2m de long, ainsi qu'un stipe d'une longueur de plusieurs mètres chez les individus les plus âgés (SKRP, 2022).

Laminaria hyperborea peut entamer des cycles de reproduction 2 à 5 années après fixation du zygote sur le substrat, et a une espérance moyenne (en Atlantique Nord-est) de 12 à 15 ans. A l'inverse des plantes terrestres, les laminaires ne poussent pas verticalement vers l'opposé des racines, mais vers le bas, depuis un point situé à la base de la fronde, le méristème.

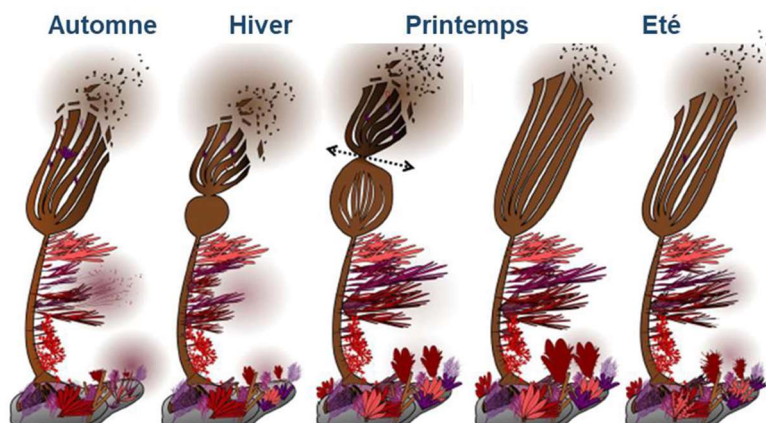


Figure 15: Cycle annuel de croissance et renouvellement de la fronde des laminaires (J-C. LECLERC, 2015)

Chaque année l'algue se reproduit et la fronde est renouvelée, ainsi seul le stipe permet de déterminer l'âge d'une laminaire. La vieille fronde est libérée dans l'environnement au cours du printemps une fois que la nouvelle fronde est bien développée (figure 15).

Le crampon des laminaires s'étend et se ramifie chaque année par la production de nouveaux haptères.

Les laminaires sont les plus fragiles dans leurs états de spores et de jeunes sporophytes (P. POTIN. K. FLAVIN et al, 2013.), ce sont, en culture, les phases les plus complexes où les populations cultivées font face aux plus fortes pertes. La sporulation des *Laminaria hyperborea* se réalise principalement au cours de l'hiver, la période peut s'étendre dès le mois de novembre et jusqu'en avril.

Les diverses actions de dragage menées afin d'évacuer les vases au large de la presqu'île de Guérande peuvent causer une augmentation de la turbidité significative par mise en suspension de sédiments dans la colonne d'eau. Cette augmentation importante de la turbidité impacte la capacité des laminaires à photosynthétiser, mettant en péril leur survie ainsi que leur reproduction. Ce point est précisé partie 3.5.2.

La mise en place d'une période de cessation d'activités de dragages lors du printemps, période critique pour la reproduction des laminaires et pour l'implantation des plantules sur substrats, permettrait d'améliorer les conditions de déroulement du cycle de vie des laminaires et par extension, la santé écologique des populations de macroalgues et faune associée.

Il est toutefois nécessaire de recueillir des données factuelles concernant cette situation.



Figure 16: sonde EXO3 (source : ysi)

Le déploiement d'une sonde autonome relevant pH, turbidité, salinité et température de l'eau telle que la sonde YSI ExO-3 (figure 16) permettra l'obtention de données précises concernant les paramètres de l'eau, qui pourront être mis en relation avec l'état de santé des pieds de laminaires, leur taux de croissance, et les activités hydrologiques et nautiques majeures (crues, dragage, ...) lors de la période de relevés. Cette sonde opère en autonomie et repose sur une alimentation en batterie, pouvant permettre la prise de données pour une durée maximale de 60 jours. Les relevés sont effectués toutes les 15 secondes et peuvent être récoltés par connexion directe filaire, ou en Bluetooth.

Cette sonde peut être installée à une profondeur maximale de 250m, elle est équipée d'un système d'autonettoyage des capteurs par des brosses rotatifs. La mise en relation de ces informations aboutira à la construction d'hypothèses chiffrées sur les conditions optimales de croissances des laminaires des côtes de Loire Atlantique, ainsi que sur les facteurs et activités pouvant perturber leur croissance.

Cette sonde pourrait être déployée à hauteur des laminaires sur les Evens (profondeur -3m), une ancre centenaire y est abandonnée et constituerait un support solide ainsi qu'un point de repère fiable pour la sonde.

3.3.2. Distribution et évolution des populations

Laminaria hyperborea colonise principalement l'étage infralittoral des mers tempérées à froide (figure 17). Ne tolérant pas des températures d'eau supérieures à 20°C et inférieures à 5°C, cette espèce se retrouve sur les côtes européennes, du Portugal jusqu'au nord de la Norvège, ainsi qu'en Islande.

Sur nos côtes françaises, sauf côtes bretonnes, ces laminaires sont majoritairement en mauvais état. Le réchauffement des masses d'eaux, les vagues de chaleurs ainsi que l'intensification des activités humaines, impactant la turbidité, sont les premières causes de la dégradation de cet habitat.

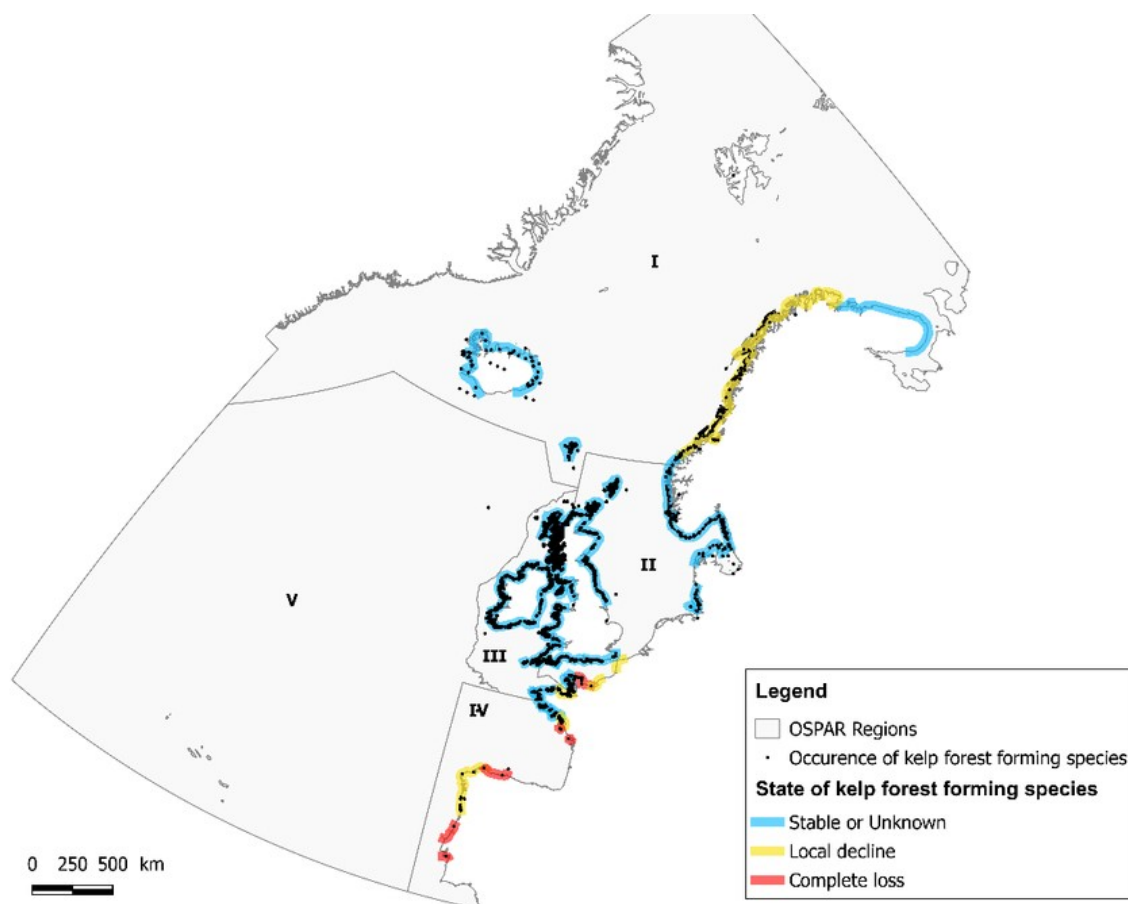
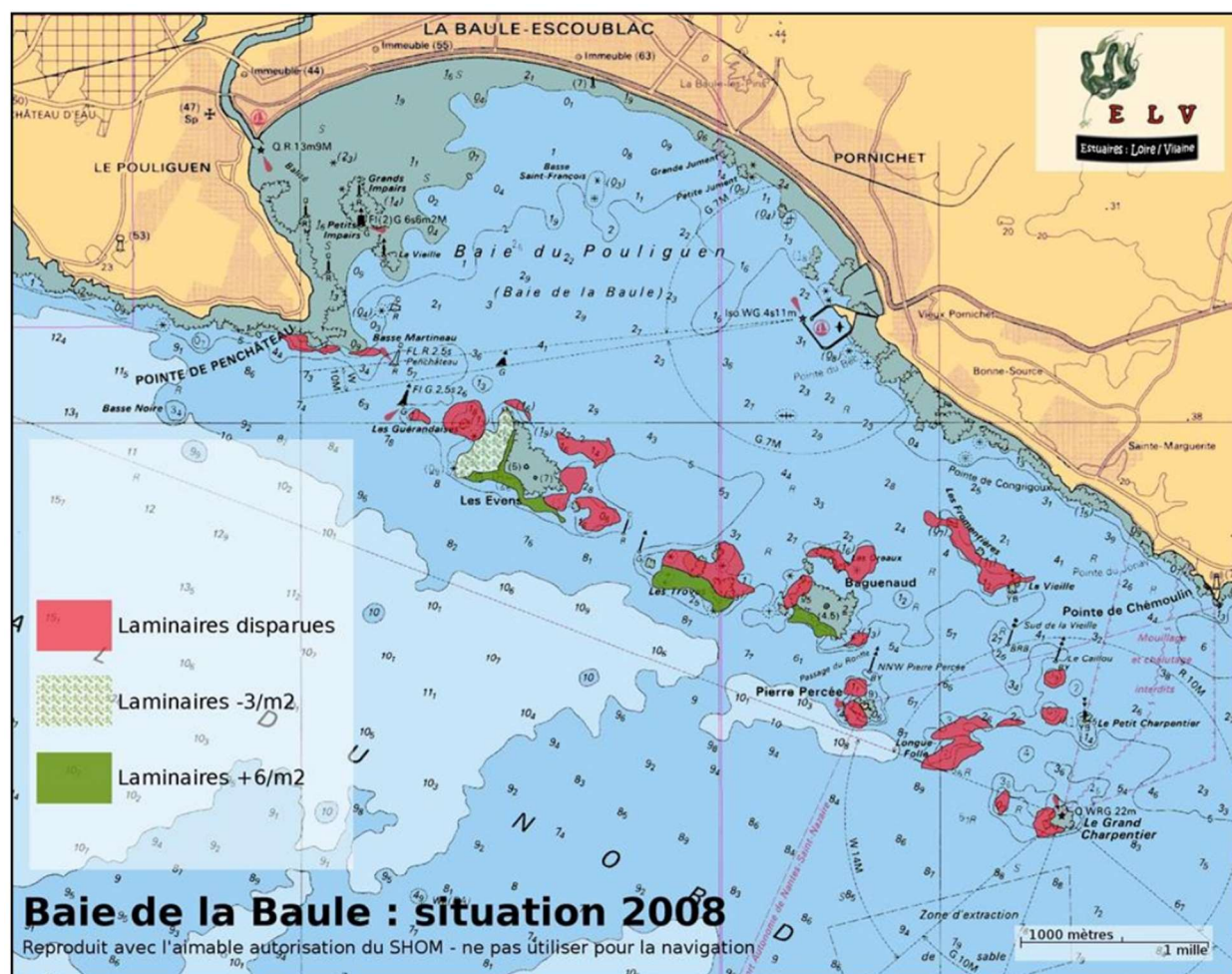
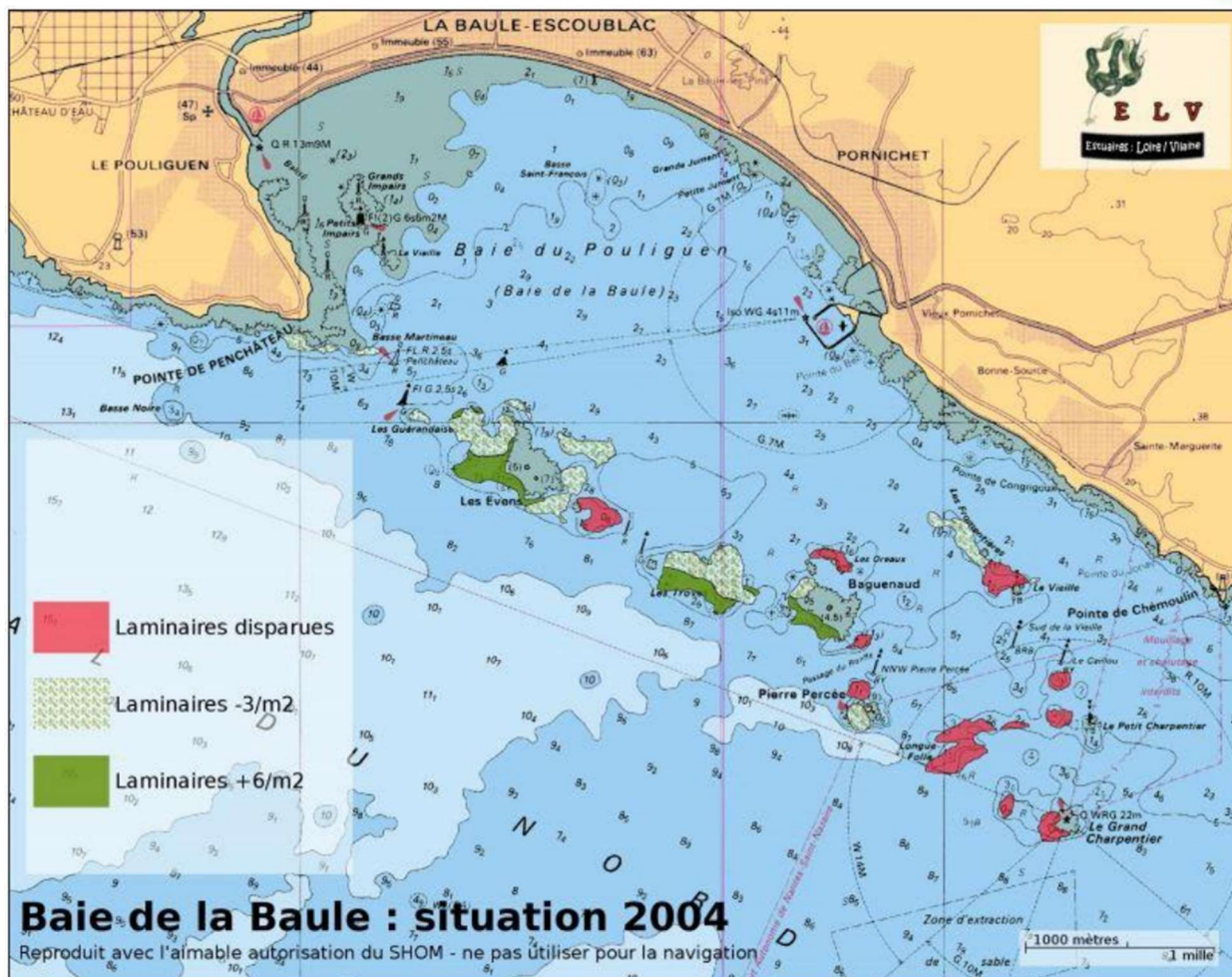


Figure 17: Distribution de *Laminaria hyperborea*. (sources: Global Biodiversity Information Facility (GBIF), Ocean Biogeographic Information System (OBIS))

L'Association ELV étudie depuis 1995 le site des îles de la baie du Pouliguen. 90% de la surface des champs de laminaires de cette baie ont disparu entre 1995 et 2014 (ELV, 2014, figure 18), les 10% restants ne sont présents qu'à une densité inférieure à 3 pieds de laminaire par mètre carré, soit en mauvaise santé. La biodiversité associée à cet habitat a également été gravement endommagée, en témoignant l'installation et la prolifération d'espèces envahissantes écrasant toute compétition sur les substrats comme les moules, ophiures, étoiles de mer et oursins.

Les suivis de population ELV sont réalisés en coopération avec le bureau d'étude Bio-littoral, ainsi que de la station du MNHN de Concarneau. Le protocole d'inventaire floristique utilisé afin de réaliser les cartes suivantes est basé sur les modèles de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) et du protocole « Evaluation de l'Etat de Conservation des Biocénoses des Roches Subtidales » (ECBRS) (DERRIEN-COURTEL et al., 2011) élaboré par la station biologique marine de Concarneau (protocole présenté partie 4.2.4.).



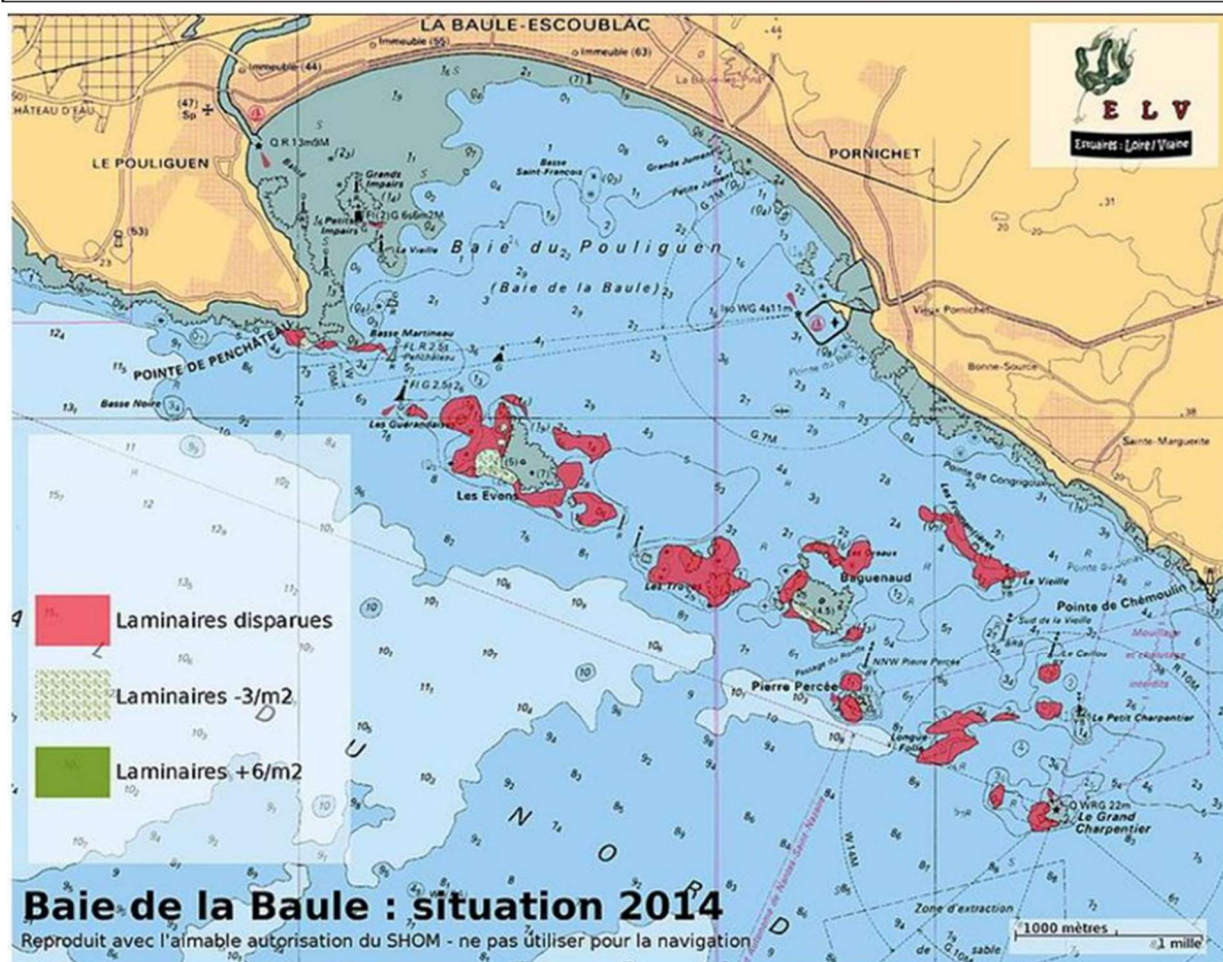
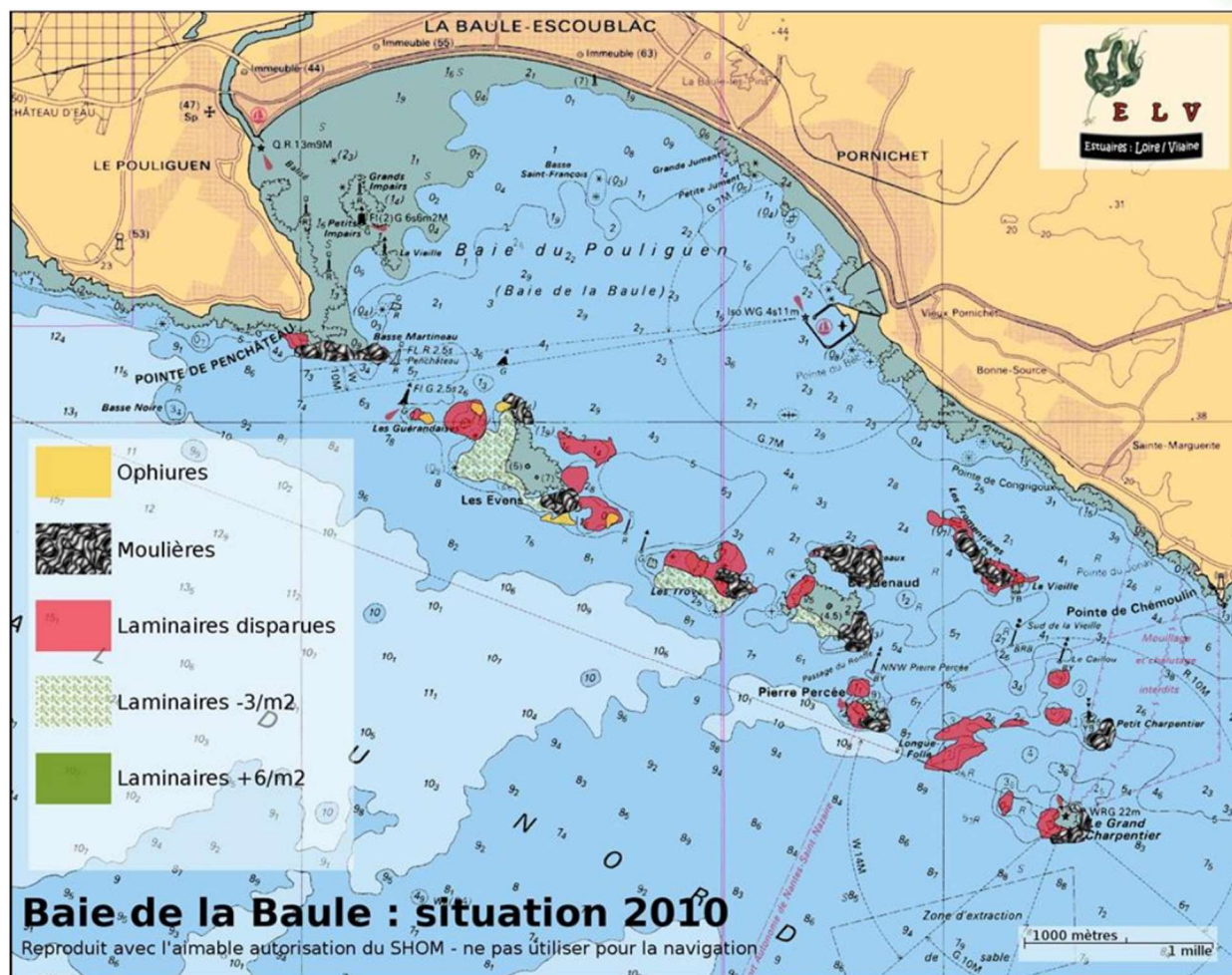


Figure 18: Evolution de la densité en laminaires en baie du Pouliguen, 1995-2004 (ELV)

3.3.3. Services écosystémiques

a. Régulation climatique et Séquestration du carbone atmosphérique (maintien du pH)

A la manière des plantes terrestres, les lamineuses génèrent l'énergie nécessaire à leur survie par photosynthèse. Elles captent ainsi le dioxyde de carbone (CO_2) dissous dans la colonne d'eau ainsi que le rayonnement solaire pour produire la matière organique nécessaire à leur fonctionnement, processus libérant notamment du dioxygène (O_2). Cette consommation du CO_2 résulte en une intégration dans l'organisme du carbone, qui sera ainsi considéré « stocké » ou « séquestré » dans l'algue. Cette séquestration n'est pas pérenne, la dégradation de la plante ou de tout organisme l'ayant consommé libérant progressivement du carbone. Il est estimé que les forêts de lamineuses séquestrent mondialement 4,91 mégatonnes de carbone atmosphérique chaque année (A.M. EGER et al. 2023).

