



@Armel Ruy

RESTAURATION DE L'HABITAT LAMINAIRES

LES EVENS, BAIE DU POULIGUEN

**Résultats 2024–2025 : Croissance des laminaires et
étude des paramètres physico-chimiques**



CNRS • SORBONNE UNIVERSITÉ
Station Biologique
de Roscoff



agence de l'eau
Loire-Bretagne



ELV

Association Estuaires Loire & Vilaine

FONDATION
DE LA MER

NANTES
SAINT-NAZAIRE
PORT

BIO
LITTORAL

1Ocean

TBS



Photos première page

Site de restauration des Evens en juillet 2024 (à gauche) puis en juillet 2025 (à droite). Crédits: Armel Ruy, [Les laminaires: l'autre forêt](#).

A propos de l'Association Estuaires Loire & Vilaine

Depuis sa création en 2008, [l'Association Estuaires Loire Vilaine](#) (ELV) s'implique dans des projets scientifiques et participatifs afin de préserver la qualité de l'eau, les fonds marins et les écosystèmes. Elle participe ainsi à la protection de la biodiversité, de la ressource et à l'atténuation des effets du dérèglement climatique. Les projets scientifiques menés par l'association incluent des cartographies des populations de laminaires dans la Baie du Pouliguen (1995-2014), des inventaires de macroalgues dans le secteur Loire-Vilaine, et la restauration des champs de laminaires depuis 2023.

Partenaires et collaborateurs du projet de restauration

Le projet de restauration des laminaires s'appuie sur une collaboration étroite entre plusieurs acteurs scientifiques, associatifs et institutionnels. L'Association Estuaires Loire & Vilaine assure la coordination et la mise en œuvre opérationnelle du projet. La Station biologique de Roscoff et le bureau d'études BioLittoral ont contribué à l'élaboration et la réalisation du protocole scientifique. L'organisation Mission 1 Ocean accompagne le projet à travers un suivi documentaire. Ce travail est rendu possible grâce au soutien de l'Agence de l'Eau, la Fondation de la Mer, le Grand Port de Nantes–Saint-Nazaire, TBS et Beuchat.

Auteurs du rapport

Le rapport a été rédigé par Olivia le Gouvello et Jean-Claude Ménard.

Note introductive

Le présent rapport s'inscrit dans la continuité du rapport *Restauration de l'habitat laminaires - Présentation de projet* d'Amélie Alarcon (2024), qui présentait le cadre, les objectifs et la méthodologie du projet de restauration. Il a pour objectif de rendre compte des résultats obtenus au cours des deux premières années de mise en œuvre du projet, sur la période 2024–2025.

Résumé exécutif

Depuis 2023, l'Association Estuaires Loire & Vilaine (ELV) mène un projet de restauration de forêts de laminaires dans la Baie du Pouliguen / La Baule, en collaboration avec la Station biologique de Roscoff et BioLittoral, dans le cadre d'un appel à projets de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne remporté par ELV. Ce projet de restauration, unique en France, a débuté par une phase de culture de plantules de l'espèce *Laminaria hyperborea* en laboratoire, lesquelles ont été fixées sur des cordes et des galets avant d'être implantées en milieu naturel en juillet 2024, à proximité de l'îlot des Evens. Une sonde multiparamétrique est présente sur le site depuis décembre 2024 afin de mieux comprendre les facteurs environnementaux contrôlant la croissance des laminaires.

Un an après la mise en place des galets, plusieurs denses zones de laminaires adultes ont été observées sur le site d'étude, et sont associées à une augmentation notable de la biodiversité. La phase de croissance des laminaires, observée à partir d'avril–mai 2025, coïncide avec une augmentation concordante de la température et de la salinité, ainsi qu'une diminution de la turbidité. Les analyses statistiques indiquent que la température, la salinité et le pH de l'eau sont principalement influencés par le débit de la Loire, tandis que la turbidité est directement liée à la houle et indirectement au débit du fleuve. La direction du vent et les régimes des marées exercent également une influence significative sur ces paramètres. Les opérations de dragage contribuent par ailleurs à l'augmentation de la turbidité et devraient par conséquent être strictement encadrées durant la période de croissance favorable des laminaires.

La phase de reproduction prévue pour 2026–2027 sera déterminante pour assurer la pérennité de la restauration. En cas de reproduction, essaimage et fixation des laminaires, cette méthodologie pourrait être déployée sur d'autres sites du secteur Loire-Vilaine afin de restaurer ces habitats essentiels à la préservation de la biodiversité et à l'atténuation du changement climatique.

TABLE DES MATIÈRES

Liste des figures et tableaux	5
1. Introduction	6
1.1. Contexte	6
1.2. Objectifs	7
2. Méthodes	8
2.1. Zone d'étude et espèce de laminaire choisie	8
2.2. Culture et implantation des laminaires	9
2.3. Inventaires de biodiversité	10
2.4. Etude des données environnementales	10
2.4.1. Paramètres physico-chimiques étudiés	10
2.4.2. Analyse des données environnementales	11
3. Résultats	13
3.1. La croissance et l'abondance des laminaires	13
3.2. Evolution de la turbidité, température, salinité et pH entre décembre 2024 et octobre 2025	14
3.3. Mise en relation des paramètres physico-chimiques avec la houle, le débit de la Loire et les vents	16
3.3.1. Evolution de la houle et du débit de la Loire au cours de la période d'étude	16
3.3.2. Influence du débit de la Loire sur les paramètres	17
3.3.3. Influence de la houle sur les paramètres	18
3.3.4. Influence de la direction du vent sur les paramètres	18
3.3.5. Analyse multivariée	19
4. Discussion et perspectives	21
4.1. Les modalités du développement des laminaires	21
4.2. L'influence de la houle, du débit de la Loire et des vents sur la turbidité, la température et la salinité et le pH	22
4.3. Autres facteurs naturels et anthropiques influençant la croissance des laminaires	24
4.3.1. Les marées	24
4.3.2. La variabilité des étiages de la Loire	24
4.3.3. Les dragages	25
4.3.4. La présence de brouteurs et de moules	26
4.4. L'impact des laminaires sur l'écosystème environnant	27
4.4.1. Un taux de biodiversité accru	27
4.4.2. L'influence des laminaires sur le pH	27
4.5. Les difficultés techniques rencontrées	28
4.6. Les prochaines étapes de la restauration	29
4.7. Le rôle de la restauration des laminaires face aux enjeux environnementaux et socio-économiques	30
4.7.1. Perspectives socio-économiques et environnementales locales de la restauration	30
4.7.2. Déploiement de la restauration à plus grande échelle	30
4.7.3. La restauration des laminaires comme levier face au réchauffement climatique	31
5. Conclusion	32
6. Bases de données	32
7. Bibliographie	33
8. Liste des annexes	36

Liste des figures et des tableaux

Figures

Figure 1 : Morphologie des laminaires, exemple de *Laminaria digitata* (Alarcon, 2024) (a). Photo de *Laminaria hyperborea* dans la Baie du Pouliguen (crédits: Armel Ruy) (b).

Figure 2 : Carte de la localisation du site d'étude dans la Baie du Pouliguen (à gauche), et carte de la zone d'étude près de l'île des Evens (à droite). Adapté de Alarcon, 2024

Figure 3 : Photo de *Laminaria hyperborea* sur le site des Evens (ELV, 2024)

Figure 4 : Photographies illustrant le processus de culture et ensemencement de substrats : (de gauche à droite) culture des plantules en bassins, galet ensemencé, et cordage de coco ensemencé de plantules (ELV).

Figure 5 : Représentation du processus d'implantation des substrats ensemencés sur la zone d'étude (Alarcon, 2024).

Figure 6 : Sonde EXO 3, Xylem telle qu'affichée par le fabricant (à gauche), et la sonde sur le site de restauration fixée avec une ancre (à droite).

Figure 7 : Photos de laminaires sur une roche de référence sur le site des Evens à un an d'écart, en juillet 2024 (à gauche) et juillet 2025 (à droite).

Figure 8 : Représentation schématique des fonds marins du site de restauration des Evens, réalisée à partir d'observations de terrain et illustrant la distribution des individus de *L. hyperborea* observées en juillet 2025.

Figure 9 : Évolution des moyennes journalières de turbidité (a) (en unité néphélométrique de formazine - FNU), de température (b) (en °C), de salinité (c) (unités de salinité pratique - PSU ou g de sel par kg d'eau), et de pH (d) entre décembre 2024 et octobre 2025.

Figure 10 : Évolution des moyennes journalières de houle (en mètres) (a) et de débit de la Loire (m³/s) (b) entre décembre 2024 et octobre 2025. Les rubans autour des lignes correspondent à l'écart type.

Figure 11 : Effet de la direction du vent sur la turbidité (a), la température (b), la salinité (c) et le pH (d). Les barres colorées représentent les valeurs moyennes (\pm écart-type) de chaque paramètre pour les différentes directions de vent.

Figure 12 : Analyse des coordonnées principales entre décembre 2024 et octobre 2025.

Figure 13 : Cartes des effets conjugués en période estivale de la Vilaine, de la Loire, et de dragage de la Loire par vents du Sud (à gauche), et vents d'ouest (à droite). Les flèches rouges représentent la direction du vent. Cartes tirées du rapport Santé Littoral Mer Loire Vilaine SLMLV de 2010.

Figure 14 : Types de dragues hydrauliques : aspiratrice stationnaire avec conduite de refoulement; b) aspiratrice en marche. Schéma issu de Dragages et environnement marin (Alzieu et al, 1999).

Figure 15 : Carte avec les exutoires de dragages du port de Pouliguen/la Baule et du port de Pornichet (ELV).

Figure 16 : Vue d'une dizaine d'helcions à la base de la fronde d'une linaire. Hauteur de l'image : 8 cm. Source : [science.nature](https://www.science.nature.com/) (a). Photo d'oursins autour de laminaires (ELV, 2022) (b). Photo de moules accrochées aux stipes de laminaires (Biolittoral) (c).

Figure 17 : Le rôle des habitats de macro-algues comme refuge face à l'acidification de l'océan. (Edworthy et al, 2023).

Tableaux

Tableau 1 : Résultats des tests de corrélation de Spearman entre les moyennes journalières des différents paramètres, calculées pour l'ensemble de la période, ainsi que pour décembre–avril et juin–octobre.

Tableau 2 : Coefficients des vecteurs des paramètres pour chaque axe de l'analyse des coordonnées principales.

1. Introduction

1.1. Contexte

Le projet de restauration de l'Association Estuaires Loire & Vilaine (ELV) s'intéresse aux champs de laminaires, des habitats de macroalgues brunes abritant une biodiversité majeure et jouant un rôle crucial dans la captation de carbone. La structure tridimensionnelle formée par les thalles, les stipes et les crampons de laminaires offre une grande diversité de micro-habitats (Fig.1), permettant à de nombreuses espèces de faune et de flore de s'abriter, de se nourrir et de se reproduire (Leclerc et al, 2015; Potin, 2012). Les forêts de laminaires figurent parmi les écosystèmes les plus productifs de la planète (Krumhansl & Scheibling, 2012), avec une production annuelle de matière organique comprise entre 1000 et 2000 gC m²/an. Cette productivité est comparable à celle des mangroves, environ six fois supérieure à celle des herbiers de zostères (Bio-Littoral, 2013), et près de trois fois plus élevée que celle des herbiers de posidonies méditerranéens les plus productifs (Vela, 2024). En raison de leur faible tolérance aux variations de température, salinité et turbidité, les laminaires constituent par ailleurs de bons indicateurs écologiques de la qualité des eaux côtières et des fonds marins.

Malgré leur importance écologique, les forêts de laminaires connaissent un déclin rapide sur la façade Atlantique française. Depuis plus de trente ans, l'association ELV documente une régression marquée des populations entre les estuaires de la Loire et de la Vilaine. Dans la baie du Pouliguen / La Baule, ce déclin atteint environ 90 % entre 1995 et 2014 (Association ELV, 2014), les populations restantes présentant des densités très faibles, inférieures à 3 individus par m².

Les causes de ce déclin sont multiples et interconnectées. Le réchauffement de l'océan et la multiplication des vagues de chaleur sous-marines perturbent le cycle reproductif des laminaires et favorisent la prolifération de brouteurs, notamment les oursins (Rogers-Bennett, 2019). Ce phénomène est renforcé par le déclin de leurs prédateurs naturels, en particulier les poulpes, lié notamment à la surpêche (interview de J-C. Ménard par M. Marzloff, 2023). Par ailleurs, l'augmentation de la turbidité liée aux rejets anthropiques contribue directement à la dégradation de ces habitats en réduisant la pénétration lumineuse et en altérant les conditions nécessaires au développement des laminaires. Ces rejets anthropiques incluent les apports de nutriments continentaux provoquant des blooms de phytoplanctons, ou encore les activités portuaires et les opérations de dragage rejetant des sédiments en mer.

Face au déclin de populations de laminaires constaté dans la Baie de Pouliguen/ la Baule, ELV mène depuis 2023 un projet de restauration de ces écosystèmes, en collaboration avec la Station biologique de Roscoff et BioLittoral. Issu d'un appel à projet de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne, ce projet constitue à ce jour la première initiative de restauration de champs de laminaires en milieu naturel en France. Il s'inscrit pleinement dans les objectifs de la Loi européenne sur la restauration de la nature, adoptée en 2024, qui vise la restauration d'au moins 20 % des écosystèmes terrestres et marins de l'Union européenne d'ici 2030 (Conseil UE, 2024).

NB: Pour plus d'informations de contexte sur l'écologie et la biologie des laminaires, les spécificités réglementaires de la Baie du Pouliguen / La Baule, et d'autres projets de restauration d'habitats sous-marins, se référer au rapport d'Amélie Alarcon (2024), Restauration de l'habitat Laminaires, Parties 1, 2 et 3.

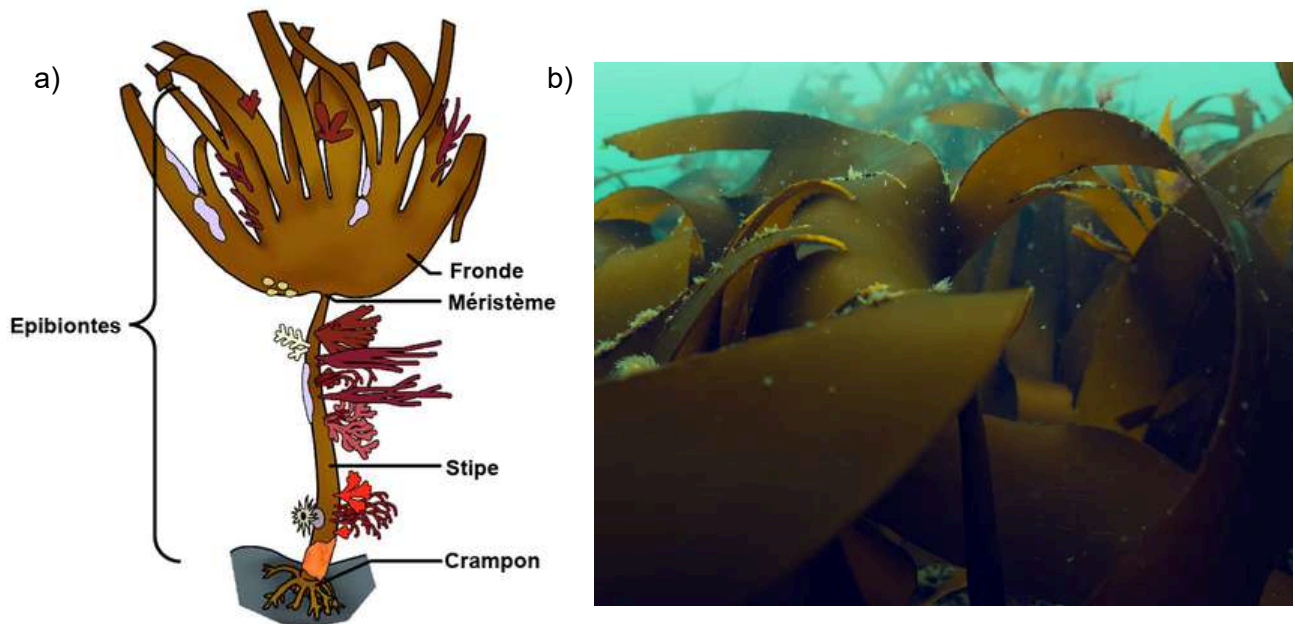


Figure 1 : Morphologie des laminaires, exemple de *Laminaria digitata* (Alarcon, 2024) (a). Photo de *Laminaria hyperborea* dans la Baie du Pouliguen (crédits: Arnel Ruy) (b).

