Étude des déterminants environnementaux de la composition algale de la laisse de mer

Morgane Pronost

▶ **To cite this version:**

Morgane Pronost. Étude des déterminants environnementaux de la composition algale de la laisse de mer. Sciences du Vivant [q-bio]. 2018. dumas-02025560

HAL Id: dumas-02025560

https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02025560

Submitted on 19 Feb 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

AGROCAMPUS OUEST

☐ **CFR Angers**

☑ **CFR Rennes**

Année universitaire : 2017-2018 Spécialité : Agronomie Spécialisation (et option éventuelle) : Génie de l'environnement (GE), Option Préservation et Aménagement des Milieux - Ecologie Quantitative (PAM-EQ)	**Mémoire de fin d'études** ☑ d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage ☐ de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage ☐ d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

Étude des déterminants environnementaux de la composition algale de la laisse de mer

Par : Morgane PRONOST

Soutenu à Rennes le 20 septembre 2018

Devant le jury composé de :

Président : Ivan BERNEZ

Maître de stage : Isabelle LE VIOL

Co-encadrant : Christian KERBIRIOU

Enseignant référent : Manuel PLANTEGENEST

Autres membres du jury :

Claire ROLLET, Responsable de Laboratoire, Chef de Station de Dinard

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST

Ce document est soumis aux conditions d'utilisation
«Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 4.0 France»
disponible en ligne http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr

Remerciements

Je remercie tout d'abord énormément Isabelle et Christian pour tout ce qu'ils m'ont apporté : un stage qui m'a énormément plu et appris, mais aussi leur bonne humeur, leur dynamisme, leurs bons conseils, leur confiance et surtout leur disponibilité malgré tous les impératifs, en particulier pour les corrections de ce mémoire.... Sans oublier mon premier poste d'ingénieur !

Merci également à Manuel Plantegenest pour la relecture du mémoire et, en premier lieu, pour les cours d'écologie qui m'ont menée jusqu'ici. Je remercie également mes autres professeurs d'écologie qui m'ont fait comprendre que j'avais vraiment trouvé ma voie à Agrocampus Ouest, en GE, et surtout en PAM-EQ.

Pauline, Alan, Kévin : je n'ose pas imaginer à quoi auraient ressemblé les heures au bureau sans vous. Même si on est tous d'accord pour dire que Kévin est un peu pénible… ;) Merci aussi pour votre aide (indispensable) sur les algues, la programmation et R.

Merci à Elie, Julie et Claire pour les coups de mains qui sauvent la vie.

Yvan : je n'oublierai jamais le signal de la pause café / thé / rôti de porc.

Merci à Florian Mausy pour m'avoir appris à monter, programmer et piloter un drone, le tout dans la bonne humeur.

Merci à tous les collègues que j'ai pu croiser à Concarneau et qui font de la station un lieu de travail agréable et enrichissant.

Une mention spéciale pour mes compagnons de fortune et d'infortune, les neuf PAM avec qui j'ai tellement ri, appris, profité des semaines de terrain et pleuré il faut le dire (surtout le dernier jour). Ces six mois avec vous étaient beaucoup trop courts.

A David et Fabien : j'aurais beaucoup trop de choses à dire mais je dirai simplement longue vie à la Brainless Légion !

Je remercie évidemment mon papa pour son soutien sans faille et tous ses conseils pour toujours prendre la vie du bon côté. Et puisque c'est toi qui imprimes ce mémoire le jour de ton anniversaire… surprise : bon anniversaire Papa !

Enfin, Valentin, c'est très difficile de te remercier comme il se doit alors que tu es juste à côté de moi, que tu regardes ce que j'écris et que tu me parles en même temps. En plus, je vois mal comment je pourrais te remercier assez alors que sans toi je n'en serais pas du tout là aujourd'hui. Heureusement, il me reste toute la vie pour le faire…

Sommaire

Introduction 1
I) Matériel et méthode 4
1. Zones d'étude et choix des sites 4
a. Sites avec suivi temporel, échelle Finistère 4
b. Sites ponctuels, large échelle 5
2. Les algues 6
a. Espèces étudiées 6
b. Identification et résolution taxonomique 6
c. Variabilité spatiale des communautés algales et des laisses de mer 7
3. Protocole de recueil des données 8
4. Variables environnementales 10
a. Habitats EUNIS et herbiers de zostères 10
b. Variables géomorphologiques et hydrodynamiques 11
5. Analyses statistiques 12
a. Sélection des données 12
b. Composition des communautés algales de la laisse 13
c. Abondance et diversité des communautés algales de la laisse 14
II) Résultats 14
1. Les communautés algales de la laisse de mer 14
2. Provenance des algues de la laisse de mer 16
a. Composition expliquée par les habitats 16
b. Proportions d'espèces flottantes 16
c. Quantité de laminaires et proportion d'algues vertes 18
3. Rôle de la géomorphologie de la plage 19
a. Richesse spécifique 19
b. Volume de laisse 19
4. Effets du coefficient de marée et des tempêtes 20
5. Saisonnalité de la composition algale des laisses 21
III) Discussion 22
1. Déterminants de la composition algale de la laisse de mer 22
a. Des laisses de mer d'origines diversifiées 22
b. Un reflet des caractéristiques de la plage où elle se forme 25

c. De fortes variations temporelles de la composition de la laisse de mer. 26
2. Limites de l'étude 29
a. Limites du protocole 29
b. Limites des données disponibles 29
3. Perspectives..... 30
a. Drone d'exploration sous-marine : caractérisation des habitats et observation des communautés algales 30
b. Extension du suivi à l'écosystème de la laisse 30
c. Développement du programme participatif Plages Vivantes 31
Conclusion..... 32

Liste des figures

Figure 1 : Les deux zones d'étude : l'échelle France et l'échelle Finistère…… 4

Figure 2 : (a) Cartes des 31 sites suivis, correspondant à la « zone Finistère » et (b) carte complète des 169 sites échantillonnés…….. 5

Figure 3 : Fragments de laminaires non identifiables. …….. 6

Figure 4 : Variabilité de la composition de la laisse. (a) laisse dominée par des algues rouges filamenteuses ; (b) laisse dominée par Laminaria sp., Ulva sp. et Fucus sp., typiquement une laisse très riche ; (c) laisse dominée par Laminaria hyperborea, typiquement un très grand volume de laisse (d) laisse sans espèce dominante, typiquement un très faible volume de laisse. ……. 7

Figure 5 : Protocole d'échantillonnage de la laisse de mer. (a) : résumé schématique du protocole ; (b) transect de 25m sur la plage Cornouaille à Concarneau ; (b) quadrat de 1m². ..9

Figure 6 : Habitats marins selon la typologie EUNIS, incluant les habitats étudiés A1 à A5, avec un exemple de déclinaison pour l'habitat A1 (site INPN - Inventaire National du Patrimoine Naturel) ……..… 11

Figure 7 : Localisation des variables environnementales étudiées sur une vue en coupe de la zone littorale …… 12

Figure 8 : Richesse spécifique des quadrats pour les relevés de suivi (échelle Finistère, 1) et pour les données ponctuelles (large échelle, 2). …….. 15

Figure 9 : (a) Volume de laisse de mer en m^3 et (b) quantité de laisse de mer calculée selon l'indice volumique log(V)+10 …… 15

Figure 10 : Volume de laisse de mer sur les plages du Finistère Sud en fonction de l'exposition de la plage. Indice volumique : ind=log(V)+10 ……. 20

Figure 11 : Modélisation par un modèle GAMM de la richesse spécifique de la laisse de mer en fonction du temps ……... 21

Figure 12 : Déterminants environnementaux de la richesse spécifique de la laisse de mer, leur effet et leur importance relative …….. 22

Figure 13 : (a) Drone Coco en cours d'utilisation en face de l'île de Guiriden (archipel des Glénan) au cours d'un reportage pour France 3 Littoral sur les drones marins low-tech et (b) image de *Fucus serratus* prise par le drone à Concarneau ……. 30

Liste des tableaux

Tableau 1 : Résultats des modèles expliquant les paramètres des laisses de mer par les déterminants identifiés …… 17

Liste des annexes

Annexe I : Modèles de départ des analyses statistiques et modèles retenus

Annexe II : Matrice de corrélation des variables

Annexe III : Liste des algues observées

Annexe IV : Limites des données cartographiques disponibles

Glossaire

Estran : zone du littoral soumise aux variations des marées.

Etage infralittoral : zone située tout en bas de l'estran, toujours ou presque toujours immergée et dont la limite inférieure est la zone circalittorale.

Etage circalittoral : étage océanique compris entre l'étage infralittoral et l'étage bathyal, zone limite d'éclairement.

EUNIS : European Nature Information System.

Phanérogame : végétal possédant des fleurs et des graines. Terme utilisé pour distinguer les plantes marines des algues.

Zone subtidale : environnement littoral benthique peu profond, marin ou de l’estran, qui se trouve sous le niveau moyen des basses eaux au cours de marées, notamment des marées de vives-eaux. Correspond aux étages infralittoral et circalittoral.

INTRODUCTION

Le XXI^{ième} siècle nous confronte à de nombreux enjeux globaux et parmi eux figure la crise de la biodiversité. Cette crise est même aujourd'hui admise comme la 6ème extinction massive de l'histoire de notre planète (Barnosky *et al*., 2011, Ceballos *et al*., 2015). De nombreuses menaces sont identifiées comme étant à l'origine de cette grande perturbation biologique, toutes liées aux activités humaines : principalement le changement climatique, la destruction et la fragmentation des habitats, la surexploitation et l'introduction d'espèces invasives (Derraik, 2002 ; Worm *et al*., 2006 ; Ceballos *et al*., 2015).

Les conséquences de cette pression humaine ne sont pas toutes aussi évidentes que les extinctions. On observe aussi de fortes diminutions des populations ; par exemple le Living Planet Index mis en place par le World Wildlife Fund for Nature (WWF) a mis en évidence une diminution des populations de vertébrés de 58% en seulement 40 ans (WWF Living Planet Report, 2016). La diminution drastique des populations d'oiseaux fait également l'actualité : ces 17 dernières années, un tiers des oiseaux des campagnes françaises a disparu (Geffroy, 2018). Même les espèces les plus communes sont touchées, comme le moineau domestique (Ghosh *et al*., 2010). On observe encore un effet différent, plus sournois, de ce déclin de la biodiversité, lié au fait que certaines espèces tendent à être favorisées au détriment d'autres espèces en fonction de certains de leurs traits, les communautés tendant ainsi de plus en plus à se ressembler sur le plan taxonomique mais aussi fonctionnel : on parle ainsi d'homogénéisation biotique, dont l'impact est certainement sous-estimé (Gaston *et al*. 2008, Ceballos *et al*., 2017).

Les espèces marines ne sont pas épargnées et de nombreuses ont disparu, comme le phoque moine des Caraïbes (*Monachus tropicalis*) (LeBoeuf *et al*., 1986), ou sont en déclin, comme le montre l'exemple des baleines *Eubalaena* et des baleines grises dont l'aire de distribution a grandement diminué (Rodriguez *et al*., 2018). Un consensus scientifique tend pourtant à minimiser la perte de biodiversité en milieu marin, ce qui est attribuable au manque important de données sur les populations marines, bien moins échantillonnées que les populations terrestres (Edgar *et al*., 2005). La biodiversité marine subit en réalité les mêmes pressions d'extinction, de déclin des populations et d'homogénéisation biotique, comme l'illustre le Living Planet Index lorsqu'il est appliqué au milieu marin (Zoological Society of London et WWF, 2014). La diminution de la taille moyenne des poissons pêchés est un exemple frappant d'homogénéisation trophique due à la pêche (McClenachan, 2009).

Enfin, impossible de présenter les menaces pesant sur la biodiversité marine sans aborder les différents rejets issus du milieu terrestre : pollution plastique (micro et macro-déchets) (Derraik, 2002), pollution aux métaux lourds (cadmium, mercure, cuivre, plomb, zinc) (Millward *et al*., 2018) et apports terrigènes excessifs en sédiments et nutriments dus à l'agriculture intensive (Menesguen, 2003). Cette dernière est également à l'origine du phénomène des marées vertes, un symptôme bien connu de l'enrichissement des eaux en nitrates (Menesguen, 2013).

Or, la biodiversité est une richesse qu'il est indispensable de conserver, pour sa valeur intrinsèque tout d'abord, mais également pour les services écosystémiques fondamentaux de support, d'approvisionnement, de régulation et culturels qu'elle fournit (bien qu'ils fassent trop souvent oublier la première raison) (Worm *et al*., 2006 ; Arnaud De Sartre *et al*., 2014). La biodiversité marine et en particulier côtière représente la ressource alimentaire principale de millions de personnes et contribue à maintenir la qualité de l'eau ; sa dégradation est associée à un risque global accru pour les populations côtières (Worm *et al*., 2006).

Pour protéger le milieu marin face à toutes ces menaces, il est nécessaire de comprendre l'écologie de ses espèces et le fonctionnement de ses écosystèmes et d'assurer un suivi des communautés afin de détecter de potentiels changements en réponse aux pressions

environnementales mais aussi aux réponses adoptées par les sociétés (politiques publiques, plan de gestion, mesures de conservation, de protection). Ces deux éléments sont fondamentaux, mais non suffisants. Conserver la biodiversité ne se fera aussi qu'avec l'adhésion des populations : aussi est-il crucial, dans cet objectif, que cette population ait conscience des bouleversements en cours et ait envie de s'impliquer dans la préservation des milieux, tout particulièrement les enfants qui représentent l'avenir de l'humanité et de ses actions alors même qu'ils sont de moins en moins connectés à la nature. On parle même d'« extinction de l'expérience de nature » (Pyle, 1993). Parmi les différentes actions menées (programmes d'éducation et de sensibilisation à l'environnement, communications par divers médias) à différentes échelles (locales à nationales) par différents acteurs (associations, scolaires, politiques, médias...) un moyen original fait référence aux sciences participatives. Les sciences participatives permettent à des acteurs « non experts » de participer à la production de connaissances scientifiques (Charte des sciences et recherches participatives en France, 2017). Elles permettent à la fois une acquisition de données de grande ampleur selon des protocoles standardisés ouvrant la voie à des recherches plus ambitieuses et l'implication du grand public dans les enjeux étudiés (Houllier et Merilhou-Goudard, 2016). C'est également un moyen d'initiation à la démarche scientifique et de renforcement de l'esprit critique pouvant renforcer le lien entre citoyens et scientifiques dans un contexte de méfiance croissante à l'égard des sciences (notamment due à la propagation de fausses informations), dont le mouvement « anti-vax » est l'exemple le plus frappant (Nichols *et al*., 2009 ; Houllier et Merilhou-Goudard, 2016). Les sciences participatives peuvent impliquer une validation par des experts et reposent fortement sur la mobilisation des volontaires (Houllier et Merilhou-Goudard, 2016).

Le suivi de diverses communautés marines peut ainsi être proposé, notamment celui des communautés algales, associées à de nombreux enjeux environnementaux. En effet, les macroalgues sont des espèces marines très structurantes de leur milieu et constituent des habitats favorisant une grande biodiversité (Torn *et al*., 2016). Leur exploitation s'est par ailleurs intensifiée ces dernières années (agroalimentaire, cosmétique, engrais…) (Cabioc'h *et al*., 2014). Enfin, ces organismes peuvent réagir aux changements physico-chimiques du milieu marin et ainsi constituer des indicateurs des effets de ces changements (qu'ils soient liés au changement climatique ou à la modification de certaines pratiques) (Martin *et al*., 2015) répondant aux objectifs de la Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (2008). Il est donc essentiel d'assurer un suivi de ces communautés dans le contexte actuel de perturbations climatiques et de crise de la biodiversité.

C'est pourquoi il est pertinent de développer des observatoires, fondés sur un compromis entre la quantité et la qualité des données, mobilisant à la fois des spécialistes aux compétences pointues mais localisées (par exemple les experts réalisant les suivis standardisés en station marine) et des volontaires pouvant assurer un suivi à plus large échelle. La diversité des niveaux et le principe du volontariat impliquent de limiter la résolution taxonomique, de standardiser le protocole tout en le rendant attractif et de minimiser l'effort individuel (temps de suivi, nombre de sites) pour favoriser un grand nombre de participants.

Pour répondre aux enjeux environnementaux et sociaux évoqués, le programme Plages Vivantes (http://plagesvivantes.65mo.fr/) a été mis en place : il propose un suivi participatif des algues de la laisse de mer. Encore en cours de développement, il proposera à terme le suivi de différents taxons des hauts de grèves à plusieurs types de public (scolaires, gestionnaires et grand public). L'objectif est de suivre les algues échouées en tant que témoin des changements qui les affectent (par exemple des variations de distribution de certaines espèces en réponse au changement climatique) et potentiellement en tant que témoin de l'état des habitats marins, sous condition que la laisse de mer reflète réellement les communautés algales présentes en mer à proximité.