Les lamineuses permettent de diminuer la quantité de carbone présente dans l'atmosphère en les séquestrant à travers la chaîne alimentaire et la sédimentation. Le carbone séquestré par décomposition organique ou rejets alimentaires peuvent rester emprisonnés plusieurs siècles dans les sédiments marins (Oceanwise). Cette capacité de séquestration fait des lamineuses un **levier de lutte contre l'effet de serre et le changement climatique global, ainsi que face au phénomène global de baisse du pH des eaux marines : l'acidification des océans**. En effet les océans ont la capacité d'absorber le CO_2 atmosphérique, ce carbone, en se dissolvant en mer, libère des ions H^+ , augmentent le pH global des mers (figure 19). Ce phénomène représente une menace pour les organismes calcifiants (mollusques, phytoplanctons, coraux ou encore crustacés), ne pouvant plus effectuer la calcification de leur coquille dans une eau trop acide (figure 19, J.P. RAFFERTY, 2009. NYSDEC, OATF, 2022). Le pH des océans à la surface de la planète a diminué en moyenne d'environ 0,1 unité de pH (de 8,2 à 8,1) depuis la révolution industrielle (1770). La préservation et la restauration des forêts de lamineuses sont ainsi des leviers de lutte importants face à ce phénomène de modification du pH.

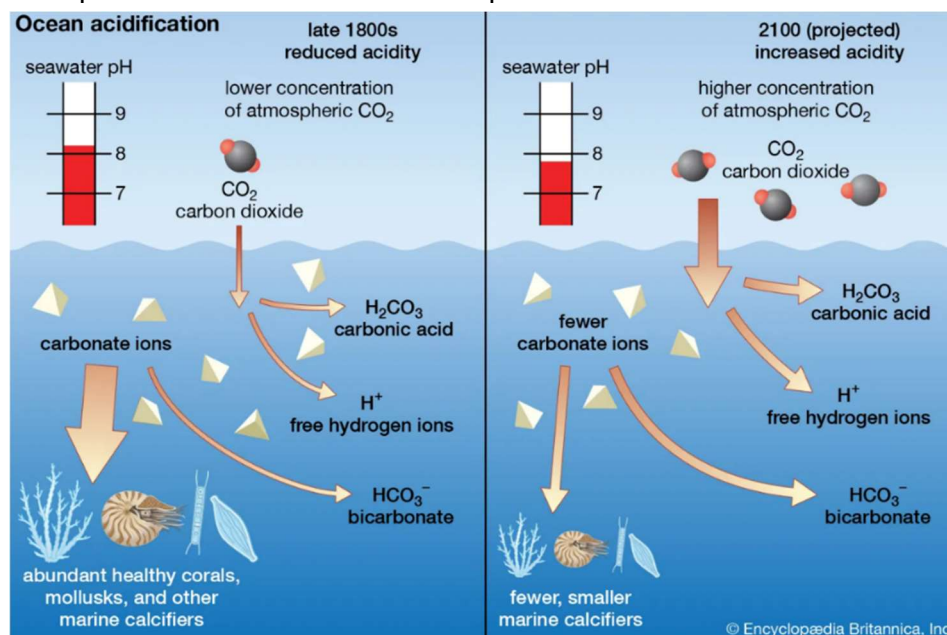


Figure 19: Schématisation du phénomène d'acidification des océans (J.P. RAFFERTY, 2009)

De plus, les lamineuses, et par extension les algues, ont selon une hypothèse des années 90 la capacité de participer à la **formation de nuages**. Selon cette hypothèse, les algues dont les lamineuses captent dans l'atmosphère de l'ozone, nécessaire à la synthétisation de molécules antioxydantes contenant de l'iode. Cet iode est rejeté par l'algue en situation de stress (fortes chaleurs par exemple), et participerait à la constitution de particules de sulfure de diméthyle (ou diméthylsulfure, DMS) dans l'atmosphère, s'oxydant en acide sulfurique, noyaux de condensation permettant la formation de nuages (CLAW, CHARLSON et al. 1987 ; MCFIGGANS et al., 2004). Les lamineuses joueraient ainsi un rôle essentiel dans la formation de dépressions en périodes de fortes chaleurs, participant activement à la régulation du climat et atténuant les effets du réchauffement climatique.

b. Perte de biodiversité

Les forêts de laminaires font partie des habitats les plus actifs écologiquement et abritent une faune marine extrêmement diversifiée, avec une des productions primaires par habitat les plus élevées des écosystèmes marins (E. KELLY, 2005). Selon les travaux de P. POTIN et J-C. LECLERC, chaque pied de linaire en France peut abriter plusieurs centaines d'espèces faunistiques et floristiques différentes. Les laminaires jouent un rôle d'habitat, mais également de ressource alimentaire. Certaines recherches évaluent jusqu'à **60% du carbone trouvé dans les invertébrés côtiers est attribuable à la productivité primaire des laminaires** (E. KELLY, 2005). La riche faune d'invertébrés liée aux laminaires permet à son tour de substantier le macrofaune mobile. Les rapports de l'OFB mettent en évidence plusieurs faits alarmants en France (métropolitaine) :

- **94%** des **habitats** marins et côtiers **d'intérêt communautaires** évalués sont en **mauvais état**
- **56%** des **eaux de surface** littorales sont en **mauvais état**
- **6 poissons sur 11 sont menacés**

Le projet de restauration des laminaires de Sussex présenté en partie 3.4.1 avère que restaurer cet habitat structurant et nourricier permet relancer la biodiversité marine. Par suite de la restauration des laminaires, de nombreuses espèces sont revenues. Ces algues jouent ainsi un rôle essentiel dans la conservation d'espèces, et un potentiel moyen de lutte face à perte de biodiversité en France.

c. Défense naturelle des côtes

Les laminaires sont des algues structurantes de grande taille et une composante essentielle de l'écologie des fonds rocheux tempérés à froids. Pouvant vivre jusqu'à 20 ans pour certaines espèces, elles forment une canopée **pérenne**.

Dans un contexte contemporain de recul du trait de côte par érosion des falaises, dunes et formations rocheuses (LETORTU P. 2023), les laminaires diminuent l'impact du facteur d'érosion que sont les vagues et la houle. Un littoral présentant une forêt de laminaires peut, en moyenne, réduire de 10% l'impact des vagues sur la côte (MORRIS R.L et al. 2019). Cette capacité est également constatée lors de fortes tempêtes, évènements causant le plus de dommages aux structures de défense des côtes.

d. Régulation des nutriments et de l'eutrophisation

Les laminaires ne sont directement consommées que par de rares espèces de brouteurs tels que les oursins ou helcions. Toutefois de nombreuses espèces se nourrissent de ces algues après leur mort et décomposition. En effet lors de fortes tempêtes, les laminaires peuvent être arrachées, et vont se dégrader plus au large (ou sur les plages/côtes), enrichissant le substrat et nourrissant une faune diverse. Les laminaires jouent ainsi un rôle important dans l'apport de nutriments organiques en eaux profondes.

Ces macroalgues ont également une capacité de filtration des nutriments et autres matières en suspension dans l'eau. Les laminaires consomment deux molécules largement produites par les activités humaines : l'azote et le phosphore (majoritairement issus des activités agricoles et de traitement des eaux usées) dissous dans l'eau de manière très efficace. Ce fait, cumulé à la morphologie structurante des laminaires induit une stabilisation des sédiments par réduction de l'impact de la houle et une baisse effective de la turbidité et des risques d'eutrophisation. En effet en présence de forte concentration en nitrate et phosphore, des blooms de phytoplanctons peuvent se manifester. Ce terme fait référence à une multiplication massive en microalgues à la surface en réponse à une disponibilité augmentée de nutriment. Des températures élevées ainsi qu'un ensoleillement fort peuvent exacerber ce phénomène. Cette forte activité biologique génère une brutale baisse de concentration en O₂ dans l'eau, ce qui appauvrit puis détruit toute vie organique sous le bloom. Ce phénomène est surnommé « l'asphyxie des écosystèmes aquatiques ».

3.4. Etat des lieux de la recherche – restauration d’habitats naturels côtiers

3.4.1. Comparaison - projets de restauration de laminaires



© NOAA's National Ocean Service

a. Green gravel

1. Projet principal

Les champs de laminaires font partie des habitats naturels marins dont la détérioration atteint un seuil critique depuis le début du siècle (T. WERNBERG et al. 2019). Face à cette perte évidente et importante de biodiversité, l'Association de biologie marine du Royaume-Uni, à la suite d'une étude bibliographique, a constaté que les nombreuses tentatives de restauration des laminaires, coraux et autres populations algales sauvages avaient des **résultats mitigés par des coûts protocolaires importants**, ainsi qu'une **vitesse de restauration insuffisante pour inverser la tendance de disparition constatée**.

A ainsi été développé le projet « **Green Gravel** », proposant une méthode de transplantation simple, consistant à simplifier la phase de réinsertion dans le milieu naturel, après reproduction, culture et ensemencement de substrats par des laminaires.

Le concept de Green gravel est d'ensemencer des **petits substrats rocheux** (peu coûteux : graviers et cailloux), par fixation de gamétophytes voire jeunes sporophytes de laminaires. Les graviers ensemencés sont chargés sur des véhicules maritimes à fort volume, puis **déversés sans assistance sous-marine** directement en mer, sur des substrats rocheux où les laminaires ont disparu.

Cette méthode, très peu coûteuse, a permis d'obtenir des pieds de laminaires de 20-30 cm, presque un an après la remise en habitat naturel. Les premières tentatives green gravel en milieu rocheux abrité ont tenté trois approches de remise à l'eau des graviers ensemencés : le rejet direct depuis le bateau à la surface, attachés à des casiers puis mis à l'eau par des plongeurs, et une mise à l'eau à la main par des plongeurs. Après trois mois, 60% des graviers en casiers et 53% des graviers libres ont conservé des pieds viables de laminaires.

En milieu exposé/battu les résultats se sont révélés moins concluants, avec une moyenne sur tous les sites de 18.5% des plantules qui ont survécu après 4 mois. Les survivants ne sont pas restés sur substrat, se détachant des graviers pour coloniser les roches (S. FREDRIKSEN et al. 2020). Le rapport publié en février 2024 sur l'application du protocole green gravel en milieu battu a présenté une perte de 92% des plantules sur gravier un mois seulement après la remise en mer, et de la totalité des plantules dans les 7 mois qui ont suivi. Ces essais ont toutefois ouvert la piste d'exploration de l'ensemencement de plus gros substrats, les galets (« cobble »), ayant mieux résisté aux conditions naturelles d'un plateau rocheux battu (H.S. EARP et al. 2024).

Considérant les moyens très faibles pour des résultats prometteurs, le projet Green Gravel s'est étendu en un groupe d'action international en la faveur de la restauration de l'habitat laminaire. De nombreux projets ont rejoint ce groupe d'action international, avec comme objectif commun de tester et développer la méthodologie Green gravel à travers le monde, afin de constituer des protocoles simples et peu coûteux pour chaque espèce et milieu.

2. Californie du Sud (USA)

Ce projet a pour objectifs d'appliquer la méthode Green Gravel afin de restaurer les forêts de varech géant (*Macrocystis pyrifera*), de concevoir un protocole reproductible pour une reforestation à grande échelle, et d'ajouter une dimension d'assistance évolutive au protocole green gravel existant, afin de concevoir et réintroduire des algues plus résistantes aux conditions climatiques vers lesquelles nous nous dirigeons.

Malgré l'apparence ambitieuse des objectifs, ce projet se veut économique, afin de permettre pour l'avenir un déploiement du protocole simple même à grande échelle. La méthode est similaire à l'expérimentation menée par ELV. Des plants sauvages sont prélevés en milieu naturel, mis en culture jusqu'à reproduction en bassin, les plantules produits sont fixées sur substrat puis réintroduits. Pour limiter les pertes de pieds sauvages, cette méthode peut également ne prélever qu'une partie des tissus du thalle pour réaliser la reproduction ex situ, mais ce changement nécessite l'intervention de plongeurs professionnels, générant une augmentation des coûts. Le « carnet de culture » du projet a intégré toutes les étapes de culture ex situ des plants prélevés, la méthode, le protocole ainsi que le matériel et les coûts. Ce document est accessible et utilisable par tout technicien voulant participer au projet de restauration (extrait figure 20).

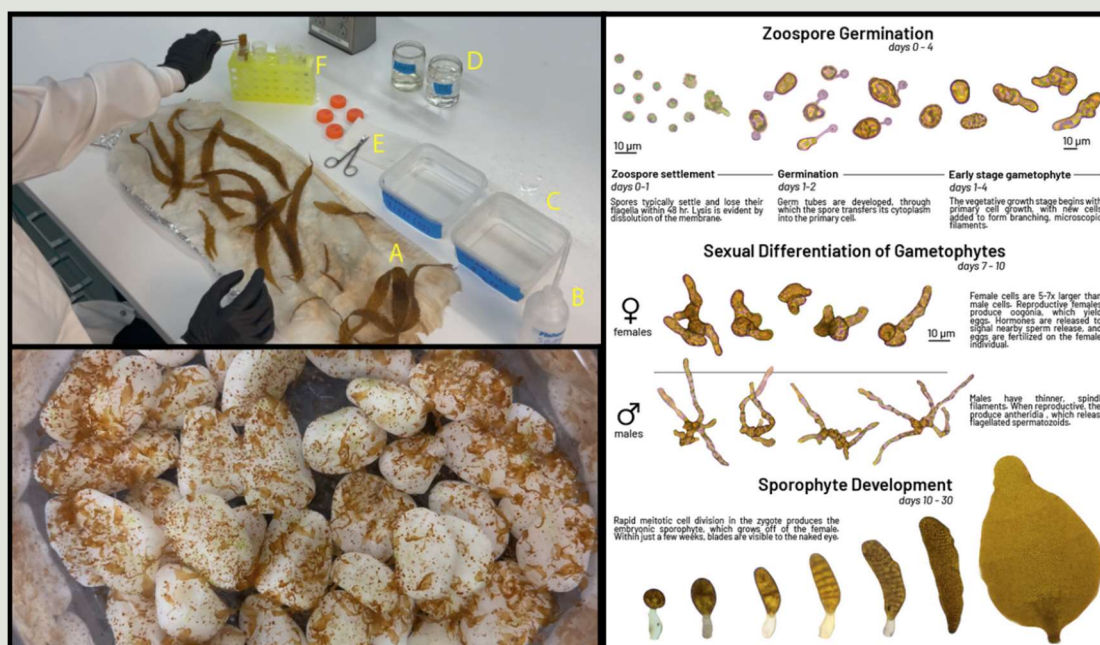


Figure 20: Extrait du carnet de culture, avec photographies d'algues sauvages prélevées (haut à gauche) et les graviers ensemencés (bas à gauche)

Les plants de la première année de réintroduction ont malheureusement été perdus du fait des conditions climatiques intenses et des tempêtes répétées de 2021. Toutefois le site voisin de Mexico, ayant subi moins de dégâts météorologiques, a constaté un franc succès d'implantation avec un taux de croissance des plantules réinsérés supérieur au taux moyen naturel. Afin d'éviter de perdre de nouveau les galets ronds précédemment utilisés, les sporophytes ont été fixés en 2022 sur des tuiles plates, le suivi est encore en cours à ce jour (J. LAMB et al. 2023).

3. Novel kelp forest restoration method tested on artificial boulder reefs in Danish waters.

Cette thèse de 2022 basée sur le protocole Green gravel a également fait de la culture et de l'ensemencement ex situ d'algues de deux espèces : *Laminaria digitata* et *saccharina latissima*. Les spores ont été fixés puis cultivés sur des roches jusqu'à ce que les plantules atteignent une taille supérieure à quelques centimètres. Les supports ensemencés ont été réinsérés sur un récif artificiel au détroit du Petit Belt au Danemark. Les *saccharina* ont poussé et ont entamé un cycle de reproduction avec succès 50 à 133j. après réintroduction. Les *L. digitata* n'ont malheureusement pas atteint le stade adulte à cause d'une invasion d'algues vertes (L. ENEVOLDSEN, 2022).



Sussex Kelp Recovery Project

b. Sussex Kelp Recovery Project

Plusieurs travaux d'études naturalistes menés dans les années 1960-70 ont tenté de cartographier les populations de laminaires des côtes de la manche. Ces derniers reportaient alors des champs de laminaires vastes de pouvant atteindre plusieurs dizaines de kilomètres de long pour 2 à 5 kilomètres de large (J. ADOUIN et R. PEREZ, 1970. J. KAIN, 1964.). En 1980 s'étendait un champ de laminaires de 40km de long des côtes de Shoreham-by-sea jusqu'à Selsey bill.

Depuis la fin des années 1980, 96% des champs de laminaires des côtes du comté de Sussex au sud-est de l'Angleterre ont disparu, causant une forte dégradation de la qualité des eaux et de la richesse spécifique des côtes sud anglaises. En 2018, dans l'optique de restaurer et protéger les habitats essentiels à la ressource halieutique en déclin, l'office des pêches côtières et de la conservation de Sussex (IFCA) ont réalisé un important travail bibliographique et empirique afin de constituer puis déployer un programme visant à réduire l'impact des activités humaines sur les habitats côtiers. Ainsi a été porté un projet visant à établir une zone marine réglementant le chalutage côtier. Institué en 2021, ce programme a permis de protéger 304 km² de fonds marins du chalutage. A la suite de la mise en place de ce zonage environnemental où le chalutage est prohibé (figure 21), plusieurs projets de conservation ont été conçus afin d'étudier et inverser les dommages de ces pratiques sur les habitats naturels, notamment un projet d'étude et de restauration des champs de laminaires, le Sussex Kelp Recovery Project (SKRP).

Dans le cadre de ce projet, la piste de la transplantation n'a pas été explorée. L'objectif principal étant d'interdire le chalutage nocif pour l'habitat, puis comprendre la biologie et l'écologie des champs de laminaires, afin de laisser les forêts de laminaires se restaurer naturellement. Des contrôles réguliers sont effectués. Selon le rapport de 2024, après seulement trois ans d'interdiction de chalutage et surveillance des fonds, de larges populations de moules sont revenues sur les côtes de Sussex, des raies électriques (torpilles) ainsi que des poissons-balistes ont été observés et recensés pour la première fois depuis plusieurs décennies, des populations de coraux et anémones se reforment et des plantules de laminaires ont été relevés sur l'ensemble de la zone, en plus d'un excellent maintien des populations existantes (SKRP 2022, Oceanographic issue n°15).

Ce projet est la démonstration de deux faits essentiels : les laminaires sont des berceaux de vie, leur restauration et préservation s'étend à une faune et flore riche et diversifiée. De plus, des restrictions des activités nocives au développement des laminaires est efficace pour assurer la restauration écologique de l'habitat qu'elles forment.



Figure 21: Périmètre de la réglementation du chalutage de fonds portée par SKP

3.4.2. Comparaison - projets de restauration de posidonies



© D. Torres

Equivalent méditerranéenne de la zostère des côtes Nord-Atlantique et Manche, plusieurs projets de restauration de la posidonie méditerranéenne (*Posidonia oceanica*) ont été entamés à travers le globe. Ils abordent la nécessité de restaurer la posidonie, plantes (et non algues) marines essentielles et endémiques de la mer Méditerranée, en raison de leur rôle écologique essentiel. Les herbiers de posidonie forment de vastes prairies sous-marines, fournissant des services écosystémiques clés tels que la séquestration du carbone et le soutien de la biodiversité. Malgré les protections juridiques, le développement côtier et l'activité humaine ont entraîné un déclin important des herbiers marins.

Le travail de synthèse du Réseau Méditerranéen de Posidonies (C. PERGEN-MARTINI et al., 2024) est une étude bibliographique critique des techniques de restauration utilisées depuis la fin des années 1990, et propose une méthodologie efficace basée sur ces expériences. Cette étude construit des lignes directrices, offrant un cadre complet pour la restauration de cet écosystème, s'appuyant sur les leçons des efforts antérieurs impliquant la transplantation de boutures et de plants. Plusieurs techniques de transplantation opérationnelle ont été utilisées à travers les différentes recherches, prenant comme base des boutures, mottes ou graines/semences. En France, les programmes RENFORC et REPOSEED du Groupement d'Intérêt Scientifique pour l'environnement marin, en particulier des Posidonies (GIS Posidonie) ont obtenu des résultats prometteurs. Les graines récoltées sur plage et réensemencées en milieu naturel ont permis la production de jeunes pieds d'environ 7cm en quelques mois. Les autres méthodes de transplantation ont obtenu des résultats plus mitigés (GIP Posidonie, 2023). Sur le plus long terme, des expérimentations de transplantation, combinées au déploiement de réglementations des activités nautiques, ont eu d'excellents résultats à la restauration des champs de posidonies. Des boutures et jeunes plants transplantés sur 625m² de champs morts entre 1988 et 1995 sur le parc national de Port-Cros ont survécu et se sont reproduits ces 30 dernières années. Le nombre de faisceaux de feuilles portés par les 301 boutures était de 613 en 1995, il a été mesuré 53 400 en 2023, soit 87 fois plus. En addition à cette croissance, les plants transplantés se sont reproduits, augmentant la surface des champs de posidonies là où la mort régnait il y a une trentaine d'années (MOLENAAR et MEINESZ, 1995 ; PERGEN-MARTINI et al., 2022). Les diverses recherches de restauration écologique menées mettent en évidence le besoin d'un délai de 4 ans minimum pour la mise en place des greffes et évaluation du succès de la transplantation. Les champs de posidonies morts ainsi que les récifs rocheux colonisés par des algues courtes sont les substrats les plus favorables aux opérations de réinsertion (ESCANDELL-WESTCOTT et al. 2023). Les posidonies étant des plantes, il est possible de les réinsérer par simple transplantation depuis un site donneur.