1.2. Objectifs

Les objectifs du projet de restauration de forêts de laminaires mené par ELV sont multiples :

1. **Restaurer les habitats de laminaires sur l'îlot des Evens**, dans la baie du Pouliguen / La Baule, en y créant des noyaux denses de laminaires capables d'assurer leur reproduction, leur essaimage et leur maintien naturel à long terme.
2. **Déterminer la période favorable à la croissance des laminaires** à partir de l'évolution des paramètres physico-chimiques dans la colonne d'eau (température, salinité, pH, turbidité), et analyser la variabilité de ces paramètres en lien avec la houle, le débit de la Loire, et la direction du vent.
3. **Développer une méthodologie de restauration reproductible à plus grande échelle** afin d'envisager l'extension de cette démarche à d'autres sites du secteur Loire-Vilaine, dans une perspective d'amélioration durable de la biodiversité locale et de renforcement de la résilience des écosystèmes côtiers.

Ce rapport présente les méthodes mises en œuvre dans le cadre du projet, puis expose les résultats obtenus au cours de la première année suivant l'implantation des galets (2024–2025), couvrant l'évolution des populations de laminaires ainsi que l'analyse des paramètres physico-chimiques sur le site.

2. Méthodes

2.1. Zone d'étude et espèce de laminaire choisie

La zone d'étude sélectionnée pour le projet de restauration est située dans la baie du Pouliguen / La Baule, au sud-ouest de l'îlot des Evens, sur un platier rocheux (Fig.2). Ce site a été retenu en raison de la diversité de ses reliefs et de la présence d'un substrat rocheux favorable à l'implantation et au développement des laminaires. Les roches affleurant à marée basse forment une barrière naturelle au nord du site expérimental, limitant partiellement les apports en eaux turbides en provenance du Grand Port de Nantes–Saint-Nazaire ainsi que des ports de La Baule–Le Pouliguen et de Pornichet. Le fleuve de la Loire se déverse au Sud-Est de la Baie du Pouliguen. La zone d'étude couvre une surface d'environ 12 mètres de large pour 40 mètres de long.

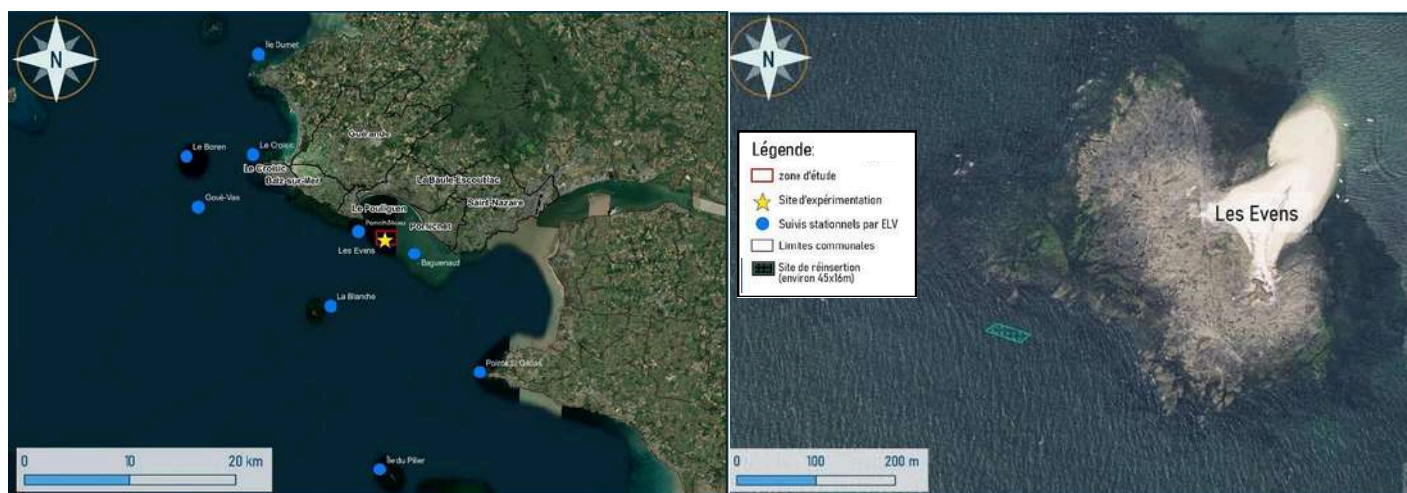


Figure 2 : Carte de la localisation du site d'étude dans la Baie du Pouliguen (à gauche), et carte de la zone d'étude près de l'île des Evens (à droite). Adapté de Alarcon, 2024

L'espèce choisie pour cette étude est *Laminaria hyperborea*, une algue brune pérenne endémique des mers de l'Atlantique Nord-Est. Les forêts de *L. hyperborea* hébergent une biodiversité particulièrement riche en raison de leur forte complexité structurelle, fournissant des habitats essentiels à de nombreux épiphytes, crustacés, poissons et invertébrés. Cette espèce présente une longévité élevée par rapport à d'autres espèces de laminaires, telles que *Saccorhiza polyschides*, avec une durée de vie pouvant atteindre 12 à 15 ans, ce qui en fait un important puits de carbone à long terme. *L. hyperborea* présente également une importante résilience face à la houle, mais demeure sensible aux variations des conditions physico-chimiques dans la colonne d'eau. Quelques individus étaient encore naturellement présents sur le site d'étude avant l'implantation des galets, confirmant la pertinence écologique du site pour un projet de restauration (Fig.3).



Figure 3 : Photo de *Laminaria hyperborea* sur le site des Evens (ELV, 2024).

2.2. Culture et implantation des laminaires

La méthodologie employée pour la culture et l'implantation des laminaires est inspirée de la méthode de Green Gravel développée au Royaume Uni, qui inclut la culture préalable des laminaires dans un laboratoire et l'ensemencement de galets avant l'implantation dans le milieu naturel (Fredriksen et al, 2020). Contrairement au Green Gravel qui déverse une grande quantité de galets en milieu naturel, la méthode d'ELV se focalise sur l'implantation manuelle d'une plus petite quantité de galets, dans l'optique de créer des îlots concentrés en laminaires capables de coloniser le milieu environnant de manière naturelle.

La culture et l'implantation des laminaires sur le site d'étude se sont déroulées entre 2023 et 2024 selon les étapes suivantes :

- 1. Prélèvement des laminaires parentes** : Une vingtaine d'individus adultes de *Laminaria hyperborea* ont été prélevés en décembre 2023 au large de la presqu'île de Guérande, puis transportés à la Station biologique de Roscoff.
- 2. Culture ex-situ en bassin**: Les individus géniteurs ont été maintenus en culture pendant huit mois dans des bassins contrôlés à une température constante de 13 °C. Durant cette période, les laminaires se sont reproduites, et les plantules issues de la reproduction se sont fixées sur différents substrats disposés dans les bassins, à savoir des galets de gneiss de 10 à 20 cm de longueur ainsi que des cordes en fibres de coco (Fig.4).
- 3. Réinsertion en milieu naturel** : En juillet 2024, les substrats ensemencés ont été transportés sur le site d'étude dans des caisses de pêche, recouverts d'une toile de jute humidifiée. Les galets ont ensuite été implantés manuellement par des plongeurs professionnels le long de deux transects espacés de 3 mètres, dans la partie Nord du site. Parallèlement, les cordes ont été enroulées autour de rochers sur le site (Fig.5).
- 4. Suivis des populations** : Le site de restauration fait l'objet de suivis réguliers sur 3 ans, reposant sur des observations in-situ, afin d'évaluer la croissance des laminaires.



Figure 4 : Photographies illustrant le processus de culture et d'ensemencement de substrats : (de gauche à droite) culture des plantules en bassins, galet ensemencé, et cordes de coco ensemencé de plantules (ELV).

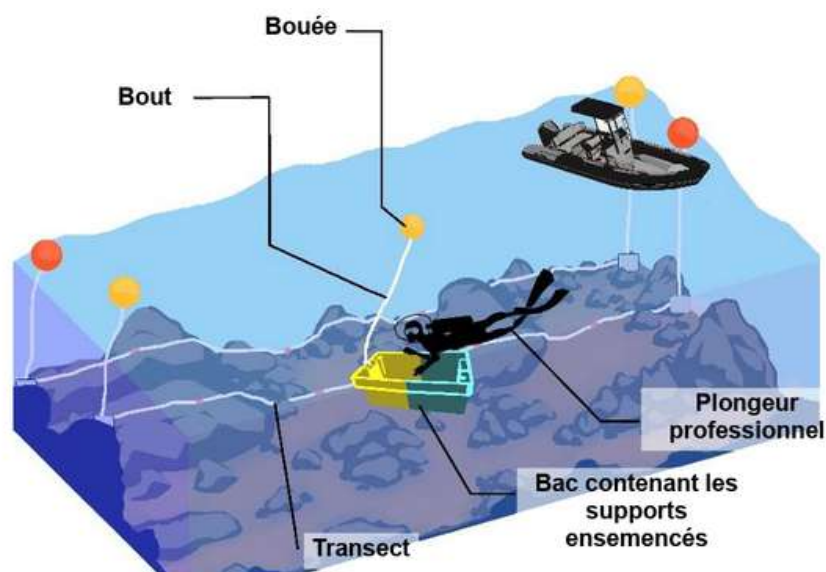


Figure 5: Représentation du processus d'implantation des substrats ensemencés sur la zone d'étude (Alarcon, 2024).

2.3. Inventaires de biodiversité

Afin d'évaluer l'impact de la restauration des laminaires sur la biodiversité locale, un inventaire a été réalisé en juillet 2024, avant l'implantation des galets et cordes, puis en juillet 2025, soit un an après la pose des galets. Ces inventaires seront poursuivis annuellement afin de suivre l'évolution à long terme des communautés biologiques. Les données sont collectées à l'aide de quadrats disposés le long de quatre transects au sein de la zone d'étude.

La méthodologie des inventaires repose sur le protocole standardisé ECBRS (État de Conservation des Biocénoses des Roches Subtidales), développé collectivement par des institutions scientifiques et gestionnaires afin d'évaluer l'état écologique des eaux côtières conformément aux directives européennes (Natura 2000, DCSMM, DCE). Elle permet de calculer un indice de qualité écologique (EQR) à partir de l'étude des macroalgues structurantes, de la faune associée et de la structure de l'habitat, en comparaison avec des sites de référence régionaux.

NB: Pour plus d'informations sur la méthodologie de culture et d'implantation des laminaires, ainsi que les inventaires de biodiversité, se référer au rapport d'Amélie Alarcon (2024), Restauration de l'habitat Laminaires, Partie 4.

2.4. Etude des données environnementales

2.4.1. Paramètres physico-chimiques étudiés

Afin de mieux comprendre les facteurs environnementaux contrôlant la croissance et la reproduction des laminaires, une sonde multiparamétrique (EXO 3, Xylem) a été placée sur le site de restauration en décembre 2024. Installée à une profondeur de 3.5 m et fixée avec une ancre (Fig.6), la sonde mesure chaque heure plusieurs paramètres physico-chimiques :

- La **turbidité**, c'est-à-dire la mesure de la réduction de la transparence due à la présence de matières en suspension dans l'eau (GIP Loire Estuaires, 2024). La turbidité influe sur la quantité de lumière atteignant les laminaires et donc la photosynthèse. Dans le cadre de l'étude, la turbidité a été mesurée en unités néphélométriques de formazine (FNU) avec un turbidimètre présent dans la sonde.

- La **température de l'eau**, qui contrôle directement la croissance et la reproduction des laminaires. En effet, la reproduction de *L. hyperborea* est soumise à des températures précises, entre 12 et 15 °C, et des températures trop élevées peuvent stopper ce processus (Dieck, 1992) ou encore provoquer la nécrose des laminaires (Simonson et al., 2015).
- La **salinité**. Bien que *L. hyperborea* puisse généralement tolérer de larges variations de salinité (16-50 PSU), sa croissance optimale est comprise entre 30 et 35 unités de salinité pratique (PSU, ou g de sel par kg d'eau) (Lüning, 1990).
- Le **pH**, qui est la mesure du taux d'acidité de l'eau. Le pH n'est généralement pas un facteur limitant de croissance pour les laminaires, mais celles-ci peuvent modifier le pH environnant, influençant donc les espèces sensibles aux variations de pH présentes dans l'écosystème (Cornwall 2013).

La sonde nécessite une réinitialisation, une recharge et le transfert des données à bord d'un bateau tous les trois mois. À la suite d'une erreur de manipulation lors de l'une de ces opérations, une interruption de la série de données d'une durée de deux mois est survenue, entre le 19 avril et le 17 juin 2025.



Figure 6: Sonde EXO 3, Xylem telle qu'affichée par le fabricant (à gauche), et la sonde sur le site de restauration fixée avec une ancre (à droite).

2.4.2. Analyse des données environnementales

Afin d'étudier l'évolution des paramètres physico-chimiques mesurés par la sonde, ceux-ci ont d'abord été analysés individuellement et représentés sous forme de séries temporelles. Pour mieux comprendre leur variabilité, ils ont ensuite été mis en relation avec plusieurs facteurs environnementaux susceptibles d'influencer les conditions locales :

- le **débit de la Loire**, dont les apports modulent les caractéristiques physico-chimiques de l'estuaire,
- la **hauteur de la houle**, qui contrôle le degré de brassage des masses d'eau,
- la **direction des vents**, qui influencent la dynamique des courants.

Les données de débit de la Loire ont été extraites du site [Candhis](#) au niveau de plateau du Four, la hauteur de la houle du site [Hydroportail](#) à la station de Saint Nazaire, et la direction du vent du site [OpenMeteo](#) au niveau de la Baule-Escoublac. Les horaires de lever et coucher du soleil à La Baule ont également été intégrés au jeu de données à partir de [Tutiempo.net](#) afin d'analyser les cycles journaliers.

Avant l'analyse des données, les enregistrements non représentatifs, notamment ceux acquis lors de la pose et du retrait de la sonde, ont été exclus du jeu de données. De même, certaines valeurs non cohérentes ont été supprimées (par exemple des valeurs de houle supérieures à 100 m). Les moyennes journalières ont été calculées à partir des enregistrements horaires des variables.

Les relations entre les variables ont été explorées à la fois par des analyses graphiques et par des analyses statistiques de corrélation. Les corrélations entre deux variables ont été évaluées à l'aide du test de **corrélation de rang de Spearman**, adapté aux relations non linéaires et aux distributions non normales.

Une analyse multivariée a également été réalisée afin d'explorer simultanément les relations complexes entre l'ensemble des variables environnementales continues. Parmi les méthodes disponibles, **l'Analyse des Coordonnées Principales (PCoA)** a été retenue, car elle est adaptée aux jeux de données combinant des variables mesurées sur des échelles différentes et présentant des relations non linéaires. Cette méthode repose sur le calcul préalable d'une matrice de distances entre les observations, puis sur la projection de ces distances dans un espace réduit de dimensions, permettant de visualiser les similitudes entre observations et les corrélations entre variables. Les nouvelles dimensions obtenues, Composantes Principales, correspondent à des combinaisons de variables maximisant la variabilité expliquée du jeu de données.

3. Résultats

3.1. La croissance et l'abondance des laminaires

Des observations régulières sur le site de restauration ont permis d'établir une chronologie de la croissance des laminaires. Après l'implantation des cordes et des galets en juillet 2024, les plantules ont commencé à grandir en avril–mai 2025, atteignant une taille de 8–10 cm. La croissance s'est poursuivie tout au long de l'été, pour atteindre environ 50 cm en juillet–août 2025 (Fig.7). Les laminaires ont été observées exclusivement sur substrat rocheux ; aucune colonisation n'a été constatée sur les cordes.

Au total, environ 500 individus de *L. hyperborea* ont été recensés dans cinq zones rocheuses situées à l'intérieur de la zone d'étude initiale, ainsi que dans une zone adjacente de 30 × 30 m (Fig.8). Quatre de ces zones, situées à une bathymétrie similaire (environ –1 m à marée basse), présentaient une densité élevée comprise entre 12 et 15 individus par m², avec des laminaires atteignant environ 50 cm de hauteur. Une cinquième zone, localisée à une profondeur plus importante (environ –2.5 m), se distinguait par une densité nettement plus faible (moins de 3 individus par m²) et des tailles plus réduites, de l'ordre de 20 cm. 150 laminaires ont été marquées à l'aide de colliers de couleur (serflex) en septembre afin de faciliter le suivi des individus.



Figure 7 : Photos de laminaires sur une roche de référence sur le site des Evens à un an d'écart, en juillet 2024 (à gauche) et juillet 2025 (à droite).