La laisse de mer est l'accumulation de matériaux rejetés sur la plage par les vagues, les

marées et le vent, incluant des algues, des herbes marines, des éponges, des crustacés, des diatomées et des charognes, mais également des déchets humains inorganiques (Orr *et al*., 2005 ; Goverment of South Australia, 2017). Elle est facilement accessible et observables (et située sur le domaine public) et pourrait donc être suivie à large échelle par des volontaires.
Par ailleurs, la laisse de mer constitue un écosystème à part entière, et joue un rôle important dans l'écologie des hauts de grève. Elle représente le principal apport en éléments nutritifs du milieu, un habitat pour de nombreux organismes (dont les invertébrés, dont s'alimentent de nombreuses espèces d'oiseaux et de poissons) et un lieu de ponte pour certaines espèces d'oiseaux vulnérables et à forte valeur patrimoniale comme le gravelot à collier interrompu (Bargain *et al*., 1999) ; elle encourage également la fixation du substrat en haut de grève, notamment la formation des dunes en stabilisant le sable et en servant d'engrais à la végétation pionnière (Kirkman and Kendrick, 1998 ; Zemke-White *et al*., 2005 ; Suursaar *et al*., 2014, Liebowitz *et al*., 2016). La laisse de mer pourrait également refléter, à une échelle plus ou moins restreinte, les communautés algales présentes en mer. Selon certaines études, la composition algale de la laisse de mer est suffisamment proche de celle des communautés locales pour que l'échantillonnage de la laisse, simple à mettre en œuvre et peu coûteux, remplace l'échantillonnage sous-marin ; elle pourrait même servir d'indicateur de l'état des écosystèmes marins (Suursaar *et al*., 2014 ; Martin *et al*., 2015). Mais pour interpréter cette composition, encore faut-il comprendre ce qu'elle reflète exactement. Plusieurs études ont montré que des facteurs géomorphologiques, hydrologiques, biologiques et temporels influençaient la quantité ou la composition spécifique de la laisse de mer (Orr *et al*., 2005 ; Zemke-White *et al*., 2005 ; Suursaar *et al*., 2014), ces paramètres variant selon la zone géographique et/ou l'étude réalisée. Par ailleurs, ces mécanismes n'ont pas été identifiés en France.
La présente étude a donc pour but de comprendre **quels sont les déterminants environnementaux de la composition algale de la laisse de mer. Les algues de la laisse proviennent-elles des communautés algales locales ? Dans quelle proportion ? A quelle distance ? La composition de la laisse dépend-elle de la géomorphologie du site ? Existe-il une forte variation temporelle de cette composition ?** Les hypothèses que nous avons testées, basées sur les études précédemment citées et les observations de terrain, sont les suivantes (lorsqu'aucune référence n'est indiquée, l'hypothèse se base sur nos observations) :
1) Nous supposons que la laisse de mer sera plus diversifiée et volumineuse sur des plages rocheuses (Orr *et al*., 2005), abritées, très découpées (Suursaar *et al*., 2014) et à proximité de substrats rocheux (Zemke-White *et al*., 2005), où se développent les algues. Nous faisons l'hypothèse que ces plages sont des zones d'accumulation où l'apport en algues est majoritairement local (Suursaar *et al*., 2014) et non exogène (échouage de radeaux d'algues flottantes). Ces dernières devraient au contraire, selon nos hypothèses, être proportionnellement mieux représentées dans les laisses de plages plus exposées, plus linéaires, aux substrats plus sableux.
2) Nous supposons que la diversité taxonomique de la laisse est plus importante après une tempête ou lors d'un gros coefficient de marée car les algues sont alors arrachées plus facilement.
3) Nous supposons que la richesse et la composition spécifique des algues de la laisse sont soumises à une importante saisonnalité liée à la phénologie des communautés algales.
Afin de tester ces hypothèses, j'ai mobilisé des données ponctuelles (n'ayant pas ou peu de réplicas temporels) collectées à large échelle dans le cadre de la phase de test du programme Plages Vivantes dans une large gamme de conditions environnementales. J'ai d'autre part élaboré un plan d'échantillonnage, à l'échelle du Finistère Sud, avec l'objectif de sélectionner une grande variété de contextes (exposition, découpage du trait de côte, substrat) et de disposer d'un nombre de sites suffisant de chaque modalité pour tester l'effet de ces variables sur la composition algale. J'ai ensuite collecté les données une fois par mois de mars à mai de

manière à évaluer l'existence de variations de la composition algale des laisses liées à la phénologie saisonnière. A la suite, je présenterai donc la méthodologie mise en place, les questionnements qu'elle a soulevés et les solutions choisies pour y répondre (relatives notamment au plan d'échantillonnage, au protocole de recueil des données et à l'analyse des données), puis je présenterai les résultats que je discuterai au regard du contexte et des enjeux établis. Enfin, j'aborderai des perspectives pour la poursuite de cette étude.

I) MATERIEL ET METHODE

1. Zones d'étude et choix des sites

Pour étudier l'effet de déterminants spatiaux et temporels sur la composition algale de la laisse de mer, un compromis est nécessaire entre un échantillonnage à large échelle spatiale et un échantillonnage suivi dans le temps. Ainsi, l'échantillonnage de sites répartis sur le quart Nord-Ouest de la France viendra compléter un suivi temporel sur un nombre de sites restreint dans le Sud du Finistère. L'étude porte donc sur deux échelles géographiques : localement, sur les côtes du Finistère Sud et plus globalement sur la côte Manche-Atlantique, auxquelles on fera référence dans la suite de ce mémoire comme « échelle Finistère » et « large échelle » (Figure 1).

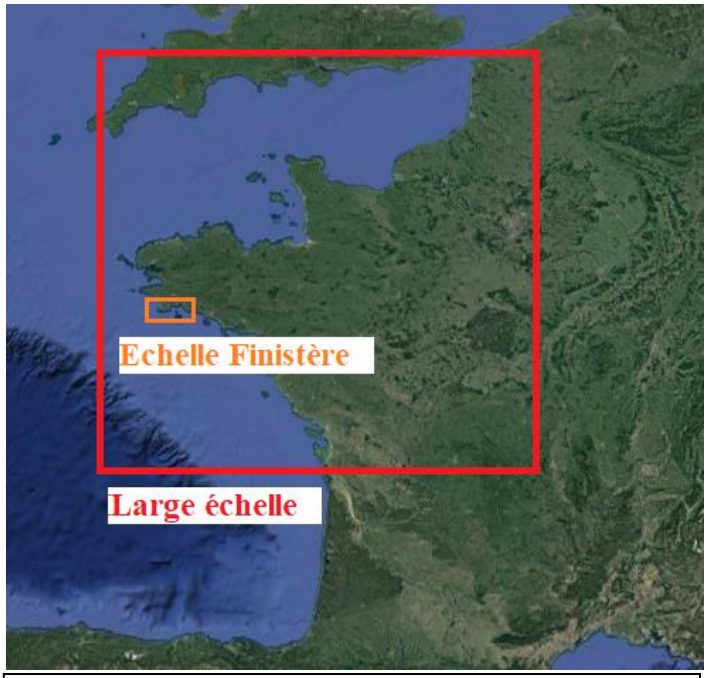


Figure 1 : Les deux zones d'étude : large échelle et échelle Finistère

L'objectif est également d'évaluer les effets des déterminants géomorphologiques (substrat, exposition…) sur la composition algale des laisses. Les sites choisis, à chaque échelle, doivent donc présenter des variations selon ces différentes variables, et le nombre de sites par variable doit être suffisant pour être représentatif de cette variabilité environnementale. Si les deux zones d'études sont naturellement hétérogènes à leur propre échelle, on prend soin de choisir des sites aux côtes plus ou moins découpées, à l'exposition variable et présentant plusieurs substrats.

a. Sites avec suivi temporel, échelle Finistère

Le Finistère se situe entre deux régions biogéographiques de l'Atlantique : la région méditerranéo-atlantique (tempérée chaude), et la région boréo-atlantique (tempérée froide). La zone située de la Bretagne à l'Irlande constitue ainsi la limite de répartition de nombreuses espèces et présente la richesse spécifique la plus importante de tout l'Atlantique Nord-Est (Cabioc'h *et al*, 2014, Gallon *et al*., 2014), le Finistère comptant plus de 500 espèces d'algues

en incluant les microalgues (Département du Finistère, 2016). Il est également à noter que l'occurrence des marées vertes est importante dans cinq bassins versants finistériens, dont la Baie de Concarneau, où un nouveau plan contre la prolifération des algues vient d'être lancé (DRAAF Bretagne, 2018).
C'est dans ce contexte de grande richesse spécifique que le suivi temporel des laisses de mer est réalisé. Afin d'allouer au mieux l'effort d'échantillonnage dans le temps et l'espace de manière à avoir un nombre d'individus statistiques suffisant pour tester nos différentes hypothèses, nous avons choisi une trentaine de sites à échantillonner une fois par mois entre mars et mai. Seize sites avaient déjà fait l'objet de plusieurs échantillonnages avant le stage, il était donc pertinent de poursuivre leur suivi temporel. Les 15 autres sites ont été choisis de manière à créer un ensemble représentatif des variables environnementales explicatives identifiées comme potentiellement structurantes des communautés. Parmi ces 15 sites supplémentaires, 8 ont été choisis parmi les sites déjà échantillonnés une fois. Les sept nouveaux sites, situés plus à l'Ouest, élargissent l'échelle spatiale du suivi temporel et apportent une hétérogénéité de situations supplémentaire. Au final, le suivi temporel a été réalisé de Tréguennec à Trévignon (Figure 2) et 31 sites ont fait l'objet d'un suivi mensuel.

b. Sites ponctuels, large échelle

On complète ce suivi avec un maximum de sites « ponctuels », où l'on réalise un unique échantillonnage. Tout comme pour les sites suivis, on choisit un ensemble de sites hétérogène selon le linéaire de côte, l'exposition et le substrat, avec comme objectif supplémentaire de couvrir le maximum de plages à l'échelle du littoral Manche-Atlantique (ce qui garantit d'ailleurs une bonne hétérogénéité). La localisation des sites en elle-même était donc également un critère de sélection, on préférera par exemple faire trois échantillonnages espacés de 10km plutôt que trois échantillonnages adjacents. On garde cependant la liberté de choisir des plages « intéressantes », dont on sait qu'elles se distinguent selon certains critères biotiques ou abiotiques. 138 sites supplémentaires ont ainsi été échantillonnés. Des relevés réalisés sur les sites de suivi temporel avant la période de suivi ont également été pris en compte comme relevés ponctuels pour maintenir un effort de suivi identique sur chacun des sites.
On travaille donc finalement sur 169 sites (Figure 2) sur lesquels on devrait pouvoir observer une variabilité dans la composition algale de la laisse. Aux deux échelles d'étude, les sites facilement accessibles ont été privilégiés. Cette précaution permettra l'utilisation d'un drone flottant d'exploration sous-marine qui sera présenté ultérieurement.

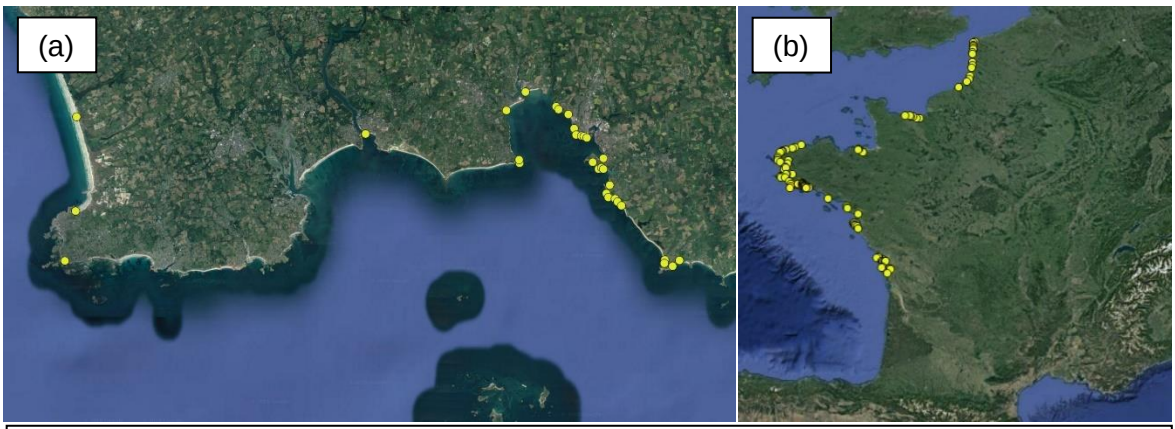


Figure 2 : (a) Carte des 31 sites suivis, correspondant à la « zone Finistère » et (b) carte complète des 169 sites échantillonnés.

2. Les algues

a. Espèces étudiées

Cette étude prend en compte toutes les macroalgues présentes dans la zone d'étude, c'est-à-dire les espèces présentes dans le Finistère Sud à l'échelle du Finistère et les espèces de la Manche et de la côte Atlantique à large échelle. L'échantillonnage est le plus exhaustif possible, sans restriction à une liste d'espèces prédéfinie.
Deux phanérogames marines ont été rajoutées à l'étude : *Zostera marina* et *Zostera noltei*, que l'on trouve dans la laisse de mer. Ce ne sont pas des algues mais le rôle de ces espèces est important dans les écosystèmes marins côtiers ; en effet, les zostères forment des herbiers aux nombreux rôles écologiques, qui constituent des habitats remarquables et des réservoirs de biodiversité. Il est à noter que ces espèces peuvent parcourir de grandes distances grâce à leur bonne flottabilité (Département du Finistère, 2016 ; Bajjouk *et al*., 2010). Par souci de simplicité, les zostères sont inclues dans la dénomination « communautés algales ».
Nous avons également porté un intérêt particulier aux algues flottantes, dont on suppose qu'elles peuvent représenter un apport exogène en algues sur certaines plages. Ont été qualifiées de « flottantes » les espèces pourvues de flotteurs (*Ascophyllum nodosum*, *Cystoseira sp*., *Fucus vesiculosus*, *Halidrys siliquosa*, et *Sargassum muticum*) (Cabioc'h *et al*., 2014) et *Himanthalia elongata*, *Zostera marina* et *Zostera noltei*, qui ne possèdent pas de flotteurs mais pour lesquelles on observe une bonne flottaison (Bajjouk *et al*., 2010 ; comm. pers. C. Kerbirou).

b. Identification et résolution taxonomique

Notre objectif est de mettre en place un échantillonnage de la laisse de mer à large échelle, visant à évaluer l'importance relative des déterminants de la composition de la laisse de mer dans le cadre d'une étude en écologie. L'objectif ici n'est pas de réaliser un inventaire exhaustif des espèces mais bien de travailler sur un échantillon représentatif des algues de la laisse en respectant un compromis entre des composantes spatiales (nombre de sites), temporelles (nombre de réplicas dans la saison) et taxonomiques (temps passé à l'identification). Les techniques de microscopie ou de génétique (impliquant du temps et des coûts supplémentaires) n'ont donc pas été utilisées pour identifier les espèces. Ce choix diminue certes la résolution taxonomique de l'étude, mais celle-ci est identique entre tous les sites pour chacune des échelles d'étude, ce qui garantit la reproductibilité de l'identification.