Figure 22: Zone de transplantation avant (gauche) et après (droite) transplantation de posidonies (C. PERGEN-MARTINI et al., 2024 ; G. ARDIZZONE et al. 2022)

3.4.3. Comparaison - projets de restauration de coraux

© D. Eidsmoe

Présents sur Terre depuis près de 500 millions d'années (I.G.L. SEIBLITZ et al. 2020), les récifs coralliens sont rares, riches, et fragiles. Selon les rapports Global Coral Reef Monitoring Network (GCRMN), ils ne colonisent que **0.2% de la surface des fonds océaniques**, et abritent pourtant plus d'**un quart de la vie marine de notre planète**. C'est une richesse spécifique et biologique équivalente voire supérieure à celle des forêts tropicales d'Amazonie ou de Nouvelle-Guinée. Jusqu'à un tiers de toutes les espèces de coraux constructeurs de récifs sont menacées d'extinction, en raison des effets combinés du réchauffement climatique et des facteurs de stress locaux tels que la pollution, les pratiques de pêche destructrices ou encore l'exploitation du corail. Les multiples travaux de recherche menés sur la perte en coraux au niveau mondial estiment que 40% des récifs coralliens ont totalement disparu depuis ce dernier siècle. Le principal levier de rétablissement écologique des récifs coralliens déployé à travers le globe est l'établissement d'aires marines protégées, toutefois de nombreux projets de transplantation.

Sur l'île de Hatamin en Indonésie, Coral Guardian œuvre depuis 2015 à la restauration des récifs coralliens par transplantation de coraux. Des boutures sont prélevées sur des récifs en bonne santé puis fixées sur cadres métalliques. Ces cadres sont ensuite placés où les récifs naturels ont été détruits par les activités de pêche à la dynamite. Le suivi parallèle de la faune a permis d'observer qu'en **seulement 5 ans**, le récif de transplants accueille **5 fois plus d'espèces et 30 fois plus de poissons** qu'avant l'étude (figure 23).



Figure 23: Restauration des récifs coralliens par Coral Guardian, de 2015 (gauche) à 2021 (droite) (CORAL GUARDIAN, 2021)

D'autres projets se rapprochent de la méthode déployée par Green gravel et ELV pour les laminaires, notamment celui mené par le Centre de Recherches Insulaire et Observatoire de l'Environnement (CRIOBE) sous la coordination de Laëticia HEDOUIN (CNRS) à Moorea en Polynésie française. Ce projet a mis en place une méthode avancée de culture de coraux, leur station d'écologie expérimentale dispose d'un vaste espace qui leur est dédié, ainsi qu'une pépinière de coraux où les boutures sont mises en bassin. Depuis 1970, des dizaines d'hectares de récifs ont été restaurés par plusieurs approches : la mise en place d'AMP gardées, le désherbage de microalgues en approche de la reproduction corallienne, gestion des espèces envahissantes, transplantation de boutures ou encore assistance évolutive (sélection et croisement volontaire de gamètes en bassin) (CORALMATES ; J. WICQUART et S. PLANES, 2020).

Coral Gardeners est une association ayant pour objectif la restauration corallienne tout en portant une volonté de sensibiliser le grand public à la restauration corallienne. Leurs opérations de transplantation sont couplées avec une sensibilisation locale aux enjeux écologiques, afin de réduire les émissions de polluants en mer et les activités de pêche et touristiques nocives pour les coraux. Entre 2017 et 2023, ils ont restauré 11 récifs coralliens pour une surface de plus de 12 000m², avec un taux de survie moyen des boutures de **82%**. Leur méthode est simple : prélever des boutures sur récif en bonne santé, mise en culture en pépinière in situ (culture sur corde de coco) pendant plus d'un an puis réinsertion en récif endommagé. Les coraux sont fixés de deux manières simultanément : un ciment souple répandu entre le corail et le substrat rocheux, ainsi qu'une attache plantée dans la roche (S. CHAUVELOT et al. 2023).

3.5. Menaces

3.5.1. Broutage

Au sein des forêts de laminaires, seul un faible nombre d'organismes est capable de s'alimenter directement des tissus de lamine (Leclerc et al., 2015). En effet, seuls l'**helcion pellucide** (*Patella pellucida*) et les **oursins** (*Equinus esculentus* et *psammechinus miliaris*) semblent directement brouter les thalles fixés de *L. hyperborea* sur les côtes atlantique nord françaises (Christie et al., 2003). Une trop importante population d'oursins peut rapidement brouter toute algue (dont les laminaires) d'un écosystème, causant un appauvrissement de la flore benthique, suivi de sa faune (Y. AGATSUMA et al. 2019). C'est un phénomène de désertification sous-marine. Sur les côtes de Californie, les oursins ont été identifiés responsable d'une perte de **90%** des effectifs des populations de néréocyste (*Nereocystis luetkeana*), algue brune géante de la famille des Laminariaceae, sur plus de 250km de littoral en seulement **deux ans** (2014-2016). Cette espèce de varech est le principal composant structurant des récifs rocheux tempérés littoraux hautement productifs de Californie, leur perte a engendré un rapide déclin de l'ensemble de l'écosystème, désormais dominé par les oursins (figure 24). Cette prolifération a eu lieu à la suite d'une canicule marine (Marine Heat Wave – MHW) exceptionnellement longue, ayant permis la formation de blooms phytoplanctoniques de grande envergure, causant à leur tour la mort ou la fuite des organismes prédateurs (mammifères, poissons, étoiles de mer et céphalopodes) d'oursins.



Figure 24: Transformation de la forêt de varech du nord de San Francisco en désert d'oursin persistant, vues sous-marines et surfacique (L. ROGERS-BENNET et C.A. CATTON, 2019)

Figure 25: Destruction progressive de l'algue brune *Ecklonia bicyclis* par broutage de l'oursin *Mesocentrotus nudus*, (Y. AGATSUMA et al. 2019)

Le récent déclin en prédateurs d'oursins (poulpes principalement) observé par ELV sur les côtes de Loire Atlantique semble être source d'une prolifération en oursins, ce qui est alarmant (interview de J-C. MENARD par M. MARZLOFF, 2023). Cette prolifération en brouteurs de laminaires met en péril la survie des ceintures de laminaires restantes (figure 25), mais également le projet de restauration de l'habitat forêt de laminaires. En effet leur présence massive induit un risque élevé que ces brouteurs se nourrissent des plantules cultivés et réintroduits, induisant la mort des pieds et par extension une forte réduction des chances d'obtenir des pieds adultes et capables de se reproduire sur les sites de réinsertion.

3.5.2. Modifications et augmentation de la turbidité

a. Généralités

L'obtention de données quantitatives concernant la turbidité d'un secteur sur l'ensemble de la colonne d'eau n'est chose aisée sans relevés in situ. Il est toutefois possible d'estimer la turbidité des eaux de surfaces à l'aide de l'imagerie satellite (figure 26). Ces deux images prises à des périodes différentes de l'année 2024 permettent de visualiser les variations de turbidité en lien avec le cycle climatique annuel et des apports terrigènes associés.

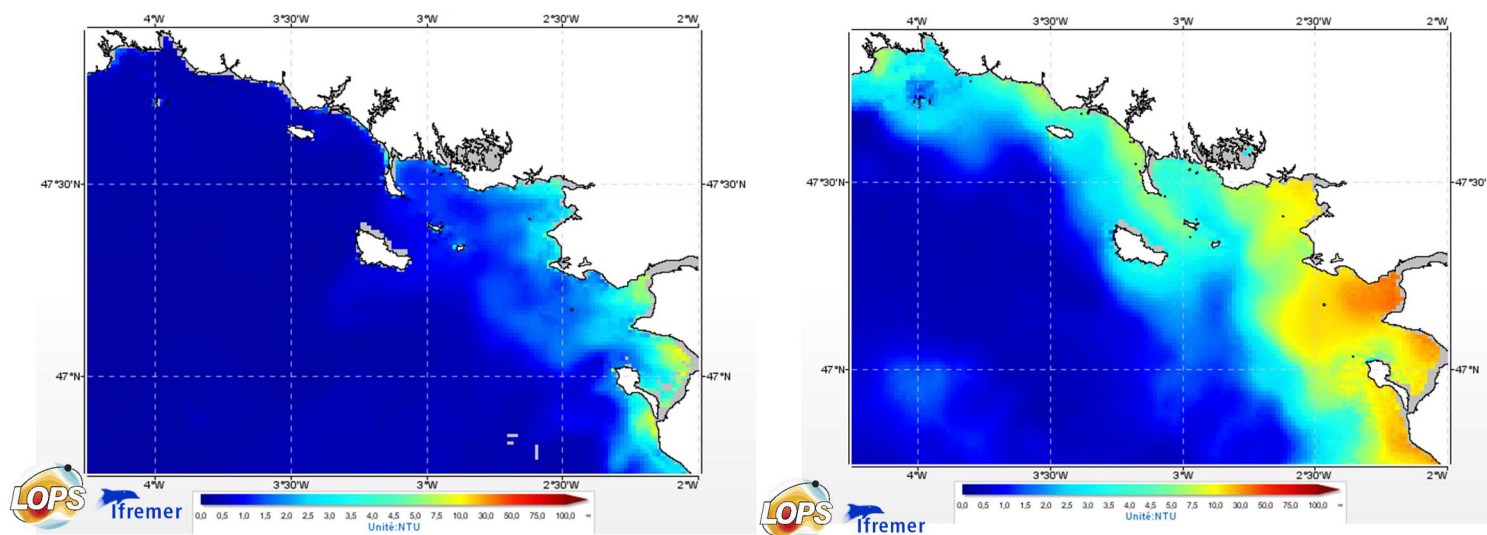
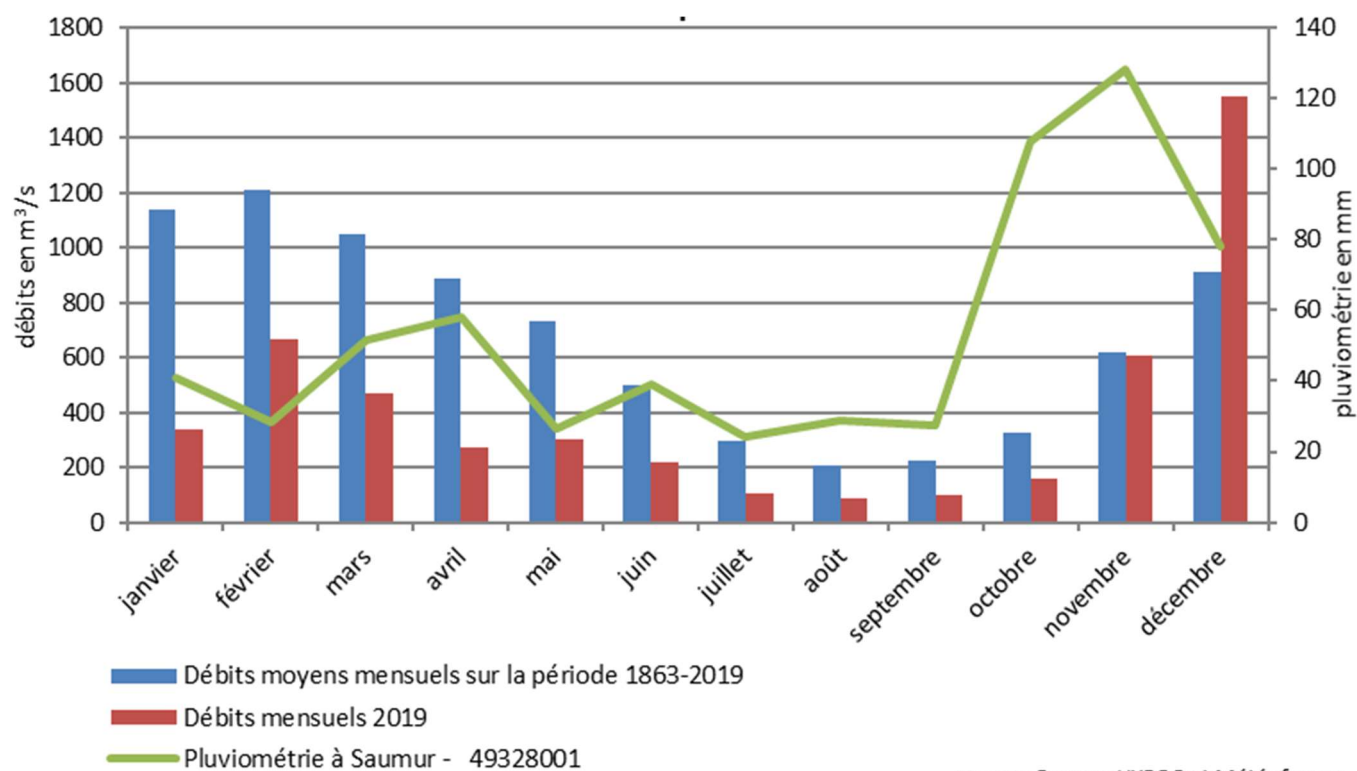


Figure 26: Turbidité moyenne (en Unité de Turbidité Néphélométrie - NTU), secteur Atlantique Nord, Bretagne sud, en Aout et Janvier 2024 (MARC, LOPS, Ifremer)

Ces variations de turbidité correspondent majoritairement aux événements de crues de la Vaine et de la Loire (figure 27) et de la Vaine.



source : Banque HYDRO et Météofrance

Figure 27: Débits mensuels de la Loire et pluviométrie à Saumur (<https://eau.maine-et-loire.fr/>)

b. Dragage

On observe toutefois des **augmentations brusques de la turbidité malgré une absence de crues de la Loire**. Cette augmentation de turbidité peut être provoquée par d'autres sources de mise en suspension de particules telles que le dragage ou les blooms de phytoplanctons.

Les ports de Saint-Nazaire ainsi que du Pouliguen-La Baule effectuent des opérations de dragages régulières afin de dégager les ports, canaux et chenaux de navigation. Il est avéré que le dragage impacte négativement les populations algues, notamment les laminaires, au-delà de l'augmentation de la turbidité. Dans le cas des laminaires, les sédiments argileux se collent au microfilm visqueux de la fronde, perturbant les échanges entre l'algue et son milieu. En addition à la réduction de la capacité photosynthétique d'environ 20% due à l'augmentation de la turbidité, le recouvrement direct des laminaires par des sédiments et autres MES provoquent la pourriture de la fronde (J.E. LYNGBY et S.M. MORTENSEN, 1996. M.W. FRASER et al. 2017). Les mois de fin hiver-début printemps, lorsque les eaux sont aux alentours de 14-15°C, sont particulièrement critique pour les laminaires, alors en reproduction et au summum de leur croissance annuelle. La méthode de dragage la plus utilisée en baie du Pouliguen car peu coûteuse est le refoulement (ou le clapage) en mer. Les vases et sédiments prélevés sont ainsi remis en suspension en mer (notamment près de Penchâteau, à l'Ouest des Evens), provoquant une rapide augmentation de turbidité ainsi qu'un enlèvement de la flore benthique. Considérant les courants et la houle océanique dominante venant d'ouest/sud-ouest (voir figure 5), les sédiments libérés vers Penchâteau reviennent rapidement vers les canaux desquels ils ont été prélevés. L'efficacité des dragages se révèle ainsi relativement faible, et des opérations régulières sont nécessaires (ELV, 2019). Un suivi sonde relevant quotidiennement la turbidité, couplé aux données et dates de dragages, permettra d'avérer ou invalider cette hypothèse de corrélation (annexe 4).

La navigation en Loire est rendue possible par les nombreuses opérations d'aménagement et d'entretien du chenal et de ses rives (figure 28). L'entrée de la Loire au niveau de Saint-Nazaire est concernée par des dragages stationnaires du chenal extérieur réguliers, des dragages d'approfondissement sont également réalisés dans le chenal de Saint-Nazaire à Couëron (GIP Loire Estuaire, 2018² et ³).

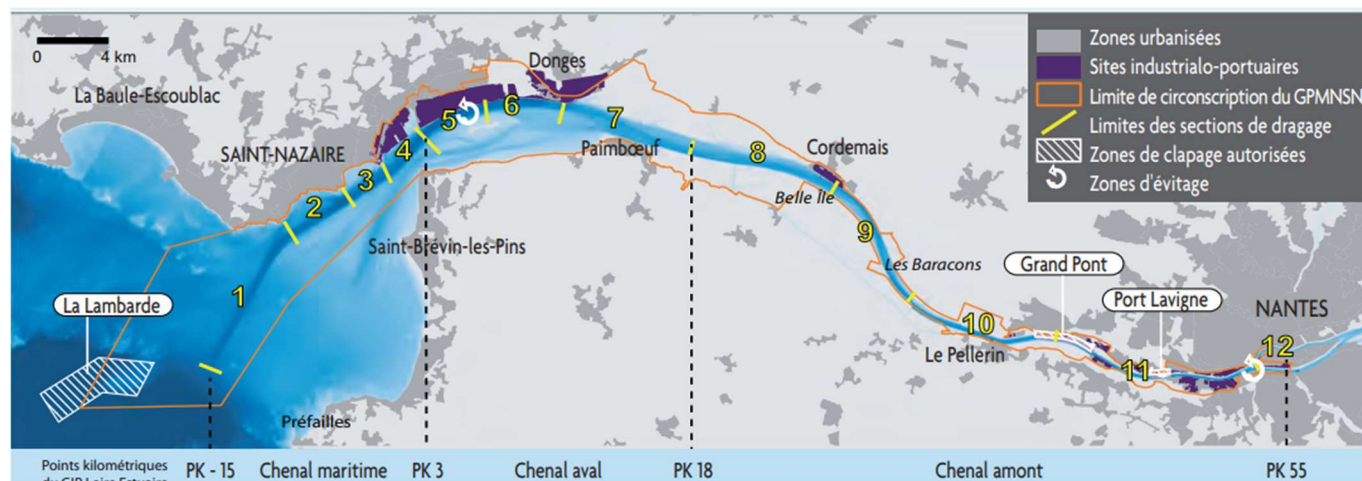


Figure 28: Accès portuaires et dragages de l'estuaire de la Loire (GIP Loire Estuaire, 2018³)

c. Blooms

Les activités humaines, notamment l'agriculture et le traitement des eaux usées, génèrent l'apport massif de nutriments inorganiques vers les océans. Ces derniers, en fortes quantités dans l'eau, peuvent exacerber la croissance des phytoplanctons, générant des blooms, augmentant à leur tour la turbidité. Ces blooms sont également décuplés par de fortes chaleurs et un ensoleillement intense, deux paramètres graduellement plus intenses et fréquents à cause du changement climatique. L'augmentation de la turbidité induite par les blooms phytoplanctoniques se réalise au détriment des algues photophiles dont les laminaires, ne pouvant photosynthétiser normalement par manque de lumière.

3.5.3. Changement et réchauffement climatique

a. UV – trous couche ozone

La couche d'ozone, bouclier naturel filtrant usuellement les rayons ultraviolets (UV) B (280-315 nm) nocifs, subit des dégradations, notamment aux pôles. Lorsque cette couche est appauvrie, les algues dont les laminaires sont exposées à des niveaux plus élevés de radiation UV-B, ce qui endommage leur ADN, protéines, lipides et acides nucléiques (I. GOMEZ et P. HUOVINEN, 2010 ; K. BISCHOF et F.S. STEINHOFF, 2012 ; C. LUTZ et al. 2015). Cela vient à perturber voire inhiber leurs processus de photosynthèse et de respiration, induisant ensuite des perturbations de la croissance des algues. Les laminaires développent des mécanismes de protection contre ces dommages. Par exemple, elles synthétisent et accumulent des substances photoprotectrices telles que les acides aminés de type mycosporine (MAAs). Ces substances absorbent les UV et réduisent les dommages cellulaires. Cependant, l'efficacité de ces mécanismes dépend de l'exposition et des conditions environnementales telles que la profondeur de l'eau et la turbidité (HANELT et al. 2007). Les UV-B peuvent également altérer ces mécanismes de défense des laminaires contre les stress environnementaux, les rendant plus vulnérables aux maladies et aux parasites. Ces nombreux facteurs engendrent une diminution de la productivité primaire, de la biomasse et de la densité des populations de laminaires, compromettant ainsi leur rôle écologique en tant qu'habitat et source de nourriture pour de nombreuses espèces marines.

b. Réchauffement des eaux

Les tendances climatiques contemporaines induisent un réchauffement global des eaux océaniques à une échelle mondiale, mesuré à un rythme de $+0,06^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0.013^{\circ}\text{C}$) par décennies depuis le début du XX^{ème} siècle, qui s'est accéléré cette dernière décennie (2010-2019) à $+0,28^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0.068^{\circ}\text{C}$). La température des océans dans les 2 000m supérieurs montre un taux de réchauffement linéaire de $0,35 \pm 0,08 \text{ Wm}^{-2}$ au cours de la période 1955-2019. Le taux de réchauffement au cours de la dernière décennie (2010-2019) est le double ($0,70 \pm 0,07 \text{ Wm}^{-2}$) (C. GARCIA-SOTO et al. 2021). Une moyenne de températures plus élevée que la norme peut induire un stress thermique, diminuant la distribution géographique, le taux de croissance et la capacité reproductive des laminaires. Une exposition à des températures élevées engendre une nécrose des tissus et une mortalité certaine en une à deux semaines (E.J. SIMONSON et al. 2015). De plus, le réchauffement favorise la prolifération d'espèces concurrentes et de brouteurs, augmentant la pression sur les populations de laminaires (M. VALERO et al. 2006). Des températures élevées peuvent également exacerber les infestations par des pathogènes tels que *Eurychasma dicksonii*, un oomycète parasite affectant les sporophytes de laminaires (F.C. KÜPPER et al. 2002). Cette situation entraîne un déplacement des zones de distribution des laminaires vers des latitudes et à des profondeurs plus élevées, pouvant réduire les services écosystémiques rendus par les forêts de laminaires et la biodiversité qui leur associée, dans les régions où ces algues ne peuvent plus survivre.

c. Baisse de la salinité

En addition à la fonte accélérée des calottes glaciaires, les changements du climat globale actuel engendrent une augmentation de la fréquence et de l'intensité d'événements de crues et tempêtes, diminuant la salinité des eaux littorales où les laminaires se développent. Une réduction de la salinité peut perturber les processus osmorégulateurs des laminaires, leur rendement photosynthétique ainsi que la force de leurs tissus, entraînant un stress physiologique et une réduction de leur croissance et de leur résilience face à d'autres stress environnementaux. Une drastique baisse de salinité entraîne la mort et la nécrose des tissus de laminaires. Une étude menée en Australie a constaté une disparition de presque 100% des laminaires aux 4 premiers mètres de profondeur après exposition à une forte baisse de salinité provoquée par des inondations et tempêtes successives (T.R DAVIS et al, 2022). Une couche d'eau de mer de surface moins salée est également susceptible de former plus de connexions moléculaires, donc d'être plus turbide. Il est fréquent d'observer sur le site des Evens une eau de mer sale en surface (plus douce) au lendemain de crue, de forte houle ou de dragage. Cette pellicule recouvrant une eau plus claire (plus salée). Ce phénomène diminue l'incidence de lumière en profondeur, aux dépends des laminaires.