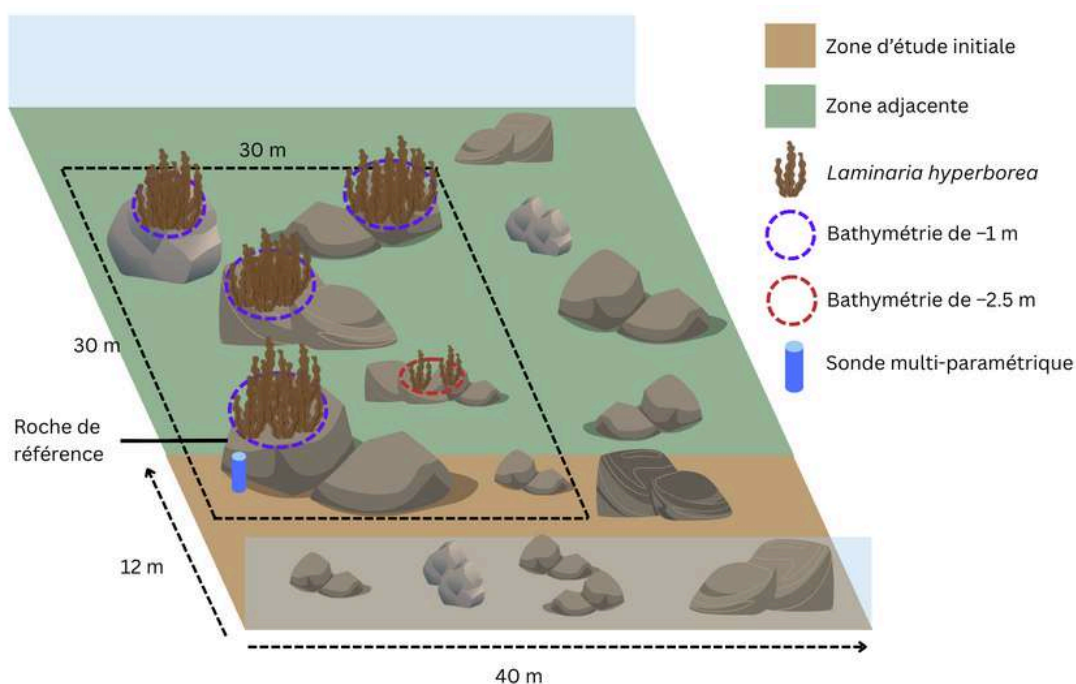


Figure 8 : Représentation des fonds marins du site de restauration des Évens, réalisée à partir d'observations de terrain et illustrant la distribution des individus de *L. hyperborea* observées en juillet 2025.

3.2. Evolution de la turbidité, température, salinité et pH entre décembre 2024 et octobre 2025

Turbidité

Au cours de la période d'étude, la turbidité était globalement plus élevée et plus variable entre décembre et avril (en moyenne 18.5 ± 7.7 FNU) qu'entre juin et octobre (en moyenne 10.0 ± 4.4 FNU) (Fig.9.a). Une diminution progressive de la turbidité est observée à partir de mars. La turbidité journalière maximale a été observée le 25/02/2025 avec 42.2 ± 15.6 FNU, et des valeurs instantanées atteignant 80.7 FNU et 85.6 FNU ont été enregistrées à cette période (respectivement le 25/02/2025 et le 26/02/2025). La turbidité journalière minimale a été observée le 08/08/2025 avec 5.1 ± 0.3 FNU. La variabilité intra-journalière de la turbidité, mesurée par les écarts-types, était également plus marquée entre décembre et avril qu'entre juin et octobre.

Température

La température de l'eau a présenté une évolution quasi linéaire au cours de la période d'étude (Fig.9.b). Entre décembre et avril, elle s'est établie autour d'une moyenne de 10.4 ± 1.2 °C, restant inférieure à 10 °C entre janvier et mars. La température journalière minimale a été observée le 02/02/2025, avec 8.3 ± 0.4 °C, tandis que la température minimale instantanée enregistrée était de 6.5 °C pendant la journée du 19/01/2025. À partir de février, la température a progressivement augmenté. Entre juin et octobre, la température moyenne était de 18.0 ± 0.7 °C, avec un maximum journalier de 19.5 ± 1.2 °C observé le 30/06/2025. Ce jour-là, la sonde a enregistré des températures instantanées allant jusqu'à 22.8 °C. Les écarts types sont particulièrement élevés entre mi-juin et début juillet ainsi qu'autour de mi-janvier.

Salinité

La salinité journalière moyenne a fluctué entre 21.7 ± 4.5 PSU et 35.3 ± 0.06 PSU sur l'ensemble de la période d'étude (Fig.9.c). Entre décembre et avril, la salinité moyenne était de 28.7 ± 2.6 PSU, avec une forte variabilité : les valeurs journalières alternaient entre des périodes de faible et de forte salinité, et la variabilité intra-journalière était également importante, se traduisant par des écarts types élevés. La salinité journalière minimale observée est de 21.7 ± 4.5 PSU le 21/02/2025. Toutefois, des valeurs instantanées plus faibles encore (en-dessous de 16 PSU) ont été enregistrées au cours des mois de janvier et février, comme lors du 29/01/2025 où la salinité est descendue jusqu'à 11.6 PSU. À partir de mi-mars, une tendance générale à l'augmentation de la salinité se dessine, bien que des épisodes de faible salinité persistent. Entre juin et octobre, la salinité est restée plus élevée et relativement plus stable que lors de la période hivernale, avec une moyenne de 34.2 ± 0.06 PSU. La salinité maximale journalière a été observée le 07/07/2025, atteignant 35.3 ± 0.06 PSU.

pH

Le pH moyen observé sur l'ensemble de la période d'étude était de 7.95 ± 0.07 (Fig.9.d). Les moyennes journalières minimales de pH ont été observées au début de la période de mesure, les 04/12/2024 et 05/12/2024, avec un pH en moyenne de 7.82 ± 0.03 . À partir de février, le pH a augmenté progressivement. Entre juin et octobre, le pH a présenté une forte variabilité : en juin, une chute brutale de pH de 8.10 à 7.90 a été observée en l'espace de quelques jours (entre le 19/06/2025 et le 22/06/2025), correspondant à une variation de pH d'environ 59 % (sur l'échelle logarithmique), avant une remontée à 8.05 fin juin. La période de juin à octobre s'est également caractérisée par une forte variabilité intra-journalière, indiquée par des écarts types plus élevés qu'en hiver. Les analyses statistiques montrent notamment que le pH est en moyenne 0.03 unités (7.2%) plus élevé de jour que de nuit, tandis qu'aucune différence significative n'a été observée entre décembre et avril (Annexe 1).

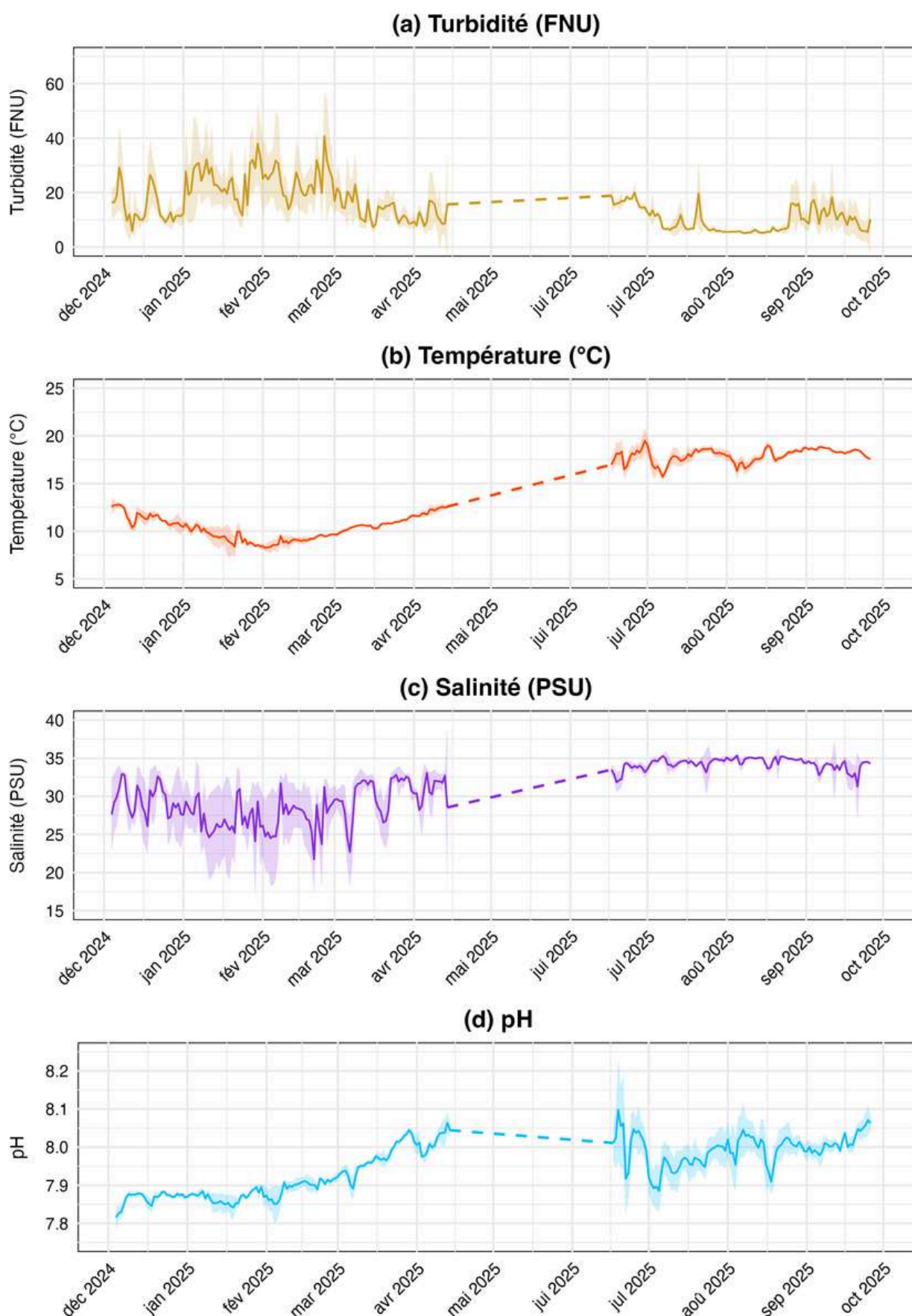


Figure 9 : Évolution des moyennes journalières de turbidité (en unité néphélométrique de formazine - FNU) (a), de température (en °C) (b), de salinité (unités de salinité pratique - PSU ou g de sel par kg d'eau) (c), et de pH entre décembre 2024 et octobre 2025 (d). Les rubans autour des lignes correspondent à l'écart type et la ligne en pointillés représente une période d'absence de données (14/04 – 17/06).

3.3. Mise en relation des paramètres physico-chimiques avec la houle, le débit de la Loire et les vents

Pour comprendre la variabilité de la température, de la turbidité, de la salinité et du pH, ces paramètres ont été mis en relation avec la houle, le débit de la Loire, et la direction du vent par corrélations graphiques et statistiques (Annexe 2).

3.3.1. Evolution de la houle et du débit de la Loire au cours de la période d'étude

La houle était en moyenne plus élevée entre décembre et avril qu'entre juin et octobre (1.32 ± 0.85 m contre 0.87 ± 0.52 m) (Fig.10.a). Des épisodes de houle particulièrement intenses ont marqué la fin du mois de janvier, avec des moyennes journalières maximales atteignant 4.25 ± 0.22 m le 27/01/2025. Le débit de la Loire, en moyenne autour de $988 \text{ m}^3/\text{s}$ au cours de la période d'étude, était également plus élevé entre décembre et avril qu'entre juin et octobre ($1754 \pm 731 \text{ m}^3/\text{s}$ contre $365 \pm 269 \text{ m}^3/\text{s}$) (Fig.10.b). Des périodes de fort débit (supérieures à $3000 \text{ m}^3/\text{s}$) ont été observées entre le 09/01/2025 et le 16/01/2025 puis entre le 29/01/2025 et le 02/02/2025. Le débit journalier maximal a été observé le 13/01/2025, atteignant $3723 \pm 7.34 \text{ m}^3/\text{s}$.

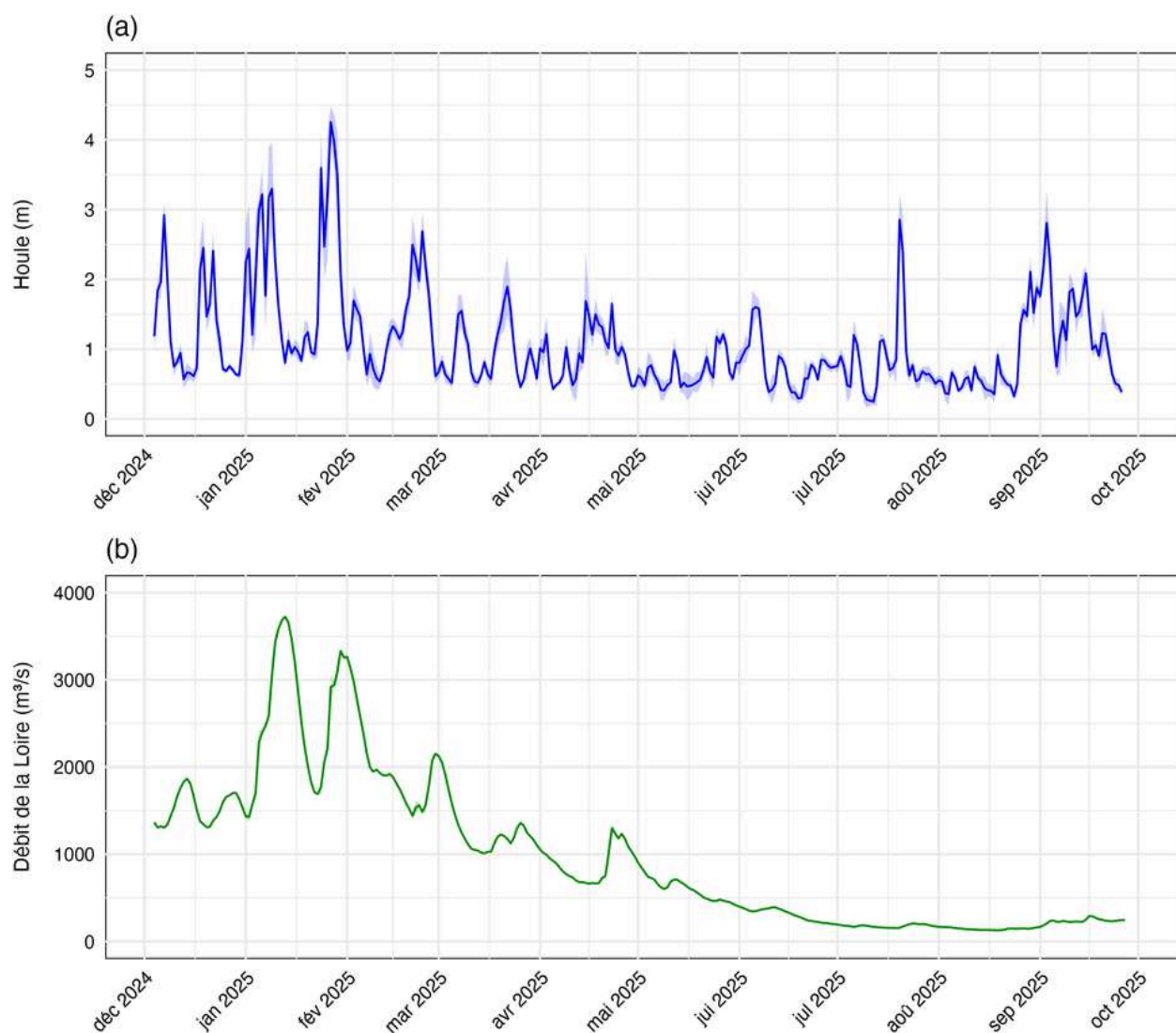


Figure 10 : Évolution des moyennes journalières de houle (en mètres) (a) et de débit de la Loire (m^3/s) (b) entre décembre 2024 et octobre 2025. Les rubans autour des lignes correspondent à l'écart type.

3.3.2. Influence du débit de la Loire sur les paramètres

Influence sur la température

La température de l'eau et le débit de la Loire sont corrélés négativement au cours de la période d'étude (coef. = -0.851) (Tableau 1, Annexe 2). Les périodes de fort débit hivernal (janvier-mars, débit moyen de $2315 \pm 687 \text{ m}^3/\text{s}$), sont associées à une température inférieure à 10°C . À l'inverse, la période juin-octobre, caractérisée par un débit faible (en moyenne de $365 \pm 269 \text{ m}^3/\text{s}$) coïncide avec des températures plus élevées, en moyenne de $18.0 \pm 0.7^\circ\text{C}$. Cette relation négative est particulièrement marquée entre décembre et avril (coef. = -0.742), alors qu'elle devient faible et positive entre juin et octobre (coef. = 0.235), indiquant une moindre influence de la Loire sur la température à cette période. La période d'écarts-type élevés de la température autour de mi-janvier coïncide également avec les fortes crues de la Loire (Annexe 2).