Figure 3 : fragments de laminaires non identifiables. Photo P. Poisson

A l'échelle du Finistère, la détermination des taxons échantillonnés a été autant que possible réalisée à l'espèce, selon des critères facilement identifiables in situ, à l'aide de supports comme le Guide Delachaux (Cabioc'h et al., 2014) et le site internet Estran22 (proposant de nombreuses photos commentées). L'aide de certains experts a également été sollicitée pour l'identification (Sandrine Derrien, Aodren Le Gal).
A large échelle, la priorité était plutôt de maximiser le sombre de sites échantillonnés ; nous nous sommes donc focalisés sur les espèces les plus fréquentes et abondantes, les plus importantes sur le plan fonctionnel. Par ailleurs, le programme Plages

Vivantes prévoyant l'identification des algues de la laisse par un public non expert, il était nécessaire d'identifier une liste restreinte de taxons faciles d'identification et structurants de leur milieu (qui ont été inclus dans une clé d'identification développée au cours du programme).
Lorsqu'elles n'ont pas été identifiées à l'espèce, les algues ont été identifiées soit au niveau du genre (comme *Ceramium sp*. ou *Laminaria sp.* pour des fragments de laminaires) (Figure 3), soit par regroupement de deux espèces (comme *Furcellaria lumbricalis* et *Polyides rotundus*, regroupées en *Furcellaria*/*Polyides* car leur base permettant de les différencier est souvent absente chez les spécimens échoués), soit par un nom générique tel que « Algues rouges filamenteuses » pour les cas extrêmes. Par ailleurs, le niveau d'identification variait entre les différents observateurs et au cours de l'apprentissage de chacun, ces regroupements ont donc permis d'homogénéiser la résolution taxonomique.

c. Variabilité spatiale des communautés algales et des laisses de mer

Bien qu'aucune cartographie précise, récente et complète des communautés algales françaises ne soit disponible à l'heure actuelle, certaines cartes nous permettent d'affirmer qu'il existe une variabilité spatiale dans la répartition des espèces en Bretagne. Ainsi, les herbiers de zostères (Bajjouk et al., 2010), les champs de laminaires (Derrien et al., 2009), les fucales (Guillaumont et al., 2009a) et les corallinales (le maerl) (Guillaumont et al., 2009b) présentent des distributions variées et ne sont pas présentes tout le long de la côte.
On observe aussi une grande variabilité dans la laisse au cours des relevés, en termes de composition spécifique, de richesse spécifique et de volume (Figure 4).

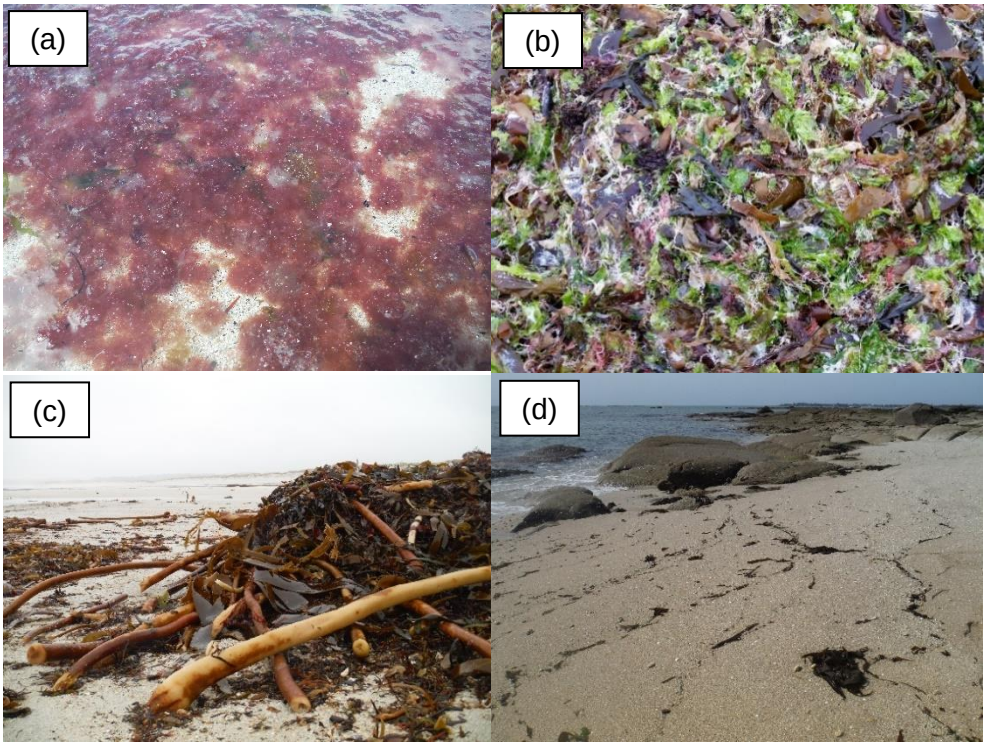


Figure 4 : Variabilité de la composition de la laisse. (a) laisse dominée par des algues rouges filamenteuses ; (b) laisse dominée par Laminaria sp., Ulva sp. et Fucus sp., typiquement une laisse très riche ; (c) laisse dominée par Laminaria hyperborea, typiquement un très grand volume de laisse (d) laisse sans espèce dominante, typiquement un très faible volume de laisse. Photos : P. Poisson

3. Protocole de recueil des données

Un protocole d'échantillonnage de la laisse de mer a été mis en place en février 2017 lors d'un précédent stage, avec comme objectif à long terme la mise en place d'une collecte de données participative (programme Plages Vivantes). Il était nécessaire de conserver ce protocole pour que la présente étude permette d'avancer vers cet objectif et pour que les données collectées durant la période du stage soient comparables aux données existantes, qui couvraient déjà de nombreuses plages du Finistère Sud sur une année complète. Le protocole est le suivant (Figure 5) :

- Sur un transect de 25m : mesure du volume de laisse de mer par l'estimation de la longueur cumulée sur 25m, de la largeur moyenne et de l'épaisseur moyenne.
- Echantillonnage dans 5 quadrats de 1m² disposés tous les 5m le long du transect. Dans chaque quadrat est réalisée une estimation du recouvrement et de l'épaisseur moyenne (qui n'ont pas été exploitées au cours du stage mais pourront l'être par la suite) et les espèces d'algues présentes sont identifiées. On note également l'abondance de chaque espèce par un indice de 1 à 4 similaire au coefficient de Braun-Blanquet mais basé sur le nombre de spécimens plutôt que sur la surface : 1 – espèce peu abondante, observée une fois dans le quadrat ; 2 – plusieurs spécimens de cette espèce observés dans le quadrat ; 3 – de nombreux spécimens de cette espèce observés dans le quadrat ; 4 – espèce majoritaire dans le quadrat.
- La date, le nom de l'observateur et le nom du site échantillonné sont notés.

Les dimensions de la laisse permettent de calculer son volume. La variabilité du volume étant trop importante par rapport à celle des autres variables, un indice a été mis en place pour permettre d'estimer celui-ci ainsi que les quantités relatives des espèces majoritaires. La formule est la suivante : $ind = (\log(V)+10)$; où V est le volume de la laisse en m^3. Ajouter 10 permet de conserver des valeurs positives et ainsi d'appréhender cet indice volumique de manière plus intuitive. Il est ensuite possible de multiplier cet indice par l'abondance d'une espèce donnée pour obtenir sa quantité, mais l'espèce en question doit représenter la majorité du volume total de la laisse ; ce calcul a donc été appliqué aux laminaires. Cette formule permet de réduire la variabilité du volume, qui aurait créé de la surdispersion dans les modèles, tout en prenant en compte l'abondance relative et le volume dans le calcul des quantités.

Figure 5 : Protocole d'échantillonnage de la laisse de mer. (a) : résumé schématique du protocole ; (b) transect de 25m sur la plage Cornouaille à Concarneau ; (c) quadrat de 1m². Photos P. Poisson

Les sites choisis pour le suivi temporel (Finistère Sud) ont été échantillonnés une fois par mois pendant trois mois (mars, avril, mai). Presque tous ces suivis ont été faits par le même observateur (MP), l'effet observateur du jeu de données « échelle Finistère » est donc certainement négligeable (bien qu'il ne soit, de fait, pas estimable).

Bien que le protocole n'ait pas été mis au point pour répondre à la problématique du stage, il y est adapté car il permet une mesure de la quantité de laisse de mer, l'identification des espèces présentes et leur abondance relative : nous pensons que ces éléments caractérisent le compartiment algal de la laisse de mer de manière suffisante puisque l'objectif est d'étudier ce qui détermine la quantité de laisse et sa composition spécifique. De plus, ce protocole est simple et rapide à mettre en œuvre, ce qui permet de multiplier le nombre de relevés, réduit les besoins en matériel et l'impact sur le milieu (par exemple aucun prélèvement n'a été réalisé pour des mesures de masse) et en fait un protocole compatible avec l'objectif d'une campagne de relevés participative. Les cinq réplicas réalisés sur chaque site permettent en outre de tenir compte de la variabilité spatiale intra-laisse : les tests menés en 2017 sur le nombre de quadrats idéal ont montré que cinq quadrats permettaient de détecter 90% des 30 taxons de la clé d'identification créée pour le programme Plages Vivantes.

Le plan d'échantillonnage mis en place doit permettre d'analyser les variations spatiales et

temporelles de la composition algale de la laisse de mer en fonction des variables environnementales associées.

4. Variables environnementales

Pour comprendre ce qui influence la composition de la laisse de mer, différentes variables ont été choisies, caractérisant l'hydrologie du milieu, la géomorphologie de la côte ou les communautés algales locales. Les précédentes études sur le sujet ont permis de mettre au jour de nombreux déterminants potentiels de la composition algale de la laisse de mer (Orr *et al*., 2005, Suursaar *et al*., 2014, Zemke-White *et al*., 2005), néanmoins seules les variables les plus pertinentes ont été sélectionnées au cours de ce stage : ce sont celles qui, d'après les données bibliographiques et les avis d'expert, permettront de vérifier les hypothèses émises, et pour lesquelles des données sont disponibles. Nous nous sommes ainsi intéressés au type d'habitat marin, à la présence d'herbiers de zostères, au découpage du trait de côte (linéaire), au coefficient de marée, à l'occurrence de tempêtes, au type de plage, au substrat proche de la plage et à l'exposition. Toutes ces variables ont un effet sur la composition de la laisse de mer d'après les études citées ci-dessus.

a. Habitats EUNIS et herbiers de zostères

Le type d'habitat marin (dont les herbiers de zostère) constitue un indicateur des communautés algales locales. En effet, si des cartographies de ces communautés existent, elles sont très anciennes et très incomplètes. Chez les algues, la répartition des espèces est directement liée à l'habitat (Cabioc'h *et al*., 2014), une cartographie des habitats selon la typologie EUNIS (Hamdi *et al*., 2010) a donc été utilisée, complétée par une cartographie des herbiers de zostère (habitat A2.61 de la classification EUNIS) (Rebent, 2007).
La typologie EUNIS (European Nature Information System) est une typologie européenne donc la traduction française est issue de la collaboration de l'Ifremer, du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie et du Muséum National d'Histoire Naturelle. Elle constitue la seule typologie intégrant les habitats marins à l'échelle européenne ; elle est donc la typologie standard employée pour les données de cartographie des habitats (Bajjouk *et al*., 2015). C'est une classification hiérarchique des habitats, dont la première classe concerne les habitats marins et intertidaux et qui intègre le substrat, la profondeur, l'hydrodynamisme et la biocénose du milieu (Figure 6) (Bajjouk *et al*., 2015).
Les variables habitat EUNIS et herbiers ont été prises en compte en termes de proportion de surface occupée dans une zone tampon entourant le site. L'hypothèse selon laquelle la laisse de mer est composée d'algues locales implique en effet que si un habitat prédomine sur les autres alors les espèces algales qui le caractérisent prédomineront dans la laisse. On a ainsi travaillé à l'échelle de la plage, avec des zones tampons de 200m de rayon (pour ne prendre en compte que l'habitat le plus proche dans la mesure du possible), et à l'échelle du paysage, avec des zones tampons de 1000m de rayon (pour évaluer l'effet d'une combinaison d'habitats).
Les herbiers de zostère sont inclus dans la typologie d'habitats EUNIS, mais à un niveau de classification beaucoup plus précis que celui disponible sur la carte ; leur proportion dans les zones tampon a donc été calculée indépendamment de celles des habitats. Les habitats EUNIS pris en compte sont les suivants : A1- Roche et autres substrats durs intertidaux ; A2-Sédiment intertidal, A3-Roche et autres substrats durs infralittoraux ; A4-Roche et autres substrats durs circalittoraux et A5-Sédiment subtidal.

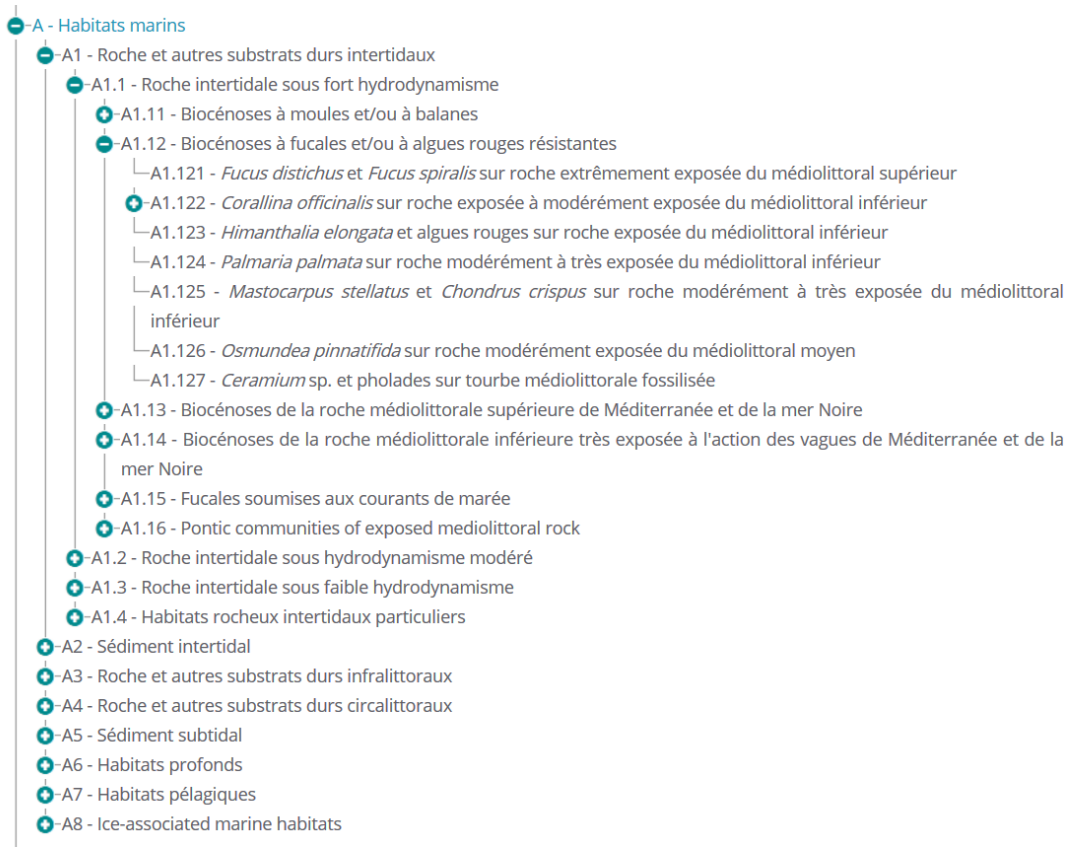


Figure 6 : Habitats marins selon la typologie EUNIS, incluant les habitats étudiés A1 à A5, avec un exemple de déclinaison pour l'habitat A1 (site INPN - Inventaire National du Patrimoine Naturel)

b. Variables géomorphologiques et hydrodynamiques

La forme du linéaire de côte définit si une plage est plutôt droite ou découpée, ce qui influence la richesse spécifique et le volume de laisse selon nos hypothèses. Il est calculé à partir du trait de côte Histolitt, qui représente la ligne atteinte par la mer lors des plus grandes marées (coefficient 120) (data.gouv, 2018). C'est une variable quantitative, une simple mesure de la longueur en mètres du linéaire dans des buffers de mêmes dimensions que pour les habitats, réalisée sur le logiciel QGIS. Un linéaire de côte faible correspond ainsi à une plage droite, hypothétiquement associée à une faible quantité et une faible diversité d'algues dans la laisse. Cette variable est comprise entre 378 et 973m pour les buffers de 200m et entre 2000 et 11945m pour les buffers de 1000m.
Le coefficient de marée, compris entre 33 et 109, correspond au coefficient au moment du relevé, en revanche la variable booléenne « tempête » indique l'occurrence ou non d'une tempête (vents à plus de 90km/h) dans la semaine précédant le relevé. On suppose que ces deux variables influencent positivement la richesse spécifique de la laisse.
Deux variables catégorielles, le type de plage et le substrat proche, servent à tester l'effet de la présence représentative des rochers sur la composition algale de la laisse : on pense que cette dernière est plus riche, volumineuse et d'origine locale en présence de rochers. La variable « type de plage » possède deux modalités : les plages uniquement sableuses (sédiments de diamètre inférieur au centimètre) et les plages de sable et de rochers (des galets de plusieurs centimètres de diamètre aux plus gros rochers). Les rares plages uniquement rocheuses

appartiennent à cette dernière catégorie. De même, le substrat proche, qui est le substrat présent juste après celui de la plage, est représenté par les catégories Sable (incluant le sable et la vase) et Roche (incluant la roche et le gravier). La vase et le gravier sont très peu représentés. Le substrat proche a été renseigné à partir de l'Atlas des fonds meubles du plateau continental du golfe de Gascogne : carte biosédimentaire (1976).
Enfin, on a fait l'hypothèse qu'une exposition faible favorise la présence de laisses d'origine locale, riches et volumineuses. L'exposition, définie selon trois catégories (Exposé, Abrité, Moyennement exposé), a été renseignée grâce à l'orientation des vents dominants et à la configuration de la plage. Les sites soumis aux vents dominants sans aucune protection physique sont Exposés. Les sites soumis aux vents dominants mais protégés par une pointe, une baie ou un aménagement, ou peu soumis aux vents mais non protégés sont Moyennement exposés. Les sites peu soumis aux vents et protégés physiquement ou totalement protégés sont Abrités. Il était important d'utiliser ces trois modalités car dans une précédente étude les expositions fortes et faibles s'opposaient à une exposition moyenne (Orr *et al*., 2005).
On a donc analysé les variables environnementales suivantes (Figure 7) : la tempête, le coefficient de marée, le linéaire de côte, les proportions de cinq habitats EUNIS et la proportion d'herbiers autour d'un site (indépendamment de celle des cinq grands types d'habitats).