3.5.4. Qualité des eaux

La qualité écologique et physico-chimique des eaux côtières joue un rôle crucial dans la santé des laminaires, particulièrement sensibles à ses variations, notamment en termes de nutriments, de température, et de présence de polluants. Les fleuves tels que la Loire et la Vilaine, qui se jettent dans l'océan Atlantique, sont des sources importantes de pollution côtière. Ils apportent des charges significatives de nutriments, comme les nitrates et les phosphates, provenant des pratiques agricoles intensives de leurs bassins versants. Par ailleurs, ces fleuves transportent également des contaminants chimiques, tels que les pesticides, les métaux lourds, plastiques et hydrocarbures, issus des activités industrielles et urbaines. Ces polluants peuvent avoir des effets toxiques directs sur les laminaires, altérant leur croissance, leur reproduction ou encore leur capacité à résister aux maladies.

Au large de la côte entre les estuaires de la Loire et de la Vilaine, l'état de santé des masses d'eau côtières et des fonds marins sont évalués à travers l'étude des macroalgues structurantes telles que les laminaires, ainsi que de la faune et flore leur étant associée. Cette étude ELV permet le calcul d'un indice dit EQR (Ecological Quality Ratio, voir partie 4.2.4), et est réalisée annuellement par le MNHN de Concarneau en collaboration avec Bio-Littoral (figure 29).

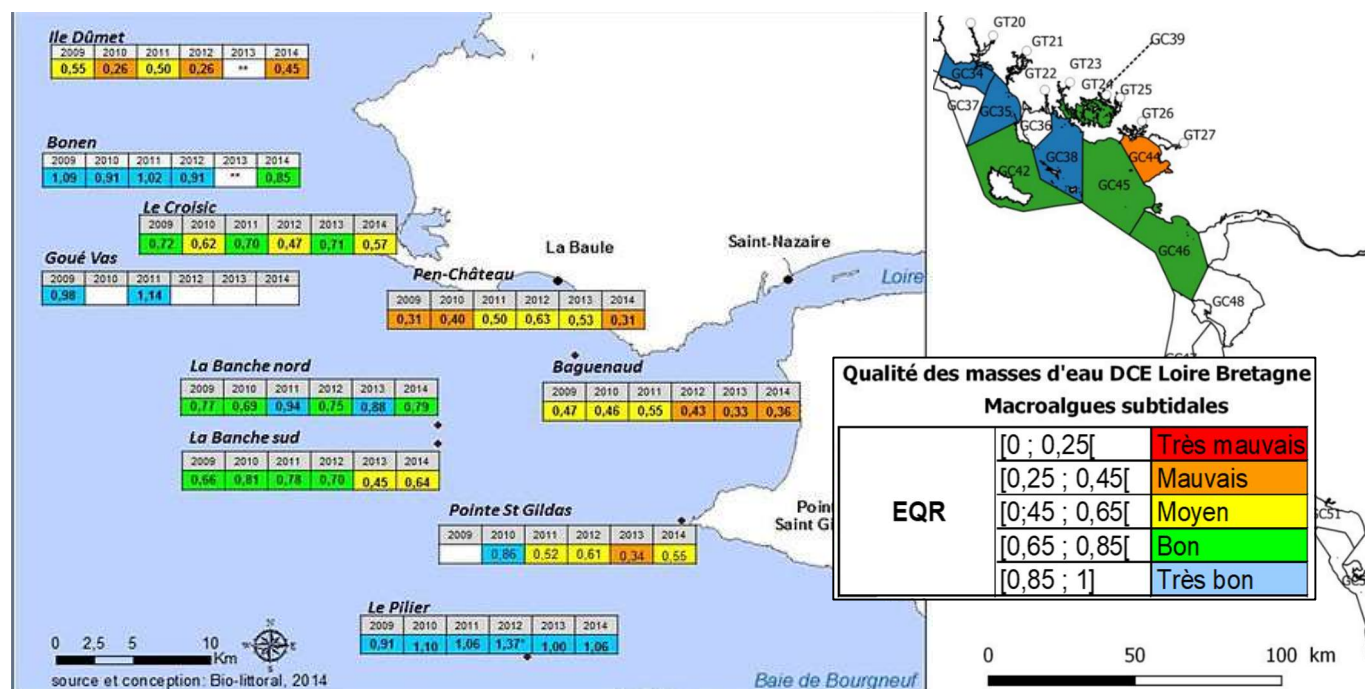


Figure 29: Résultat du suivi de l'état de santé des masses d'eau côtières, période 2009-2014 (Bio-littoral, MNHN, 2014) à gauche, et surveillance DCE 2016 (Ifremer, 2018) à droite

Les sites proches des estuaires sont de mauvaise qualité principalement à cause d'une forte turbidité alimentée par les fleuves et blooms de phytoplanctons. En baie de La Baule – Le Pouliguen, l'influence de la Loire est très présente, les forts courants de marée ainsi que les opérations de dragage remettent une quantité importante de matières en suspension. La pointe de Saint-Gildas est affectée par le panache turbide de la Loire, avec une intensité variable selon la direction des vents dominants. Dans le secteur de la Banche, le site Sud, bien que situé plus au large et théoriquement en meilleure position, les eaux sont souvent d'une qualité inférieure à celle du site Nord. Cela est dû aux dépôts répétés de vases draguées dans le chenal d'accès au Port Autonome sur la Lambarde, impactant fortement la zone entre la bouée Est et le phare de la Banche. Enfin, les sites plus éloignés en mer, tels que les abords du plateau du Four (Le Bonen & Goué-Vas) et le Pilier face à Noirmoutier, maintiennent une bonne qualité de l'eau par leur distance des côtes et des estuaires.

a. microplastiques

La pollution des eaux côtières par les microplastiques provenant de la Loire et de la Vilaine représente une préoccupation environnementale croissante. Les microplastiques, définis comme des particules de plastique de moins de 5 mm, sont issus principalement des activités anthropiques, notamment des rejets domestiques, industriels et agricoles. Des études récentes montrent que ces fleuves transportent des quantités significatives de microplastiques vers l'océan Atlantique, contribuant à la contamination des écosystèmes marins côtiers (J. CASTRO-JIMENEZ et al. 2024). Des mesures de gestion efficaces, telles que l'amélioration des systèmes de filtration des eaux usées et la réduction des sources de plastiques à usage unique sont essentielles pour atténuer cette pollution et protéger la santé des écosystèmes côtiers.

Les microplastiques peuvent adhérer à la fronde des laminaires, altérant ainsi leur capacité de photosynthèse et leur croissance (N.M.C FERGUSON, 2021 ; L. GUTTOW et al., 2015). De plus, les microplastiques peuvent agir comme vecteurs de polluants chimiques et de microorganismes pathogènes, augmentant le stress environnemental sur les laminaires, réduisant leur capacité d'intégration de nutriments, leur croissance et leur fertilité (T. GALLOWAY et al., 2017). Ces particules peuvent également perturber les interactions écologiques, affectant la santé des populations d'herbivores marins qui se nourrissent habituellement de laminaires ou de leurs épiphytes, entraînant des conséquences en cascade dans le réseau trophique (SAVOCA et al., 2020).

b. Agriculture et pesticides

Le Groupement d'Intérêt Public (GIP) Loire estuaire est une structure dédiée à la gestion intégrée du fleuve et à la préservation de l'estuaire de la Loire. Ses missions principales incluent la surveillance et l'évaluation de la qualité des eaux et des milieux aquatiques associés à l'estuaire étendu de la Loire, la mise en œuvre de projets de restauration écologique et la promotion d'une gestion durable des ressources naturelles. Ces suivis incluent notamment des évaluations des pratiques agricoles en bordure de Loire, ainsi que des émissions en polluants nocifs. Sur le secteur du site Natura 2000 « Estuaire de la Loire - intérieur » seul, ce sont plus de 300 exploitations (près de 500 exploitants), représentant plus de 16 000 hectares de terres, qui ont été recensées en 2013 (figure 30).

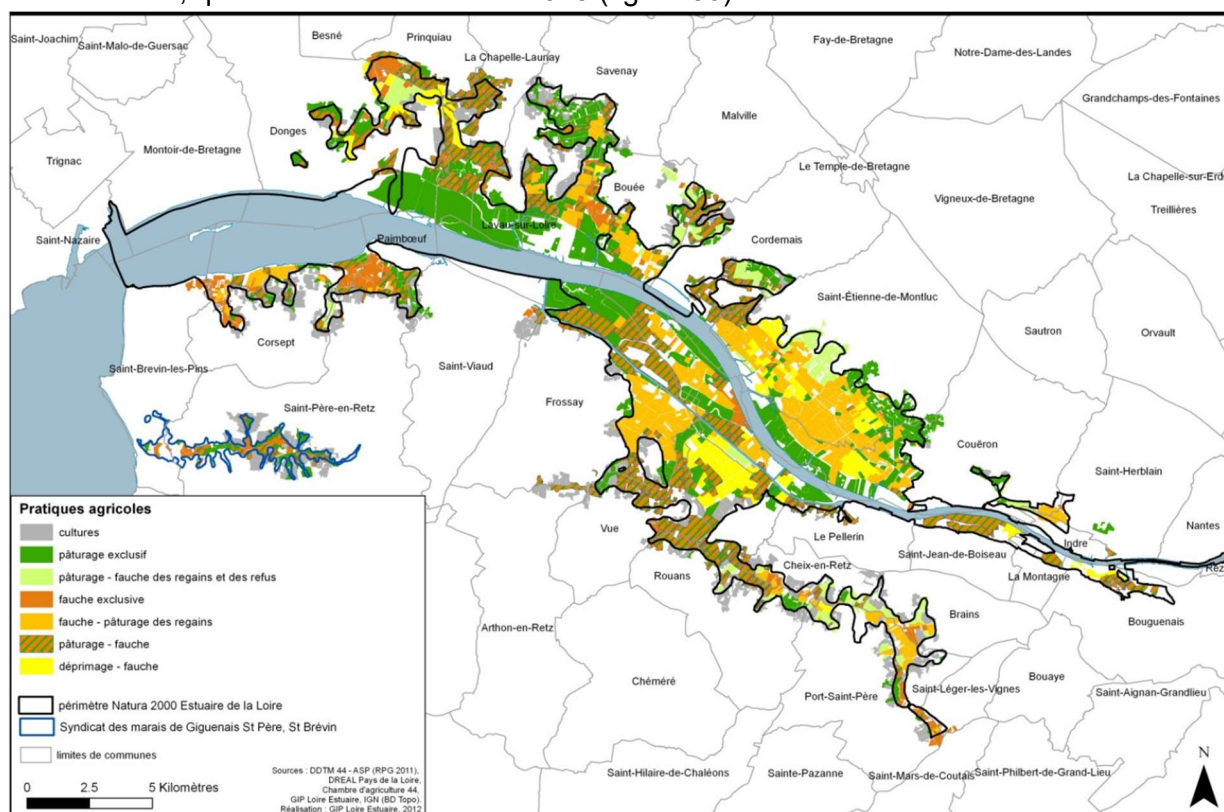


Figure 30 : Pratiques agricoles en abords de Loire : secteur de la zone Natura 2000 "Estuaire de la Loire" (GIP, 2013)

Sur l'estuaire de la Loire, plusieurs pesticides sont régulièrement détectés en raison de ces pratiques agricoles intensives. Les principaux pesticides retrouvés comprennent :

- **Glyphosate** : Cet herbicide est largement utilisé pour contrôler les mauvaises herbes dans les cultures de céréales et de légumes. Un des métabolites du glyphosate, l'AMPA (acide aminométhylphosphonique), est le pesticide le plus fréquemment détecté dans les eaux de l'estuaire de la Loire. Selon le SAGE de l'estuaire de la Loire, la Valeur Guide Environnementale (VGE) fixée à une moyenne annuelle de 0,2 µg/l d'AMPA est fréquemment dépassée en embouchure de Loire ainsi que sur les cours d'eau de la Turballe (données AMPA 2015-2022), signifiant une eau impropre à la consommation par l'Homme.
Le glyphosate se présente comme un herbicide se dégradant quelques jours après son application et se décomposant rapidement dans le sol, suggérant une utilisation sans dangers pour les écosystèmes proches. Cependant, le glyphosate peut être transporté vers les eaux côtières, notamment lors d'événements de ruissellement majeurs. Cet herbicide impacte la capacité photosynthétique des algues, même à faible concentration dans l'eau, induisant une perturbation de leur croissance (R.P. KITTLE et al. 2016) ;
- **Atrazine** : Bien que son utilisation soit interdite dans l'UE depuis 2003, l'atrazine est un herbicide persistant (longue durée de décomposition) encore retrouvé à ce jour dans les eaux côtières. Cet herbicide retarde le cycle de reproduction des algues dont *Laminaria hyperborea* (HOPKIN R. et KAIN J.M., 1978) et perturbe la croissance et le processus de photosynthèse d'autres espèces telles que la zostère (1978. Y. GAO et al. 2011) ;
- **Diuron** : Interdit en agriculture en France depuis 2003, il est encore utilisé en association avec d'autres biocides pour contrôler les mauvaises herbes dans les cultures et la formation d'algues dans les antifouling (peintures antisalissures) pour navires. Le diuron est un contaminant courant, fonctionnant comme bloqueur universel de photosynthèse. Cet herbicide impacte également la capacité photosynthétique (inhibition de l'incorporation de carbone) et reproductrice des laminaires (P. JOHANSSON et al., 2012).

c. Métaux lourds

L'estuaire de la Loire est affecté par la pollution aux métaux lourds, principalement en raison des activités industrielles et urbaines le long de son bassin versant. Parmi les métaux lourds les plus fréquemment détectés, on trouve le cuivre (Cu), le plomb (Pb), le zinc (Zn) et le cadmium (Cd). Le cadmium et le plomb proviennent principalement des rejets industriels et des anciennes activités minières. Le mercure, bien que moins utilisé contemporanément, persiste dans l'environnement en raison de sa stabilité chimique. Le zinc et le cuivre, largement utilisés dans les alliages et les revêtements, sont également présents en quantités préoccupantes en raison de leur utilisation industrielle, ainsi que de la corrosion des infrastructures métalliques existantes. Ces métaux lourds sont toxiques pour la faune et la flore aquatique et peuvent s'accumuler dans les sédiments, posant des risques à long terme pour l'écosystème estuarien et la chaîne alimentaire (D.F. ARAUJO et al. 2019).

L'utilisation de peintures antifouling sur les coques de bateaux est également une source de pollution aux métaux lourds dans l'estuaire de la Loire. Ces peintures contiennent des composés métalliques, principalement du cuivre, conçus pour prévenir la colonisation des coques de navires par des organismes marins comme les algues, mollusques ou crustacés. Les métaux contenus dans ces produits peuvent se lessiver progressivement dans l'eau, contribuant à la contamination des sédiments et de la colonne d'eau. En addition du cuivre et du zinc, les peintures antifouling peuvent contenir des biocides organostanniques (dérivés de l'étain), comme le tributylétain (TBT), bien que leur usage soit désormais restreint en raison de leur toxicité ainsi que de leur impact persistant sur les écosystèmes marins.

d. Affluence estivale

La baie du Pouliguen - La Baule, célèbre pour ses plages touristiques, subit une pression environnementale accrue durant la saison estivale en raison des activités balnéaires. Cette baie est reconnue à une échelle internationale pour sa beauté, souvent décrite comme l'une des plus belles du monde, notamment en raison de sa longue plage de sable fin qui s'étend sur près de 9 kilomètres. Elle attire chaque année plus d'un million de visiteurs, faisant de La Baule l'une des stations balnéaires les plus prisées de France (figure 31).



Figure 31: Fréquentation de la baie de la Baule en juillet, vue de Pornichet, 2008 (©Burgermac)

La communauté d'agglomération de Guérande estime que ce sont chaque année 360 000 habitants présents en saison estivale contre les 75 000 résidents annuels (Cap-Atlantique 2021) présents sur la presqu'île de Guérande. En 2022, ce sont 4,5 millions de visiteurs qui ont été recensés sur la presqu'île lors des deux mois de vacances d'été (M. BAHIN, 2022).

Les pollutions côtières dans cette zone sont en partie liées à ces afflux massifs de vacanciers. Cette activité décuplée sur une brève période peut causer une saturation ou des déficiences du réseau d'assainissement des eaux usées de la presqu'île, causant des rejets d'eau usées en mer. La fréquentation humaine et animale (promenades d'animaux de compagnie et équestres, ...) est à l'origine de contaminations de l'eau par des bactéries d'origine fécale telle que *Escherichia coli* (E. coli).

Les activités balnéaires sont source d'une accumulation de déchets sur les plages (plastiques, métaux, mégots, textiles, ...) ainsi qu'une augmentation des rejets de produits chimiques (protections solaires, insecticides, ...) et produits issus des loisirs nautiques (hydrocarbures, solvants, produits d'entretien, ...). Ces éléments impactent la qualité et les paramètres physico-chimiques des eaux côtières, pouvant représenter un frein au développement, à la croissance et à la reproduction des laminaires.

4. Présentation du projet

4.1. Descriptif du projet et de la mission

4.1.1. Objectifs principaux

Ce projet s'intéresse aux laminaires, macroalgues structurantes abritant une biodiversité exceptionnelle, dont le déclin est documenté par ELV depuis presque 30 ans sur les côtes entre les estuaires de la Loire et de la Vilaine. L'objectif principal est de **restaurer l'habitat « forêt de laminaires »** sur l'îlot des Evens dans la baie du Pouliguen- La Baule. L'objectif global à long terme est de restaurer les forêts de laminaires entre les estuaires de la Loire et de la Vilaine pour qu'elles puissent de nouveau fournir un habitat essentiel pour de nombreuses espèces marines, améliorer la biodiversité locale et renforcer la résilience des écosystèmes côtiers face aux changements environnementaux.

La méthode restauration choisie est celle du **renforcement des populations de laminaires existantes** par prélèvement, reproduction et culture ex situ de *L. hyperborea*. Les jeunes sporophytes produits et fixés sur substrats (galets) sont ensuite réintroduits dans leur milieu naturel, puis suivis par des inventaires sur une période de **3 ans**. Ce délai a été défini afin de correspondre à la durée nécessaire pour que les jeunes plantules atteignent un stade d'adulte capables de se reproduire. Ce choix de période permet également de prendre en compte la forte variabilité interannuelle des conditions météorologiques et hydrologiques du site. Cette première tentative de rétablissement écologique permettra également l'identification des supports d'ensemencement les plus efficaces, la construction d'un protocole de récolte, culture et réinsertion reproductible, tout en limitant les coûts, mais également donnera le cadre idéal pour étudier les liens entre la croissance des laminaires et les divers facteurs biotiques (blooms phytoplanctoniques, brouteurs, établissement d'épiphytes,...) et abiotiques (dragage, apports de polluants, variations de la salinité, du pH, des températures,...) pouvant avoir un impact néfaste sur ces algues.

Le projet comprend plusieurs étapes clés :

- **Évaluation des Populations Actuelles**, le but étant de comprendre et quantifier les populations de laminaires existantes sur le site des Evens.
- **Prélèvement de plants sauvages et culture en bassin** à la station biologique de Roscoff par Philippe POTIN (Directeur de recherche CNRS) et son équipe. Les plants sauvages mis en culture proviennent de la côte sauvage (44). Leur reproduction est suivie pour permettre un ensemencement de substrats.
- **Réintroduction** des laminaires sur la zone des Evens et mise en place de programmes de **surveillance** hebdomadaires et d'inventaires détaillés annuels afin de suivre la croissance et la santé des plantules. La faune et flore associée à l'habitat de forêts de laminaires sera également étudiée afin de déterminer l'impact de l'expérimentation sur l'écosystème local ainsi que la capacité de rétablissement de la faune, flore et peuplements bactériologiques. Une zone d'influence étendue autour du site de réinsertion sera également étudiée après 3 ans afin de déterminer la pousse éventuelle de jeunes *Laminaria hyperborea* (recrutement) sur les secteurs proches.
- **Sensibilisation et Éducation** : L'expérimentation sera médiatisée sous plusieurs forme et par divers organismes : articles, interview, vidéos, ... La fondation 1Ocean réalise également deux films sur l'expérimentation, et suivra sa progression sur les trois années prévues.

4.1.2. Financement

Ce projet de restauration de l'habitat laminaires a été retenu par l'Agence de l'Eau lors d'un appel à projets de restauration des écosystèmes littoraux sur le secteur Loire-Bretagne. Le projet a ainsi bénéficié d'un soutien financier pour la période du projet, 3 ans. Des aides complémentaires sont apportées par la fondation de la mer, la fondation 1Ocean ainsi que par le Grand Port Maritime de Nantes Saint-Nazaire (GPMNSN).

4.1.3. Justification du choix d'espèce

- **Une population de cette espèce en bonne santé forme une forêt (ou « champs »)**
Laminaria hyperborea forme de vastes forêts sous-marines, fournissant habitat et abri pour une grande variété d'espèces marines, notamment des poissons, invertébrés et autres algues. Les populations de *L. hyperborea* créent une structure tridimensionnelle complexe qui soutient une grande biodiversité en offrant des niches écologiques pour différents organismes. Cette complexité structurelle est cruciale pour la restauration des écosystèmes marins dégradés. D'autres espèces similaires telles que *Saccorhiza polyschides*, tout en fournissant également un habitat en canopée, ne forme pas de forêts aussi étendues ou structurellement complexes, et ne sont pas associées à autant d'épiphytes que *L. hyperborea*, ce qui rend son rôle écologique moins impactant en termes de soutien à la biodiversité.
- **Espèce pérenne**
L. hyperborea présente une plus grande stabilité et résilience à long terme que l'autre principale laminaire de nos côtes, *Saccorhiza polyschides*. Elle peut vivre 12 à 15 ans, formant des forêts stables et persistantes qui servent d'habitats cohérents et de puits de carbone. Cette longévité de l'espèce permet également une meilleure et plus efficace séquestration du carbone en comparaison avec d'autres macroalgues structurantes, ainsi qu'une stabilité des écosystèmes qu'ils habitent et supportent. D'un autre côté, *S. polyschides* a une durée de vie plus courte, de moins d'un an, et a tendance à être plus opportuniste, dominant souvent les zones perturbées mais n'apportant pas les mêmes avantages écologiques à long terme.
- **Espèce encore présente sur le littoral étudié**
L. hyperborea est encore présente de manière éparse sur le récif rocheux des Evens, indiquant des conditions physico-chimiques et hydrologiques du site encore favorables à l'implantation et au maintien de l'espèce (voir figure 4).
- **Résistante comme sensible**
L. hyperborea est réputée pour sa grande résistance à l'action des vagues, ce qui en fait une espèce clé dans les environnements côtiers turbulents. Elle présente plusieurs adaptations à une forte activité hydrologique, telles que des haptères solides. Leur structure ramifiée permet de s'accrocher fermement au substrat, offrant ainsi une stabilité même dans des eaux agitées. *L. hyperborea* présente également un stipe flexible et résistant lui permettant de se plier sous les vagues sans se briser, ainsi que des lames difficiles à déchirer. Cette durabilité est cruciale pour survivre dans des environnements à haute énergie où d'autres espèces pourraient subir des dommages. Malgré cette résilience, *L. hyperborea* est sensible aux variations des paramètres physico-chimiques de son milieu (voir partie 4.1.), son déclin est preuve de cette sensibilité et souligne l'importance de préserver cette espèce.
- **Efforts de restauration antérieurs réussis**
Des projets de restauration antérieurs impliquant *L. hyperborea* se sont révélés une réussite dans diverses régions du monde (voir partie 3.4.1.). Les approches, connaissances et les techniques éprouvées par ces projets fournissent des informations et des méthodologies précieuses qui peuvent être appliquées aux efforts de restauration en France.