Influence sur la salinité

Le débit de la Loire et la salinité présentent une forte corrélation négative sur l'ensemble de la période d'étude (coef. = -0.898), ainsi qu'au cours des périodes décembre-avril (coef. = -0.613) et juin-octobre (coef. = -0.638) (Tableau 1, Annexe 2). Les épisodes de fort débit fluvial sont associés à une diminution marquée de la salinité. Par exemple, le 13/01/2025, un débit de $3723 \pm 7.34 \text{ m}^3/\text{s}$ correspondait à une salinité de $25.5 \pm 5.32 \text{ PSU}$, et le 01/02/2025, un débit de $3262 \pm 28.5 \text{ m}^3/\text{s}$ était associé à une salinité de $26.4 \pm 3.78 \text{ PSU}$. À l'inverse, les périodes de faible débit coïncident avec une augmentation de la salinité, comme observé le 23/01/2025 ($1691 \pm 7.34 \text{ m}^3/\text{s}$, $31.2 \pm 2.24 \text{ PSU}$) et le 15/03/2025 ($1011 \pm 8.29 \text{ m}^3/\text{s}$, $32.0 \pm 0.816 \text{ PSU}$). La période juin-octobre est également caractérisée par des salinités élevées (en moyenne $34.2 \pm 0.06 \text{ PSU}$), associées à des débits globalement faibles (en moyenne $365 \pm 269 \text{ m}^3/\text{s}$).

Influence sur le pH

Le pH présente également une corrélation négative avec le débit de la Loire sur l'ensemble de la période d'étude (coef. = -0.674) (Tableau 1, Annexe 2). Toutefois, la force et le sens de cette relation varient selon la saison. Entre décembre et avril, une corrélation négative marquée est observée (coef. = -0.638) : l'augmentation progressive du pH, de 7.9 à 8.05 unités de pH, entre février et mi-avril, coïncide avec une diminution concomitante du débit fluvial, augmentant d'environ 2000 à 700 m^3/s . En revanche, entre juin et octobre, la relation s'inverse, le coefficient de corrélation devenant positif et plus faible (coef. = 0.269). Ceci indique une influence atténuée du débit de la Loire sur le pH et suggère que les hausses de débit au cours de cette période sont associées à une augmentation du pH.

Influence sur la turbidité

Les analyses statistiques indiquent une corrélation positive et forte entre la turbidité et le débit de la Loire sur l'ensemble de la période d'étude (coef. = 0.735) (Tableau 1). Les épisodes de fort débit fluvial sont associés à une augmentation de la turbidité, comme l'illustrent le débit et la turbidité moyennes plus élevées entre décembre et avril ($1754 \pm 731 \text{ m}^3/\text{s}$ et $18.5 \pm 7.7 \text{ FNU}$), comparativement à la période juin-octobre, marquée par des débits plus faibles ($365 \pm 269 \text{ m}^3/\text{s}$ en moyenne) et une turbidité réduite ($10.0 \pm 4.4 \text{ FNU}$). Bien que les corrélations statistiques soient significatives, les observations graphiques ne sont pas aussi claires (Annexe 2). Seulement certains pics de turbidité coïncident avec des épisodes de débit élevé, notamment le 30/01/2025 ($38.3 \pm 14.5 \text{ FNU}$, $3331 \pm 17.8 \text{ m}^3/\text{s}$), et à l'inverse la période de turbidité réduite du 23/01/2025 correspond à un débit faible ($13.6 \pm 6.12 \text{ FNU}$, $1691 \text{ m}^3/\text{s} \pm 7.34 \text{ m}^3/\text{s}$).

Tableau 1 : Résultats des tests de corrélation de Spearman entre les moyennes journalières des différents paramètres, calculées pour l'ensemble de la période, ainsi que pour décembre–avril et juin–octobre. Tous les coefficients sont statistiquement significatifs ($p < 0.05$), sauf les coefficients en italique.

Paramètres	Coef. de corrélation entre déc. et oct.	Coef. de corrélation entre déc. et avr.	Coef. de corrélation entre jui. et oct.
Turbidité & Houle	0.622	0.625	0.502
Turbidité & Débit	0.735	0.631	0.544
Température & Houle	-0.265	-0.260	0.465
Température & Débit	-0.851	-0.742	0.235
pH & Houle	-0.393	-0.380	-0.058
pH & Débit	-0.674	-0.638	0.269
Salinité & Houle	-0.406	-0.381	-0.078
Salinité & Débit	-0.898	-0.613	-0.638

3.3.3. Influence de la houle sur les paramètres

Turbidité

La turbidité présente une corrélation positive et modérément forte avec la houle sur l'ensemble de la période d'étude (coef. = 0.622) (Tableau 1). Les pics de turbidité coïncident clairement avec des périodes de forte houle (Annexe 2), notamment le 19/12/2024 (houle de 2.45 ± 0.41 m, turbidité de 26.2 ± 13.3 FNU), et le 21/07/2025 (turbidité de 19.2 ± 12.8 FNU, houle de 2.39 ± 0.51 m). Ces corrélations sont également visibles lors de périodes prolongées, comme entre le 04/01/2025 et le 10/01/2025, une période caractérisée par une turbidité moyenne de 27.7 ± 13.8 FNU, et une houle moyenne de 2.68 ± 0.81 m. À l'inverse, les périodes de faible turbidité correspondent à des conditions de houle atténuée, comme lors du 25/12/2024 (turbidité de 9.00 ± 1.58 FNU, houle de 0.71 ± 0.05 m) et entre le 01/08/2025 et le 15/08/2025 (turbidité de 5.55 ± 0.69 FNU et houle de 0.52 ± 0.15 m).

Salinité, température et pH

Sur l'ensemble de la période d'étude, la houle présente des corrélations négatives et relativement faibles avec la température (coef. = -0.265), la salinité (coef. = -0.406) et le pH (coef. = -0.393). Entre décembre et avril, ces relations demeurent négatives. En revanche, entre juin et octobre, la relation entre la houle et la température s'inverse et devient modérément positive (coef. = 0.465), tandis qu'aucune corrélation significative n'est observée entre la houle et le pH, ni entre la houle et la salinité au cours de cette période (Tableau 1).

3.3.4. Influence des vents sur les paramètres

Les analyses statistiques montrent que la direction du vent exerce une influence significative sur la turbidité, la température, la salinité, et le pH (test de Kruskal-Wallis, $p < 0.05$, voir Annexe 3) (Fig.11). Les vents provenant du Sud, de l'Est et du Sud-Est sont associés à des niveaux de turbidité élevés ainsi qu'à des niveaux bas de salinité, de température et de pH au niveau du site. Sous vents du Sud-Est, les valeurs de salinité et de température sont minimales (27.57 ± 4.93 PSU ; 11.12 ± 2.97 °C), le pH est relativement faible (7.93 ± 0.07) et la turbidité est maximale (16.84 ± 9.30 FNU en moyenne). À l'inverse, les vents de secteurs Nord, Ouest et Nord-Ouest correspondent aux niveaux de turbidité les plus faibles (12.05 ± 10.73 FNU pour le secteur Nord), ainsi qu'aux valeurs les plus élevées de température (16.03 ± 3.42 °C pour l'Ouest), de salinité (33.21 ± 2.64 PSU pour l'Ouest) et de pH (7.97 ± 0.07 pour l'Ouest).

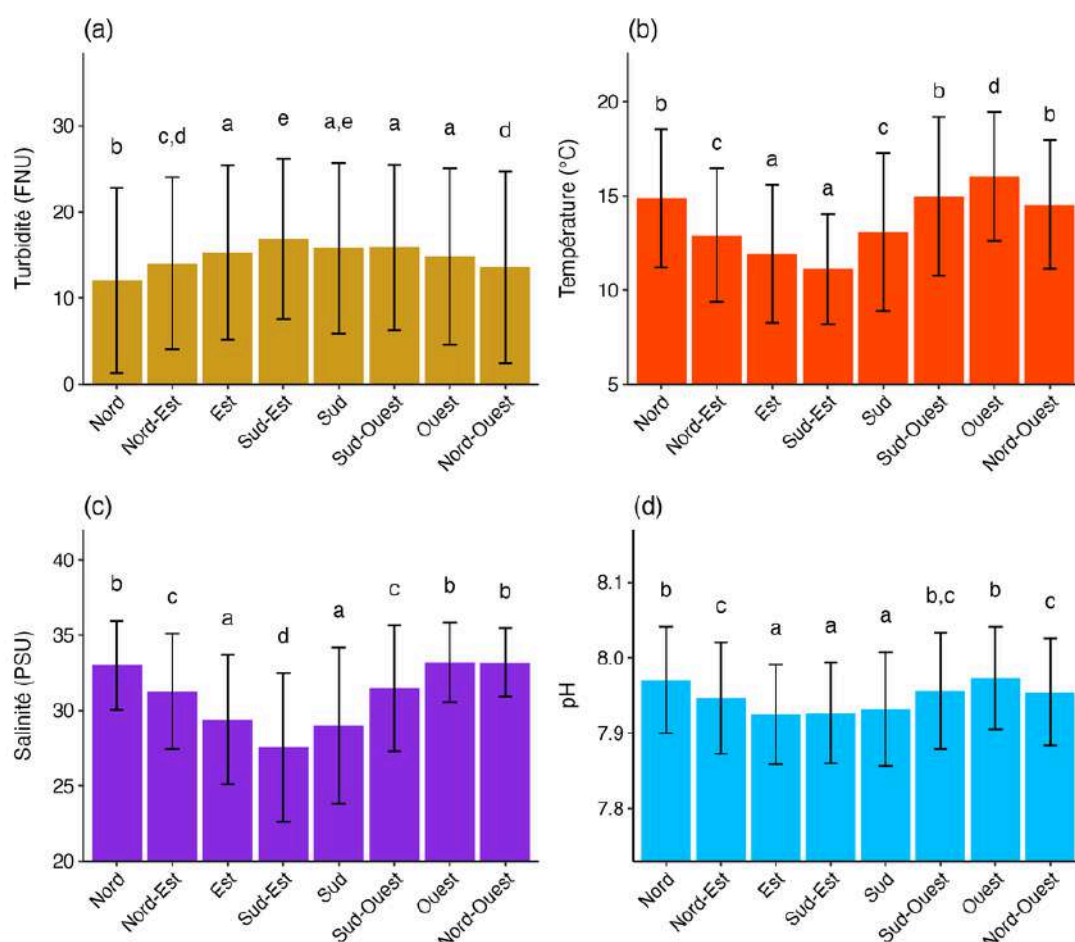


Figure 11 : Effet de la direction du vent sur la turbidité (a), la température (b), la salinité (c) et le pH (d). Les barres colorées représentent les valeurs moyennes (\pm écart-type) de chaque paramètre pour les différentes directions de vent. Des lettres différentes au-dessus des barres indiquent des différences statistiquement significatives entre les moyennes (test post-hoc de Dunn avec correction de Bonferroni, $p < 0.05$).

3.3.5. Analyse multivariée

L'analyse des coordonnées principales met en évidence deux groupes de points distincts correspondant aux deux périodes de mesure (décembre-avril, juin-octobre), indiquant que la saison constitue un facteur majeur de structuration des données (Fig.12). Le graphique met également en évidence deux axes principaux expliquant la plupart de la variation totale ($80.6\% + 13.9\% = 94.5\%$).

L'axe PCoA1, qui concentre à lui seul la majorité de la variabilité observée (80.6%), est fortement structuré par le débit fluvial (coefficient de vecteur = -0.91) (Tableau 2). Celui-ci est nettement plus élevé durant la période décembre-avril, comme l'indique la flèche orientée vers les observations de cette période. Cet axe est également significativement influencé par la température (0.83), la salinité (coef. = 0.69) et le pH (coef. = 0.70), variables positivement corrélées entre elles et plus élevées entre juin et octobre qu'entre décembre et avril. Le débit est négativement corrélé à ces trois variables, comme en témoignent les orientations opposées des vecteurs. Ainsi, PCoA1 représente un gradient saisonnier marqué, allant d'un hiver dominé par un fort débit fluvial à un été caractérisé par des eaux plus chaudes, plus salées et plus alcalines.

L'axe PCoA2 capture une part plus réduite de la variation totale (13.9%). Cet axe est fortement influencé par la turbidité (coef. = 0.73) et la houle (coef. = 0.86), variables positivement corrélées entre elles. L'axe 2 décrit ainsi la variabilité intra-saisonnière liée aux conditions de mélange.

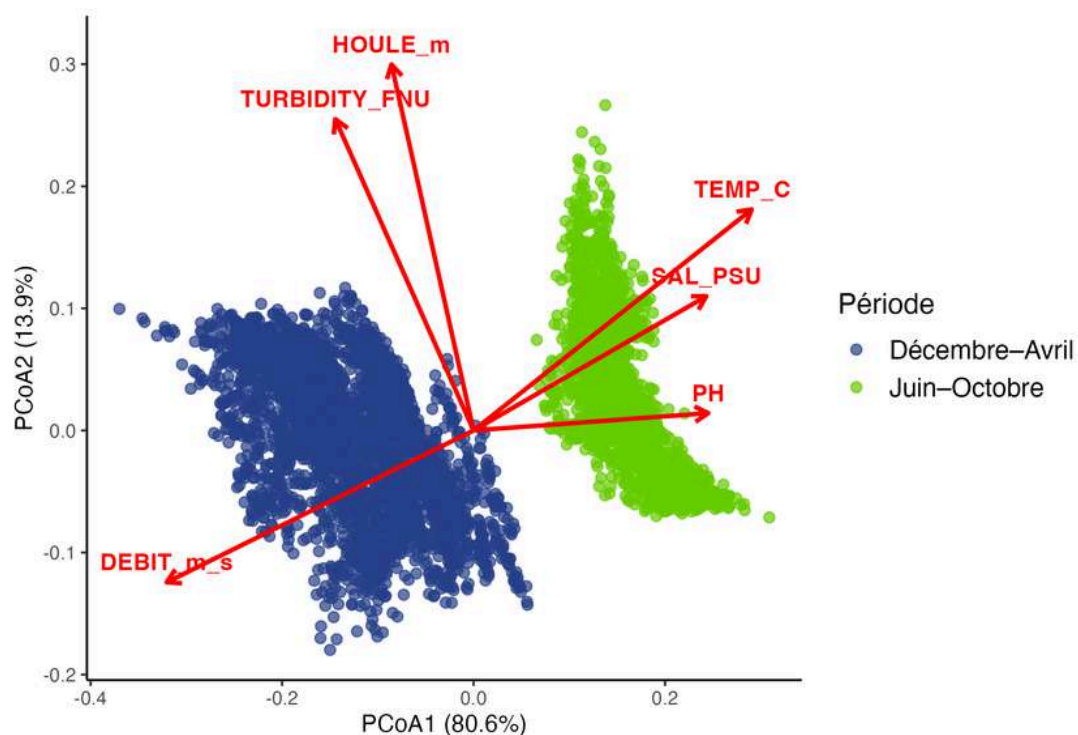


Figure 12 : Analyse des coordonnées principales entre décembre 2024 et octobre 2025. Chaque point est une observation pendant la période d'étude, c'est-à-dire un moment précis où des mesures ont été prises pour toutes les variables. Ces points ont été coloriés par période (décembre-avril et juin-octobre). Les variables sont représentées sous forme de flèches qui permettent de déterminer l'influence des variables sur la variation totale.

Tableau 2 : Coefficients des vecteurs des paramètres pour chaque axe de l'analyse des coordonnées principales. Les coefficients des vecteurs sont des corrélations directionnelles entre chaque variable environnementale et les axes de l'ordination. Ils indiquent dans quelle direction et avec quelle intensité chaque variable structure la distribution des observations dans l'espace PCoA.

Paramètre	Coef. vecteur pour <u>PCoA1</u>	Coef. vecteur pour <u>PCoA2</u>
Débit de la Loire (m3/s)	-0.9159127	-0.35542096
Salinité (PSU)	0.6945181	0.31394564
pH	0.7004623	0.04051113
Température (°C)	0.8301083	0.51722589
Turbidité (FNU)	-0.4126482	0.72850899
Houle (m)	-0.2450300	0.85659286

4. Discussion et perspectives

4.1. Les modalités du développement des laminaires

Le premier résultat encourageant issu des deux premières années de l'étude de restauration menée par ELV est la croissance effective des laminaires entre 2024 et 2025. Plusieurs observations peuvent être formulées concernant les modalités de développement des laminaires.