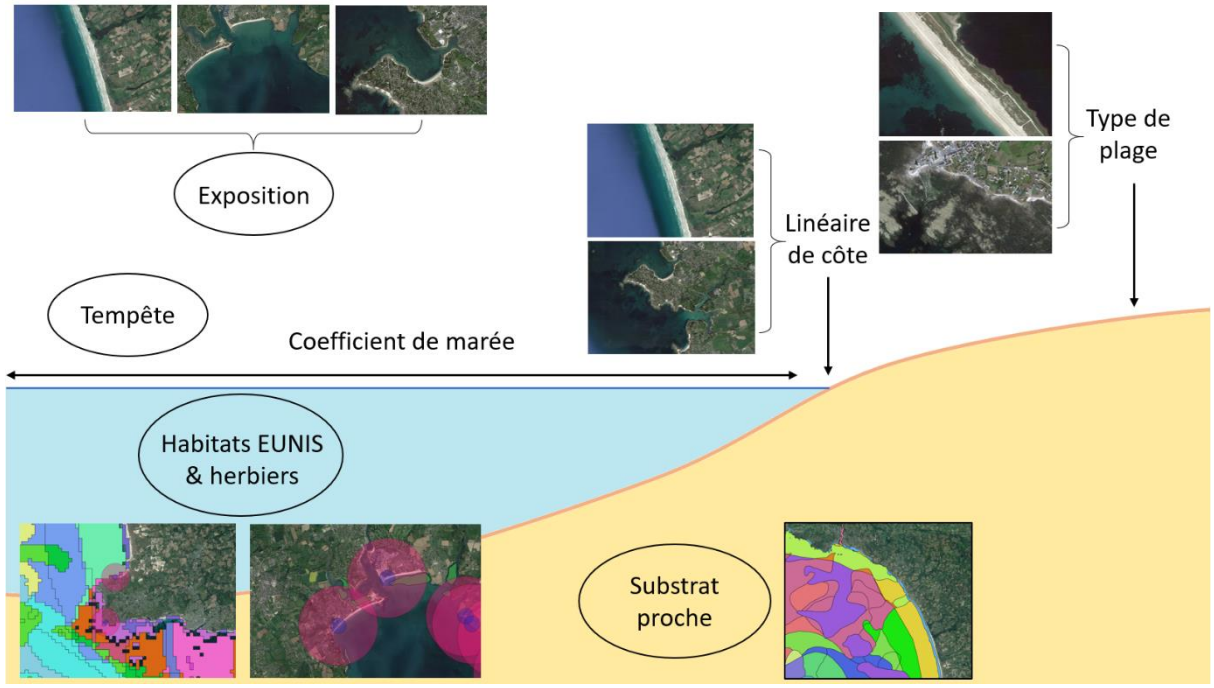


Figure 7 : Localisation des variables environnementales étudiées sur une vue en coupe de la zone littorale

5. Analyses statistiques

a. Sélection des données

Le protocole ayant été appliqué par divers observateurs, avec au début un fort effet apprentissage, et modifié au cours de sa première année d'utilisation, les données sont hétérogènes et il a fallu sélectionner les plus pertinentes.
Concernant les données de suivi, l'effet apprentissage est faible pour les espèces les plus

communes et fort pour les espèces plus rares. Il a été décidé d'étudier uniquement les espèces dont la fréquence dans les quadrats est supérieure à 25% pour pouvoir négliger l'effet apprentissage et parce qu'on ne souhaite pas que les espèces rares aient un poids statistique important dans les analyses, puisque ce sont les espèces communes qui ont le plus d'impact sur les écosystèmes marins et côtiers. Un certain nombre de relevés supplémentaires a été écarté (laisses de mer insuffisamment fraîches, observateur différent…) ; sur un total de 465 quadrats échantillonnés pour 93 relevés, on analyse donc finalement la composition de 323 quadrats.
Pour les données ponctuelles, les données les plus anciennes sont éliminées pour limiter l'effet apprentissage et parce que les premiers relevés (2017) ne comportaient parfois qu'un ou deux quadrats, il est donc probable qu'ils ne rendent pas bien compte de la composition spécifique de la laisse. On prend en compte les relevés réalisés à partir du 29 septembre 2017, soit 369 quadrats.
Chez les laminaires et plus rarement chez le genre Fucus, l'identification de l'espèce était parfois impossible car seuls des fragments de thalle étaient présents (Figure 3). Dans ce cas on notait Laminaria sp. ou Fucus sp. Ce cas de figure étant très fréquent chez les laminaires, les trois espèces concernées ont dû être regroupées. Par la suite on désigne donc *Laminaria digitata, Laminaria hyperborea* et *Saccorhiza polyschides* par *Laminaria sp*.
Trois relevés comportant quatre quadrats ont été conservés : on a négligé l'absence du cinquième quadrat pour gagner en information.
Par ailleurs ; le quadrat est l'individu statistique de nos analyses et l'information apportée par chaque quadrat est conservée ; elle n'est pas intégrée d'une quelconque façon.
Enfin, une base de données Access a été créée au cours du stage pour faciliter la gestion des données.

b. Composition des communautés algales de la laisse

Nous souhaitons connaître la provenance majoritaire des algues de la laisse, c'est-à-dire si les algues s'échouent au plus près lorsqu'elles se détachent et sont donc locales, ou si elles dérivent et s'échouent sur une plage plus éloignée. Pour cela une Analyse en Composantes Principales avec Variables Instrumentales (ACPVI ou PCAIV) est réalisée, visant à expliquer la dissimilarité de composition algale entre les quadrats par les habitats existant en face du site. En d'autres termes, la proportion de tel ou tel habitat à proximité des sites échantillonnés explique-elle que les compositions algales des laisses se ressemblent plus entre elles ? L'ACPVI rajoute une contrainte par rapport à l'ACP : les coordonnées des individus (les quadrats) sont fonction linéaire des variables environnementales présentes dans un deuxième tableau (Jaquet et Prodon, 2014). Pour évaluer si la dissimilarité en composition algale des laisses entre différents sites s'explique par la dissimilarité en habitats à proximité, on utilise le Mantel test qui permet de tester si une relation existe entre deux matrices de distances (alors que pour l'ACPVI, le deuxième tableau ne peut pas être une matrice de distances) (Bonnet and Van de Peer,2002). Autrement dit, le fait que deux sites se ressemblent plus en termes de composition d'habitat à proximité explique-t-il le fait que la composition en algues des laisses se ressemble plus ? L'analyse de la provenance des algues de la laisse de mer d'appuie également sur des modèles linéaires généralisés : les proportions d'algues flottantes, de zostères et d'algues vertes dans la laisse et la quantité de laminaires sont modélisées par les caractéristiques de la plage et les proportions des différents types d'habitats afin de déterminer si certains types de plage (au sens général) favorisent un apport en algues locales et s'il existe bien des algues dérivant plus que d'autres.

c. Abondance et diversité des communautés algales de la laisse

Pour évaluer dans quelle mesure la richesse spécifique et le volume en algues des laisses dépendent de paramètres environnementaux, nous avons utilisés des modèles linéaires généralisés (glm). Plus précisément, on utilise des modèles mixtes (glmer) permettant d'appliquer un effet random sur le site, de manière à prendre en compte la structuration par site des relevés (plusieurs réplicas par site). On ne souhaite pas étudier l'effet du site en tant que tel sur la composition de la laisse. La plupart des modèles sont testés selon la loi binomiale négative, selon la structure (1) ci-dessous. Cependant, lorsque la variable à expliquer est une proportion (par exemple le nombre d'espèces flottantes F par rapport aux espèces non flottantes NF), on applique la loi binomiale et on construit le modèle selon la structure (2). C'est le cas des modèles 1, 2 et 7.
Enfin, des modèles mixtes additifs généralisés (GAMM) sont utilisés pour tester l'existence d'une relation non linéaire entre la variable à expliquer et les prédicteurs, notamment pour les aspects temporels, puisque la phénologie des algues est cyclique (structure (3)).

(1) glmer.nb (richesse ~ Variables environnementales + (1|site), data=tableau)
(2) glmer (F, NF ~ Variables environnementales + (1|site), data=tableau, family=binomial)
(3) gamm (richesse ~ s(jour), random=list(site=~1), data=tableau)

Le choix des variables de départ de chaque modèle (Annexe I) est fait par expertise écologique, sur la base des hypothèses de l'étude. Les variables quantitatives sont centrées-réduites pour pouvoir comparer directement la valeur des paramètres estimés (Schielzeth, 2010). En l'absence de fortes corrélations entre les variables (coefficient de corrélation > 0.70), celles-ci sont toutes prises en compte et l'absence de multicolinéarité au sein du modèle est évaluée avec une estimation du Variance Inflation Factor (VIF, Fox, & Monette, 1992) (Annexe II). Les variables se révélant non significatives sont ensuite éliminées une à une, en commençant par celle dont la p-value est la plus élevée ; le modèle retenu est donc généralement constitué uniquement de variables significatives. Toutefois, lorsque plusieurs modèles sont satisfaisants pour une même variable à expliquer, on choisit celui présentant l'AIC la plus faible (et celui-ci peut inclure une variable non significative). Enfin, on prend soin de vérifier l'absence de surdispersion pour chaque modèle.
Ces précautions couplées à un choix de modèles adaptés devraient nous permettre d'obtenir des résultats fiables et d'identifier les déterminants de la composition algale de la laisse de mer parmi les variables étudiées.

II) RESULTATS

1. Les communautés algales de la laisse de mer

Au total, 94 espèces ou genres ont été observés dans la laisse de mer au cours des relevés, toutes données confondues (Annexe III). Les plus fréquentes sont, par ordre décroissant : les *Laminaria sp*., les *Ulva sp*., *Fucus serratus*, les *Cystoseira sp*. et *Chondrus crispus*. Beaucoup d'espèces sont rarement observées, voire très rarement : plus de 60% des algues apparaissent dans moins de 10% des quadrats (l'unité statistique), comme *Ahnfeltiopsis devoniensis*, et plus de 20% apparaissent dans moins de 1% des quadrats, comme *Sphaerococcus coronopifolius*.

La richesse spécifique moyenne des quadrats est de 8 espèces pour le jeu de données « Echelle Finistère » et de 7 espèces pour le jeu de données « large échelle » (Figure 8). La différence de richesse entre les deux jeux de données est assez faible mais la laisse de mer est légèrement plus riche et, en particulier, il existe plus de laisses très diversifiées dans le Finistère Sud (entre mars et mai) que dans le reste de la zone d'étude.
Le volume de laisse est dans la plupart des cas très faible, mais il arrive qu'un volume d'algues disproportionné s'échoue sur la plage, ce qui aurait rendu cette variable brute difficilement modélisable (Figure 9.a). Le calcul de l'indice volumique permet de résoudre ce problème (Figure 9.b).

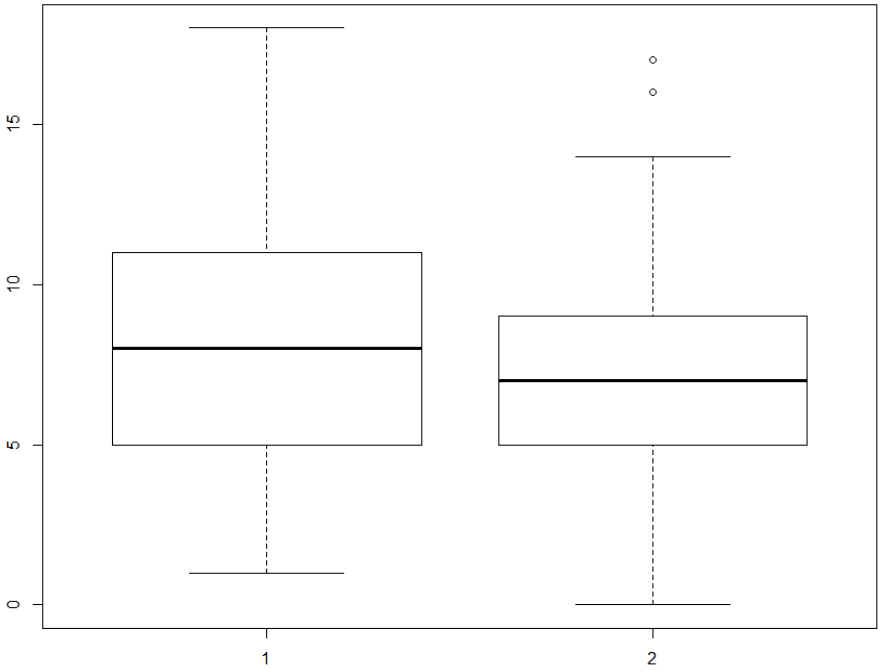


Figure 8 : Richesse spécifique des quadrats pour les relevés de suivi (échelle Finistère, 1) et pour les données ponctuelles (large échelle, 2).

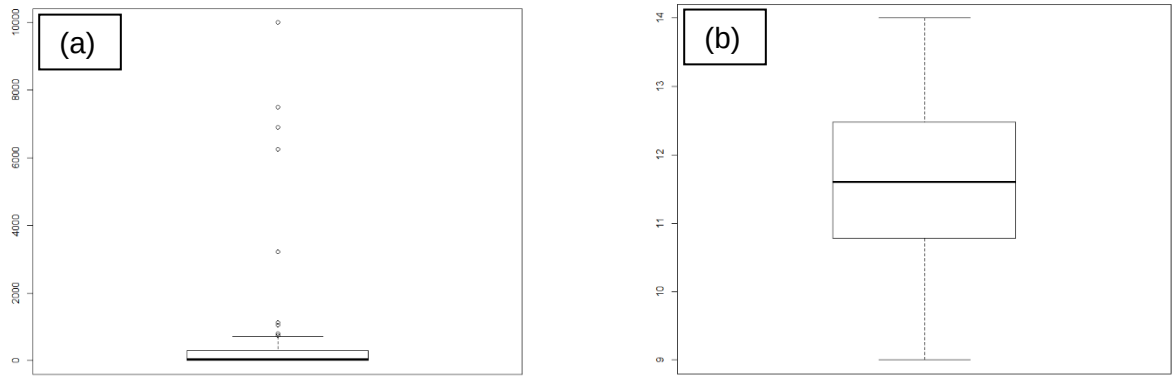


Figure 9 : (a) volume de laisse de mer en m^3 et (b) quantité de laisse de mer calculée selon l'indice volumique log(V)+10

2. Provenance des algues de la laisse de mer

Les parties II.2 et II.3 sont consacrées aux résultats sur la provenance des algues et l'effet des caractéristiques géomorphologiques de la plage.
Tous les résultats des modèles statistiques retenus pour les analyses sont présentés dans le Tableau 1. Sauf indication contraire, on travaille sur le jeu de données « large échelle ».

a. Composition expliquée par les habitats

Le pourcentage de dissimilarité entre les quadrats (369 répartis sur 138 sites) expliqué par les proportions d'habitats est de 9,7% (p-value = 0.01). À titre indicatif, la dissimilarité entre les quadrats est expliquée par l'ensemble des variables environnementales (proportions en habitats, substrat proche, type de plage, exposition, linéaire, tempête et coefficient de marée) à hauteur de 26,5%. Les habitats expliquent donc une part assez faible de la dissimilarité des compositions algales des quadrats, mais non négligeable comparée au total que l'on peut expliquer avec les variables disponibles.
La part de dissimilarité en composition algale expliquée par la dissimilarité en proportion d'habitats (et non plus par la proportion d'habitats) aux deux échelles d'étude est également de 9,7% (p-value < 0.001). On peut cependant noter que seule l'échelle du kilomètre est réellement explicative ; en effet, il n'y a pas de lien significatif entre la dissimilarité en habitats à 200m et la dissimilarité en composition spécifique. A l'échelle de 1000m, la dissimilarité en habitats explique 11,4% (p-value = 0.01) de la dissimilarité en composition spécifique. Il est intéressant de constater que l'échelle la plus grande est la plus pertinente dans la comparaison entre la laisse de mer et les habitats marins.