4.1.4. Demandes et autorisations

Dans le cadre de cette étude, la demande d'une Autorisations d'Occupation Temporaire (AOT) s'est révélée nécessaire, le placement de substrats en mer constituant une forme d'occupation d'espace public maritime. L'AOT a été délivrée par la Direction Départementale des Territoires et de la Mer (DDTM) pour une durée de 3 ans à compter du 1^{er} juin 2024 (fin le 31 mai 2027), durée prolongeable.

4.2. Méthodologie

4.2.1. Orientation générale de la méthodologie

L'objectif de la mission étant d'estimer l'efficacité de la méthode de restauration écologique proposée, à savoir la réinsertion de plants cultivés ex situ, l'approche **BACI** semble la plus appropriée pour ce projet.

La méthode "**Before After Control Impact**" (BACI) est une approche expérimentale largement utilisée en écologie pour évaluer les impacts des perturbations anthropiques ou naturelles sur les écosystèmes (R.H. GREEN, 1979 ; A.J. UNDERWOOD, 1991). Cette méthode repose sur la comparaison des conditions écologiques avant et après une intervention (Before-After) et entre des sites affectés et non affectés par cette intervention (Control-Impact). Elle permet de distinguer les effets spécifiques de la perturbation étudiée des variations naturelles de l'environnement.

En pratique, des données sont recueillies sur les paramètres écologiques pertinents (par exemple, la diversité des espèces, la qualité de l'eau, la couverture végétale, ...) à la fois avant et après l'événement perturbateur dans des sites témoins (contrôles) et des sites impactés. Les analyses statistiques de ces données permettent d'identifier et de quantifier les changements attribuables à l'intervention, en tenant compte des variations spatio-temporelles naturelles. La robustesse de la méthode BACI réside dans sa capacité à fournir des preuves solides et quantifiables des impacts écologiques, ce qui est crucial pour l'élaboration de politiques de conservation et de gestion des ressources naturelles.

S'il on rapporte cette méthode au projet de restauration de laminaires porté par ELV, en utilisant le même principe de comparaison avant-après et entre sites témoins et sites de restauration, cette approche permet de mesurer l'efficacité des interventions de restauration des laminaires sur les écosystèmes.

Dans ce contexte, les données écologiques ont été collectées avant et seront collectées tous les ans après l'action de réinsertion de sporophytes de *Laminaria hyperborea*, par l'étude de l'indice EQR du protocole ECBRS DCE (voir partie 4.3.4.a. suivante). Ce protocole étant réalisé sur le littoral guérandais annuellement par la DCE ainsi que par le MNHN de Concarneau, il sera possible de comparer les résultats de l'état écologique des masses d'eaux côtières d'autres sites à celui impacté par des efforts de restaurations menés par ELV.

Cette méthode permettra d'obtenir une comparaison entre site restauré et sites témoins prenant en compte les variations interannuelles ayant pu perturber ou exacerber la croissance des laminaires et faune/flore associée. Ainsi, la méthode BACI fournit une évaluation rigoureuse et quantifiable des effets des actions de restauration, permettant de vérifier leur succès et d'ajuster les stratégies de gestion en conséquence.

4.2.2. Prélèvement des laminaires parents

Dans le cadre de ce projet, la reproduction ex situ d'individus sauvages de *Laminaria hyperborea* est nécessaire, afin de produire des substrats (galets et cordes de coco) colonisés par l'espèce, pouvant par la suite être réintroduits dans le milieu naturel. Cette étape de culture est réalisée par le laboratoire de recherche de la station biologique de Roscoff, sous la direction de Philippe Potin (figure 32). Les plantules de laminaires ont de meilleurs taux de survie lorsque les plants parents ont un génome **sauvage** que celles élevées à partir de banques. Ce phénomène est en partie dû au meilleur potentiel d'adaptation des populations sauvages au site de réintroduction d'où elles proviennent, permettant une meilleure résilience aux stress environnementaux (G. OWENS et S. ROGERS, 2022).

Des individus de l'algue brune *L. hyperborea* ont été collectés en décembre 2023 au large de la presqu'île de Guérande en zone intertidale à infralittorale supérieure, à marée haute. Les individus sélectionnés et prélevés sont des sporophytes adultes capables de se reproduire d'environ 1m de hauteur, correspondant à 4-5 ans d'âge. Les crampons ont été délicatement détachés du substrat rocheux à l'aide d'un ciseau à bois utilisé comme levier. Une vingtaine de laminaires (stipe > 15cm) ont été prélevées sur différents plateaux rocheux de la côte sauvage (large du Croisic) aux Evens, afin de limiter l'impact sur les populations existantes.

En simultanée, les substrats d'ensemencement pour les jeunes sporophytes sont préparés. 500kg de galets de gneiss de 10 à 20cm sont récupérés depuis la carrière de la Clarté à la Roche-Bernard, ainsi que trois brins de corde de coco pour une longueur totale de corde de 200m. Ces substrats solides ont une surface sèche, propice à la fixation de lamine. Il sera toutefois important d'étudier sur le long terme leur croissance sur ces supports afin de déterminer la pertinence des substrats choisis ainsi que pour hiérarchiser leur efficacité.

Pour assurer une meilleure survie lors du transport vers le site de culture à Roscoff, les laminaires sauvages prélevées sont placées en bacs de pêche sous toile de jute humidifiée à l'eau de mer du site de prélèvement. Arrivées à destination, les laminaires sont préparées pour la culture en bassin. Les lames sont en premier lieu séparées du stipe ainsi que du méristème, puis nettoyées de tout épibionte, notamment des mollusques tenaces tels que les helcions (figure 33).



Figure 32: Arrivée d'ELV à Roscoff pour mise en culture des laminaires prélevées (© ELV)

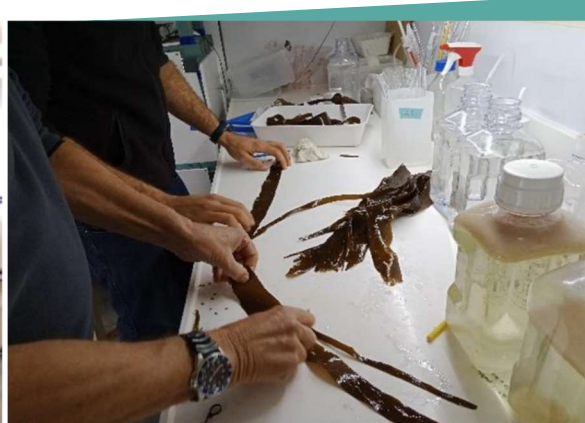


Figure 33: Nettoyage des laminaires (© ELV)

Après nettoyage, les laminaires sont placées en bassins de culture, galets et cordes de coco placés au fond. Les plants sont conservés en eau de mer filtrée à 0,45 μm à une température d'environ 13°C, sous aération constante et densité de flux photonique de 50 à 60 μmol de photons (éclairage LED variable, photopériode de 10 h de lumière et 14 h d'obscurité). Les bassins de culture sont soumis à un courant circulaire pendant 10 secondes toutes les heures (figure 34).



Figure 34: Bassin de culture des sporophytes parents et juvéniles, station biologique de Roscoff

4.2.3. Culture ex situ

Les Laminaires nordiques ont une croissance légèrement plus lente que d'autres espèces du genre *Laminaria*, avec une température en bassin optimale pour la pousse de 12 à 15°C. Les plants doivent être conservés à une température d'eau inférieure à 21°C, et supérieure à 10°C (J.J. BOLTON, K. LTINING, 2012. ELV, 2023). Philippe Potin est impliqué dans plusieurs projets majeurs portant sur les algues, notamment les projets IDEALS et GENIALSG. Le service commun des cultures d'algues de la station biologique offre des installations spécialisées : deux salles de culture en bassins maintenues à 13°C, un laboratoire et des armoires thermostatiques à température contrôlable. Le laboratoire contient également des hottes pour assurer des conditions de travail stériles, ainsi que des loupes, microscopes et autres appareils d'analyse pour assurer le suivi des cultures.



Usuellement, les plants sont observés en bassin cylindrique où les sporophytes sont maintenus en mouvement par des systèmes d'aération de fond ou de roues à aubes (figure 35) puis, à l'observation de zones sombres sur les lames (sporocystes), sont placés en armoire thermostatique à une température proche des 9°C afin de déclencher de manière contrôlée la sporulation.

Lors de la culture en bassin, les laminaires parents ont réalisé leur cycle de reproduction sans assistance en bassin de culture, la reproduction a été constatée lorsque des jeunes sporophytes ont été observés à la surface des galets et cordes de coco au fond des bassins. Les sporophytes produits non fixés lors du cycle de reproduction ont été placés flottants dans des cuves cylindriques d'une hauteur < 1m afin d'assurer un apport de lumière suffisant à tous les individus flottants, sous lampe de culture LED en bandes, pompe et bulleur (figure 35).

Figure 35: Bassin de culture cylindrique contenant les jeunes sporophytes non-fixés produits par les laminaires parents de Guérande (ELV, P. POTIN, 2024)

Les plantules fixées sur substrats ont pu croître en bassins de culture en eau circulante à 13°C, également sous éclairage LED variable, simulant le cycle journalier. La croissance des jeunes sporophytes s'est stabilisée à l'atteinte d'une taille de 5-10cm sur substrat rocheux, et de 15-20cm sur corde de coco. Les laminaires ont colonisé des galets de manière dense, atteignant des tailles maximales plus faibles. Les cordes de coco ont présenté après plusieurs mois de culture des sporophytes plus grands et épars (figure 36).



Figure 36: Sporophytes ensemencés sur substrats (galets à gauche, cordes de coco à droite) après 8 mois de culture ex situ à la station biologique de Roscoff

4.2.4. Inventaire initial sur site

a. DCE, protocole ECBRS et indice EQR

Afin de répondre aux besoins d'évaluation de la qualité et de l'état des écosystèmes des eaux côtières de la directive Natura 2000 dite « Habitats, Faune, Flore » ainsi que de la Directive Cadre Stratégie Milieu Marin (DCSMM), le développement de bioindicateurs forts et de protocoles standardisés s'est révélé nécessaire.

Afin d'harmoniser les nombreuses méthodes d'évaluation existantes, un travail de réflexion et de développement a été entamé par une collaboration entre la DDTM, l'Ifremer, l'Agence de l'eau, Le MNHN (station biologique de Concarneau), plusieurs instituts universitaires et bureaux d'études tels que bio littoral ainsi que des associations telles qu'ELV.

Ce travail de réflexion a été alimenté par la documentation et l'expérience de ces acteurs, ainsi que des programmes de surveillance DCE (financé par l'Agence de l'Eau Loire Bretagne et l'Ifremer), du réseau benthique d'Ifremer (ReBent, financé par le Conseil Régional de Bretagne et Ministère de la Transition Écologique, à travers la DREAL) des suivis annuels sur les secteurs Loire et Vilaine menés par ELV en coopération avec Bio littoral et d'inventaires ZNIEFF (DERRIEN-COURTEL S. et LE GAL A. 2022).

Un nouveau protocole fût proposé à l'issue de ce travail de réflexion, permettant d'obtenir une note de l'état écologique des eaux côtières, par l'étude des macroalgues structurantes et de la faune et flore associée : le **protocole « Etat de Conservation des Biocénoses des Roches Subtidales » (ECBRS)**, permettant le calcul d'un **indice** (d'une note) de qualité partiel, **Ecological Quality Ratio (EQR)**.

L'EQR est calculé en divisant l'indice de qualité d'un site par la médiane des indices de qualité des sites de référence. Les sites de Chausey, des Haies de la Conchée (Saint-Malo) et des Pierres Noires (Baie d'Etel) servent de références en raison de leurs scores élevés, représentant les masses d'eau les moins turbides du secteur Loire-Vilaine (du sud du Golfe du Morbihan au nord de Noirmoutier). **Une grille d'interprétation permet de qualifier l'état écologique d'une masse d'eau en fonction de son EQR.**

Ce protocole concerne les platiers rocheux subtidaux, propices à l'implantation de macroalgues. Il doit permettre **d'évaluer l'état de conservation et la fonctionnalité de ces habitats.**

Le protocole ECBRS s'appuie sur 8 paramètres, répartis en 3 volets : l'étude des algues de l'infralittoral supérieur, le suivi faune et cirralittoral côtier (facultatif) et la structure de l'habitat :

- La hauteur des limites de l'étagement phytal
- La composition et la densité en espèces de macroalgues structurantes (laminaires, sargasses, cystoseires, ...)
- La composition et densité en espèces d'algues caractéristiques
- La composition et densité en espèces d'algues opportunistes
- La composition et densité en espèces faunistiques
- Détermination de l'âge des laminaires par mesure et étude des stipes
- Etude des stipes de *Laminaria hyperborea* et de leurs épibioses / épiphytes
- Etude de la structure de l'habitat (mesure de la longueur et état physiologique)

La période optimale pour la réalisation de ce transect s'étend de mi-mars à mi-juillet. Le protocole permet l'obtention de données qualitatives et quantitatives précises et représentatives. Afin de collecter les données nécessaires au calcul de l'indice EQR, des transects sous-marins à bout plombés (0,6 à 1kg à <10m) sont installés sur la zone d'étude, des quadrats de 0,25m² (50cm x 50cm) également plombés y sont disposés, séparés par une distance égale. Des fiches de relevés, racks à prélèvements et mètre ruban sont nécessaires pour effectuer les mesures.

b. Méthode

Le site de réintroduction des Evens a été scindé en 4 transects : deux correspondants aux limites extérieures de la zone d'étude (12x40m), deux en intérieur. Ces transects sont espacés de 3m (± 1 m), ils ont été représentés visuellement par la pose de cordes lestées par des gueules et signalées en surface par des bouées ou balises flottantes (figure 37). Cette disposition permet aux plongeurs de suivre aisément les transects géoréférencés, ainsi que de signaler les activités scientifiques en surface pour l'équipe de sécurité et autres éventuels usagers nautiques.

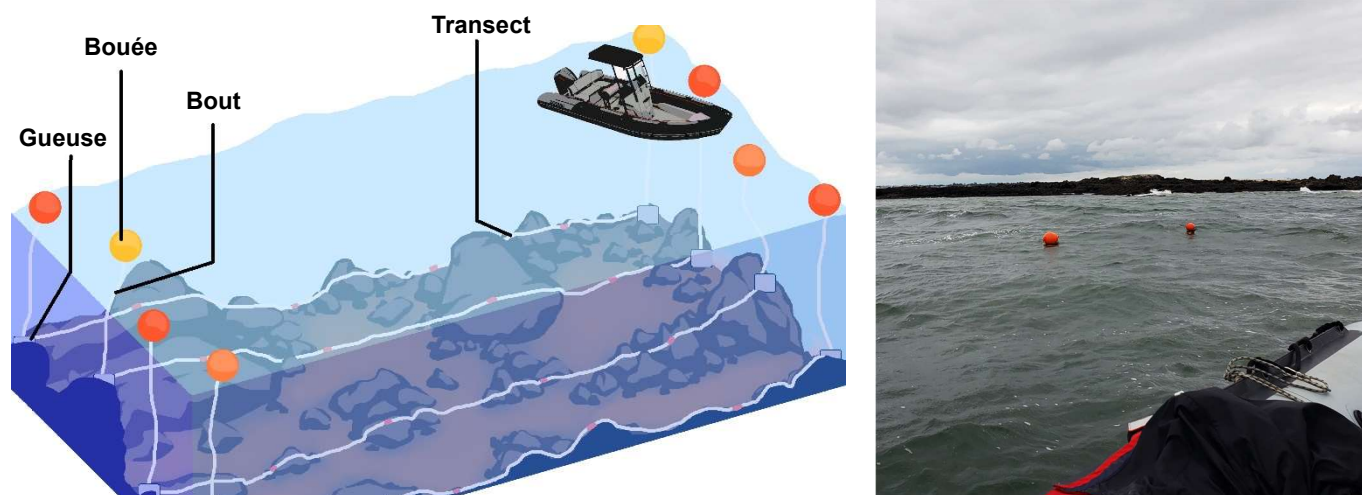


Figure 37: Représentation des transects sous-marins et photographies terrain

Le long des 4 transects, le protocole ECBRS a été effectué par le bureau d'étude Bio littoral. Sur le site de réintroduction sélectionné, *Laminaria hyperborea* est encore présente (résultats de l'inventaire en annexe 5). En outre, cette plongée a permis la production d'une représentation de la topographie du site : un dessin schématique à main levée (figure 38). Ce modèle, en addition de photographies sous-marines (annexe 6), ont permis une meilleure compréhension du site pour les plongeurs effectuant le travail de réinsertion de jeunes sporophytes, ainsi que l'identification de sites à favoriser pour ce projet.

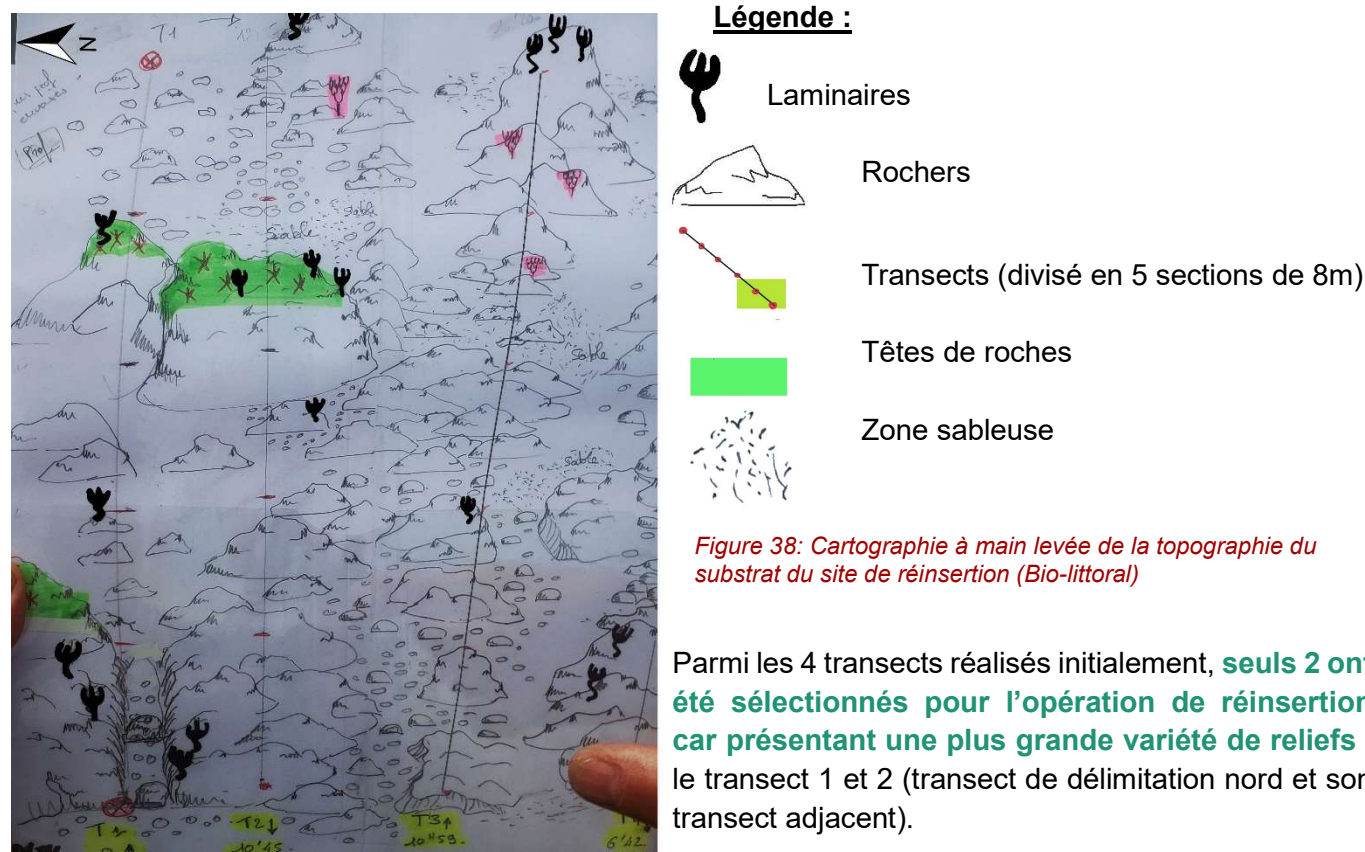


Figure 38: Cartographie à main levée de la topographie du substrat du site de réinsertion (Bio-littoral)

Parmi les 4 transects réalisés initialement, **seuls 2 ont été sélectionnés pour l'opération de réinsertion car présentant une plus grande variété de reliefs** : le transect 1 et 2 (transect de délimitation nord et son transect adjacent).

4.2.5. Réinsertion en milieu naturel

a. transport



Les substrats ensemencés en sporophytes ont été récupérés à la station biologique de Roscoff le 24 juillet 2024. Les galets ensemencés ont été chargés en bacs de pêche, les cordes de cocos sont restées sur leur cadre de culture (figure 39). Les bacs ont été fournis par le bureau d'étude Bio-littoral, ainsi que des pêcheurs pratiquant en baie de la Baule.

Figure 39: Récupération des galets ensemencés et mise en bac de pêche pour transport, Station biologique de Roscoff (© A. RUY)

Les galets ont été disposés en bac de sorte à limiter le contact, afin de ne pas détruire par écrasement les jeunes sporophytes fixés. De manière à limiter la dessiccation des sporophytes lors du transport, les bacs ainsi que les cadres à cordes de coco ont été recouverts d'une toile de jute humidifiée, les bacs ont également été empilés dans le fourgon de transport (figure 40 ci-dessous).



Figure 40: Bacs de pêche chargés en galets ensemencés (gauche), recouverts de toile de jute humidifiée (centre) et chargés en fourgon pour le transport (droite).