- **Profondeur** : Bien que les galets aient été initialement déployés entre -1 et -3.5 m de profondeur, les individus adultes de *L. hyperborea* ont été observés majoritairement à faible profondeur (environ -1m), avec des densités élevées comprises entre 12 et 15 individus par m² et mesurant environ 50 cm. Une seule zone de présence de laminaires a été détectée à plus grande profondeur (environ -2.5 m), mais avec une densité nettement plus faible (moins de 3 individus par m²) et des individus de plus petite taille (20 cm). Ces résultats indiquent que les laminaires ont présenté de meilleures performances de croissance dans les zones proches de la surface, ce qui pourrait s'expliquer par la présence d'une plus forte luminosité, favorisant la photosynthèse.
- **Dispersion spatiale** : Les laminaires n'ont généralement pas été observées dans la zone d'étude initiale, mais plutôt dans une zone adjacente (de 30 x 30 m de surface) située plus au Nord, près de l'îlot des Evens. Cette distribution suggère que les plantules se sont majoritairement détachées des galets et des cordes – potentiellement par l'action de la houle, puis fixées à des substrats environnants. Les plantules pourraient par exemple s'être fixées dans les algues rouges environnantes, qui poussent à partir d'avril. Une autre hypothèse est la présence de gamétophytes sur les frondes lors du transfert des galets porteurs de plantules, qui auraient ensuite dérivé sous l'influence de la houle.
- **Conditions environnementales** : Les laminaires ont démontré une capacité de croissance malgré des conditions environnementales contraignantes. Un épisode de canicule marquée fin juin (19/06–04/07) (Météo France, 2025) a provoqué une augmentation importante de la température de l'eau (maximum journalier de 19.5 °C observé le 30/06) (Fig.9.b). Les températures instantanées enregistrées ont également dépassé les 21 °C à 6 reprises entre le 29 juin et le 1er juillet (Annexe 4), seuil au-delà duquel une nécrose des tissus peut se produire chez les laminaires (Simonson et al., 2015). De plus, des épisodes de forte houle, atteignant jusqu'à 4.25 m, ont été enregistrés durant la période d'étude, susceptibles de provoquer l'arrachage des plants. Enfin, la salinité a présenté une extrême variabilité, oscillant entre 21.7 et 35.3 PSU (Fig.9.c). La formation de populations denses dans ces conditions suggère que la phase de culture en laboratoire a joué un rôle déterminant en renforçant la résilience des individus.
- **Période favorable de croissance** : Les graphiques de turbidité (Fig.9.a), de température (Fig.9.b), et de salinité (Fig.9.c) pris ensemble montrent que la période durant laquelle les laminaires ont poussé (printemps-été) coïncide avec une évolution concordante des paramètres physico-chimiques à partir de mi-mars : une diminution de la turbidité, une augmentation de la température et une augmentation de la salinité. Toutes ces évolutions sont favorables à la croissance des laminaires. La baisse de la turbidité améliore la pénétration de la lumière dans la colonne d'eau, stimulant la photosynthèse, tandis que la croissance optimale de *L. hyperborea* est observée à des températures comprises entre 10 et 15 °C (Dieke, 1992) et des salinités entre 30 et 35 PSU (Lüning, 1990). S'ajoute à ces évolutions également l'allongement de la photopériode, permettant une augmentation de l'activité photosynthétique. À partir d'avril, la durée d'ensoleillement devient supérieure à celle de l'obscurité (406 heures de jour contre 313 heures de nuit cumulées sur le mois d'avril à La Baule), tandis que la couverture nuageuse diminue progressivement.

4.2. L'influence de la houle, du débit de la Loire et des vents sur la turbidité, la température et la salinité et le pH

Les résultats ont premièrement montré que la température, le pH et la salinité sont fortement influencés par le débit de la Loire. En ce qui concerne la température, la corrélation entre le débit et la température est négative et forte en hiver, tandis qu'elle devient positive et faible en été. Durant la période des grandes crues de la Loire, entre janvier et mars, l'apport important d'eaux fluviales — particulièrement froides à cette période de l'année (entre 4 et 10 °C à la station de Montjean-sur-Loire, moyennes 2005–2023, rapport GIP Loire Estuaires, 2025a) — contribue à abaisser la température de l'eau côtière en dessous de 10 °C. À l'inverse, entre juin et octobre, la Loire est non seulement beaucoup plus chaude (20–25 °C; GIP Loire Estuaires, 2025a), mais son débit, fortement réduit, exerce une influence bien moindre sur la température de la mer. Celle-ci évolue alors principalement en fonction du réchauffement estival de l'air, conduisant à des températures marines plus élevées.

Concernant la salinité, l'apport massif d'eau douce en période de fortes crues (janvier-février) entraîne une dilution de l'eau de mer et une baisse marquée de la salinité, conduisant à des valeurs particulièrement faibles (jusqu'à 21.7 PSU le 21/02), très inférieures à la salinité de l'Atlantique au large, en moyenne de 35 PSU (Zweng et al, 2019). À l'inverse, lorsque le débit de la Loire diminue, notamment durant la période estivale, l'influence fluviale s'atténue et la salinité s'élève. Ces mécanismes expliquent la corrélation négative observée entre le débit de la Loire et la salinité sur l'ensemble de la période d'étude.

La corrélation entre le pH et le débit présente également une variation saisonnière marquée : elle est négative et forte en hiver, puis devient positive et faible en été. Entre février et avril, la diminution progressive du débit de la Loire — dont le pH est autour de 7.8 — entraîne une augmentation du pH des eaux côtières. À l'inverse, entre juin et octobre, le débit est plus faible et le pH de la Loire devient nettement plus basique (environ 8.2), de sorte que les apports fluviaux faibles contribuent à une élévation du pH en milieu marin. Cependant, l'analyse graphique de l'évolution du pH montre une forte variabilité du pH à cette période, particulièrement marquée au mois de juin, avec des fluctuations pouvant atteindre jusqu'à 59 % en l'espace de quelques jours (Fig.9.d). Plusieurs hypothèses peuvent être avancées pour expliquer ces importantes variations de pH entre juin et octobre :

- (i) le développement de **blooms phytoplanctoniques**, dont la décomposition entraîne d'une part une baisse d'oxygène dans le milieu (hypoxie/anoxie) et d'autre part une augmentation de la production de dioxyde de carbone et, par conséquent, une acidification locale du milieu. La survenue de tels blooms est plausible à cette période, en raison d'une forte hydraulicité printanière favorisant les apports en nutriments issus des activités agricoles du bassin de la Loire, combinée aux températures élevées observées au mois de juin.
- (ii) l'occurrence d'**épisodes orageux** au mois de juin, susceptibles d'apporter des eaux de ruissellement relativement douces (de pH proche de la neutralité), voire plus acides (WHOI, 2007), modifiant ainsi temporairement le pH du milieu côtier.

Deuxièmement, la turbidité est fortement influencée à la fois par la houle et le débit de la Loire. La turbidité est directement contrôlée par la houle, comme l'indiquent les corrélations graphiques nettes entre les épisodes de forte houle et les périodes de turbidité élevée. La houle provoque une remise en suspension des sédiments du fond, augmentant la concentration de matières en suspension dans la colonne d'eau et réduisant la transparence du milieu (Dussauze et al, 2009).

Le débit de la Loire exerce également une influence significative sur la turbidité. Les apports fluviaux en sédiments fins, notamment sous forme de vase, contribuent à l'augmentation de la turbidité en zone côtière. Toutefois, l'influence du débit sur la turbidité apparaît plus indirecte dans les observations graphiques (Annexe 2), en alimentant le milieu en sédiments qui sont ensuite remis en suspension par l'action de la houle. Par ailleurs, l'interaction complexe entre le débit de la Loire et le fonctionnement du bouchon vaseux — caractérisé par des concentrations en matières en suspension supérieures à 1 g/L (GIP Loire Estuaires, 2025b)— pourrait expliquer cette relation indirecte (Annexe 5). Selon les observations du GIP, la première grande crue de 2025, survenue autour du 13 janvier (avec des débits supérieurs à 3000 m³/s), a entraîné un déplacement du bouchon vaseux vers l'aval (GIP Loire Estuaires, 2025b), provoquant vraisemblablement une évacuation partielle du bouchon et une augmentation des apports de sédiments en mer. Ce processus aurait été amplifié lors des crues successives de janvier et février, **conduisant notamment à un pic de turbidité très marqué à la fin du mois de février (42 FNU), supérieur à ce que l'effet de la houle seule aurait permis d'expliquer** (Annexe 2). Ainsi, **le débit de la Loire et la houle interagissent de manière complexe pour contrôler la turbidité** au niveau du site de restauration.

La houle exerce un effet secondaire sur la température, le pH et la salinité. Les corrélations entre la houle et ces paramètres sont faibles, mais orientées dans le même sens que celles identifiées entre le débit de la Loire et les paramètres (Tableau 1). Ceci suggère que la houle renforce l'influence fluviale en brassant les masses d'eau. Au contraire, en l'absence de houle, les différences de densité entre les eaux froides et douces apportées par la Loire et les eaux plus salées de l'océan peuvent entraîner une stratification de la colonne d'eau, les masses d'eau fluviale se retrouvant en surface au-dessus des eaux océaniques plus denses (GIP Loire Estuaire, 2021). Cet effet est perceptible principalement entre décembre et avril, période durant laquelle l'influence de la Loire sur les paramètres physico-chimiques est dominante : les corrélations entre la houle et la salinité, la température et le pH sont négatives et faibles. En revanche, entre juin et octobre, lorsque l'action de la Loire devient plus limitée, aucune corrélation significative n'est observée entre la houle et le pH ou entre la houle et la salinité.

Les résultats de l'analyse multivariée appuient les observations graphiques et statistiques (Fig.12). Le débit de la Loire apparaît comme le facteur expliquant la plus grande part des variations observées entre les périodes étudiées (décembre-avril et juin-octobre). La période comprise entre décembre et avril est caractérisée par des conditions de haut débit, associées à l'apport d'eaux froides, douces et acides, tandis que la période de juin à octobre correspond à des conditions de faible débit, au cours desquelles le site présente des températures plus élevées et une salinité accrue. La houle, quant à elle, explique principalement les variations intra-saisonnières, en particulier la variabilité de la turbidité.

Enfin, la direction du vent a joué un rôle moins déterminant que la houle et les crues, mais tout de même significatif statistiquement. Lorsque les vents soufflent des secteurs Sud-Est à Est, la turbidité augmente, tandis que la température, la salinité et le pH diminuent. Ceci peut s'expliquer par la dynamique des courants de la Loire, qui sont alors emportés vers l'Ouest/Nord-Ouest, dans la direction du site d'étude (Fig.13). À l'inverse, lorsque les vents proviennent de l'Ouest ou du Sud-Ouest, la turbidité est plus faible et les valeurs de température, de salinité et de pH sont plus élevées, les apports fluviaux étant alors déviés vers l'Est/Nord-Est (Fig.13).

Les vents influencent également, à certaines périodes, l'intensité du mélange des masses d'eau. Les vents d'Est et de Nord-Est sont associés à des moyennes de houle plus faibles (Annexe 6), et donc à un brassage réduit. À débit fluvial constant, un simple changement de direction du vent peut ainsi modifier rapidement les conditions physico-chimiques du milieu. Ce mécanisme pourrait notamment expliquer la forte variabilité intra-journalière de la salinité observée entre décembre et avril (Fig.9.c), les variations de brassage liées aux régimes de vent modifiant localement le mélange des eaux marines et fluviales et entraînant par conséquent des variations importantes de salinité.

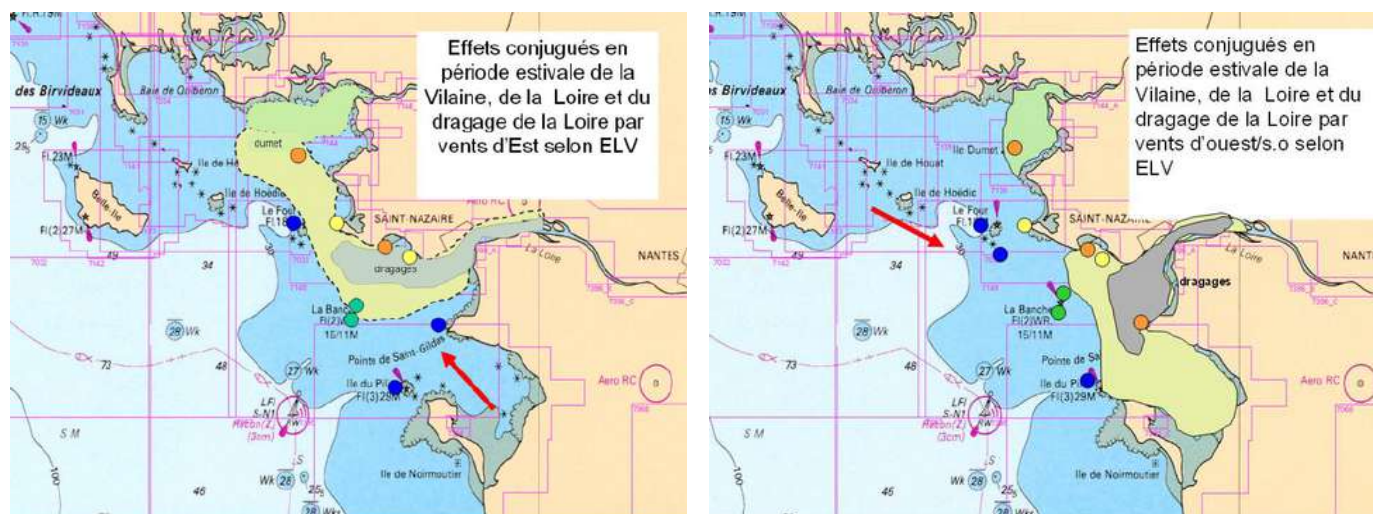


Figure 13 : Cartes des effets conjugués en période estivale de la Vilaine, de la Loire, et de dragage de la Loire par vents du Sud (à gauche), et vents d'ouest (à droite). Les flèches rouges représentent la direction du vent. Les surfaces en gris sont les zones très turbides, et en jaune moins turbides. Les points de couleurs différentes sont les sites inventoriés lors de la campagne d'ELV. Les couleurs des points désignent la qualité de l'eau sur ces sites: bleu (bonne qualité) > vert > jaune > orange (mauvaise qualité) selon la notation EQR (ecological quality ratio). Cartes tirées du rapport Santé Littoral Mer Loire Vilaine SLMLV de 2010.

4.3. Autres facteurs naturels et anthropiques

4.3.1. Les marées

En complément de la houle, du débit de la Loire et de la direction du vent, les marées jouent également un rôle important dans la variabilité des paramètres physico-chimiques, en particulier à l'échelle intra-journalière. Les volumes d'eau mis en mouvement par le cycle de marée influencent fortement la température de l'eau dans les zones d'estuaires, où se mélangent les masses d'eau fluviales et océaniques. Lors de la marée montante (flot), les volumes d'eau de mer pénétrant dans l'estuaire sont estimés à 5 à 15 fois supérieurs aux apports fluviaux de la Loire (GIP Loire Estuaires, 2025a). À l'inverse, lors de la marée descendante (jusant), l'influence des eaux fluviales devient dominante et conditionne davantage la température de l'estuaire.

Ainsi, les températures instantanées supérieures à 21 °C observées à plusieurs reprises durant l'épisode de canicule de la fin juin (Annexe 4) ont été enregistrées principalement lors des phases de jusant et de basse mer. Lors de ces phases de marées, la Loire — dont la température atteint à cette période 20 à 25 °C (GIP Loire Estuaires, 2025c) — exerce une influence marquée sur la température de la mer, et la diminution de la hauteur de la colonne d'eau favorise un réchauffement rapide du milieu. Cette dynamique explique la forte variabilité intra-journalière de la température observée au cours de cette période. De même, le minimum de température instantanée enregistré le 19/01/2025 (6.5 °C) s'est également produit lors d'une phase de marée descendante, lorsque la Loire, entre 4 et 10 °C à cette période, exerce une influence importante sur la température de l'estuaire.

4.3.2. La variabilité des étiages de la Loire

Bien que l'influence du débit de la Loire sur la turbidité soit clairement établie, la variabilité des conditions d'étiages de la Loire, c'est-à-dire les périodes où le débit est inférieur à 250 m³/s (GIP Loire Estuaires, 2025c), constitue un facteur déterminant à prendre en compte. L'année 2024 a en effet été particulièrement humide, avec un débit moyen de 1189 m³/s au cours de l'année, et des étiages très peu marqués, le débit étant resté supérieur à 250 m³/s tout au long de l'année (GIP Loire Estuaires, 2025c). Dans ces conditions, le développement d'un bouchon vaseux a probablement été limité, le débit élevé favorisant un transport continu des sédiments vers l'aval.

À l'inverse, les données indiquent un étiage prolongé en 2025, avec 94 jours de débit inférieur à 250 m³/s déjà enregistrés entre le 22 juin et le 26 septembre 2025 (Fig.9.a). Ces conditions sont favorables à la formation d'un bouchon vaseux plus épais et plus en amont de la Loire, pouvant entraîner une turbidité accrue dans l'estuaire lors de grandes crues en 2026 provoquant l'évacuation du bouchon.