Le modèle 5.3 (Tableau 1) étudiant l'effet de la diversité en habitats (donc en communautés algales) sur la richesse de la laisse indique la richesse spécifique est positivement liée à l'interaction d'un substrat proche sableux et de la diversité en habitats (mesurée par un indice de Shannon sur les proportions d'habitats) dans un rayon de 1000m (p-value = 0.028). Les variables « substrat proche » et « diversité d'habitats » et leur interaction expliquent d'ailleurs une assez grande part de la variabilité de la richesse spécifique (r^2 = 0.20). La diversité d'habitats a également un effet positif très significatif sur la richesse de la laisse lorsqu'elle est testée seule (p-value <0.001).
Les résultats de ce modèle, de l'ACPIV et du Mantel-test suggèrent que les algues de la laisse de mer sont d'origine locale dans certains cas. On souhaite alors étudier la dérive potentielle de certaines espèces pour déterminer dans quels cas de figure l'apport en algues est exogène.

b. Proportions d'espèces flottantes

Nous modélisons la proportion d'espèces flottantes (donc susceptibles d'avoir dérivé) dans la laisse par les variables géomorphologiques de la plage pour identifier quels types de plage sont plutôt approvisionnés localement. Selon l'hypothèse, on s'attend à une interaction entre le type de plage et la proportion d'espèces flottantes : en plage de sable droite et exposée, la relation doit être plus forte.
Nous prenons également deux exemples d'espèces flottantes, *Z. marina* et *Z. noltei,* regroupées en Zostères, pour tester l'existence de radeaux ou de dérive de manière générale. On modélise donc la proportion et l'abondance de zostères dans la laisse par la proportion d'herbiers de zostères dans une zone tampon (200m ou 1000m) autour du transect.

Tableau 1 : Résultats des modèles expliquant les paramètres des laisses de mer par les déterminants identifiés. L'AIC est en gras lorsqu'il a permis de choisir le meilleur modèle. Les cases « Variable 1 *et* Variable 2 » correspondent à une interaction. Les lignes d'un modèle correspondent aux variables (déclinées en modalités si qualitatives) retenues pour celui-ci. Les modèles 1.2, 1.3, 4.1, 4.2, 8 et 9 concernent le jeu de données « échelle Finistère ».

Variable modélisée	**Modèle**	**Variable/modalité**	**estimate**	**p-value**	**r²**	**AIC**
Proportion d'espèces flottantes dans la laisse	1.1	Exposition: exposé (/abrité)	-0,63 ± 0,31	0,41 *		1050,0
		Exposition: moyen	-0,6 ± 0,31	0,054 .		
	1.2	Substrat proche: roche (/gravier)	-0,53 ± 0,4	NS		**1519,4**
		Substrat proche: sable	0,35 ± 0,47	NS		
		Substrat proche: vase	-0,53 ± 0,44	NS		
		Linéaire (200m)	0,26 ± 0,12	0,036*		
	1.3	Linéaire (200m)	-0,23 ± 0,14	NS (0,089)		1519,8
Proportion de zostères dans la laisse	2	zostère, 200m	2,36 ± 4,36	NS		329,5
		zostère, 1000m	4,44 ± 12,43	NS		
Abondance de zostères dans la laisse	3	zostère, 200m	-0,18 ± 0,25	NS		434,6
		zostère, 1000m	0,15 ± 0,22	NS		
Volume de laisse	4.1	Exposition: exposé	0,09 ± 0,04	0,034 *	0,02	1435,3
		Exposition: moyen	0,12 ± 0,04	<0,001 ***	0,02	
	4.2	Jour du relevé	-0,001 ± 0,00	0,019 *	0,01	1434,7
Richesse spécifique	5.1	Sédiment subtidal, 1000m	0,50 ± 0,13	<0,001 ***	0,03	1136,0
		(Sédiment subtidal, 1000m)²	-0,50 ± 0,13	<0,001 ***		
		Linéaire du paysage	0,52 ± 0,16	0,001 **	0,06	
		(Linéaire du paysage)²	-0,53 ± 0,16	<0,001 ***		
		Type de plage: sable et roche (/sable)	-0,27 ± 0,12	0,032 *	0,01	
		Substrat proche: sable	_0,18 ± 0,10	NS	0,03	
	5.2	Linéaire (1000m)	0,52 ± 0,17	0,003 **	0,06	1695,4
		(Linéaire)² (1000m)	-0,51 ± 0,17	0,002 **		
		Type de plage: sable et roche	-0,07 ± 0,13	NS	0,01	
		Linéaire du paysage *et* Type de plage: sable et roche	0,26 ± 0,13	0,048 *	0,05	
	5.3	Diversité en habitat à 1000m	0,09 ± 0,07	NS	0,12	**847,6**
		Substrat proche: sable	0,11 ± 0,11	NS	0,03	
		Diversité en habitat à 1000m *et* Substrat proche: sable	0,23 ± 0,10	0,028 *	0,17	
	5.4	Diversité en habitat à 1000m	0,42 ± 0.11	<0,001 ***		1032,9
	5.5	Volume de laisse	0,17 ± 0,02	<0,001 ***	0,15	1568,0
Quantité de laminaires	6	Roche infralittorale *et* circalittorale à 200m	-1,30 ± 0,61	0,034 *	0,05	1936,0

		Substrat proche: sable	-1,54 ± 0,49	0,002 **	0,12	
Proportion d'algues vertes	7	Substrat proche: sable	0,30 ± 0,15	0,040 *		483,7
Richesse spécifique	8	Tempête: oui (/non)	0,37 ± 0,09	<0,001 ***	0,06	1606,7
		Coefficient de marée	-0,10 ± 0,03	<0,001 ***	0,02	
		Coefficient de marée *et* Tempête	0,20 ± 0,11	NS (0,070)	0,02	
Richesse spécifique	9	Jour du relevé	0,50 ± 0,18	0,005 **	0,18	1554,2
		(Jour du relevé)²	_0,70 ± 0,18	<0,001 ***		

Nous testons l'effet de nos variables environnementales sur la proportion d'espèces flottantes dans la laisse de mer grâce au modèle 1.1 (Tableau 1). D'après ce modèle, la proportion d'espèces flottantes est significativement plus faible sur les plages exposées (p-value = 0.041) et probablement plus faible sur les plages d'exposition moyenne (p-value = 0.054), contrairement à notre hypothèse de départ.
Nous modélisons également la proportion d'algues flottantes dans le jeu de données « échelle Finistère ». Les modèles 1.2 et 1.3 (Tableau 1) sont les deux meilleurs modèles pour ce jeu de données, avec des AIC respectives de 1519,4 et 1519,8. On peut donc affirmer que dans le Finistère Sud le linéaire de côte à l'échelle de la plage influence positivement la proportion d'espèces flottantes (p-value = 0.036) ; il y a donc une plus grande proportion d'espèces flottantes sur les plages découpées.
Les zostères sont des espèces pouvant dériver facilement, nous testons alors l'influence de la proportion d'herbiers autour du site sur la proportion et l'abondance de zostères dans la laisse (modèles 2 et 3, Tableau 1). Il s'avère qu'aucune de ces deux variables n'est expliquée par la présence d'herbiers.
Aucun lien n'est détecté entre le lieu d'origine des zostères et leur lieu d'échouage. On peut supposer qu'elles ne se retrouvent pas nécessairement en face de leur lieu d'origine et qu'elles dérivent donc probablement.
Nous concluons que les espèces flottantes apparaissent plutôt dans les laisses de plages abritées et, dans le Finistère, sur les plages au linéaire découpé.

c. Quantité de laminaires et proportion d'algues vertes

Nous souhaitons confronter ces résultats sur les espèces flottantes à des résultats du même type pour des espèces non flottantes et a priori locales. Les laminaires et les algues vertes, qui ne flottent pas, sont deux groupes très fréquemment présents dans la laisse de mer, nous souhaitons donc savoir dans quelles conditions ces espèces se retrouvent le plus.
Le modèle 6 (Tableau 1) montre que la quantité de laminaires est plus importante pour un substrat proche rocheux que sableux (p-value = 0.002) et que cette variable explique bien la quantité de laminaires (r^2 = 0.12). En revanche, lorsque la proportion en roche infralittorale et circalittorale (habitats A3/A4) dans un rayon de 200m plus est importante que celle des autres habitats (A1, A2 et A5), la quantité de laminaires est plus faible (p-value = 0.034), même si cette variable est moins explicative (r^2 = 0.05).
La proportion d'espèces d'algues vertes (*Ulva sp.*, *Chaetomorpha sp.*, *Enteromorpha sp.*, *Cladophora sp.*) dans la laisse par rapport aux espèces rouges ou brunes est modélisée par les habitats, le linéaire, le type de plage et le substrat proche (modèle 7, tableau 1). On ne détecte qu'un seul effet, celui du substrat proche, qui augmente la proportion d'algues vertes dans la laisse lorsqu'il est sableux (p-value = 0.040).
Le substrat proche est donc le paramètre déterminant la présence de laminaires et d'algues

vertes dans la laisse. Les résultats suggèrent que l'on peut observer des espèces locales aussi bien pour des substrats sableux (algues vertes) que rocheux (laminaires). Cependant, d'après les résultats du modèle 5.3 sur la diversité en habitats, le substrat sableux est celui qui a le plus tendance à favoriser un apport en algues locales dans la laisse.
Ainsi, les résultats ne permettent pas de trancher sur l'origine des algues mais semblent indiquer que les deux types d'apport (local ou exogène) existent et que la composition de la laisse reflète plus fidèlement les communautés algales locales sur les plages relativement exposées (et plus rectilignes dans le Finistère), avec un substrat proche sableux.

3. Rôle de la géomorphologie de la plage

La première hypothèse suppose également que la richesse spécifique et la quantité de laisse sont plus importantes sur les plages de rochers découpées et pas trop exposées. La richesse spécifique et le volume de laisse sont donc modélisés par le type de plage, le substrat proche de la plage, le linéaire de côte (à deux échelles) et l'exposition. Nous testons également l'effet des proportions d'habitats, qui allient substrat et profondeur. Il y a donc deux modèles de départ (richesse et volume) incluant toutes ces variables explicatives.

a. Richesse spécifique

On teste l'effet de la géomorphologie de la plage et des habitats sur la richesse spécifique de la laisse. On observe grâce au modèle 5.1 (Tableau 1) un optimum de richesse pour une proportion moyenne de sédiment subtidal dans les 1000m entourant le site (p-value < 0.001) ou pour un linéaire de côte moyen (p-value < 0.001), à l'échelle du kilomètre également. La richesse est plus importante pour des plages sableuses que pour des plages avec rochers (p-value < 0.032). Pour l'effet du substrat proche, la p-value est de 0.075, il est donc probable que la richesse soit plus importante pour un substrat proche rocheux que pour un substrat proche sableux. Le modèle 5.2 (Tableau 1) indique que pour les plages de type « sable et roche », la richesse spécifique augmente avec le linéaire de côte de la plage, alors que pour les plages de type « sable » on observe un optimum de richesse pour un linéaire moyen (p-value < 0.048). Dans ces deux modèles, le linéaire de côte explique mieux la richesse spécifique que les autres variables ($r^2 = 0.06$) et le type de plage est très peu explicatif ($r^2 = 0.01$). On notera également que le modèle 5.1 apporte plus d'information que le modèle 5.2 (respectivement, $r^2 = 0.19$ et $r^2 = 0.09$) et explique relativement bien les variations de richesse spécifique dans les laisses de mer.

b. Volume de laisse

L'effet de la géomorphologie de la plage sur la quantité de laisse de mer (modèle 4.1, tableau 1) est testé pour le jeu de données « échelle Finistère » car le suivi temporel permet de prendre en compte la variance du volume due à la date d'échantillonnage, le volume variant d'une journée à l'autre. On ne modélise pas directement le volume mais l'indice volumique présenté dans la partie I.3.
On observe un effet très significatif de l'exposition sur la quantité de laisse, qui est maximale pour une exposition moyenne (p-value < 0.001) (Figure 10). Le volume de laisse est également plus important pour des plages exposées que pour des plages abritées (p-value < 0.034). Ce résultat est néanmoins à nuancer puisqu'avec un r^2 de 0.02, l'exposition de la plage explique finalement très peu les variations de volume.

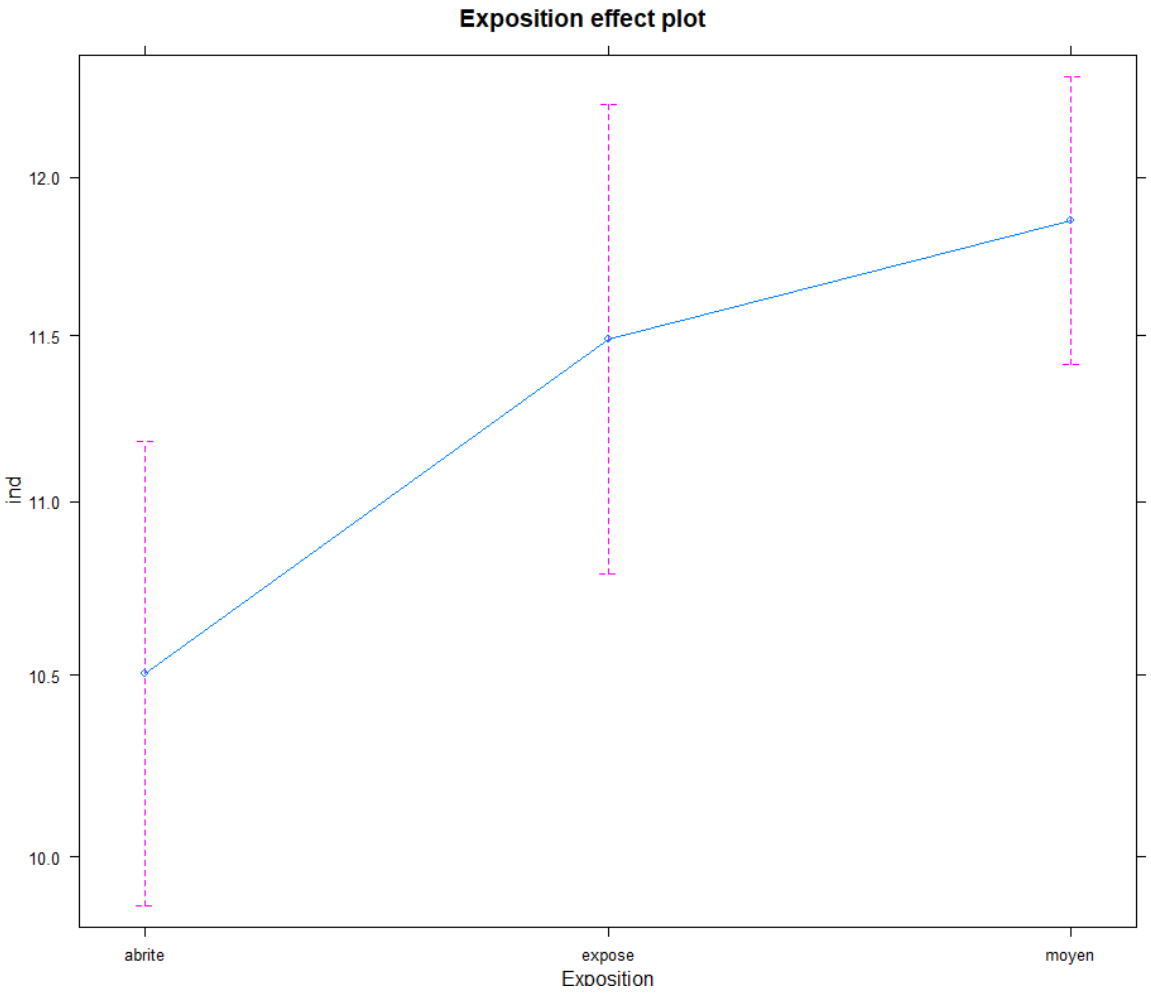


Figure 10 : Volume de laisse de mer sur les plages du Finistère Sud en fonction de l'exposition de la plage. Indice volumique : ind=log(V)+10

Les modèles montrent que la richesse spécifique et la quantité de laisse dépendent bien de paramètres de la plage. Elles sont également liées entre elles : la richesse dépend positivement du volume (p-value < 0.001, modèle 5.5, tableau 1), qui en est d'ailleurs un déterminant important (r^2 = 0.15). Ce résultat confirme un des aspects de l'hypothèse 1, selon laquelle certains types de plage présentent à la fois une richesse spécifique et un volume importants.