Considérant les importantes durées de trajet (environ 3h aller simple), les bacs et cordes ont passé une nuit en fourgon. Celui-ci a été ouvert afin de permettre une bonne circulation de l'air et la conservation de températures basses, les bacs ont été arrosés d'eau de mer provenant de Pénestin. Une partie des sporophytes de *L. hyperborea* non-fixés sur substrats d'expérimentation (fixés sur les parois ou le liner des bacs de culture, ainsi que les pieds non-fixés) sont remis en culture à la station biologique de Roscoff, afin de permettre d'autres expérimentations voire une autre opération de transplantation à la saison prochaine.

b. Opération de réinsertion

L'opération de réinsertion a eu lieu le 25 juillet 2024 après plusieurs jours d'anticyclone, sous temps dégagé et houle calme (vent <3m.s-2, vagues <0,3m). Les bacs de pêches, cadres de cordes de coco ainsi que le matériel de plongée ont été chargés sur une barge ostréicole afin de faciliter la manipulation sur site (photothèque, annexe 7). Les laminaires sur navire ont été arrosées d'eau de mer de la Baie du Poulguen toutes les heures dans l'attente de leur réinsertion.

Des transects ont été mis en place de la même manière que lors de l'inventaire initial (partie 4.2.4.b.). Conformément à la décision prise à la suite de la production de la carte descriptive de la topographie du terrain (figure 38), seul deux transects ont été posés afin de couvrir la zone déterminée comme étant la plus favorable à la réinsertion de *L. hyperborea*. Cette sélection se justifie par leur plus riche variété en reliefs, failles et têtes de roches.

Le long des transects, les 14 bacs (7 par transect) contenant les galets ont été descendus en mer tous les 4-5m à l'aide de bouts en nœuds coulants (descente progressive, limitation des dégâts aux sporophytes). Les bacs ont été signalés en surface à l'aide de bouées reliées par des bouts (figure 41 ci-dessous).

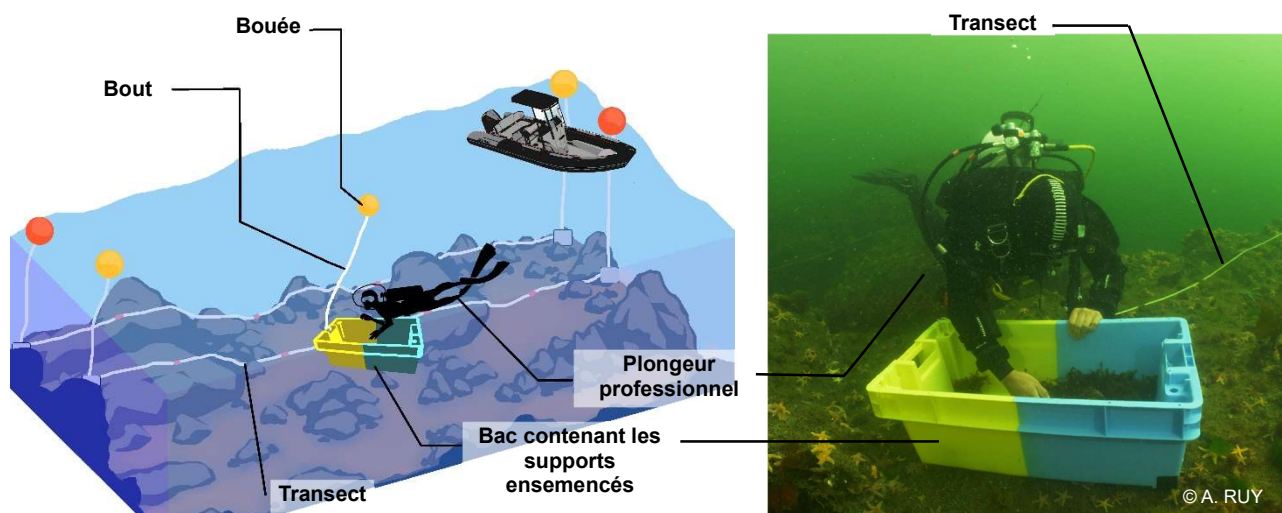


Figure 41: Représentation de la méthodologie de réinsertion et photographies terrain

Après mise en place des transects et bacs, les plongeurs professionnels de Bio-littoral ont réalisé la mise en place des galets. Ces derniers ont été positionnés à la main en failles, creux, et autres recoins afin d'assurer leur stabilité vis-à-vis de la houle. Les trois sections de cordes de coco ont été déroulées autour de têtes de roches et reliefs, puis nouées et sécurisées à l'aide de chambres à air en caoutchouc (figure 42 ci-dessous). En raison des forts apports d'eau douce en lien avec les fréquentes pluies du printemps-été 2024, le site de réinsertion a connu un important recrutement de moules sur les hauts de roches (photographies en annexe 6). Les galets ensemencés ont été placés sous cette ceinture de moule, à une bathymétrie où de jeunes laminaires sont encore présentes, signifiant une suffisamment bonne ascendance de lumière pour leur croissance.



Figure 42: Galet ensemencé placé en faille (gauche) et corde de coco ensemencée enroulée autour de roches (Les Evens, © A. RUY)

4.3. Effets attendus

Concernant l'expérimentation, ELV espère une pousse progressive des sporophytes jusqu'à ce qu'ils atteignent une taille de jeune adulte après plusieurs années. La première plongée de surveillance réalisée le 19 août (après plusieurs jours de houle importante) a révélé les substrats ensemencés toujours en place, sporophytes intacts, ce qui est prometteur pour la suite. Après deux années, la taille des sporophytes déterminera leur capacité de reproduction. Au bout de 3 ans, au moins une reproduction avec succès des jeunes laminaires transplantées est espérée, ainsi que le recrutement d'une nouvelle génération de jeunes sporophytes sur les substrats rocheux subtidaux alentours aux Evens. Le résultat espéré est la formation d'un champs de laminaires en croissance et en bonne santé, capable de se reproduire et coloniser naturellement les substrats rocheux des Evens, voire de toute la baie du Pouliguen.

Les effets plus globaux attendus de ce projet de restauration d'une forêt de laminaires sont multiples et impactent la biodiversité marine comme les communautés humaines.

D'un point de vue **écologique**, une recolonisation progressive des laminaires implique une amélioration de l'habitat naturel de nombreuses espèces aquatiques, leur restauration devrait donc induire une augmentation de la biodiversité marine. Les champs de laminaires reconstitués pourront de nouveau servir de refuge et de site de reproduction pour de nombreuses espèces de poissons, crustacés et invertébrés. L'étude de la faune et de la flore associées aux laminaires lors des années de surveillance du projet pourra également permettre d'évaluer l'efficacité de l'expérimentation ainsi que la vitesse et l'ampleur du rétablissement écologique de ce projet.

Cette régénération devrait également améliorer la productivité primaire de la zone, renforçant les chaînes alimentaires locales. Les laminaires, en tant qu'organismes photosynthétiques, joueront un rôle clé dans l'absorption du CO₂, contribuant à l'atténuation des effets du changement climatique tout en améliorant la qualité de l'eau par la réduction des nutriments excédentaires. Par ailleurs, les forêts de laminaires ayant la capacité de protéger les côtes contre l'érosion en atténuant l'énergie des vagues, elles auront un impact bénéfique sur la stabilité des littoraux.

Sur le plan **socio-économique**, la restauration des laminaires pourrait revitaliser la pêche locale en offrant des habitats cruciaux pour des espèces commercialement importantes, tout en favorisant le développement d'activités liées à l'écotourisme, telles que la plongée sous-marine et les visites éducatives. À plus long terme, la reconstitution des laminaires pourrait aussi encourager de nouvelles initiatives de gestion durable des ressources marines, renforçant ainsi la résilience des communautés locales face aux défis environnementaux et économiques.

4.4. Communication autour du projet

4.4.1. Conférences et réunions

Ce projet a été porté et présenté par ELV depuis 2022. Nombre de conférence et réunions présentant ses enjeux, sa méthode ainsi que les résultats attendus ont été tenues entre 2022 et 2024. Le projet a ainsi été exposé lors de conférences à Brest à la communauté scientifique, lors de la manifestation les « Océanes Atlantique / La Baule » aux usagers et élus, ainsi que lors de multiples réunions avec les instances publiques concernées par le projet (DDTM, COREPEM, ...). Les usagers ont également été consultés, notamment les clubs de plongée de la presqu'île de Guérande, à qui une participation aux missions de terrain a été proposée, mais aussi les pêcheurs et plaisanciers fréquentant la Baie du Pouliguen. Le projet a également été à plusieurs occasions présenté en article de presse (Ouest France figure 42, We Demain, l'Echo de la presqu'île, ...) à la suite d'interviews.

Le projet a reçu un accueil très favorable par tous les acteurs consultés et informés sur la restauration des laminaires. Les services publics tels que la DDTM ainsi que les ports maritimes ont apporté un soutien engagé au projet ainsi qu'aux opérations terrain nécessaires à leur réalisation. Ce projet porte en effet pour objectif principal la restauration d'un écosystème originellement riche. Sa réussite permettrait le renouveau de la biodiversité marine et côtière, au bénéfice des activités de pêche et touristiques locales (C. PINEIRO-CORBERIRA et al., 2022).

Bientôt une forêt maritime au large du Pouliguen ?

Les laminaires, une espèce d'algues, ont presque disparu de la baie du Pouliguen. Une expérimentation est lancée pour tenter de restaurer cette forêt maritime, un atout face au changement climatique.

Pourquoi ? Comment ?

Quelle est cette expérimentation au large de La Baule ?

C'est une forêt d'un tout autre genre qui est en train de naître, au large de la baie du Pouliguen. « Une expérimentation unique en France, novatrice », lance Jean-Claude Ménard, président de l'association Estuaire Loire Vilaine, qui porte ce projet avec de nombreux partenaires.

Dans un espace d'environ 500 m² en zone Natura 2000, protégé par l'île des Evens, cette opération de restauration doit permettre à un massif d'algues, des laminaires, de reprendre racine, entre 4 et 5 m de profondeur.

Comment cette restauration prend forme ?

Six personnes, dont quatre plongeurs, étaient sur le pont, à 3 km de la côte bauloise, jeudi 25 juillet. Sur une barge, des caisses renferment les précieuses algues, fixées à 200 m de cordages et plusieurs kilos de galets. Des spécimens de laminaires hyperborea, prélevés ici même.

« Elles se sont reproduites et ont été élevées sur ces supports dans des bassins, à la station biologique de Roscoff (Finistère) », explique le président.



Jean-Claude Ménard, président d'Estuaire Loire Vilaine, présente l'un des nombreux échantillons d'algues mises à l'eau lors de cette expérimentation. Dans trois ans, ces plantules de quelques centimètres pourront mesurer jusqu'à 1,50 m.

(Photo : OUEST-FRANCE)

Figure 43: Extrait d'un article présentant le projet de restauration de laminaires (Ouest France, 2024)

4.4.2. 1Ocean

La fondation 1Ocean est un projet international d'exploration scientifique mené avec l'UNESCO. Son objectif principal est d'étudier les océans, les comprendre par la science, et diffuser ces informations afin de sensibiliser le public à la préservation de l'environnement. Dans ce cadre de mise en valeur des écosystèmes marins et de leur richesse, la fondation 1Ocean réalise un court métrage concis (une douzaine de minutes) présentant la première année du projet, ainsi qu'un long métrage d'environ une heure du projet sur 3 ans. Ce long métrage présentera les prises effectuées par le cadreur sous-marin professionnel Armel RUY. Il comprendra des interviews des acteurs du projet tels que Jean-Claude MENARD, porteur du projet ELV, Philippe POTIN de la station biologique de Roscoff ou encore Anne-Laure BARRILET du bureau d'étude Bio-littoral. Il exposera les étapes de reproduction et de culture de sporophytes en bassin à Roscoff, la réinsertion en milieu naturel des substrats ensemencés ainsi que les inventaires réalisés par ELV et Bio-littoral. Ce long-métrage permettra de communiquer à grande échelle le projet de restauration des champs de laminaires porté par ELV ainsi que sa méthode et ses résultats.

5. Discussion

Cette expérimentation représente la continuité logique des autres projets d'études sur la disparition des laminaires menés par ELV, en apportant une réponse au déclin constaté.

Forte de nombreuses années d'étude des laminaires, l'association ELV possède une vaste expérience en expertise naturaliste subtidale pour des projets de gestion et d'étude côtière à grande échelle, impliquant divers partenaires professionnels. Ce projet s'est réalisé en coopération avec des experts et spécialistes performants et compétents : équipe de Bio-littoral, chercheurs de la station biologique de Roscoff, ... Ce travail scientifique collectif a permis une rigueur scientifique essentielle pour bâtir la force du projet ainsi que sa crédibilité, en addition à l'augmentation des chances de succès et de la reproductibilité de l'étude. Ce projet a l'avantage d'être porté par une association bénévole impliquée et motivée, permettant la mise en place rapide d'actions ainsi qu'un échange des compétences et des connaissances de chacun. ELV entretient également des relations positives avec ses partenaires et acteurs locaux concernés par l'étude. Ces bonnes relations locales ont permis une limitation des coûts lors de l'étude grâce aux personnes nous ayant gracieusement prêté du matériel, et celles ayant participé bénévolement aux missions. Au-delà du bénévolat et services entre personnes, ce projet a été réalisé suivant un protocole simple sans usage de matériel complexe ou coûteux, afin d'assurer l'accessibilité et la reproductibilité de l'expérimentation.

Enfin, malgré le manque d'accès aux travaux universitaires, fermés et/ou privés, la bibliographie constituée pour ce rapport, uniquement composée de ressources ouvertes au public, a permis d'établir une base de données pertinente pour la bonne compréhension et la solidité du projet.

Bien que cette étude ait été réalisée comme initialement souhaitée et avec des résultats pour le moment prometteurs, elle présente certaines limitations qu'il est important de reconnaître. Ces points faibles doivent être pris en considération pour évaluer la portée et la généralisation des conclusions.

Cette étude se rapproche des projets de restauration forestière dans sa philosophie et sa méthodologie, mais est toutefois bien plus complexe car soumise aux aléas maritimes. 2024 s'est présentée particulièrement défavorable au projet nécessitant des sorties en mer sous anticyclone maintenus, avec un printemps et un été exceptionnellement pluvieux (météo France). Ces conditions ont provoqué une alternance de semaines de houles sous mauvais temps et des journées d'anticyclones brefs où l'eau de mer était particulièrement turbide. Les opérations d'inventaire initial et de réinsertion des substrats ensemencés en mer ont ainsi été plusieurs fois repoussés entre juin et août dans l'attente d'une météo et d'une mer plus clémentes. Les brèves périodes favorables aux opérations ont également dû être mises en relation avec les disponibilités des plongeurs de Bio-littoral. De plus, par son statut d'association, ELV a fait face à des problèmes d'organisation inhérents au statut de bénévole de ses adhérents. Certaines étapes du projet ont ainsi été légèrement retardées dépendamment des disponibilités de chacun.

La restauration écologique a pour objectif de remettre en place un écosystème sur la trajectoire d'une récupération complète autonome. Bien que les efforts de restauration puissent souvent mettre un écosystème dégradé sur une voie de rétablissement initiale relativement rapide, le retour complet de l'écosystème peut nécessiter des années. Ainsi, même si certaines activités de restauration peuvent être achevées, le processus global de restauration continue généralement à mesure que l'écosystème se rétablit et mûrit (SER, 2024). Il est possible que l'écosystème ne retrouve pas son état écologique antérieur, les réalités écologiques actuelles telles que le changement climatique mondial pouvant amener les laminaires à se développer à un rythme et à une amplitude différente de ce qui fut observé ces dernières dizaines d'années. Pendant cette période de rétablissement, des obstacles et/ou événements destructeurs peuvent surgir de manière imprévue. Les tempêtes extrêmes comme Xynthia en 2011 sont caractérisées par de forts vents et une houle ravageuse pour les algues structurantes. Les événements climatiques exceptionnels de cette catégorie (typhons, cyclones et tempêtes) causent d'importants dégâts aux canopées de laminaires, arrachées par les violents mouvements d'eau. Les laminaires arrachées s'échouent au large ou sur les côtes, et les rares pieds survivants voient leur fronde gravement endommagée voire détruite, ne laissant derrière que le stipe (K-T. LEE et al. 2023).

Ces évènements remettent également en suspension de grandes quantités de matières inorganiques pouvant recouvrir et nécroser les tissus algaux (voir partie 3.5.2.b.) et augmenter la turbidité dans la colonne d'eau, également au détriment des laminaires. Dans le cadre de cette étude, des tempêtes violentes peuvent également causer des dommages aux supports ensemencés. En effet une forte houle pourrait retourner les galets ce qui écraserait et détruirait les jeunes sporophytes (comme ce qui est arrivé à certains projets Green gravel), ainsi que couper les cordes de coco enroulées autour des têtes de roches, les éloignant de leur habitat favorable. Des périodes de pluies intenses peuvent également engendrer des apports d'eau douce et de sédiments importants en mer, impactant la turbidité.

Au fur et à mesure des avancées scientifiques concernant les impacts des produits d'entretien sur la santé humaine, animale et végétale, de nouvelles compositions aux produits utilisés sont développées. Les peintures antifouling contemporaines « moins toxiques » destinées à protéger les navires face au développement d'algues et animaux fixés contiennent entre autres des métaux lourds et pesticides toxiques (voir partie 3.5.4.). Ces composés herbicides sont avérés nocifs pour les laminaires, une forte activité nautique saisonnière ou des évènements nautiques (régate, compétition, ...) pourraient engendrer une propagation de pesticides destructeurs pour les sporophytes réintroduits et natifs.

De multiples facteurs relevant des évènements météorologiques et biotiques peuvent engendrer des invasions monospécifiques. Les espèces envahissantes remplacent par compétition les autres espèces, et appauvrissent le milieu rapidement (voir exemple des oursins en Californie, partie 3.5.1.). Les suivis ELV ont déjà observé une colonisation des Evens par des oursins, étoiles de mer ou encore ophiures. Par ailleurs la réinsertion des laminaires s'est réalisée lors d'une période d'intense recrutement de moules, attirées par les dépôts de sédiment sur les roches, venant des pluies et crues soutenues de 2024.

Il est essentiel de considérer, lors d'une action de restauration écologique, les causes initiales de la perte de biodiversité restaurée par le projet. Ici les causes du déclin ne sont pas quantifiées et sourcées avec précision, toutefois les hypothèses portées par ELV sont supportées par des corrélations indéniables.

La mise en place aux Evens d'une sonde multiparamétrique (voir partie 3.3.1.), associée à un suivi temporel précis des évènements potentiellement néfastes pour les laminaires (dragages, blooms, tempêtes, vagues de chaleur, ...), permettra de poser des corrélations quantifiées, ainsi que la mesure de leur impact sur les laminaires suivies pour l'expérimentation.

La question se pose ensuite de notre capacité à agir sur les causes identifiées responsables du déclin des laminaires sur les côtes de la presqu'île de Guérande. Dans le cas du dragage, plusieurs alternatives sont envisageables afin de réduire leur impact sur les populations de laminaires. La première possibilité est un simple arrêt des dragages en amont des périodes critiques au cycle de vie des laminaires (printemps), soit lors des mois d'octobre-novembre. Rejeter les sédiments sur un site loin en mer (clapage), ou sur une plaine sablo-vaseuse et non pas sur les substrats rocheux permettrait également une limitation des impacts sur la faune et flore. Une valorisation à terre des sédiments (sables pour enrobés, argiles pour briques, ...) permettrait une réduction des rejets en mer ainsi qu'une solution à plus long terme pour évacuer ces sédiments revenant inévitablement obstruer les canaux de navigation.

Si le changement climatique (augmentation des températures, tempêtes, ...) se révèle être l'élément perturbateur des laminaires principal, il sera primordial d'identifier et déployer des leviers de lutte face à cette tendance s'aggravant chaque jour.

6. Conclusion

Les efforts de restauration et de protection des forêts de laminaires à travers le globe sont cruciaux pour assurer la préservation de ces écosystèmes côtiers uniques et des services écologiques et économiques qu'ils offrent. Ce projet propose un plan complet pour restaurer les zones de laminaires dégradées de l'île des Evens dans la du Pouliguen – La Baule. En réalisant ce projet, ELV contribue à la préservation des écosystèmes de forêts de laminaires et à la redynamisation écologique et économique du littoral, tout en offrant une réponse concrète aux exigences européennes et internationales de protection et restauration des écosystèmes marins français. Dans la continuité des années de suivis cartographiques des champs de laminaires menés par ELV entre les estuaires de la Loire et de la Vilaine, ce projet vient offrir une piste de rétablissement face au grave déclin de cet écosystème. Cette expérience, novatrice en France, a consisté au prélèvement de *Laminaria hyperborea* sur la côte sauvage, au suivi de leur reproduction en bassin de culture à la station biologique de Roscoff, reproduction qui s'est suivie par l'ensemencement de substrats (galets et cordes de coco) par les jeunes sporophytes produits. Cette première année d'expérimentation s'est poursuivie par la réinsertion sur le site des Evens des jeunes laminaires fixées sur substrats par l'équipe de plongeurs professionnels du bureau d'étude Bio-littoral. A ce jour, les substrats ensemencés réintroduits sont intacts et en bonne santé, signe prometteur de survie et d'implantation pour l'avenir. La croissance des laminaires, ainsi que l'évolution de la variété spécifique du site d'expérimentation seront suivies sur une période de trois ans. En parallèle de ce suivi, l'association ELV cherchera à identifier et enrayer les éléments sources du déclin des laminaires. Les objectifs sont multiples : étudier la croissance et la potentielle reproduction des *L. hyperborea* réintroduites, tester les supports d'ensemencement les plus efficaces, identifier et prévenir les causes de déclin des laminaires.

Si cette expérimentation se révèle être une réussite vis-à-vis de nos attentes, ELV souhaite réaliser d'autres opérations de réinsertion en autres lieux (potentiellement plus favorables) afin de constituer des **cœurs de populations de laminaires** en bonne santé et fertiles, capables de coloniser les substrats rocheux subtidaux de nos côtes. Cette étude est également en concordance avec la récente loi européenne pour la restauration de la Nature, et permettrait de **justifier la mise en place d'une AMP** offrant davantage de protection à la biodiversité fragile et en déclin de la presqu'île de Guérande.

Un essai de culture de laminaires mené en bassin de mytiliculture en parallèle du projet n'a pas abouti dans le cadre de ce projet de restauration écologique. En effet les fortes pluies du printemps et de l'été 2024, couplées à des défaillances de l'étanchéité des bassins de test ont entraîné une trop forte baisse de la salinité, causant un échec de la reproduction puis la mort des laminaires parents. Cet essai ouvre toutefois une piste d'exploration intéressante tant pour la préservation des laminaires et de la bonne qualité des eaux que pour les activités de mytiliculture. Une association entre culture de moules et laminaires telles que *L. hyperborea* ou *saccharina latissima* permettrait une meilleure production de coquillages liées à l'assainissement de l'eau par les algues. Cela ouvre ainsi de nouvelles possibilités de commerce et d'emploi, en addition à l'ouverture d'un cadre de recherche et de culture intéressant pour ELV. Cette idée a longuement été étudiée et développée par Thierry CHOPIN. Le concept **d'Aquaculture multitrophique intégrée (AMTI)** s'inspire directement du fonctionnement de la chaîne alimentaire naturelle, et propose de cultiver algues, coquillages (et/ou crustacés) et poissons simultanément afin d'aboutir à une meilleure acceptabilité environnementale et économique (T. CHOPIN et al. 2013).