4.3.3. Les dragages

Des opérations de dragage, menées jusqu'au mois de mars dans le secteur d'étude, ont vraisemblablement contribué à influencer la turbidité. Ces opérations sont régulièrement effectuées dans le Grand Port de Nantes–Saint-Nazaire afin de maintenir les profondeurs nécessaires à la navigation, en extrayant les sédiments accumulés dans les ports, les canaux et les chenaux (Alzieu et al, 1999). La méthode la plus couramment employée dans cette région est le dragage hydraulique, qui consiste à aspirer les sédiments à l'aide d'une drague, puis à les rejeter dans une zone de dépôt définie en milieu marin (par refoulement ou clapage selon le type de dragage) (Fig.14 & 15). Cette technique entraîne une remise en suspension temporaire des particules fines, provoquant une augmentation locale de la turbidité. En 2024, 4.57 millions de m³ de sédiments ont été dragués dans les différents secteurs du Grand Port.

Les données de la sonde n'ont pas permis de mettre en évidence des périodes de pics de turbidité qui pourraient être causées directement par les opérations de dragages. Cependant, tout apport de sédiments augmente indirectement la turbidité car ces sédiments sont remis en suspension lors des épisodes de houle.

Les dragages peuvent avoir des conséquences néfastes sur les lamineaires. L'augmentation de la turbidité réduit la pénétration lumineuse dans la colonne d'eau, limitant ainsi la photosynthèse. De plus, les sédiments argileux peuvent adhérer au microfilm visqueux recouvrant les frondes, perturbant les échanges entre les lamineaires et leur environnement. Enfin, le dépôt de vase sur les roches empêche la fixation des spores, compromettant le recrutement des lamineaires (Lyngby & Mortensen, 1996; Fraser et al. 2017).

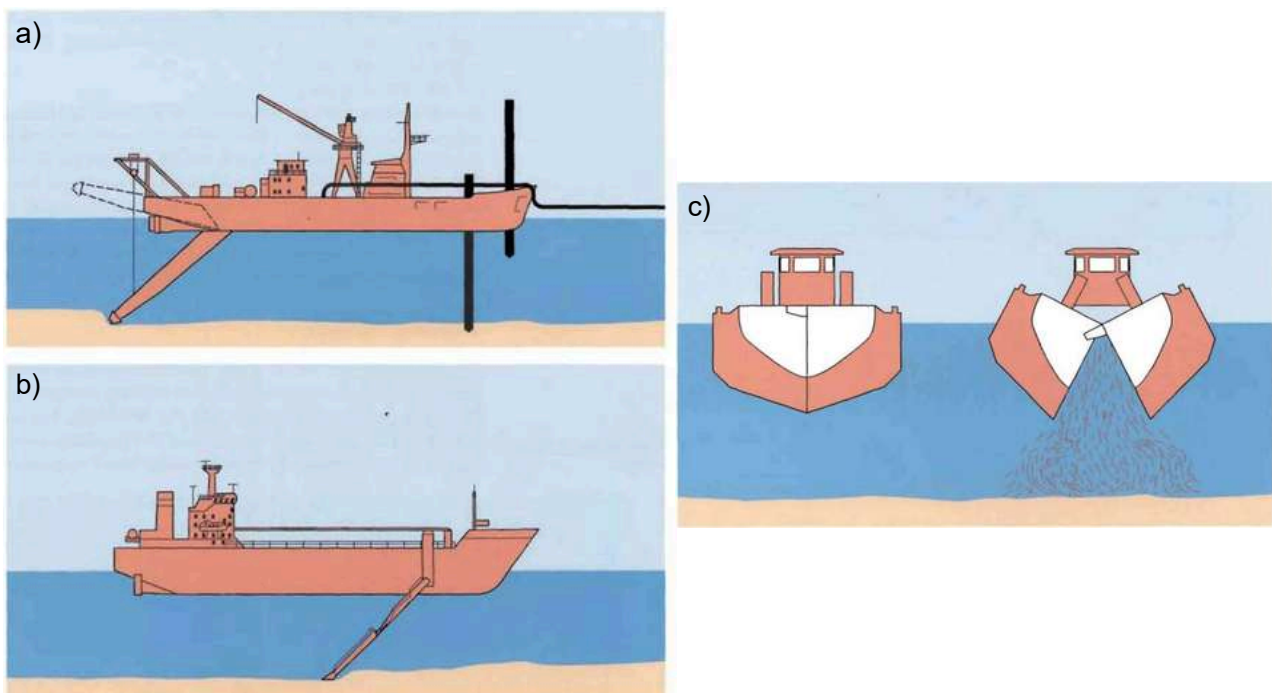


Figure 14 : Types de dragues hydrauliques : (a) aspiratrice stationnaire avec conduite de refoulement; b) aspiratrice en marche et (c) drague fendable. Schéma issu de Dragages et environnement marin (Alzieu et al, 1999).

Compte tenu des impacts négatifs des opérations de dragage sur la croissance et le recrutement des laminaires, **il est impératif de protéger la zone de restauration en interdisant les dragages à partir de fin février, soit juste avant la période favorable à la croissance et à la reproduction des laminaires**. Cette interdiction devrait s'appliquer à l'ensemble des cœurs de populations de laminaires dans la région, conformément aux diagnostics des sites Natura 2000, qui identifient ces cœurs de populations comme des habitats prioritaires à protéger (OFB, 2023).

Par ailleurs, les vases draguées, composées notamment d'argile, de sable et de granulats, présentent un potentiel de valorisation (CEREMA, 2025). Plutôt que d'être rejetées en mer — où ils sont ultérieurement redéposés vers les côtes avec les courants et marées— ces sédiments pourraient être recyclés à terre sous plusieurs formes. Ils pourraient tout d'abord être utilisés pour le renforcement du littoral face aux épisodes de submersion de plus en plus fréquents, notamment par la construction de digues d'argile dans les secteurs identifiés comme à risque. Ensuite, ces sédiments pourraient servir à amender des sols agricoles calcaires en leur apportant de l'argile et du sable, contribuant ainsi à améliorer leur structure et leur capacité de rétention hydrique. Enfin, les vases pourraient être valorisées dans le domaine de la construction, par exemple pour la fabrication de briques de torchis (mélange d'argile, de paille et de copeaux de bois). Des premières discussions sur ces perspectives de recyclage des vases draguées ont déjà été engagées par ELV avec le Grand Port de Nantes–Saint-Nazaire.

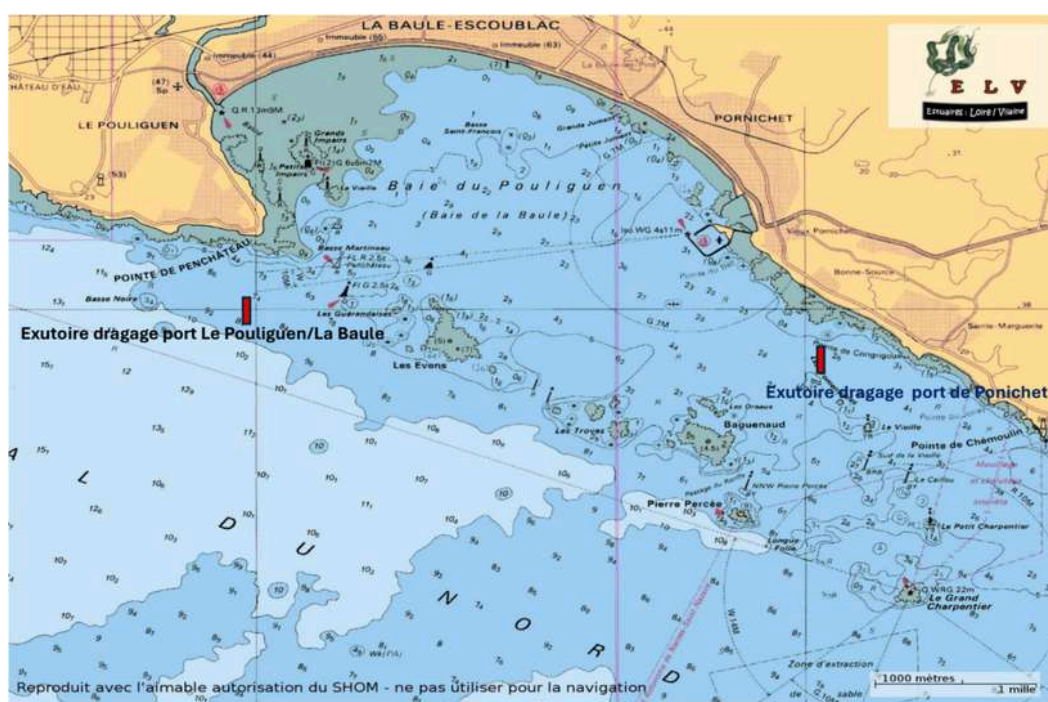


Figure 15 : Carte avec les exutoires de dragages du port du Poulguen / La Baule et du port de Pornichet (ELV).

4.3.4. La présence de brouteurs et de moules

La présence de brouteurs et de moules observés pendant la période d'étude constitue un facteur potentiellement limitant de croissance des laminaires (Fig.16). Durant l'été 2025, les laminaires sur le site d'étude ont été confrontées à une forte pression de broutage, principalement exercée par les oursins et les helcions (gastéropodes). La salinité élevée enregistrée à cette période (en moyenne 34 PSU) a favorisé la prolifération des oursins. Cette prolifération est par ailleurs de plus en plus fréquente sur les côtes de Loire-Atlantique, phénomène attribué notamment au déclin récent de leurs principaux prédateurs, en particulier les poulpes, ce qui constitue une menace croissante pour les populations de laminaires (Ménard et Marzloff, 2023). Afin de limiter leur impact, une régulation locale des oursins a été mise en place sur une zone du site.

De plus, une forte colonisation par des moules, s'agrippant aux stipes et aux thalles, a été observée lors de la période estivale. Cette colonisation semble liée à la forte charge sédimentaire du milieu (Ménard, 2021). En augmentant le poids et la prise au courant des frondes, ces organismes fragilisent les laminaires face à la houle, augmentant le risque d'arrachage. Une intervention de régulation a donc également été réalisée en fin d'été sur une partie du site.



Figure 16 : Vue d'une dizaine d'helcion à la base de la fronde d'une linaire. Hauteur de l'image : 8 cm.

Source : [science.nature](https://www.science.nature.com) (a). Photo d'oursins autour de laminaires (ELV, 2022) (b). Photo de moules accrochées aux stipes de laminaires (Biolittoral) (c).

4.4. L'impact des laminaires sur l'écosystème environnant

4.4.1. Un taux de biodiversité accru

Des observations sur le site en juillet 2025 ont révélé un impact positif des laminaires sur la biodiversité locale. L'espace est redevenu une nurserie, avec une augmentation notable de la biomasse. La présence de jeunes bars (*Dicentrarchus labrax*), lieus jaunes (*Pollachius pollachius*), mullets noirs (*Chelon ramada*), labres vieilles (*Labrus bergylta*), éperlans (*Osmerus eperlanus*), ainsi que de crustacés tels que les araignées de mer (*Maja brachydactyla*), a été notée.

Il est à noter également l'abondance importante de *Sacchoriza* dans la Baie du Poulguen et sur le site des Evens en juillet 2025 par rapport à juillet 2024. La présence de cette algue traduit des conditions particulièrement favorables à la croissance des producteurs primaires cette année. La biodiversité accrue observée en 2025 pourrait donc être également liée à la prolifération de *Sacchoriza*, et non seulement de *Laminaria hyperborea*. Néanmoins, les *Laminaria hyperborea*, étant des espèces pérennes, sont susceptibles de favoriser une augmentation plus durable de la biodiversité dans le temps si elles poursuivent leur développement.

La comparaison de l'inventaire de 2025 avec celui de 2024 (bientôt disponibles) permettra d'apporter des précisions sur l'évolution de la biodiversité sur l'année et d'évaluer l'effet de la restauration des laminaires sur les communautés associées.

4.4.2. L'influence des laminaires sur le pH

L'analyse des données de la sonde a permis de mettre en évidence une influence des laminaires — et plus largement des producteurs primaires — sur le pH environnant. En effet, une importante variabilité intra-journalière des taux de pH (écarts types élevés) a été observée au cours de la période juin-octobre (Fig.9.c), caractérisée par un pH en moyenne 7.2 % (0.03 unités de pH) plus élevé pendant la journée que pendant la nuit (Annexe 1). Cette variation journalière de pH est typique de la présence de producteurs primaires, qui absorbent le dioxyde de carbone pendant la journée via la photosynthèse, élevant les taux de pH, et relâchent du dioxyde de carbone la nuit via la respiration, réduisant le pH (Cornwall et al, 2013; Delille et al, 2009) (Fig.17).

Bien que l'amplitude des variations observées dans le cadre de cette étude demeure modérée, elle pourrait s'accroître si la population de lamiacées continue de se développer. Certaines études ont documenté des différences de pH entre le jour et la nuit pouvant aller jusqu'à 0.90 pour les grandes forêts de lamiacées (*Macrocystis pyrifera*), suggérant un rôle potentiel de tampon biogéochimique vis-à-vis de l'acidification de l'océan (Cornwall et al, 2013; Edworthy et al, 2023) (Fig.17).

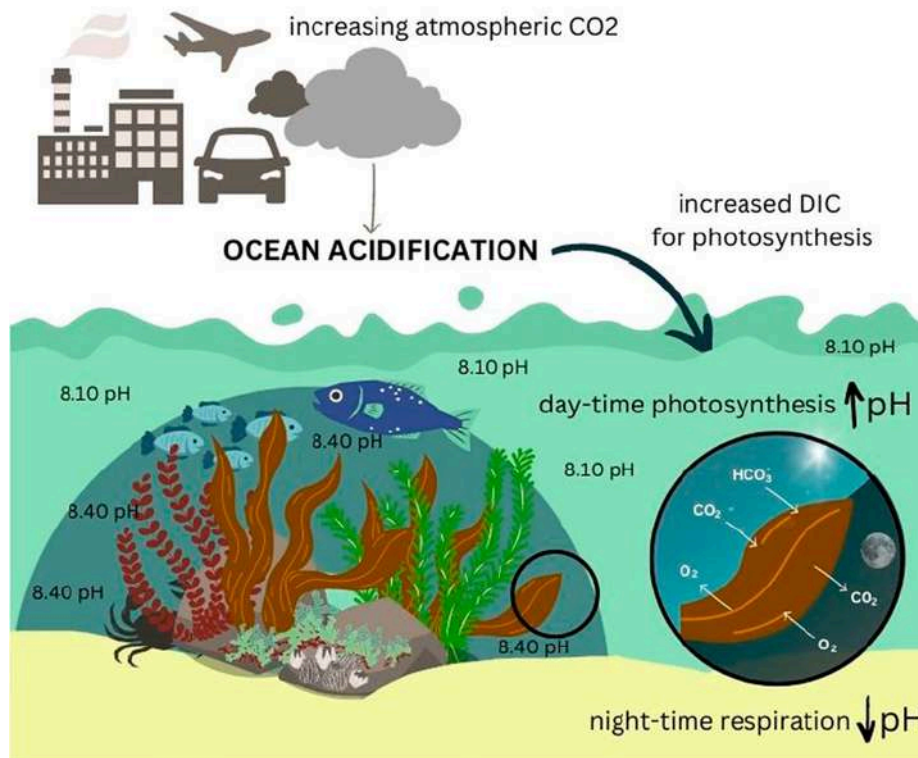


Figure 17 : Le rôle des habitats de macro-algues comme refuge face à l'acidification de l'océan. (Edworthy et al, 2023)

4.5. Les difficultés techniques rencontrées

Bien que la mise en œuvre de cette méthode de restauration ait donné des résultats prometteurs jusqu'ici, plusieurs difficultés techniques et opérationnelles ont été rencontrées.

Tout d'abord, les conditions en mer, variables et souvent contraignantes (houle, vents, turbidité, marées), ont limité la réalisation des opérations de terrain. La sonde nécessitant une recharge, l'enregistrement des données sur un ordinateur ainsi qu'une réinitialisation tous les trois mois, sa récupération dans des conditions de forte houle et de faible visibilité s'est avérée délicate. Une erreur de manipulation liée à ces conditions défavorables a entraîné une interruption de l'acquisition de données pendant huit semaines, entre la mi-avril et la mi-juin. Par ailleurs, l'implantation des galets, initialement prévue au printemps, a dû être reportée à juillet, en raison d'épisodes prolongés de houle importante et de visibilité insuffisante.

Ensuite, malgré les interdictions d'accès mises en place sur le site, l'absence de contrôles effectifs des activités humaines a probablement contribué à la disparition des cordes et leur plantules enroulées autour des roches. La fréquentation répétée de pêcheurs plaisanciers observée sur le site constitue une hypothèse plausible pour expliquer ces pertes.

Enfin, cette étude a été marquée par certaines contraintes administratives. Toute action en mer étant assimilée à une occupation du domaine public maritime, elle a nécessité de régler une taxe (Autorisation d'Occupation Temporaire), impliquant des démarches complexes et coûteuses.