4. Effets du coefficient de marée et des tempêtes

La deuxième hypothèse stipule que l'occurrence d'une tempête avant la formation de la laisse et un fort coefficient de marée influencent positivement la richesse spécifique de la laisse.
L'effet des tempêtes et des marées sur la richesse spécifique est testé sur le jeu de données « échelle Finistère ». (modèle 8, tableau 1). Ces deux paramètres on un effet significatif, positif pour la tempête (p-value < 0.001) et négatif pour le coefficient de marée (p-value < 0.001).
Ces paramètres hydrologiques déterminent donc en partie la richesse spécifique de la laisse, mais sont des déterminants mineurs comparés à la diversité en habitats puisque leurs valeurs de r^2 sont de 0.06 pour la tempête et 0.02 pour le coefficient de marée.

5. Saisonnalité de la composition algale des laisses

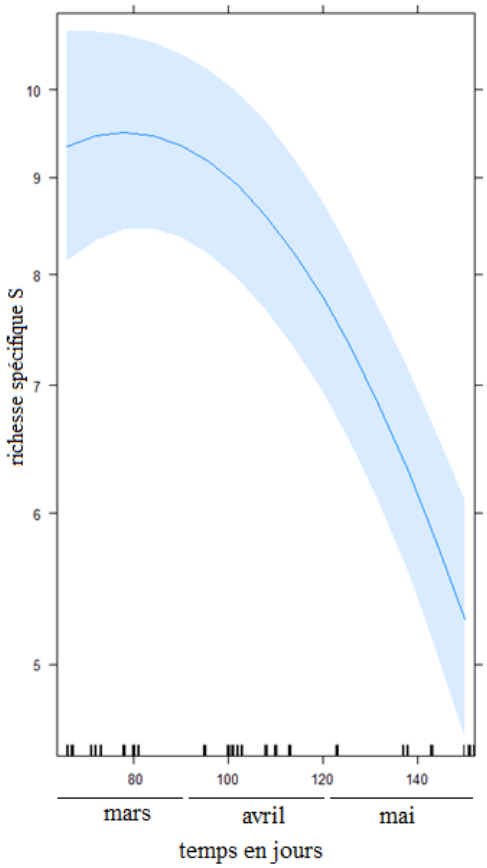


Figure 11 : modélisation par un modèle GAMM de la richesse spécifique de la laisse de mer en fonction du temps

D'après notre troisième hypothèse, la saisonnalité des communautés algales est observable dans la laisse, tant au niveau de la richesse spécifique que de la présence ou non de certaines espèces. On teste sur les données de suivi la richesse en fonction du temps pendant les trois mois de relevés, de mars à mai.
La relation entre ces deux variables est significative et non linéaire : on observe un optimum (ou peut-être un plateau) de richesse au mois de mars, puis la richesse décroit au cours du printemps (Figure 11). Ce résultat confirme donc que la composition de la laisse reflète la phénologie des algues.

L'abondance de l'espèce *Colpomenia peregrina* a été testée en fonction du temps. En effet, on n'observait cette espèce dans les relevés qu'à certaines périodes. Cependant, sa rareté diminue la puissance des modèles, que l'on ne peut exploiter. D'autres espèces semblaient apparaître au printemps dans la laisse, comme *Porphyra sp*. ou *Grateloupia turuturu*, mais il n'a pas été possible de modéliser leur abondance pour les même raisons, ces espèces étant encore plus rares.

En revanche, le modèle 4.2 (Tableau 1) montre que le volume de laisse diminue dans le temps entre mars et juin (p-value = 0.019), bien que très peu (-0,001 ± 0,00).

On peut donc partiellement confirmer l'hypothèse 3 et affirmer qu'il existe une saisonnalité dans la composition de la laisse de mer, qui diminue de manière continue en quantité et en diversité au cours du printemps.

Grâce à des analyses multivariées comparant la composition spécifique de la laisse aux habitats et grâce à de nombreux modèles, on démontre qu'il existe bien des déterminants géomorphologiques, hydrologiques et temporels de la composition de la laisse de mer, influençant plus ou moins fortement la diversité et la quantité de la laisse (Figure 12). L'hypothèse 1, complexe, est globalement infirmée par les résultats. Ceux-ci suggèrent tout de même que les laisses de mer peuvent être formées d'algues locales mais que des apports exogènes existent très probablement et que la provenance des algues peut dépendre du type de plage. De plus, bien que le schéma théorique proposé ne soit pas validé, ces analyses permettent finalement d'en proposer un autre, illustré par la Figure 12 qui résume les résultats sur la richesse et le volume. Les hypothèses 2 et 3, quant à elles, sont partiellement confirmées. On se propose donc de discuter de la portée et de la validité de ces résultats et des perspectives qu'ils apportent.

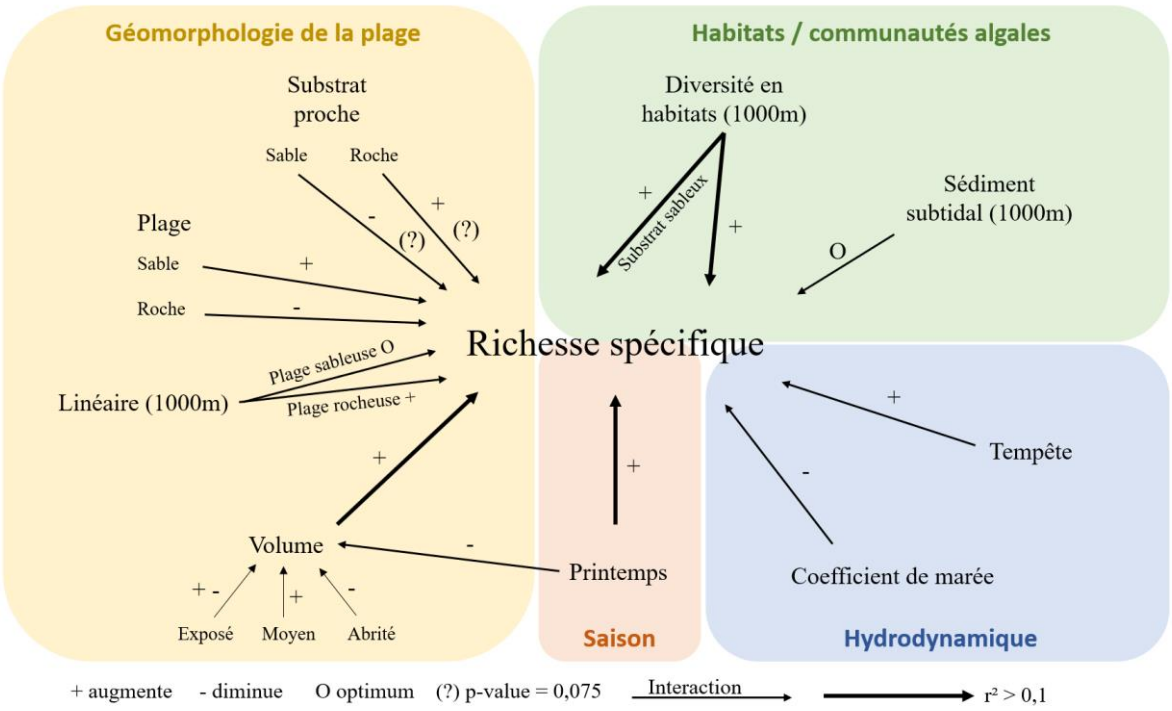


Figure 12 : Déterminants environnementaux de la richesse spécifique de la laisse de mer, leur effet et leur importance relative

III) DISCUSSION

1. Déterminants de la composition algale de la laisse de mer

a. Des laisses de mer d'origines diversifiées

Nos analyses ont permis de comparer la composition spécifique de la laisse de mer et celle des communautés algales locales en les assimilant à des proportions d'habitats. Il ressort de ces résultats que des apports en algues endogènes (algues locales) et exogènes (algues dérivées) sont possibles, et que les caractéristiques de la plage peuvent moduler l'importance relative ces deux types d'apports.

En effet, la variable environnementale qui explique le mieux la richesse spécifique est la diversité en habitats : elle explique 12% de la variance de la richesse, un chiffre assez proche des 10% de dissimilarité des quadrats expliqués par les habitats. Ces deux résultats indiquent un lien entre la composition de la laisse et les habitats et sont cohérents avec l'hypothèse selon laquelle la laisse de mer reflète les communautés algales dans sa composition. Cette hypothèse avait été confirmée par plusieurs études montrant que la composition de la laisse de mer dépendait majoritairement des communautés algales proches (Suursaar *et al.*, 2014 ; Martin *et al.*, 2015 ; Liebowitz *et al.*, 2016) mais aucune de ces études ne concernait la France

et pour deux d'entre elles le nombre de sites échantillonnés était beaucoup plus restreint (17 plages maximum) que pour la présente étude.
La diversité en habitats en interaction avec le substrat proche est un paramètre encore plus déterminant de la richesse (17% de la variance expliquée) ; un résultat logique puisque la variable Substrat proche complète les variables d'habitats. En effet, la cartographie des habitats EUNIS est très imprécise (voire non renseignée) sur la zone littorale correspondant à celle où l'on identifie le « substrat proche » (Annexe IV). L'étude de cette interaction montre que lorsque la diversité en habitats est importante la richesse spécifique est plus élevée pour un substrat proche sableux que rocheux. Or, un substrat rocheux est plus riche en algues qu'un substrat sableux puisque les algues se développent fixées à un support solide (Cabioc'h *et al*., 2014), il paraitrait donc logique que la laisse de mer soit plus riche en présence de récifs rocheux. Ce résultat traduit donc probablement la présence d'herbiers de zostères, qui se développent sur fond meuble (Bajjouk *et al*., 2010). Il faudrait, pour le vérifier, modéliser l'abondance des zostères dans la laisse en fonction du substrat proche.

Ces résultats suggèrent que les algues de la laisse de mer sont au moins partiellement locales puisqu'elles dépendent des habitats marins voisins, mais laissent la place à l'existence d'un phénomène de dérive qui concernerait les algues flottantes. Les modèles indiquent que les espèces flottantes apparaissent plutôt dans les laisses de plages abritées et, dans le Finistère, sur les plages au linéaire découpé ; un résultat opposé à l'hypothèse de départ. Cela ne garantit pas que la laisse de ces plages soit composée d'algues ayant dérivé ; en revanche, sur les plages présentant les critères opposés, à savoir une exposition moyenne à forte et un linéaire médiant à droit pour le Finistère, les algues de la laisse sont probablement majoritairement locales. Les plages aux laisses de mer « locales » seraient donc celles sur lesquelles les algues flottantes ne sont pas piégées.
Par ailleurs, la modélisation de l'abondance ou de la proportion de zostères dans la laisse ne révèle aucun lien avec la présence d'herbiers à proximité. Si on ne peut pas affirmer que les zostères dérivent, cela reste une hypothèse très valable.
Il faut garder à l'esprit que l'on étudie les algues flottantes car ce sont celles qui peuvent dériver (Kirkman and Kendrick, 1998 ; Liebowitz *et al*., 2016), mais il est en réalité possible que les algues flottantes s'échouent en face de leur lieu d'origine. Pour savoir dans quelles conditions les algues dérivent réellement et étudier ce transport, il faudrait réaliser un suivi de radeaux ou créer un radeau d'étude artificiel. La première option permettrait de travailler sur des radeaux réels, donc de savoir où et quand ils se forment, ce qui conditionne leur transport (courants, vents, tempêtes) et comment ils s'échouent. Un radeau artificiel permettrait cependant de suivre plus facilement le radeau, par exemple à l'aide d'une balise sans craindre de la perdre.

Les laminaires sont étudiées en tant qu'exemple d'algues non flottantes. La quantité de laminaires est plutôt bien expliquée par les variables environnementales et dépend majoritairement du substrat proche. Un substrat proche rocheux donne lieu à des laisses plus riches en laminaires, ce qui est cohérent avec l'écologie de ces algues qui, comme la plupart des espèces, se développent sur un substrat rocheux (Derrien *et al*., 2009). Les analyses montrent également que plus les zones infralittorale et circalittorale sont rocheuses, moins les laminaires sont abondantes dans la laisse de mer. Or, cet habitat correspond à une zone habituellement colonisée par les laminaires (Derrien *et al*., 2009). Ce résultat suggère que la fusion des habitats « Roche infralittorale » (A3) et « Roche circalittorale » (A4) en « Roche infralittorale et circalittorale » qui a été faite est inappropriée pour l'étude des laminaires. Ce choix avait été fait car les habitats A3 et A4 étaient peu représentés dans nos buffers, mais il efface la limite écologique qui différencie ces deux habitats et qui correspond à la limite de profondeur des laminaires, soit environ 30 mètres (Derrien *et al*., 2009 ; BioLit, 2018). C'est

donc vraisemblablement l'habitat Roche circalittorale qui est associé à une faible quantité de laminaires dans la laisse, et non l'habitat Roche infralittorale, où les laminaires se développent. Dans ce cas, une grande quantité de laminaires dans la laisse correspond bien à la proximité d'habitats colonisés par les laminaires : on a donc un échouage direct de ces algues.

A l'inverse des laminaires, les algues vertes s'échouent plutôt sur des plages dont le substrat proche est sableux. Il est possible que ces algues soient bloquées par les rochers et n'atteignent pas la plage, mais il est plus probable que, contrairement aux autres espèces étudiées, elles se développent sur substrat sableux. En effet, les *Ulva* sont capable de survivre longtemps en suspension et un bouturage important a lieu dans ces conditions (Menesguen, 2013). Notre résultat témoigne donc certainement de la production d'algues vertes (du genre *Ulva*) en face des plages dont la laisse est riche en algues vertes, qui s'échouent donc plutôt localement et ne dérivent pas. Il faut garder en tête que pour les algues vertes, la concentration en nitrates dans l'eau est un facteur important et probablement plus déterminant que ceux testés dans cette étude (Menesguen, 2013).

Ainsi, nos résultats sont mitigés quant à la provenance des algues de la laisse et ne montrent pas une aussi grande similarité de la laisse par rapport aux communautés algales que ne le font d'autres études sur le sujet.
Il peut y avoir plusieurs explications à cela. Tout d'abord il est possible qu'en France le phénomène de dérive soit plus présent que dans d'autres régions du monde et que les apports exogènes en algues dans la laisse soient plus courants. La question est alors de savoir si dans chaque laisse il y a toujours des algues de différentes provenance ou si les laisses sont parfois locales, parfois issues de radeaux.
Cette différence pourrait aussi être due au manque de données sur les communautés algales, à une détection imparfaite des espèces dans la laisse ou tout simplement au fait que toutes les espèces se développant à proximité ne sont pas nécessairement présentes dans la laisse au moment des relevés. L'échantillonnage des communautés algales réalisé dans le cadre de la thèse de Stéphanie Lemesle (2015) sur les sites de Courseulles sur mer et Langrune, correspondant à trois sites de notre étude (deux sites à Courseulles et un à Langrune), permet d'éclaicir ces aspects. Ces données permettent en effet de comparer directement la composition de la laisse aux algues fixées sur ces sites. Bien évidemment, cet échantillonnage étant de plusieurs années antérieur au notre, les communautés algales ont pu évoluer, mais cette comparaison est tout de même révélatrice. Si on remarque qu'on détecte dans la laisse 58% des espèces présentes en mer (26 espèces sur 45), il est surtout intéressant de constater que les algues rouges sont majoritairement responsables de cette différence. En effet, on détecte 2 algues vertes sur 3 présentes en mer, 9 algues brunes sur 11, mais seulement 15 algues rouges sur 31. Ainsi, que ce soit parce qu'elles ne s'échouent pas dans la laisse autant que les autres, parce qu'elles se décomposent plus vite ou parce qu'on les remarque et les identifie moins facilement, il est raisonnable de penser que l'échantillonnage de la laisse est moins représentatif des communautés algales locales si celles-ci présentent une forte proportion d'algues rouges.