De plus, il est également possible d'envisager un fonctionnement industriel en mer inspiré de la régénération naturelle du milieu. Se présente ainsi l'approche de **l'économie bleue régénérative**, visant à exploiter des ressources marines de manière durable et restauratrice, tout en préservant les écosystèmes aquatiques pour les générations futures. Ce modèle est atteignable à travers des pratiques d'exploitation limitant les impacts négatifs sur la ressource naturelle (éco-tourisme, pêche durable, ...) couplées à la mise en place d'aires marines protégées à réglementation forte pour assurer le renouvellement de la ressource (R. LE GOUVELLO et F. SIMARD, 2024).

7. Bibliographie

7.1. Rapports, thèses et documents

- A. CASTRIC-FEY, A. GIRARD-DESCATOIRE, M.-TH. L'HARDY-HALOS, S. DERRIEN-COURTEL, (A.D.M.S.), 2001. « La vie sous-marine en Bretagne - Découverte des fonds rocheux. ».
- A. ESCANDELL-WESTCOTT, R. RIERA et N. HERNANDEZ-MUNOZ, 2023. « Posidonia oceanica restoration review: Factors affecting seedlings », Journal of sea Research volume 1910.
- A. VELA, 2024. « Fonctionnement et production primaire des herbiers à Posidonia oceanica (L.) Delile en Méditerranée » Biodiversité et Ecologie. Université de Corse Pascal Paoli, 2006.
- A.J. UNDERWOOD, 1991. « Beyond BACI: Experimental designs for detecting human environmental impacts on temporal variations in natural populations », Australian Journal of Marine and Freshwater Research volume 42, issue 5, p.569-587.
- A.M. EGER, E.M. MARZINELLI, R. BEAS-LUNA, C.O. BLAIN, L.K. BLAMEY, J.E.K. BYRNES, P.E. CARNELL, C.G. CHOI, M. HESSING-LEWIS, K.Y. KIM, N.H. KUMAGAI, J. LORDA, P. MOORE, Y. NAKAMURA, A. PÉREZ-MATUS, O. PONTIER, D. SMALE, P.D. STEINBERG et A. VERGÉS, 2023. « The value of ecosystem services in global marine kelp forests », Nature n°14, article 1894.
- B. WEAR, N.E O'CONNOR, M.J. SCHMID et M.C. JAKSON, 2023. « What does the future look like for kelp when facing multiple stressors? » Ecology and evolution, volume 13, issue 6.
- BENCIVENGO P., BARREAU C., VERDET F., 2023. « Pollution des plages et des cours d'eau par les biomédias utilisés dans le traitement des eaux usées », Surfrider Foundation Europe.
- BIO LITTORAL, 2013. « Habitat remarquable : les forêts de laminaires - Rôle fonctionnel dans la région? »
- C. HARTVIG, N.M. JØRGENSEN, K.M. NORDERHAUG, E. WAAGE-NIELSEN, 2003. « Species distribution and habitat exploitation of fauna associated with kelp (Laminaria Hyperborea) along the Norwegian Coast », Cambridge University Press.
- C. LÜTZ, L. DI PIAZZA, J. FREDERSDORF et K BISCHOF, 2015. « The effect of ultraviolet radiation on cellular ultrastructure and photosystem II quantum yield of Alaria esculenta (L.) Greville from Spitsbergen (Norway) », Polar biology volume 39, p.1957-1966.
- C. PERGENT-MARTINI, S. ACUNTO, S. ANDRÉ, E. BARRALON, S. CALVO, I. CASTEJÓN-SILVO, J.M. CULIOLI, L. LEHMANN, H. MOLENAAR, B. MONNIER, P. OBERTI, A. PEY, L. PIAZZI, M.C. SANTONI, J. TERRADOS, A. TOMASELLO, G. PERGENT, 2022. « Posidonia oceanica restoration, a relevant strategy after boat anchoring degradation? », Conference: 7th Mediterranean Symposium on Marine Vegetation, Genève, Italie.
- C. PINEIRO-CORBEIRA, S. BARRIENTOS, R. BARRIERO, R. DE LA CRUZ-MODINO, 2022. « Assessing the importance of kelp forests for small-scale fisheries under a global change scenario », Frontiers in Marine Science volume 9, section Marine fisheries.
- COMMISSION EUROPEENNE, 2022. « Proposition de règlement du parlement européen et du conseil relatif à la restauration de la nature ».
- CORAL GUARDIANS, 2021. « RAPPORT D'ACTIVITÉS 2021 ».
- D. A SMALE, T. WERNBERG, A. YUNNIE, T. VANCE, 2014. « The rise of Laminaria ochroleuca in the Western English Channel (UK) and comparisons with its competitor and assemblage dominant Laminaria hyperborea », Marine Ecology 36, p.1033-1044.
- D.F. ARAÚJO, E. PONZEVEIRA, N. BRIANT, J. KNOERY, T. SIREAU, M. MOJTAHID, E. METZGER et C. BRACH-PAPA, 2019. « Assessment of the metal contamination evolution in the Loire estuary using Cu and Zn stable isotopes and geochemical data in sediments », Marine Pollution Bulletin, volume 143, p.12-23.
- D.T. PUGH, 2004. « Tides, surges, and mean sea levels ».
- DERRIEN-COURTEL S. et LE GAL A., 2022. « Protocole ECBRS - Etat de Conservation des Biocénoses des Roches Subtidales ».
- Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement des Pays de la Loire , 2012. « ÉTUDE RELATIVE A LA GESTION DURABLE DU TRAIT DE COTE DE LA REGION DES PAYS DE LA LOIRE - fascicule USII de la pointe du Castelli a la pointe de Chemoulin »

- E. GOUBERT, E. FRENOD, P. PEETERS, P. THUILLIER, H-J VESTED, N. BERNARD, V. VERON et L. ALLANO, 2008. « Caractérisation du fonctionnement hydrosédimentaire de l'estuaire de la Vilaine à partir d'études bathymétriques et altimétriques (Altus) ».
- E. KELLY, 2005. « The role of kelp in the marine environment ». Irish Wildlife Manuals 17.
- E.J SIMONSON, R.E. SCHEIBLING et A. METAXAS, 2015. « Kelp in hot water: I.Warming seawater temperature induces weakening and loss of kelp tissue » Marine Ecology Progress n°537.
- ELV, 2013. « Le banc de Guérande, la faune et la flore ».
- F. CAYOCCA, 2012. « Golfe de Gascogne, Etat physique et chimique - Caractéristiques physiques – Turbidité ».
- F. GEVAERT, C. LEBLANC, G. LEVAVASSEUR, P. POTIN et F. VIARD, 2006. « Dynamique des champs de Laminaria digitata, ressource algale en Bretagne : Impacts biotiques, abiotiques et anthropiques », Biodiversité et changement global, colloque de restitution, p.37-45.
- F.C. KÜPPER, D.G. MÜLLER, A.F. PETERS, B. KLOAREG et P. POTIN, 2002. « Oligoalginat Recognition and Oxidative Burst Play a Key Role in Natural and Induced Resistance of Sporophytes of Laminariales », Journal of Chemical Ecology volume 28, p.20057-2081.
- G. MANCINI, D. VENTURA, E. CASOLI, A. BELLUSCIO et G.D. ARDIZZONE, 2022. « Transplantation on a Posidonia oceanica meadow to facilitate its recovery after the Concordia shipwrecking », Marine Pollution Bulletin volume 179.
- G. MCFIGGANS, H. COE, R. BURGESS, J. ALLAN, M. CUBISON, M.R. ALFARRA, R. SAUNDERS, A. SAIZ-LOPEZ, J.M.C. PLANE, D. WEVILL, L. CARPENTER, A.R. RICKARD, et P.S MONKS, 2004. « Direct evidence for coastal iodine particles from Laminaria macroalgae – linkage to emissions of molecular iodine ». Atmospheric Chemistry and Physics volume 4, issue 3, p.701–713.
- G. OWENS et S. ROGERS, 2022. « KelpGen: Genomic Tools for Preserving and Restoring Canada's Kelp Forests », University of Victoria (UVic).
- GIP Loire Estuaire, 2018. « Les niveaux d'eau de la Loire en amont de Nantes ».
- GIP Loire Estuaire, 2018². « L'essentiel sur la Loire, de la Maine à la mer - SYNTHÈSE 8 - Un fleuve et un estuaire aménagés pendant 2 siècles ».
- GIP Loire Estuaire, 2018³. « Les mouvements - Les dragages d'entretien dans l'estuaire ».
- GIP Loire Estuaire, 2023. « Les mouvements, Les sédiments, La dynamique du bouchon vaseux ».
- GIP Posidonie, 2023. « Rapport d'activité 2023 – depuis 1982 ».
- H. MOLENAAR, A. MEINESZ et G. CAYE, 1993. « Vegetative reproduction in Posidonia oceanica. Survival and development in different morphological types of transplanted cuttings », Botanica Marina volume 36, issue 6.
- H.S. Earp, D.A. Smale, H.J.N. Catherall, P.J. Moore, 2024. « An assessment of the utility of green gravel as a kelp restoration tool in wave-exposed intertidal habitats ». Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom n°104.
- I. GOMEZ et P. HUOVINEN, 2010. « Induction of phlorotannins during UV exposure mitigates inhibition of photosynthesis and DNA damage in the kelp Lessonia nigrescens », Photochemistry and Photobiology volume 86, Issue 5 p.1056-1063.
- I.G.L. SEIBLITZ, K.C.C. CAPEL, J. STOLARSKI, Z.B.R. QUEK et M.V. KITAHARA, 2020. « The earliest diverging extant scleractinian corals recovered by mitochondrial genomes », Scientific Reports 10, article 20 714.
- Institution d'Aménagement de la Vilaine, 2009. « Conseil d'administration du 06 Juillet 2009 – Extrait de délibération ».
- Institution d'Aménagement de la Vilaine, nc. « ÉTUDE DE MODÉLISATION DE L'ESTUAIRE DE LA VILAINE - Les mouvements de l'eau dans l'estuaire de la Vilaine ».
- Institution d'Aménagement de la Vilaine, nc. « ÉTUDE DE MODÉLISATION DE L'ESTUAIRE DE LA VILAINE - Les sédiments dans l'estuaire de la Vilaine ».
- J. AKEROYD et P. WYSE JACKSON, 1995. « A handbook for botanic gardens on the reintroduction of plants to the wild », IUCN, BGCI.

- J. AUDOUIN, R. PEREZ, 1970. « Cartographie des populations de laminaires des côtes françaises de la manche orientale » Science et Pêche Bull. Institut Pêches maritimes, n°194.
- J. CASTRO-JIMENEZ, Y AMINOT, N. BELY, C. POLLONO, B.I.T. IDJATON, L. BIZZOZERO, O. PIERRE-DUPLESSIX, N.N. PHUONG et J. GASPERI, 2024. « Organophosphate ester additives and microplastics in benthic compartments from the Loire estuary (French Atlantic coast) », Marine Pollution Bulletin volume 201.
- J. LAMB, M. BRACKEN, P. DAWKINS, A. PAZ-LACAVEX, E. FIORENZA et M. HAN, 2023. « Scaling a new cost-effective intervention tool to restore and future-proof coastal kelp forests - California Sea Grant Kelp Recovery Research Program Final Report 2023 ».
- J. WICQUART et S. PLANES, 2020. « Recovery of hard coral cover: the case of Moorea », Status of Coral reefs of the world, Box 8, p.128-129.
- J.E. LYNGBY et S.M. MORTENSEN, 1996. « Effects of Dredging Activities on Growth of Laminaria saccharina ».
- J.J. BOLTON et K. LTINING, 2012. « Optimal Growth and Maximal Survival Temperatures of Atlantic Laminaria Species (Phaeophyta) in Culture ».
- J.M. KAIN, N.S. JONES, 2009. « The biology of Laminaria hyperborea VII. Reproduction of the sporophyte », Cambridge University Press.
- J.P. RAFFERTY, 2009. « Ocean acidification ». Encyclopaedia Britannica.
- J-C. LECLERC, P. RIERA, M. LAURANS, C. LEROUX, L. LÉVÊQUE, D. DAVOULT, 2015. « Community, trophic structure and functioning in two contrasting Laminaria hyperborea forests », Estuarine, Coastal and Shelf Science n°152, p.11–22.
- J-C. LECLERC. « Biodiversité, Structure et Fonctionnement Trophique des communautés à Laminaria hyperborea, en conditions naturelles et exploitées, en Bretagne. » Sciences de l'environnement, Paris 6, 2013.
- J-V-F. LAMOUREUX, 1812. « Essai sur les genres de la famille des Thalassiphytes ».
- K. BISCHOF et F.S. SETINHOFF, 2012. « Impacts of Ozone Stratospheric Depletion and Solar UVB Radiation on Seaweeds », Ecological Studies (ECOLSTUD) volume 219, Seaweed biology, p.433-448.
- K. SCHULTZE, K. JANKE, A. KRÜß, W. WEIDEMANN, 1990. « The macrofauna and macroflora associated with Laminaria digitata and L. hyperborea at the island of Helgoland (German Bight, North Sea) ». Helgolander Meeresunters n°44, p.39–51.
- K.A. KRUMHANS, R.E. SCHEIBLING, 2012. « Production and fate of kelp detritus ».
- K-T LEE, G. PERROIS, H-S. YANG, T. KIM, S.K. CHOI, T. KIM, 2023. « Impact of Super Typhoon 'Hinnamnor' on Density of Kelp Forest and Associated Benthic Communities in Jeju Island, Republic of Korea », Journal of Marine Science and Engineering volume 11, issue 5.
- L. BIZZOZERO, N. COCHENNEC-LAUREAU, 2018. « Directive cadre sur l'eau, Bassin Loire-Bretagne, Contrôle de surveillance dans les masses d'eau côtière et de transition. Actions menées par Ifremer en 2016 ».
- L. ENEVOLDSEN, 2022. « Green gravel - a novel kelp forest restoration method tested on an artificial boulder reef in Danish waters ». Aarhus University, marine ecology.
- L. GUTTOW, A. ECKERLEBE et L. GIMENEZ, 2015. « Experimental Evaluation of Seaweeds as a Vector for Microplastics into Marine Food Webs », Environmental Science and Technology volume 50, issue 2.
- M. BAHIN, 2022. « LA BAULE – PRESQU'ÎLE DE GUERANDE, Evaluation de la fréquentation touristique, du 1er janvier au 31 décembre 2022, données flux vision tourisme », Office de Tourisme Intercommunal (OTI) La Baule - Presqu'île de Guérande.
- M. VALERO et C. ENGEL, avec la participation de P. ARZEL, A. CREACH, D. DAVOULT, C. DESTOMBE,
- M.W. FRASER, J. SHORT, G. KENDRICK, D. MCLEAN, J. KEESING, M. BYRNE, M.J. CALEY, D. CLARKE, A.R. DAVIS, P.L.A. ERFTEMEIJER, S. FIELD, S. GUSTIN-CRAIG, J. HUISMAN, M. KEOUGH, P.S. LAVERY, R. MASINI, K. MCMAHON, K. Mengersen, M. RASHEED, J. STATTON, J. STODDART, P. WU, 2017. « Effects of dredging on critical ecological processes for marine invertebrates, seagrasses and macroalgae, and the potential for management with environmental windows using Western Australia as a case study », Ecological indicators vol 78, p.229-242.
- M.Y. ROLEDA, J.N. MORRIS, C. MCGRAW et C. HURD, 2013. « Ocean acidification and seaweed reproduction: Increased CO2 ameliorates the negative effect of lowered pH on meiospore germination in the giant kelp Macrocystis pyrifera (Laminariales, Phaeophyceae) », Global Change Biology volume 18, issue 3, p.854-864.

Milieu marin France, 2019. « La Convention pour la protection de l'environnement marin de l'Atlantique Nord-Est – Convention OSPAR ».

N.M.M. FERGUSON, 2021. « Microplastic adherence to common species of macroalgae found throughout Scottish coastal zones », Master of research in Algal Biotechnology, Biology and Ecology, University Highlands and Islands.

New York State Ocean Acidification Task Force, 2022. « Ocean Acidification: Its causes, impacts, and mitigation; A Report to the New York State Legislature ».

P. JOHANSSON, K.M. ERIKSSON, L. AXELSSON et H. BLANCK, 2012. « Effects of Seven Antifouling Compounds on Photosynthesis and Inorganic Carbon Use in Sugar Kelp *Saccharina latissima* (Linnaeus) », Archives of Environmental Contamination and Ecotoxicology volume 63, p.365-377.

P. LETORTU, 2023. « L'érosion des falaises au sein des aléas côtiers : suivi, compréhension et partage », Université de Bretagne Occidentale ».

P.K. DAYTON, M.J. TEGNER, P.B. EDWARDS, K.L. RISER, 1999. « Temporal and spatial scales of kelp demography: the role of oceanographic climate. » Ecology Monograph 69, p.219–250.

R. HOPKIN, J.M. KAIN, 1978. « The effects of some pollutants on the survival, growth and respiration of *Laminaria hyperborea* », Estuarine and Coastal Marine Science volume 7, issue 6, p.531-553.

R. LE GOUVELLO et F. SIMARD, 2024. « Vers une économie bleue régénérative », UICN.

R.H. GREEN, 1979. Sampling Design and Statistical Methods for Environmental Biologists ».

R.J. CHARLSON, J.E. LOVELOCKT, M.O. ANDREAE et S.G. WARREN, 1987. « Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo and climate ». Nature 326, p.655-661.

R.P. KITTLE, K.J. MCDERMID, 2016. « Glyphosate herbicide toxicity to native Hawaiian macroalgal and seagrass species. » Journal of Applied Phycology n°28, p.2597–2604.

R.S. STENECK, M.H. GRAHAM, B.J. BOURQUE, D. CORBETT, J.M. ERLANDSON, J.A. ESTES et M.J. TEGNER, 2002. « Kelp forest ecosystems: biodiversity, stability, resilience and future. » Environment Conservation v29.

S. CHAUVELOT, C. PLOURDE et L. THOMAS, 2023. « Coral Gardeners - Rapport d'impact 2023 ».

S.D. CONNELL, B.D. RUSSEL, D.J. TURNER, S.A. SHEPHERD, T. KELDEA, D. MILLER, L. AIROLDI, A. CHESHIRE, 2008. « Recovering a lost baseline: missing kelp forests from a metropolitan coast. » Marine Ecology Program 360, p.63–72.

Sussex Kelp Recovery Project (SKRP), 2022. « Progress & impact report, 2021-2022 ».

T. BELSHER, J. BOVE, M.B. de CAYEUX, 1986. « Étude bibliographique de quelques espèces planctoniques et benthiques littorales de la manche – volume 4 : espèces phytobenthiques » Ifremer -centre de Brest – Département DERO – Environnement littoral.

T. CHOPIN, B. MACDONALD, S. ROBINSON, S. CROSS, C. PEARCE, D. KNOWLER, A. NOCE, G. REID, A. COOPER, D. SPEARE, L. BURRIDGE, C. CRAWFORD, M. SAWHNEY, K.P. ANG, C. BACKMAN et M. HUTCHINSON, 2013. « The Canadian Integrated Multi-Trophic Aquaculture Network (CIMTAN) - A Network for a New Era of Ecosystem Responsible Aquaculture », Fisheries volume 38, issue 7, p.297-308.

T. GALLOWAY, M. COLE et C. LEWIS, 2017. « Interactions of microplastic debris throughout the marine ecosystem », Nature Ecology & Evolution volume 1.

T. WERNBERG, K. KRUMHANSL, K. FILBEE-DEXTER, M.F. PEDERSEN, 2019. « World Seas: An Environmental Evaluation - Volume III: Ecological Issues and Environmental Impacts ». Elsevier, p.57-58

T.R. DAVIS, M.F. LARKIN, A. FORBES, J.R. VEENHOF, A. SCOTT et M.A. COLEMAN, 2022. « Extreme flooding and reduced salinity causes mass mortality of nearshore kelp forests », Estuarine, Coastal and Shelf Science 275.

WERNBERG et FILBEE-DEXTER, 2019. « Status and Trends for the World's Kelp Forests », World Seas: An Environmental Evaluation, p.57-78.

Y. AGATSUMA, S. TAKAGI, E. INOMATA et M.N. AOKI, 2019. « Process of deterioration of a kelp (*Ecklonia bicyclis* (Kjellman)) bed as a result of grazing by the sea urchin *Mesocentrotus nudus* (Agassiz) in Shizugawa Bay in northeastern Honshu, Japan », Journal of Applied Phycology n°31.

Y. GAO, J. FANG, J. ZHANG, L. REN, Y. MAO, B. LI, M. ZHANG, D. LIU, M. DU, 2011. « The impact of the herbicide atrazine on growth and photosynthesis of seagrass, *Zostera marina* (L.), seedlings », Marine Pollution Bulletin volume 62, issue 8, p. 1628-1631.

7.2. Ressources en ligne

Agence de l'eau - MAINE-LOIRE-OCÉAN, UNE SITUATION TRÈS DÉGRADÉE

<https://agence.eau-loire-bretagne.fr/home/bassin-loire-bretagne/zoom-sur-la-qualite-des-eaux-en-loire-bretagne-2020.html?dossierCurrentElemente45c63ca-4536-4b29-97c5-1cc2713d5974=044127e5-f646-4213-bda2-0c9f7a100af0>

consulté le 03/07/2024

Agence de l'eau - VILAINE ET CÔTIERS BRETONS : D'EST EN OUEST UNE SITUATION CONTRASTÉE

<https://agence.eau-loire-bretagne.fr/home/bassin-loire-bretagne/zoom-sur-la-qualite-des-eaux-en-loire-bretagne-2020.html?dossierCurrentElemente45c63ca-4536-4b29-97c5-1cc2713d5974=d567c88f-8d9b-4a41-93e0-2d66f45d7695>

consulté le 03/07/2024

CAP ATLANTIQUE – L'agglo, l'essentiel, Les chiffres clé

<https://www.cap-atlantique.fr/institution/lagglo-lessentiel/les-chiffres-cles>

consulté le 16/08/2024

Commission européenne- EMODNet

<https://emodnet.ec.europa.eu/geoviewer/>

consulté le 28/07/2024

CRIOBE – CORALMATES

<https://coralmates.criobe.pf/>

consulté le 16/08/2024

ELV - Les dragages des ports, le clapage des vases et sédiments en mer et les conséquences sur le milieu marin.