4.6. Les prochaines étapes de la restauration

Reproduction et essaimage des laminaires

Les deux premières années du projet de restauration des champs de laminaires ont donné des résultats très encourageants : les laminaires ont été cultivées avec succès en bassin, implantées sous forme de plantules sur galets et cordes en milieu naturel, puis ont atteint en un an des densités élevées et des tailles significatives. Cependant, pour assurer la pérennité de cette restauration, la reproduction naturelle, l'essaimage et la fixation des laminaires dans leur environnement constituent désormais une étape clé. Aucune *L. hyperborea* n'a été retrouvée sur le secteur des Evens en dehors de la zone de restauration.

Lorsque les conditions environnementales sont favorables — principalement entre novembre et avril — les individus adultes libèrent des spores sexuées (méiospores) qui se fixent sur des substrats durs et produisent ensuite les gamètes nécessaires à la fécondation (Potin, 2012). Cette phase est toutefois particulièrement sensible aux conditions environnementales : des températures supérieures à 21 °C peuvent stopper la gamétogenèse et provoquer la mortalité des spores (Dieke, 1992). Des épisodes de canicule pourraient ainsi constituer un facteur limitant pour la reproduction, en particulier lorsque les thalles sont exposés à la surface lors des grandes marées, ce qui favorise un réchauffement rapide.

Des suivis réguliers sur les deux prochaines années (2026–2027) sont donc indispensables afin de documenter cette phase critique du cycle de vie. En cas de succès de la reproduction, de l'essaimage et de la fixation, des campagnes de suivi permettront de cartographier la dispersion des nouveaux individus.

Suivi des paramètres physico-chimiques

Un suivi continu des paramètres physico-chimiques demeure essentiel pour comprendre les facteurs environnementaux contrôlant la croissance et la reproduction des laminaires. Afin de mieux quantifier l'influence des champs de laminaires sur leur environnement — notamment sur le pH — l'installation d'une seconde sonde sur un site témoin dépourvu de laminaires (par exemple le plateau du Four ou la Banche) est suggérée. L'ancrage de cette sonde sur le site de la Banche à une bouée existante permettrait en outre d'éviter les contraintes liées à une AOT.

Il serait également pertinent d'élargir le panel de paramètres mesurés (oxygène dissous, nutriments, chlorophylle) afin d'explorer plus finement les dynamiques biogéochimiques locales, notamment l'occurrence de blooms phytoplanctoniques et leurs interactions avec les forêts de laminaires.

Perspectives de recherche approfondie

Pour approfondir les résultats obtenus, des analyses génétiques pourraient être entreprises afin de vérifier la correspondance entre les laminaires restaurées et leurs géniteurs cultivés en laboratoire, par prélèvement de fragments et comparaison génomique. De plus, l'étude du microbiome associé aux laminaires offrirait des perspectives importantes pour comprendre les mécanismes microbiologiques contribuant à leur régénération, leur santé et leur résilience face aux stress environnementaux (Anne Sophie Burlot, Université Bretagne Sud, sous conditions d'obtention de financements).

4.7. Le rôle de la restauration des laminaires face aux enjeux environnementaux et socio-économiques

4.7.1. Perspectives socio-économiques et environnementales locales de la restauration

Si le protocole de restauration aboutit à la reproduction, à l'essaimage et à la fixation pérenne des plantules de laminaires, des perspectives concrètes pour les acteurs économiques locaux pourront être envisagées. La phase initiale de culture des laminaires pourrait, par exemple, être réalisée en hiver dans des bassins de mytilculteurs locaux, plutôt qu'en laboratoire avec du matériel coûteux. Une telle approche favoriserait l'implication des professionnels dans les projets de restauration, tout en simplifiant et réduisant les coûts opérationnels (transport, utilisation de matériel de laboratoire, etc) du protocole.

Au-delà de la phase de culture, les sites de restauration de laminaires pourraient être implantés à proximité directe des zones conchylicoles, générant des bénéfices écologiques et économiques conjoints. La présence de laminaires améliore en effet la qualité de l'eau en absorbant notamment les nutriments excédentaires comme les nitrates, limitant ainsi le risque d'eutrophisation locale (Jiang et al, 2020). Une étude a également montré que la culture d'algues peut atténuer les effets négatifs de l'acidification de l'océan sur les organismes calcificateurs, notamment les moules et les palourdes (Young et al., 2022). Des huîtres cultivées à proximité de champs de laminaires présentent une croissance accrue par rapport à des individus élevés sans algues environnantes (Young et al., 2022). Cette interaction est synergique : l'acidification stimule la croissance des laminaires, tandis que celles-ci améliorent les conditions chimiques pour les bivalves en abaissant le pH de l'eau.

Ainsi, l'implantation de sites de restauration de laminaires ou encore la culture de ces macro-algues à proximité des activités conchylicoles pourrait générer des retombées socio-économiques positives, tout en renforçant la résilience écologique des zones côtières. Ce modèle d'association de cultures, connu sous le nom d'aquaculture multitrophique intégrée, s'inscrit dans les principes de l'économie bleue régénérative, qui vise à concilier activités maritimes à faible empreinte carbone et régénération des écosystèmes marins (Chopin et al, 2001; Le Gouvello & Simard, 2024).

4.7.2. Déploiement de la restauration à plus grande échelle

Le projet de restauration des habitats de laminaires s'inscrit pleinement dans l'effort européen de mise en œuvre de la loi sur la restauration de la nature, entrée en vigueur en août 2024. Cette loi constitue un pilier du Pacte vert pour l'Europe et fixe des objectifs ambitieux : restaurer au moins 20 % des terres et mers de l'Union européenne d'ici 2030, et restaurer tous les écosystèmes dégradés d'ici 2050 (Conseil UE, 2024).

À ce jour, aucun cas documenté de restauration réussie de laminaires en milieu naturel, incluant la reproduction et l'essaimage, n'a été rapporté. Certaines initiatives internationales offrent toutefois des exemples inspirants, comme le rétablissement d'habitats de fucales, un autre ordre d'algues brunes, en Australie (Cayne et al., 2020). Par ailleurs, la méthode Green Gravel au Royaume-Uni, qui consiste à introduire une grande quantité de galets sur lesquels sont implantées des plantules de laminaires, a permis la croissance des algues, bien que la reproduction naturelle n'ait pas encore été observée (Fredriksen et al., 2020).

Le protocole développé par le projet ELV s'inspire de la méthode Green Gravel, mais utilise une quantité plus restreinte de galets, introduite manuellement. Si la reproduction et l'essaimage naturels des laminaires sont confirmés dans ce cadre, cette approche pourrait être étendue à d'autres sites de restauration de laminaires dans le secteur Loire-Vilaine et, plus largement, en France, contribuant ainsi à la régénération des habitats côtiers dégradés.

Par ailleurs, l'expérimentation de ce type de restauration est essentielle pour estimer les coûts réels associés à la régénération de ces habitats. Ces informations pourraient ensuite servir de base pour la mise en place de mécanismes de compensation environnementale, en lien avec le principe du « Pollueur-Payeur » ou la séquence réglementaire « Éviter / Réduire / Compenser ».

4.7.3. La restauration des laminaires comme levier face au réchauffement climatique

Les effets du changement climatique sur les océans sont multiples et préoccupants. Depuis la révolution industrielle, le pH moyen des océans a diminué d'environ 0.1 unité (passant de 8.2 à 8.1), signe d'une acidification croissante due à l'absorption de dioxyde de carbone d'origine anthropique (Friedlingstein, 2023), mettant sous pression les organismes marins calcifiants. Parallèlement, les eaux océaniques se sont réchauffées à un rythme moyen de +0.06 °C par décennie depuis le début du XX^e siècle, un rythme qui s'est accéléré à +0.28 °C au cours de la dernière décennie (Garcia-Soto et al., 2021). Cette augmentation de température favorise la prolifération d'espèces concurrentes, facilite la migration d'espèces invasives et augmente la présence de pathogènes, bouleversant les équilibres des écosystèmes marins. Le réchauffement climatique modifie également les régimes météorologiques, entraînant une augmentation de l'occurrence et de l'intensité des tempêtes, contribuant à une vulnérabilité accrue des habitats marins côtiers et des communautés humaines associées.

À long terme, la régénération des habitats de laminaires est susceptible de générer des bénéfices écologiques majeurs dans la lutte contre la perte de biodiversité et face aux effets du changement climatique. Les champs de laminaires pourraient à nouveau jouer un rôle central en tant que zones de refuge, d'alimentation et de reproduction pour de nombreuses espèces de poissons, crustacés et invertébrés, favorisant ainsi le rétablissement des communautés benthiques et halieutiques. Cette augmentation de la biodiversité pourrait également générer des retombées socio-économiques importantes pour les pêcheurs locaux.

Cette restauration devrait également entraîner une augmentation de la productivité primaire du système, renforçant les réseaux trophiques locaux tout en contribuant à l'absorption du dioxyde de carbone et, par conséquent, à l'atténuation du changement climatique. Les forêts de laminaires exercent par ailleurs une fonction essentielle de protection du littoral, en améliorant la qualité de l'eau, en dissipant l'énergie de la houle et en réduisant l'érosion côtière, contribuant ainsi à la stabilité des zones littorales. Enfin, en augmentant localement le pH par leur activité photosynthétique, elles peuvent jouer un rôle de tampon face à l'acidification des océans, offrant des conditions plus favorables aux organismes calcifiants (Fig.17).

5. Conclusion

Le projet de restauration de forêts de laminaires dans la Baie du Pouliguen / La Baule mené par ELV, la station biologique de Roscoff et BioLittoral constitue une initiative unique en France. Un an après la pose des galets ensemencés sur le site de restauration aux abords de l'îlot des Evens, les laminaires ont formé de denses populations, et ce malgré des conditions environnementales rudes (canicule, fortes variations de salinité, houle intense).

Ces résultats mettent en évidence à la fois la résilience des laminaires et l'efficacité de la méthode de restauration employée, incluant la culture préalable de plantules en laboratoire avant leur implantation en milieu naturel. Si la phase de croissance des plantules s'est déroulée avec succès, la pérennité de la restauration repose à présent sur la reproduction des laminaires adultes, prévue pour 2026-2027. Cette étape clé, plus sensible aux variations environnementales, fera l'objet de inventaires spatiaux et surfaciques approfondis au cours de cette période.

Les mesures de la sonde multiparamétrique ont montré que la croissance des laminaires, observée dès avril-mai 2025, est associée à une hausse de la température et de la salinité et à une baisse de la turbidité. La température, la salinité et le pH de l'eau sont principalement influencés par le débit de la Loire, tandis que la turbidité est directement liée à la houle et indirectement au débit du fleuve. Les opérations de dragage, qui augmentent également la turbidité, devraient être strictement interdites lors de la période favorable de croissance des laminaires, à compter de la fin février.

La recolonisation des laminaires dans la Baie du Pouliguen présente déjà un impact positif notable sur la biodiversité locale, en offrant des habitats structurants à de nombreuses espèces. Déployé à plus grande échelle, ce type de restauration pourrait devenir un levier majeur de lutte contre le dérèglement climatique et l'effondrement de la biodiversité, tout en générant des retombées socio-économiques positives pour les communautés locales dans le cadre d'une économie bleue régénérative.

6. Bases de données

- **Accéder aux données brutes de la sonde** : https://github.com/olegouvello/ELV_analyse_sonde_2025.
- **Débit de la Loire** : données extraites du site [Candhis](#) au niveau de Plateau du Four.
- **Hauteur de la houle** : données provenant du site [Hydroportail](#), station de Saint-Nazaire.
- **Direction du vent** : données issues du site [OpenMeteo](#), au niveau de La Baule-Escoublac.
- **Horaires de lever et coucher du soleil** : informations intégrées depuis le site [Tutiempo.net](#).
- **Couverture nuageuse** : données issues de [Weatherspark](#).
- **pH de la Loire** : Source - [data.loire-atlantique.fr](#).

7. Bibliographie

- Alarcon, A. (2024). Rapport de présentation de projet : Restauration de l'habitat des laminaires – Secteurs estuaires Loire et Vilaine. https://estuairesloirevilaine.fr/wp-content/uploads/2025/11/Rapport_restoration_Laminaires_A.ALARCON_2024.pdf.
- Alzieu, C., Abarnou, A., Bassoullet, P., Boutier, B., Chiffolleau, J.-F., Crenn, I., Derrien, A., Erard-Le Denn, E., Gourmelon, M., Guillaud, J.-F., Silva, J. R., Le Cann, P., Le Guyader, F., Le Hir, P., L'Yavanc, J., Mauvais, J.-L., Ménard, D., Michel, P., Monbet, Y., Pommepuy, M., & Quiniou, F. (1999). Dragages et environnement marin : État des connaissances. Ifremer. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00000/1040/>
- Association ELV. (2014). Évolution des macroalgues dans la baie de La Baule entre 1995 et 2014.
- Bio Littoral. (2013). Habitat remarquable : Les forêts de laminaires – Rôle fonctionnel dans la région.
- CEREMA. (2025, 25 mars). Quelles valorisations territoriales des sédiments de dragage portuaires ? Retour sur la journée technique à Lorient. CEREMA. <https://www.cerema.fr/fr/actualites/quelles-valorisations-territoriales-sediments-dragage>
- Chopin, T., Buschmann, A. H., Halling, C., Troell, M., Kautsky, N., Neori, A., Kraemer, G. P., Zertuche-González, J. A., Yarish, C., & Neefus, C. (2001). Integrating seaweeds into marine aquaculture systems: A key toward sustainability. *Journal of Phycology*, 37(6), 975–986. <https://doi.org/10.1046/j.1529-8817.2001.037006975.x>
- Conseil de l'Union européenne. (2024, 17 juin). Règlement sur la restauration de la nature : Le Conseil donne son feu vert définitif [Communiqué de presse]. <https://www.consilium.europa.eu/fr/press/press-releases/2024/06/17/nature-restoration-law-council-gives-final-green-light/>
- Cornwall, C. E., et al. (2013). Diurnal fluctuations in seawater pH influence the response of a calcifying macroalga to ocean acidification. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 280, 20132201. <https://doi.org/10.1098/rspb.2013.2201>
- Delille, B., Borges, A. V., & Delille, D. (2009). Influence of giant kelp beds (*Macrocystis pyrifera*) on diel cycles of pCO₂ and DIC in the Sub-Antarctic coastal area. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 81, 114–122.
- Dieck, T. (1992). North Pacific and North Atlantic digitate *Laminaria* species (Phaeophyta): Hybridization experiments and temperature responses. *Phycologia*, 31, 147–163.
- Dussauze, M., Sanchez, M., Barillé, L., Hitier, B., Oger-Jeanneret, H., et al. (2009). Modélisation de la turbidité en Baie de Bourgneuf (France). Hammamet, Tunisie. <http://www.paralia.fr>
- Edworthy, C., Steyn, P.-P., & James, N. C. (2023). The role of macroalgal habitats as ocean acidification refugia within coastal seascapes. *Cambridge Prisms: Coastal Futures*, 1, e22. <https://doi.org/10.1017/cft.2023.9>
- Fredriksen, S., Filbee-Dexter, K., Norderhaug, K. M., et al. (2020). Green gravel: A novel restoration tool to combat kelp forest decline. *Scientific Reports*, 10, 3983. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60553-x>
- Fraser, M. W., Short, J., Kendrick, G., McLean, D., Keesing, J., Byrne, M., Caley, M. J., Clarke, D., Davis, A. R., Erftemeijer, P. L. A., Field, S., Gustin-Craig, S., Huisman, J., Keough, M., Lavery, P. S., Masini, R., McMahon, K., Mengersen, K., Rasheed, M., ... Wu, P. (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*, 78, 229-242. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.03.026>
- Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Bakker, D. C. E., Hauck, J., Landschützer, P., Le Quéré, C., Luijkx, I. T., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Schwingshackl, C., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., Anthoni, P., ... Zheng, B. (2023). Global Carbon Budget 2023. *Earth System Science Data*, 15, 5301–5369. <https://doi.org/10.5194/essd-15-5301-2023>

Garcia-Soto, C., Cheng, L., Caesar, L., Schmidtke, S., Jewett, E. B., Cheripka, A., et al. (2021). An overview of ocean climate change indicators. *Frontiers in Marine Science*, 8, 642372. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.642372>

GIP Loire Estuaires. (2018). Les dragages d'entretiens dans l'estuaire. https://www.loire-estuaire.org/upload/iedit/1/pj/101874_4542_11e3_2018.pdf.

GIP Loire Estuaires. (2021). La salinité de l'eau. https://www.loire-estuaire.org/upload/espace/1/pj/102316_5424_11b1_2021vf.pdf.

GIP Loire Estuaires. (2023). La dynamique de bouchon vaseux. https://www.loire-estuaire.org/upload/iedit/1/pj/102474_5703_11e2-bouchon_vaseux-2023.pdf.