Une autre question incontournable est celle de l'échelle considérée lorsque l'on parle d'algues locales ou non. Nous avons étudié deux échelles, 200m et 1000m ; or dans presque toutes nos analyses, l'échelle du kilomètre s'est avérée la plus pertinente, ce qui était également le cas dans l'étude menée par Liebowitz *et al*. (2016). Cette donnée est très intéressante pour de futures analyses, mais suggère surtout que la composition de la laisse de mer est déterminée par l'environnement à une échelle assez large et donc que les algues composant la laisse de mer que l'on qualifie de « locales » peuvent provenir des communautés algales présentes dans

rayon d'au moins un kilomètre. Suursaar *et al*. (2014) ont démontré l'origine locale des algues de la laisse en échantillonnant les communautés algales sur des transects de 2 à 4km de long. Pour approfondir cette réflexion, de nouvelles zones tampon devraient donc être étudiées (par exemple tous les 500m, de 500 à 4000m). Si la composition algale de la laisse de mer reflète assez fidèlement les communautés algales présentes dans les 4000m, il serait possible d'utiliser la laisse de mer comme indicateur des communautés algales.

Quelle que soit la similarité entre la laisse de mer et les communautés algales locales, ces dernières ne conditionnent pas entièrement la composition de la laisse : les caractéristiques de la plage ont également une influence non négligeable sur celle-ci.

b. Un reflet des caractéristiques de la plage où elle se forme

La grande diversité de sites échantillonnés au cours de cette étude a permis d'identifier plusieurs déterminants de la richesse spécifique de la laisse ou de la quantité d'algues, dont le rôle ne correspond pas toujours à celui que leur avaient attribué de précédentes études.
Le substrat de la plage est l'un de ces déterminants ; il impacte la formation de la laisse de mer en retenant plus ou moins facilement les algues (Orr *et al*., 2005). Son influence sur la quantité d'algues échouées avait été démontrée en Colombie-Britannique : plus d'algues se déposent sur les plages de roche ou de galets que sur les plages de sable (Orr *et al*., 2005). Nous avons cependant détecté un effet du substrat sur la richesse spécifique opposé à ce résultat (puisque la richesse et la quantité sont liées) et à notre hypothèse de départ : la richesse spécifique de la laisse est plus importante pour des plages sableuses que pour des plages avec rochers. Cependant, nous avons choisi de rassembler dans nos analyses les plages purement rocheuses ou de galets (rares) et les plages alliant sable et roche, ce qui n'est pas le cas de l'étude réalisée par Orr *et al*. (2005), qui distingue les plages de galets, les plages de gravier et les plages de sable, toutes étant encadrées de rochers. Ces deux résultats opposés ne sont donc pas comparables et il aurait été en effet plus pertinent de considérer les plages rocheuses comme une catégorie à part entière, mais il faudrait pour cela échantillonner un grand nombre de ces plages peu courantes (la plupart des zones côtières rocheuses ne présentent pas de « plage » où des algues pourraient se déposer).
En revanche, le substrat proche de la plage, d'après les modèles, a un effet sur la richesse spécifique qui concorde avec notre hypothèse : la richesse est plus importante pour un substrat rocheux que sableux. D'après Zemke-White *et al*. (2005), la quantité de laisse de mer sur une plage de sable est plus importante à proximité de récifs rocheux, il semble donc que les récifs rocheux constituent un écosystème source augmentant la quantité et la diversité en algues à proximité, ce qui fait écho aux précédents résultats sur le caractère local des algues de la laisse.
L'un des habitats étudiés influence également la richesse : celle-ci est maximale pour une proportion moyenne en sédiment subtidal (habitat A5 de la classification EUNIS) autour de la plage (dans les 1000m). La zone subtidale correspond aux étages infralittoral et circalittoral (Bajjouk *et al*., 2015) ; c'est une zone peu profonde mais toujours immergée (Aquaportail, 2010) qui se caractérise par la présence de certaines algues comme *Himanthalia elongata*, *Chondrus crispus* ou les différentes *Laminaria* (Cabioc'h *et al*., 2014). Mais comme presque toutes les algues, ces espèces se développent sur substrat rocheux ; l'habitat qui nous intéresse n'est donc pas colonisé par les algues et il est difficile d'appréhender son impact direct sur la richesse en algues de la laisse de mer. L'explication la plus probable est que la présence d'une zone sableuse augmente généralement la diversité en habitats et favorise la présence de zostères, qui peuvent être présentes jusque dans la zone infralittorale (Bajjouk *et al*., 2010).

Le linéaire de côte détermine également la richesse de la laisse, qui est maximale pour une plage ni trop droite, ni trop découpée. Si l'on considère l'effet de l'interaction entre le linéaire de côte et le substrat de la plage, il apparait que ce résultat concerne plutôt les plages de sable et que pour les plages rocheuses, la laisse est plus riche si le linéaire est très découpé, conformément à notre hypothèse de départ. Là encore, une précédente étude montrait plutôt un lien entre le linéaire de côte et la quantité de laisse (plus importante sur un linéaire découpé) (Suursaar *et al*., 2014) que les modèles n'ont pas détecté. Notre hypothèse de départ incluait ces deux aspects – quantité et richesse – et n'est donc pas entièrement confirmée par les analyses.
Le fait que l'interaction entre le linéaire et le type de plage influence significativement la composition de la laisse concorde avec l'idée que les algues s'échouent et sont retenues plus ou moins facilement selon la géomorphologie de la plage. Le type de plage est toutefois très peu explicatif et c'est le linéaire de côte qui est le principal déterminant de la facilité d'échouage des algues.

Seule une variable a été identifiée comme un déterminant de la quantité de laisse de mer par les modèles : il s'agit de l'exposition de la plage. L'accumulation d'algues est plus importante sur les plages moyennement exposées, conformément aux résultats obtenus par Orr *et al*. (2005) et c'est sur les plages abritées qu'elle est la plus faible, contrairement aux résultats de Barreiro *et al*. (2011). Ce paramètre explique cependant très peu la variance du volume, qui doit donc dépendre d'autres paramètres non pris en compte dans l'étude, comme la hauteur des vagues, les courants (Suursaar *et al*., 2014) ou le volume d'algues disponible dans l'eau. De plus, la littérature met en évidence plusieurs variables influençant la quantité d'algues qui n'ont pas été détectées par les analyses : les marées, les tempêtes et le substrat de la plage (Orr *et al*., 2005 ; Suursaar *et al*., 2014), ce qui invite à remettre en question la méthode d'évaluation de la quantité de laisse. La mesure des dimensions de la laisse est peut-être trop imprécise, ou bien l'indice volumique utilisé n'est pas adapté.

Si des déterminants environnementaux liés à la géomorphologie de la plage ou aux habitats adjacents ont bien été identifiés, le site d'échouage reste le déterminant le plus important de la composition de la laisse de mer puisqu'il est une combinaison complexe de variables environnementales plus ou moins influentes (il aurait par exemple été possible d'étudier la largeur de la plage et sa pente, dont l'influence sur la laisse a été démontrée) (Liebowitz *et al*., 2016). Il est donc très important de suivre les mêmes sites dans le temps pour espérer détecter des changements liés au climat, par exemple.

Globalement l'hypothèse de départ selon laquelle la richesse et la quantité de laisse étaient plus importantes sur les plages rocheuses découpées et peu exposées est infirmée. En admettant que richesse spécifique et quantité de laisse vont de pair, les plages « riches » sont donc plutôt des plages sableuses (résultat à nuancer), assez découpées, moyennement exposées et situées à proximité de récifs rocheux. Cette étude permet néanmoins d'identifier des paramètres géomorphologiques de la composition des laisses et de montrer que celle-ci n'est pas entièrement conditionnée par les communautés algales.

c. De fortes variations temporelles de la composition de la laisse de mer

Nos résultats confirment l'hypothèse selon laquelle la richesse spécifique de la laisse est plus importante après une tempête, même si cet effet est modéré. En revanche, un fort coefficient de marée est plutôt associé à une richesse spécifique plus faible, contrairement à notre hypothèse de départ, qui était basée sur des observations de terrain. Il est possible que le

coefficient de marée diminue en effet la richesse en algues en favorisant leur remise en suspension, mais la raison de ce résultat opposé aux observations pourrait également être que le coefficient de marée associé au relevé était le coefficient en cours au moment du relevé, et non le coefficient en cours au moment du dépôt de la laisse. Même si l'on a échantillonné que des algues fraîches, le coefficient pouvait différer entre ces deux moments. Peut-être serait-il plus judicieux de travailler sur une moyenne des coefficients de marée dans les quelques jours précédant le relevé. En outre, il n'a pas été pris en compte si le coefficient était croissant ou décroissant, alors que l'importance relative des marées pourrait modeler la composition de la laisse, par exemple par la remise en suspension des algues et le mélange avec les algues nouvellement arrachées (Orr *et al*., 2005 ; Suursaar *et al*., 2014).
Les effets de la tempête et de la marée sur la richesse que nous avons détectés sont tout de même intéressants car les précédentes études sur le sujet montraient plutôt un effet de ces paramètres sur la quantité de laisse, et non sa composition spécifique (Zemke-White et al., 2005 ; Suursaar *et al*., 2014). Bien que nos modèles n'aient pas montré de lien entre les paramètres hydrodynamiques et la quantité de laisse, cette étude a démontré que la richesse spécifique dépendait positivement de la quantité de laisse ; il est donc raisonnable d'affirmer que la tempête et la marée participent à la composition de la laisse de mer (sans distinction entre quantité et composition spécifique) *via* le détachement et le transport des algues (Liebowitz *et al*., 2016).
Cependant, la tempête et la marée n'influencent que modérément la composition de la laisse (en comparaison avec la diversité en habitats marins notamment), ce qui est positif dans l'optique d'une campagne d'échantillonnage participative. En effet, le biais potentiel engendré par une moindre maitrise des conditions d'échantillonnage (il peut y avoir des relevés après une tempête, etc.) sera faible et pourra être pris en compte lors des analyses.
Les effets de facteurs hydrodynamiques sont potentiellement sous-estimés dans cette étude, qui ne prend pas en compte la hauteur des vagues et les courants (ou le vent), deux déterminants de la composition de laisse de mer identifiés par des études réalisées respectivement dans la mer Baltique (Suursaar *et al*., 2014) et en Californie (Liebowitz *et al*., 2016).

Si les variations temporelles de la composition de la laisse sont liées aux conditions météorologiques, elles dépendent surtout de la saison, car la phénologie des algues est source d'une grande variabilité temporelle (Liebowitz *et al*., 2016). Nous avons démontré que la richesse de la laisse diminue fortement au printemps, et cela s'observe de manière flagrante lors des relevés de terrain. Lorsque des données standardisées de suivi temporel des plages seront disponibles sur une année complète, il sera possible de connaitre le cycle annuel de la richesse spécifique des laisses, dont la variation ne se limite certainement pas au printemps.
De même, une diminution drastique du volume de laisse est observable sur le terrain en été et même dans beaucoup de cas une absence totale d'algues sur les plages. Les analyses montrent seulement une diminution légère du volume, ce qui peut s'expliquer par le fait que les données de suivi s'échelonnent de mars à mai seulement ; on peut raisonnablement penser que la poursuite du suivi temporel permettrait de démontrer cette diminution.

Ces résultats s'avèrent utiles pour la mise en place du programme de sciences participatives Plages Vivantes car ils indiquent que les relevés sont à favoriser entre l'automne et le milieu de printemps. C'est en effet le moment où la présence d'une laisse est quasi-certaine et où le plus grand nombre d'espèces est observable. L'information fournie par les relevés sera donc plus complète.

Certaines espèces observées dans la laisse présentent un intérêt particulier en raison de leur (plus ou moins) récente apparition sur nos côtes, soit du fait d'un changement de leur limite

de distribution (potentiellement dû à de faibles changements climatiques), soit du fait de leur introduction accidentelle par l'homme. Il s'agit de *Colpomenia peregrina*, *Bonnemaisonia hamifera*, *Asparagopsis armata*, *Sargassum muticum* et *Grateloupia turuturu* (Cabioc'h *et al*, 2014). Nous avons donc souhaité modéliser leur phénologie, en particulier celle de *Colpomenia peregrina* et *Grateloupia turuturu* qui semblaient apparaitre dans la laisse au cours du printemps. Ces espèces étaient cependant trop rares pour permettre la construction de modèles robustes. Pour pouvoir les étudier, il faudrait donc poursuivre les relevés et éventuellement augmenter la fréquence d'échantillonnage sur certaines plages où ces algues sont souvent présentes dans la laisse : par exemple, les laisses de la plage du CAC à Concarneau étaient particulièrement riches en *Grateloupia turuturu* au printemps. Si cela n'est toujours pas suffisant, il serait possible de modéliser la somme des abondances de toutes ces espèces, qui représenterait l'abondance d'espèces « nouvelles ».

Nous avons donc étudié les variations temporelles de la composition de la laisse de mer à l'échelle de quelques jours ou semaines (tempête, marée) et à l'échelle de quelques mois (de mars à mai), qu'en est-il alors des variations à très faible échelle temporelle, d'une laisse de mer à la suivante ? L'hétérogénéité des différentes laisses présentes au même moment sur une plage est inconnue car seules les laisses les plus fraiches ont été échantillonnées, mais selon Liebowitz *et al*. (2016) elle est importante. Il serait possible de l'évaluer en échantillonnant toutes les laisses déposées sur une plage donnée pendant quelques jours et en répétant ce schéma sur d'autres plages ou à d'autres moments. Ce plan d'échantillonnage permettrait également d'étudier le potentiel mélange des laisses : observe-t-on une transition douce dans la composition de la laisse au cours du temps ou bien deux laisses consécutives diffèrent-elles de manière bien tranchée ?

La poursuite des relevés dans les prochaines années sera également l'occasion d'étudier la variabilité interannuelle de la composition des laisses de mer, qui sera d'une grande importance dans la surveillance des écosystèmes marins et côtiers face aux changements globaux en cours. Des variations des communautés d'algues rouges bretonnes sont déjà imputées à une élévation de la température de surface ayant eu lieu ces vingt dernières années (Gallon *et al*., 2014), il était donc urgent d'entreprendre ce suivi. Les éventuels résultats attribuables au changement climatique ne seront toutefois pas obtenus avant plusieurs années, lorsqu'une tendance générale sera observable et non seulement des variations annuelles « normales ». En effet, les communautés algales peuvent subir de grandes variations d'une année à l'autre, jusqu'à 80% (Lemesle, 2015 ; Liebowitz *et al*., 2016), ce qui se reflète obligatoirement dans la laisse sans pour autant annoncer de changement à long terme.

Au cours de cette étude il a été démontré, en accord avec nos hypothèses de départ et les résultats d'une étude très similaire menée par Liebowitz et al. (2016), que la composition de la laisse de mer dépendait d'un ensemble complexe de paramètres, à la fois biologiques (communautés algales plus ou moins proches), hydrodynamiques (tempêtes détachant les algues, marées) et géomorphologiques (forme, substrat et exposition de la plage influençant le dépôt et la remise en suspension). Certains points plus précis de nos hypothèses n'ont cependant pas été confirmés, ce qui peut être dû à l'inexactitude de ces dernières ou à d'autres limites de cette étude.