<https://www.assoloirevilaine.fr/dragages>

consulté le 05/06/2024

GIP Loire Estuaire - Nutriments et eutrophisation

<https://www.loire-estuaire.org/accueil/un-territoire/contexte-physique/nutriments>

consulté le 15/08/2024

Interview de J-C MENARD par M. MARZLOFF, 2023. « Morbihan : comment la désertification des paysages sous-marins bouleverse les écosystèmes côtiers », The conversation

<https://archimer.ifremer.fr/doc/00850/96148/104333.pdf>

consulté le 05/08/2024

L. DE LA COTTE – Ouest France – « Des scientifiques tentent de créer une forêt maritime au cœur de la baie du Pouliguen »

<https://www.ouest-france.fr/mer/des-scientifiques-tentent-de-creeer-une-foret-maritime-au-cur-de-la-baie-du-pouliguen-b4e75e84-4a77-11ef-ae43-8601f2d4302d>

consulté le 15/08/2024

MARC Ifremer, LOPS – Observation satellite analysée de la turbidité, secteur Atlantique Nord, Bretagne Sud

https://marc.ifremer.fr/resultats/turbidite/images_satellites_atlantique_nord/

consulté le 03/07/2024

METEO FRANCE – 2024 : Les bilans climatiques

<https://meteofrance.fr/actualite/publications/2024-les-bilans-climatiques#:~:text=Printemps%202024,en%20moyenne%20sur%20la%20saison>

consulté le 16/08/2024

Milieu marin France - La Convention pour la protection de l'environnement marin de l'Atlantique Nord-Est

<https://www.milieumarinfrance.fr/Nos-rubriques/Cadre-reglementaire/Conventions-des-mers-regionales/Convention-OSPAR>

consulté le 07/06/2024

Observatoire Sèvre-nantaise - Suivi AMPA

<https://www.sage-estuaire-loire.org/lampa/>

consulté le 05/08/2024

Oceanographic magazine - issue n°15, p.19, « Story of hope – Sussex Kelp Restoration »

<https://oceanographicmagazine.com/features/sussex-kelp-restoration/>

consulté le 13/05/2024

OSPAR – Habitat : forêt de laminaires

<https://www.ospar.org/work-areas/bdc/species-habitats/list-of-threatened-declining-species-habitats/habitats/kelp-forest>

consulté le 07/06/2024

SER - What is Ecological Restoration?

<https://ser-rrc.org/what-is-ecological-restoration/>

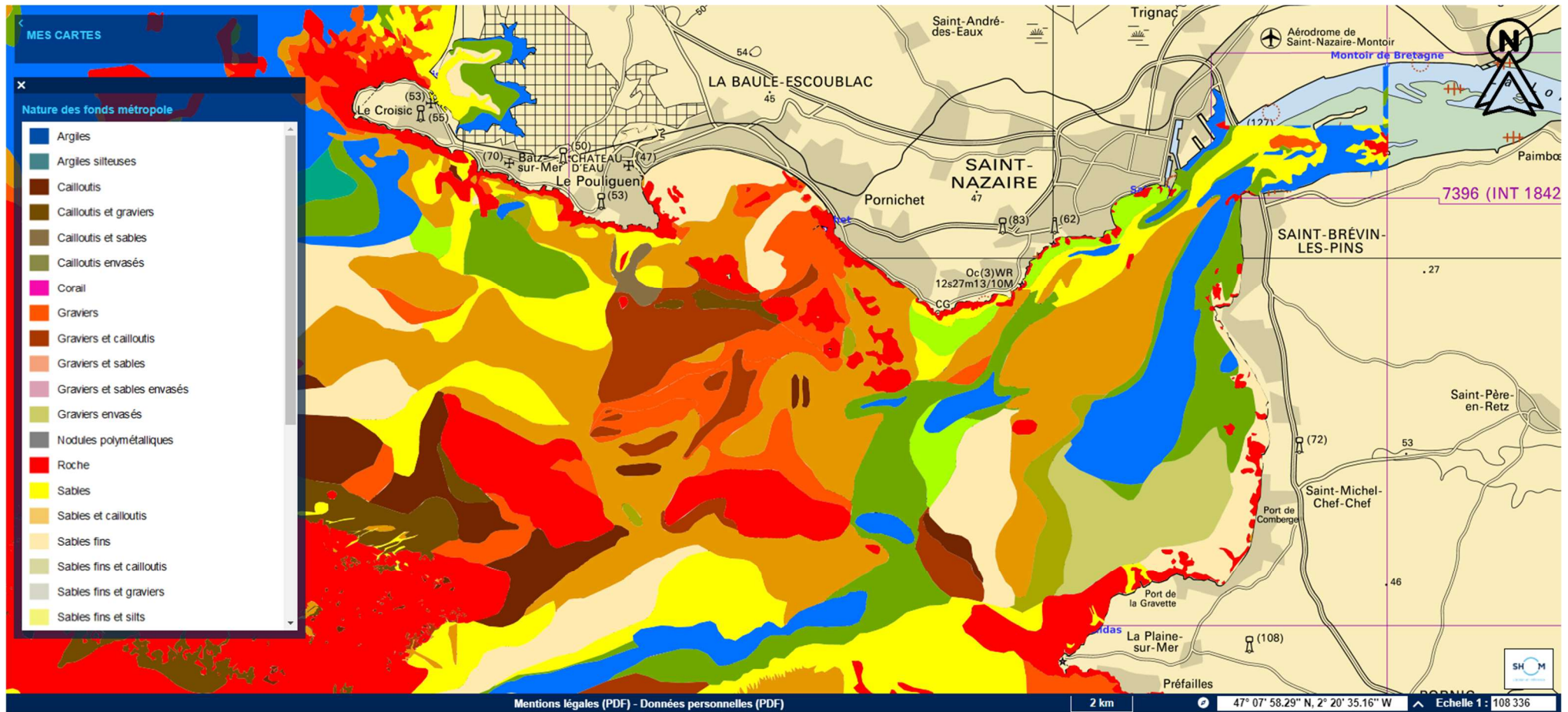
consulté le 21/06/2024

Union Européenne - Convention OSPAR

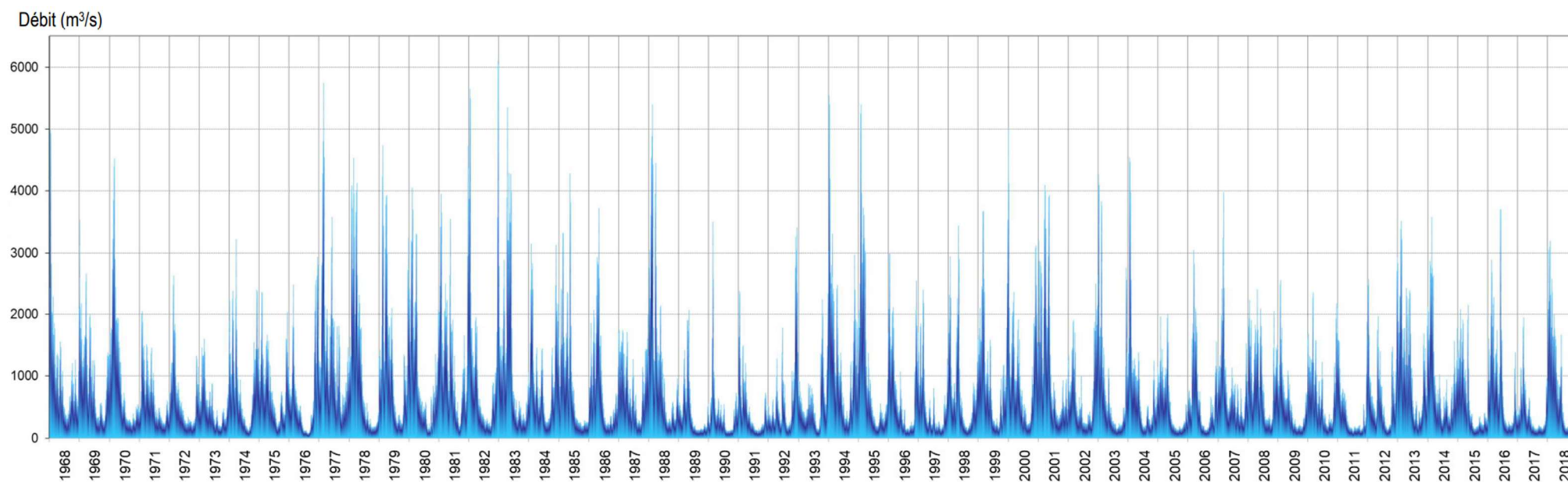
<https://eur-lex.europa.eu/FR/legal-content/summary/ospar-convention.html#:~:text=La%20Convention%20OSPAR%20vise%20%C3%A0,effets%20n%C3%A9fastes%20des%20activit%C3%A9s%20humaines.>

consulté le 07/06/2024

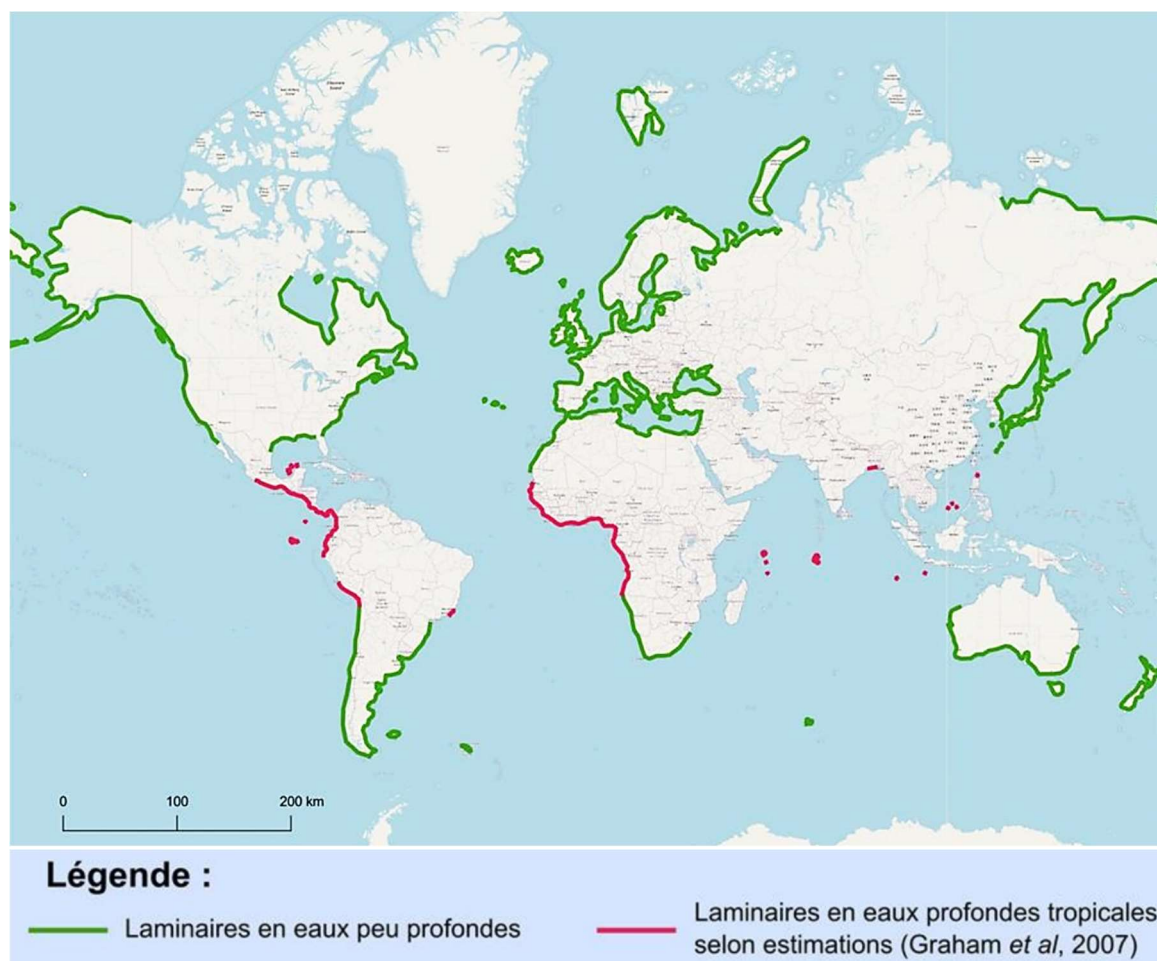
8. Liste des annexes



Annexe 1: Cartographie de la nature des substrats (SHOM)



Annexe 2: Débits journaliers de la Loire relevés à Montjean-sur-Loire (49) de 1968 à 2018 (GIP, DREAL)



Nom scientifique (nom vernaculaire)	Localisation	Taille	Profondeur maximale	Espérance
<i>Laminaria hyperborea</i> (Laminaire rugueuse)	Atlantique Nord (de Spitzberg à Bretagne Sud), Manche, Mer du Nord, Méditerranée et Mer Noire	< 2m de long	-20m (Atlantique) < -40m (Méditerranée)	10 à 15 ans
<i>Laminaria digitata</i> (Laminaire digitée)	Atlantique Nord (de Spitzberg à Bretagne Sud), Manche, Mer du Nord, Méditerranée et Mer Noire	1-1,5m (<4m)	-6m	3 à 5 ans
<i>Laminaria ochroleuca</i> (Laminaire jaunâtre)	Manche occidentale jusqu'aux côtes marocaines, Méditerranée	±2m (<2,5m)	-40m, voire -110m (déroit de Messine)	Annuelle
<i>Laminaria rodriguezii</i>	Méditerranée (endémique)	±2m	-30m à -150m	Annuelle
<i>Marocystis pyrefera</i>	Côtes du Pacifique (Amérique, Asie de l'est), Australie Sud, Nouvelle-Zélande, Afrique du Sud	< 45-50m	0 à -30m	-
<i>Saccorhiza polyschide</i> (Laminaires à bulbe)	Norvège au Maroc, Ouest de la Méditerranée (plus rare)	2-10m	< -35m	Annuelle
<i>Saccharina japonica</i> (kombu)	Japon, Corée, Chine, Russie, France (étang de Thau, introduite en 1984)	< 1m	-10m	2 ans
<i>Saccharina latissima</i> (kombu royal)	Atlantique Nord (de Spitzberg au Portugal), Japon, détroit de Béring, côtes Pacifiques et Atlantiques (estuaire du St Laurent au New Jersey)	< 3m	0 à -30m	2 à 4ans
<i>Undaria pinnatifida</i> (wakame)	Japon, Corée, Chine (endémique), Bretagne, côte Atlantique européenne, Manche (importée pour élevage ou via navires)	50cm-1,2m (Méditerranée) < 3m (Atlantique, Pacifique)	-1,5m (Méditerranée) à -18m (Ouessant) selon turbidité	Annuelle
<i>Lessonia Trabeculata</i>	Chili, Pérou, Argentine	< 2,5m	-0,5 à -20m	Annuelle

Annexe 3: Répartition des laminaires dans le monde (ELV, 2020)

RESUME / SYNTHESE

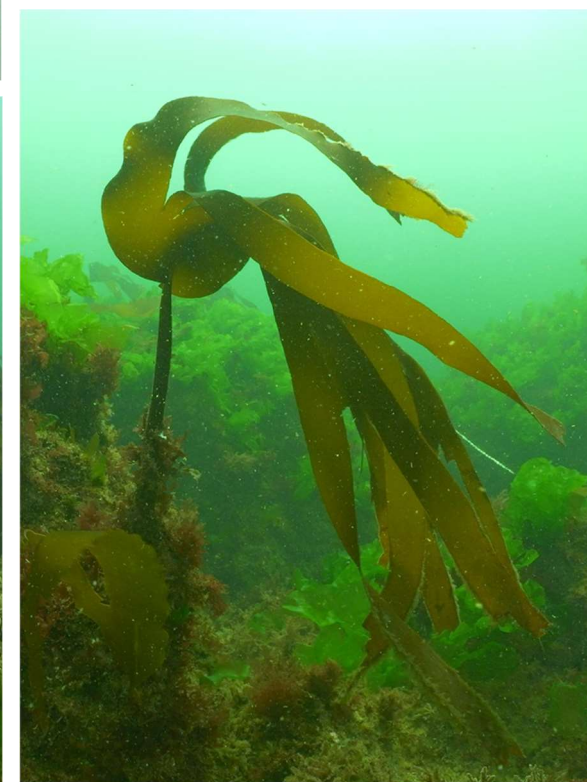
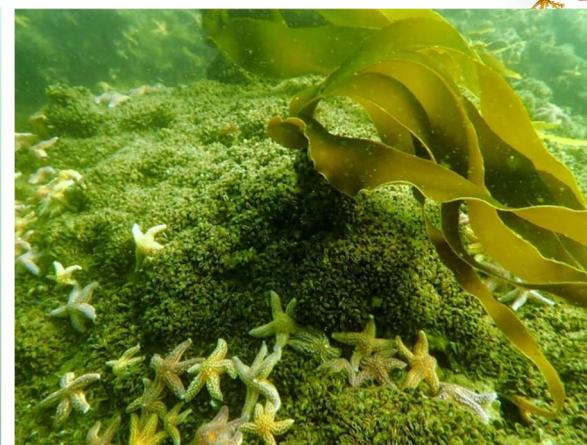
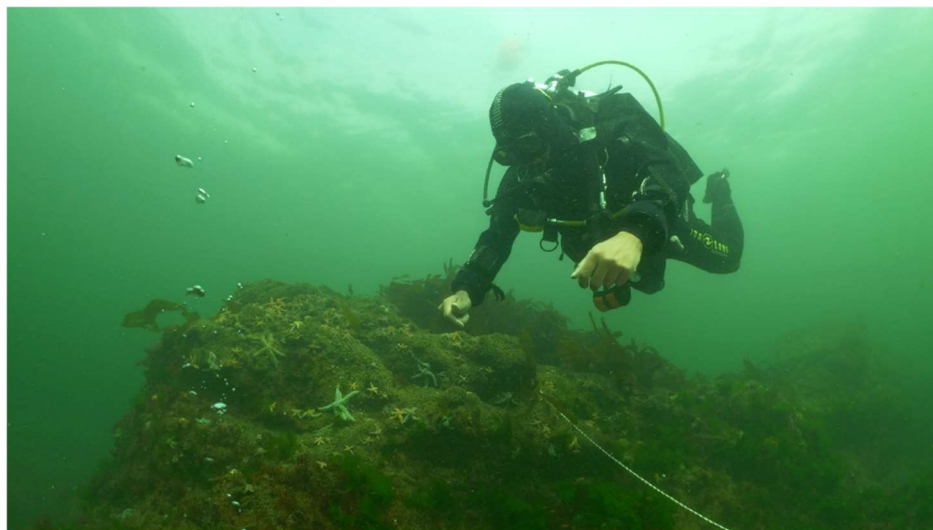
PARALLELE ENTRE DATES DE
DRAGAGE ET TURBIDITE SATELLITE
(ou sonde)

*Annexe 4: Mise en lumière de l'impact du dragage
de la Baie du Pouliguen et de l'estuaire de la Loire
sur la turbidité (SOURCE)*

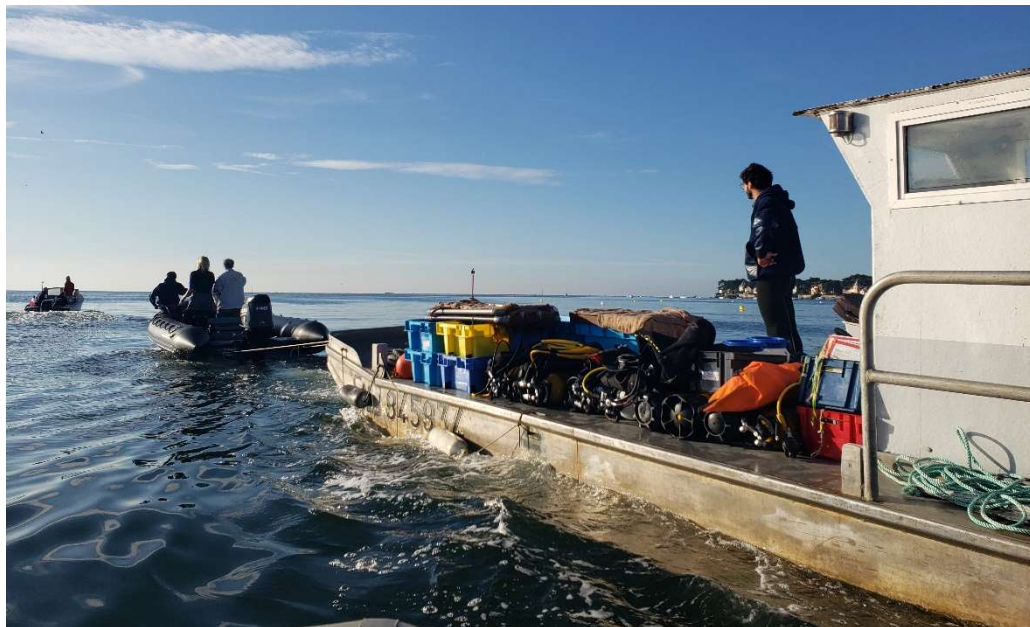
RESUME / SYNTHESE

**L'INVENTAIRE INITIAL BIO
LITTORAL**

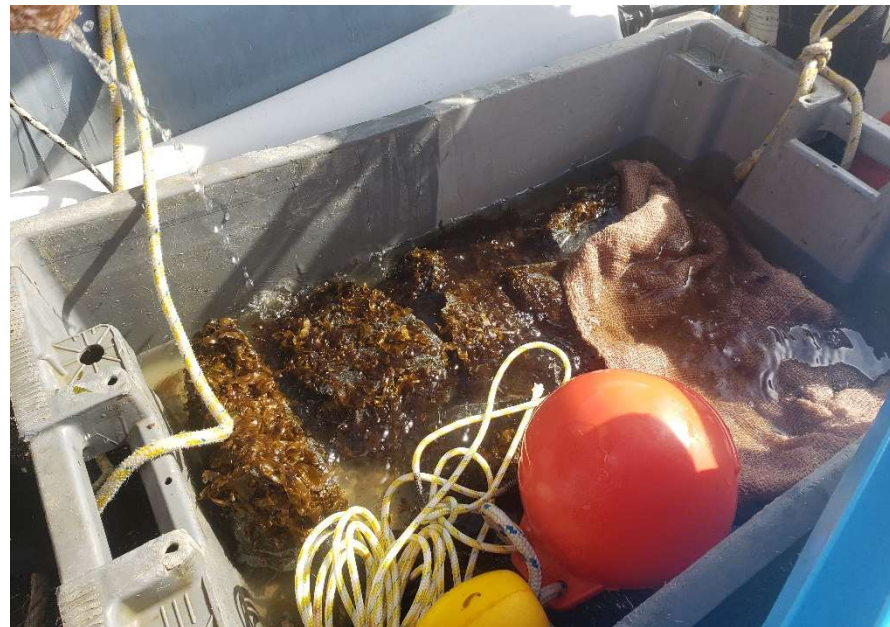
Annexe 5: Résultats de l'inventaire laminaire initial réalisé par Bio-littoral



Annexe 6: Photothèque – prises de vues lors de l'inventaire initial pour meilleure compréhension du site de réinsertion (© Bio littoral et A. RUY)



Remorquage de la barge ostréicole contenant les substratsensemencés



Préparation des bacs à la mise à l'eau sur site



Déploiement des cordes de coco ensemencées par l'équipe de Bio-littoral (© A. RUY)



Bac contenant les galets ensemencés (© A. RUY)

Annexe 7: Photothèque - prises de vues lors de la réinsertion des lamineaires