GIP Loire Estuaires. (2024). Guide technique sur la mesure de turbidité et la concentration en matières en suspension. <https://www.loire-estuaire.org/accueil/diffusion-des-connaissances/publications/1807-102520/guide-sur-la-mesure-de-turbidite-et-la-concentration-en-mes>.

GIP Loire Estuaires. (2025a). Étude de la température de l'eau dans l'estuaire de la Loire. <https://www.loire-estuaire.org/accueil/diffusion-des-connaissances/publications/1807-102616/etude-de-la-temperature-de-leau-dans-lestuaire-de-la-loire>.

GIP Loire Estuaires. (2025b). Évolution des concentrations en MES lors de la crue de janvier 2025. <https://www.loire-estuaire.org/accueil/suivis-environnementaux/bulletins-de-suivis/2422-102608/evolution-des-concentrations-en-mes-lors-de-la-crue-de-janvier-2025>.

GIP Loire Estuaires. (2025c). Bulletin Syvel n°12. <https://www.loire-estuaire.org/accueil/suivis-environnementaux/bulletins-de-suivis/2422-102566/bulletin-syvel-n12>.

Jiang, Z., Liu, J., Li, S., Chen, Y., Du, P., Zhu, Y., Liao, Y., Chen, Q., Shou, L., Yan, X., Zeng, J., & Chen, J. (2020). Kelp cultivation effectively improves water quality. *Science of the Total Environment*, 707, 135561. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135561>.

Krumhansl, K. A., & Scheibling, R. E. (2012). Production and fate of kelp detritus. *Marine Ecology Progress Series*, 467, 281–302.

Layton, C., Coleman, M. A., Marzinelli, E. M., Steinberg, P. D., Swearer, S. E., Vergés, A., Wernberg, T., & Johnson, C. R. (2020). Kelp forest restoration in Australia. *Frontiers in Marine Science*, 7, 74. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00074>.

Leclerc, Jean-Charles & Riera, Pascal & Laurans, Martial & Leroux, Cédric & Lévêque, L. & Davoult, Dominique. (2015). Community, trophic structure and functioning in two contrasting *Laminaria hyperborea* forests. *Estuarine Coastal and Shelf Science*. 152. 11-22. 10.1016/j.ecss.2014.11.005.

le Gouvello, R. & Simard, F. (2024). Vers une économie bleue régénérative. Une cartographie de l'économie bleue. Gland, Suisse : UICN.

Lüning, K. (1990). *Seaweeds: Their environment, biogeography, and ecophysiology*. Wiley.

Lynghy, J. E., & Mortensen, S. M. (1996). Effects of dredging activities on growth of *Laminaria saccharina*.

Marzloff, M. (Intervieweur) & Ménard, J.-C. (2023). Morbihan : comment la désertification des paysages sous-marins bouleverse les écosystèmes côtiers [Interview]. *The Conversation*. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00850/96148/104333.pdf>

Ménard, J.-C. (2021). Les dragages des ports, le clapage des vases et sédiments en mer et les conséquences sur le milieu marin. Des solutions diversifiées de retraitement à terre des sédiments valorisés.

Météo-France. (2025, 11 juillet). Une vague de chaleur exceptionnelle par sa durée en début d'été. Météo-France. <https://www.meteofrance.com/actualites-et-dossiers/actualites/une-vague-de-chaleur-exceptionnelle-par-sa-duree-en-debut-dete>

Office Français de la Biodiversité. (2023). Document d'objectifs des sites Natura 2000 : Estuaires de la Loire externes – ZPS FR52 12014 et ZSC FR 5202011 et FR 5202012 (3 volumes, 710 pages).

Potin, P. (2012). Intimate associations between epiphytes, endophytes, and parasites of seaweeds. In C. Wiencke & K. Bischof (Eds.), *Seaweed biology* (pp. 259–281). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-28451-9_11

Rogers-Bennett, L., & Catton, C. A. (2019). Marine heat wave and multiple stressors tip bull kelp forest to sea urchin barrens. *Scientific Reports*, 9, 15050. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51114-y>.

Simonson, E., Scheibling, R. E., & Metaxas, A. (2015). Kelp in hot water: Warming seawater temperature induces weakening and loss of kelp tissue. *Marine Ecology Progress Series*, 537, 87–100. <https://doi.org/10.3354/meps11438>.

Vela, A. (2024). « Fonctionnement et production primaire des herbiers à *Posidonia oceanica* (L.) Delile en Méditerranée » Biodiversité et Ecologie. Université de Corse Pascal Paoli, 2006.

Woods Hole Oceanographic Institution. (2007, 7 septembre). Acid rain has a disproportionate impact on coastal waters. Woods Hole Oceanographic Institution. <https://www.whoi.edu/press-room/news-release/acid-rain-has-a-disproportionate-impact-on-coastal-waters/>.

Young, C. S., Sylvers, L. H., Tomasetti, S. J., Lundstrom, A., Schenone, C., Doall, M. H., & Gobler, C. J. (2022). Kelp (*Saccharina latissima*) mitigates coastal ocean acidification and increases the growth of North Atlantic bivalves in lab experiments and on an oyster farm. *Frontiers in Marine Science*. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.881254>.

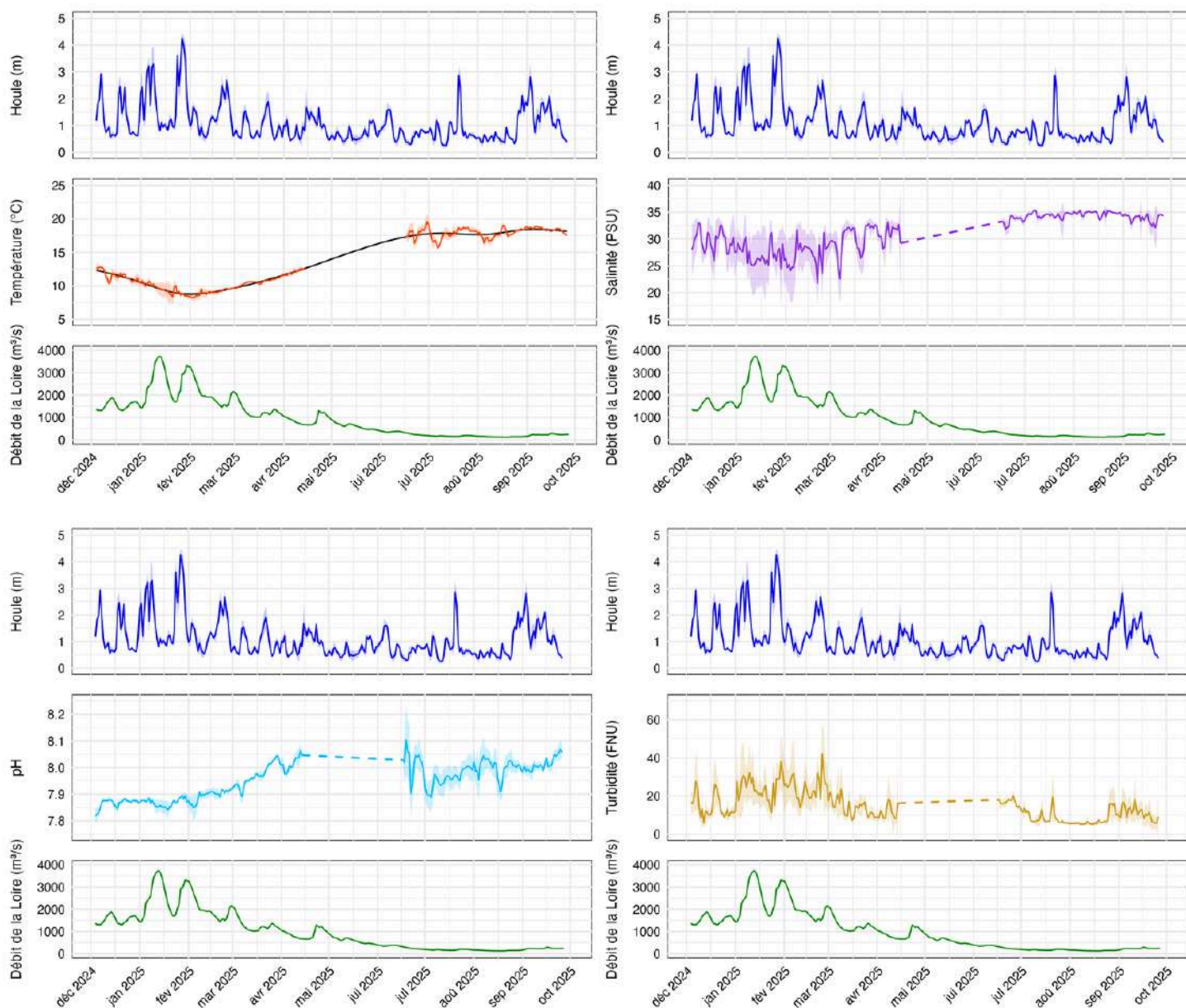
Zweng, M.M. & Reagan, James & Seidov, Dan & Boyer, Tim & Locarnini, Ricardo & Garcia, Hernan & Mishonov, Alexey & Baranova, O.K. & Paver, Christopher & Smolyar, I. (2019). *WORLD OCEAN ATLAS 2018 Volume 2: Salinity*.

8. Liste des annexes

Annexe 1 : Résultats des tests de rangs signés de Wilcoxon évaluant les différences de pH entre le jour et la nuit. Ce test non paramétrique a été retenu en remplacement du test t apparié en raison de la violation de l'hypothèse de normalité des différences. Les données ont été classées en périodes diurnes et nocturnes à partir des heures de lever et de coucher du soleil obtenues pour la ville de La Baule sur le site [TuTiempo.net](https://www.tutiempo.net).

Période	Différence de pH entre le jour et la nuit	V	Valeur p
décembre-avril	-0.00115	3939.5	0.3078
juin-octobre	0.03049	4806.5	4.152×10^{-14}

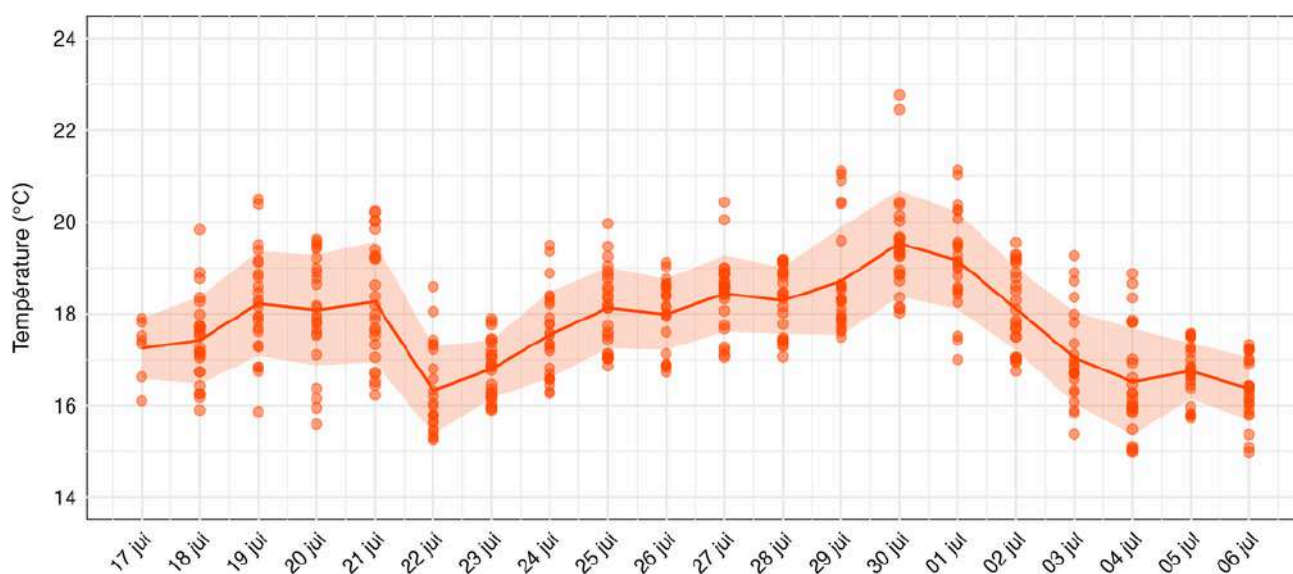
Annexe 2 : Corrélations graphiques entre la houle et le débit de la Loire avec chaque paramètre physico-chimique (température en haut à gauche, salinité en haut à droite, pH en bas à gauche, turbidité en bas à droite).



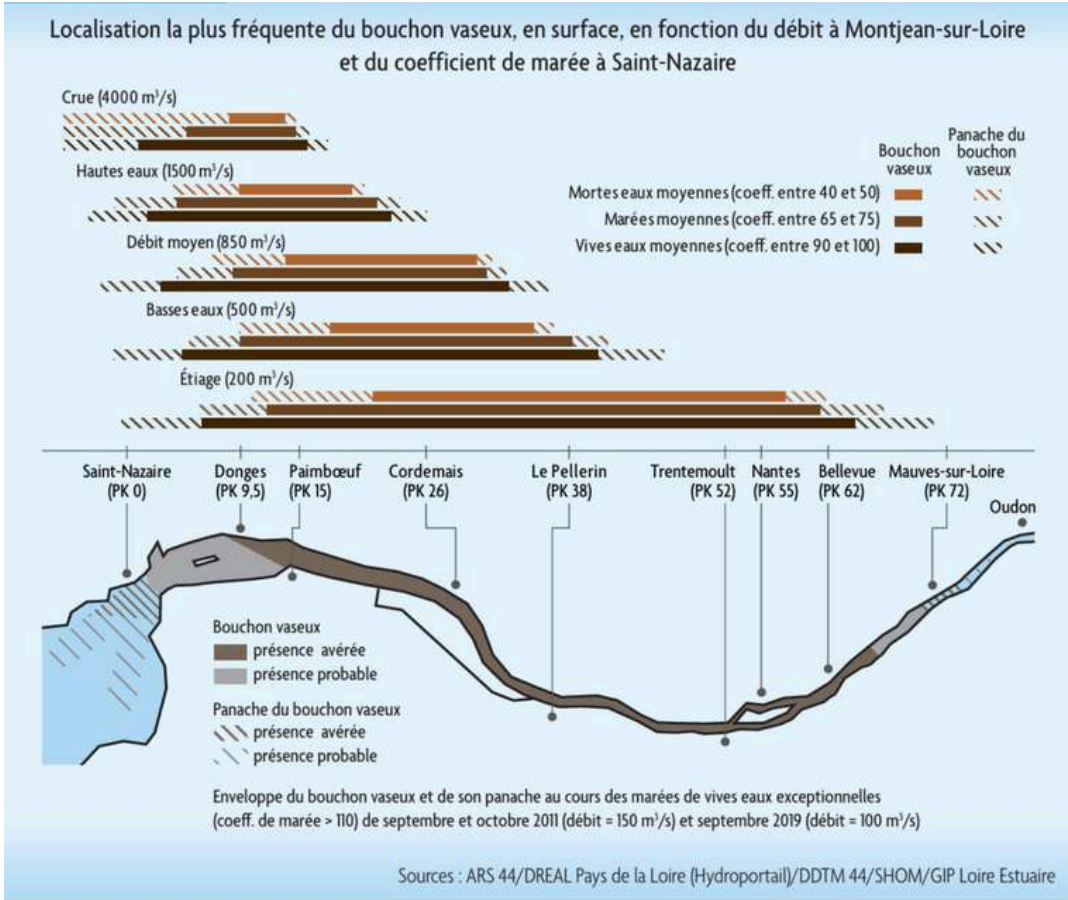
Annexe 3 : Résultats des tests de rang de Kruskal–Wallis évaluant l’influence de la direction du vent sur les paramètres physico-chimiques.

Paramètre	χ^2 de Kruskal–Wallis	Degrés de liberté	Valeur p
Turbidité	223.0	7	$< 2.2 \times 10^{-16}$
Température	828.9	7	$< 2.2 \times 10^{-16}$
Salinité	1185.5	7	$< 2.2 \times 10^{-16}$
pH	368.9	7	$< 2.2 \times 10^{-16}$

Annexe 4 : Température moyenne journalière (°C) au cours de la période de canicule (17 juin – 06 juillet 2025). La température moyenne journalière est représentée par la ligne rouge, et l’écart type est représenté par le ruban rouge autour de la ligne. Les points rouges sont les mesures horaires de température au cours de la journée.



Annexe 5: Localisation la plus fréquente du bouchon vaseux, en surface, en fonction du débit à Montjean-sur-Loire et du coefficient de marée à Saint-Nazaire. Source : La dynamique de bouchon vaseux, GIP Loire Estuaires, 2023)



Annexe 6 : Houle moyenne au cours de la période d’étude pour chaque direction de vent, avec l’écart type.