2. Limites de l'étude

a. Limites du protocole

Notre protocole d'échantillonnage de la laisse de mer a été pensé pour être simple et rapide à mettre en œuvre afin de maximiser le recueil de données : ce protocole permet aux « experts » d'échantillonner de très nombreux sites et aux « non-experts » de réaliser un échantillonnage participatif. Un compromis a donc été nécessaire entre la praticité et la précision, qui se reflète notamment dans la résolution taxonomique des données.
Par ailleurs, un comptage exhaustif du nombre de spécimens par espèce dans chaque quadrat aurait été idéal, mais n'était pas réalisable car bien trop long à mettre en œuvre, surtout dans le cas de laisses très épaisses.
La surface des quadrats (5*1m²) peut également paraître faible, mais la surface de la laisse de mer est elle aussi très faible comparée à celle d'une prairie, par exemple. De plus, la laisse de mer ne constitue pas une surface mais un volume, un quadrat de 1m² dans la laisse de mer contient donc bien plus d'information qu'un même quadrat dans une prairie. Enfin, les premiers tests du protocole ont permis de calculer que les cinq quadrats échantillonnés lors de chaque relevé suffisaient à détecter 90% des principaux taxons (taxons de la clé d'identification proposée par le programme Plages Vivantes).
Ce protocole d'échantillonnage a permis d'observer 94 espèces dans les laisses de mer, ce qui est bien inférieur au nombre d'espèces total présent en mer, puisque plus de 600 espèces ont été recensées en Bretagne rien que pour les algues rouges (Gallon, 2013). Cependant, il est probablement normal d'observer moins d'espèces dans la laisse qu'en mer ; de plus, la résolution taxonomique est limitée au genre si nécessaire, cette différence ne signifie donc pas que des espèces ont été « manquées » lors des relevés.

b. Limites des données disponibles

L'autre source d'imprécision de cette étude était le manque de données sur les communautés algales. Pour déterminer la provenance des algues de la laisse de mer, la manière la plus rigoureuse aurait été d'analyser les mêmes données en mer que celles dont on dispose dans la laisse. Il n'était pas possible de recueillir ces données nous-mêmes dans le cadre du stage pour de multiples raisons : temps, matériel, technicité et sécurité. L'analyse de cartographies des communautés algales (REBENT-SINP Ifremer, 2009) était une solution de remplacement viable, mais ces cartographies étaient anciennes et incomplètes : neuf espèces seulement sont cartographiées. La meilleure solution était donc d'exploiter la cartographie des habitats, mais sa résolution n'était pas adaptée à notre échelle d'étude (200m ou 1000m alors que les plus petits polygones de cette cartographie font 360 m de côté) et plusieurs zones tampons étaient vides ou presque vides (Annexe IV). Dans ces cas de figure, les données d'habitats ont été complétées à partir des habitats proches des zones tampons et de photographies aériennes, ce que reste très approximatif. Cette cartographie est néanmoins intéressante car elle couvre tout le littoral Manche-Atlantique et permet donc déjà une analyse des habitats à large échelle. Pour étudier l'influence des habitats marins sur la composition de la laisse, qui a certainement lieu à une échelle plus fine, il serait donc intéressant de compléter cette cartographie dans les zones littorales à une résolution plus précise, en mettant en place un protocole pour cartographier les habitats de la zone intertidale. Ce travail sera réalisé au cours du projet Life MarHa 2018-2025 et pourrait potentiellement être entrepris de façon plus fine pour le secteur de Concarneau (comm. pers.) par la Station Marine de Concarneau.

3. Perspectives

a. Drone d'exploration sous-marine : caractérisation des habitats et observation des communautés algales

Un nouveau moyen d'acquisition de données sous-marines est en cours de développement à la Station Marine de Concarneau : un drone flottant d'exploration sous-marine, nommé Coco (Figure 13.a). Équipé d'une caméra, d'un GPS et prochainement d'un sondeur, il est capable de collecter des photos des espèces et des habitats marins. Ce drone créé par Florian Mausy a été développé au cours de ce stage (montage, adaptation du code et création de nouvelles fonctionnalités, en parallèle de l'étude de la composition en algues des laisses de mer) pour répondre au mieux aux besoins de la station. Il pourra être utilisé pour photographier ou filmer les communautés algales sur des transects afin d'acquérir des données comparables à celles de l'échantillonnage de la laisse. Les images de la caméra ne permettront pas d'identifier les espèces dont la détermination est subtile, mais nous pourront travailler sur des espèces/genre facilement identifiables tels que *Fucus serratus* (Figure 13.b), *Fucus vesiculosus*, *Zostera sp*., *Cystoseira sp*., ou *Ulva sp*. L'imagerie sous-marine est en plein essor car elle améliore grandement la compréhension des écosystèmes marins et on peut s'attendre à des progrès importants des techniques employées (Bicknell *et al*., 2016).
Le drone pourra également servir à la caractérisation des habitats afin d'obtenir rapidement les données d'habitat manquantes sur nos principaux sites (ceux sur lesquels un suivi temporel est réalisé).
Enfin, cet outil pourra être exploité de multiples manières, puisqu'il est tout à fait possible de rajouter de nouveaux instruments de mesure sur le drone. La prise d'images à elle seule offre de nombreuses applications, car elle ne se limite pas nécessairement aux algues et permet de visualiser un écosystème d'habitude peu accessible. Donner l'occasion au grand public d'observer les fonds marins par l'intermédiaire du drone serait par ailleurs un moyen de sensibilisation et de reconnexion au milieu marin innovant et efficace.

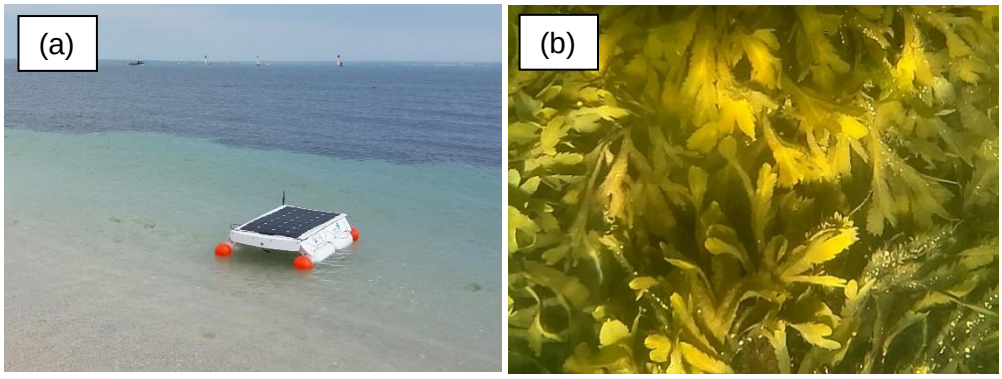


Figure 13 : (a) Drone Coco en cours d'utilisation en face de l'île de Guiriden (archipel des Glénan) au cours d'un reportage pour France 3 Littoral sur les drones marins low-tech et (b) image de *Fucus serratus* prise par le drone à Concarneau

b. Extension du suivi à l'écosystème de la laisse de mer

La laisse de mer est d'une grande importance écologique pour l'estran (Kirkman and Kendrick, 1998 ; Orr *et al*., 2005 ; Zemke-White *et al*., 2005 ; Suursaar *et al*., 2014) et constitue un écosystème à part entière encore relativement peu étudié. Notre étude des algues

de la laisse de mer est donc vouée à s'élargir à d'autres groupes taxonomiques interagissant avec la laisse, notamment les oiseaux qui s'y nourrissent (Zemke-White *et al*., 2005 ; Liebowitz *et al*., 2016) et qui, pour quelques espèces, y nichent (Kirkman and Kendrick, 1998 ; Zemke-White *et al*., 2005). Une déclinaison du protocole d'échantillonnage participatif des algues est donc en cours de développement pour les oiseaux ; il permettra notamment de déterminer dans quelle mesure certaines espèces dépendent de la laisse pour leur alimentation, c'est-à-dire s'il se nourrissent quasi-exclusivement dans la laisse, en partie ou pas du tout.
Au-delà des données ornithologiques, nous avons déjà commencé à observer d'autres espèces animales présentes sur l'estran (vivantes, mortes ou sous forme de traces), comme les crustacés, mollusques, méduses et capsules de raies. Ces observations, auxquelles seront éventuellement ajoutés des relevés botaniques de la végétation littorale, enrichissent la base de données disponible et pourront être utilisées à l'avenir pour approfondir l'étude écologique de la laisse de mer.

c. Développement du programme participatif Plages Vivantes

Le Programme Plages Vivantes est un observatoire participatif intégré de la biodiversité des hauts de grève. Son objectif principal est la compréhension des effets des changements globaux et locaux sur la biodiversité de cet écosystème. Pour cela il est nécessaire de collecter dès aujourd'hui des données et de déterminer si les algues de la laisse de mer peuvent servir d'indicateur de l'état de l'écosystème marin, ce qui a été entrepris au cours du stage.
Son deuxième objectif relève plus du domaine social : il s'agit de sensibiliser, reconnecter à la nature et impliquer le citoyen dans la recherche, le rendre acteur de la préservation du milieu littoral. Pour cela le Programme Plages Vivantes développe un protocole d'échantillonnage participatif des algues de la laisse de mer en partenariat avec d'autres structures impliquées dans la préservation de l'environnement, notamment Planète Mer et Bretagne Vivante.
La présente étude, couplée au développement de ce programme participatif, forme donc une synergie : elle fournit des premiers résultats sur les questions écologiques soulevées par la mise en place du programme et permet de tester la validité du protocole ; ce protocole sera ensuite déployé à large échelle et permettra la production des prochains résultats scientifiques.
Cette étude a permis d'étudier les laisses de mer dans plusieurs régions de France (Hauts-de-France, Normandie, Bretagne, Pays-de-la-Loire et Nouvelle-Aquitaine), préparant ainsi le déploiement à l'échelle nationale du protocole. Il reste encore à explorer la composition des laisses de mer méditerranéennes, dont les espèces diffèrent grandement de celles du littoral Manche-Atlantique (Cabioc'h *et al*., 2014), et à élargir de manière générale les contextes étudiés (en s'intéressant aux côtes du Pays Basque, par exemple).
Les premiers essais de relevés participatifs sont déjà en cours avec des élèves du CE2 à la licence et confirment que le protocole est attrayant et accessible à un public non expert et ne nécessite que des ajustements. La participation des jeunes est particulièrement intéressante car leur apprentissage est rapide et qu'il est important de les sensibiliser et de les reconnecter au milieu naturel.
Le développement du programme se poursuivra en 2019 et permettra à terme la surveillance des hauts de grève et du milieu marin (sous réserve de l'utilisation des macroalgues de la laisse de mer comme indicateur) en collaboration avec des citoyens volontaires, ce qui permettra, nous l'espérons, une meilleure compréhension et une meilleure préservation de ces milieux menacés.

CONCLUSION

Au cours de cette étude, la composition algale de la laisse de mer a été échantillonnée sur 169 sites répartis dans tout le quart Nord-Ouest de la France, dont 31 ont fait l'objet d'un suivi temporel de trois mois, ce qui représente plus de 230 relevés. Ces données ont permis de déterminer l'influence des communautés algales adjacentes, de la géomorphologie de la plage, de facteurs hydrodynamiques et du temps.

Il en ressort que les communautés algales locales semblent bien conditionner la composition algale de la laisse de mer mais qu'il existe probablement à la fois des apports locaux et exogènes (dérive d'algues flottantes). Les plages au linéaire médian à droit (notamment dans le Finistère Sud) et plutôt exposées seraient les plus susceptibles d'accueillir des algues échouées locales. La laisse ne reflète donc pas exactement les communautés algales adjacentes et pour utiliser sa composition comme indicateur de ces communautés, il faudrait connaître la proportion moyenne d'algues « locales » dans la laisse, la distance parcourue par les algues (donc la répartition des communautés algales) et surtout la distance jusqu'à laquelle on peut qualifier les algues de « locales ». L'étude de la dérive des algues flottantes apporterait également des éclaircissements sur les mécanismes de distribution des algues détachées.

La composition algale des laisses dépend tout autant de facteurs géomorphologiques, notamment le découpage du linéaire de côte à l'échelle du paysage (1000m), le substrat proche du site et l'exposition du site. Ces derniers influencent la richesse spécifique de la laisse (linéaire, substrat) et sa quantité (exposition), mais pas de la manière attendue. La forme de la côte et l'exposition jouent sur la facilité de dépôt et de remise en suspension des algues ; pour observer une laisse de mer importante et diversifiée il faut donc qu'un compromis soit respecté entre ces deux mécanismes. Un découpage de la côte moyen et une exposition moyenne permettent ainsi le dépôt de la laisse sans que celle-ci soit trop facilement emportée. Le substrat marin ne semble pas impacter mécaniquement le transport des algues jusqu'à la plage (car les récifs rocheux auraient alors constitué un obstacle) mais uniquement jouer le rôle d'écosystème source.

La laisse de mer est également modelée dans une moindre mesure par l'hydrodynamique locale : des évènements tels que des tempêtes ou des grandes marées peuvent impacter la diversité en algues de la laisse et il est probable que les vagues et les courants jouent également sur certains paramètres de la laisse, ce qu'il serait bon d'étudier.

Enfin, la variabilité temporelle de la composition de la laisse intervient probablement à différentes échelles : nous avons pu démontrer qu'à l'échelle d'une saison elle était liée à la phénologie des algues et il sera possible par la suite d'analyser la variabilité interannuelle et, au-delà, la variabilité liée aux changements.

Finalement, chaque laisse de mer est unique ; elle dépend des communautés algales présentes à cette période qui fournissent des algues détachées, des mouvements d'eau qui transportent ces algues et de la plage et ses environs qui conditionnent l'échouage et la remise en suspension ou non de la laisse.

Cette étude a ainsi permis d'améliorer les connaissances sur les déterminants de la composition algale de la laisse de mer, de démarrer un suivi des laisses qui permettra de suivre leur évolution, de rassembler des données de composition des laisses couvrant une grande partie du littoral français et de mettre à l'épreuve le protocole d'échantillonnage destiné à la future collecte de données participative. Ce protocole pourra encore faire l'objet de quelques ajustements mais permet d'ores et déjà l'acquisition de données exploitables. Tout cela participe au développement du programme Plages Vivantes qui sera poursuivi dans les prochaines années par la mise en place du suivi participatif de la biodiversité des hauts de grèves, dont l'ambition est d'assurer un suivi à l'échelle nationale (a minima Manche-

Atlantique) avec l'ambition de contribuer à évaluer des impacts des changements globaux (mais aussi locaux) sur le milieu côtier et, par extension, le milieu marin.
La poursuite de cette étude peut également donner lieu à l'exploitation du drone marin développé en parallèle, qui apportera d'une part des données de répartition des communautés algales indispensables et d'autre part une opportunité unique pour le grand public de visualiser le milieu marin de manière ludique et accessible.
Protéger la biodiversité grâce aux sciences participatives est possible et même indispensable à une préservation efficace et durable, car cela nécessite que chacun avance dans la même direction. Cette coopération passe par l'engagement des citoyens, leur participation active à l'aboutissement des objectifs donnés et, en retour, une bonne communication des résultats de la part de la communauté scientifique. Cela nécessite une adaptation des deux côtés mais est absolument nécessaire pour faire évoluer les mentalités et créer une véritable volonté de préservation pour espérer un jour retrouver une nature saine, vivante et riche.

Bibliographie

ARNAUD DE SARTRE, X. ; CASTRO, M. ; DUFOUR, S. ; OSZWALD, J. (2014). *Political ecology* des services écosystémiques. Editions scientifiques internationales. Bruxelles : P.I.E. Peter Lang. EcoPolis, No 21. 290p. ISBN 978-2-87574-197-4.

BAJJOUK, T. ; HILY, C. ; GIACOMINI, E. ; REBENT BRETAGNE. (2010). Les herbiers de zostères. *Fiche de Synthèse Habitat « Herbiers »*, 5, 13p.

BAJJOUK, T. ; GUILLAUMONT, B. ; MICHEZ, N. ; THOUIN, B. ; CROGUENNEC, C. ; POPULUS, J. ; LOUVEL-GLASER, J. ; GAUDILLAT, V. ; CHEVALIER, C. ; TOUROLLE, J. ; HAMON, D. *et al*. (2015). Classification EUNIS, Système d'information européen sur la nature : Traduction française des habitats benthiques des Régions Atlantique et Méditerranée. Vol. 1. Habitats Littoraux. Réf. IFREMER/DYNECO/AG/15-02/TB1, 231p.

BARGAIN, B., GELINAUD, G., LE MAO, P. and MAHOUT, J. (1998-1999). Les limicoles nicheurs de Bretagne. *Penn Ar Bed*, No 171-172: 68 p.

BARREIRO, F. ; GOMEZ, M. ; LASTRA, M. ; LOPEZ, J. ; DE LA HUZ, R. (2011). Annuel cycle of wrack supply to sandy beaches : effect of the physical environment. *Marine Ecology Progress Series*, 433, pp65-74, DOI : 10.3354/meps09130.

BARNOSKY, A.D. ; MATZKE, N. ; TOMIYA, S. ; WOGAN, G.O.U. ; SWATZ, B. ; QUENTAL, T.B. ; MARSHALL, C. ; MC GUIRE, J.L. ; LINDSEY, E.L. ; MAGUIRE, K.C., MERSEY, B. ; FERRER, E.A. (2011). Has the Earth's siwth mass extinction already arrived ? *Nature*, 471, pp 51-57, DOI : 10.1038/nature09678.

BICKNELL, A.W.J. ; GODLEY, B.J. ; SHEEHAN, E.V. ; VOTIER, S.C. ; WITT, M.J. (2016). Camera technology for monitoring marine biodiversity and human impact. *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 14, issue 8, pp 424-432, DOI : 10.1002/fee.1322.

BONNET, E. ; VAN DE PEER, Y. (2002). Zt : a software tool for simple and partial Mantel tests. *Journal of statistical software*, 7, 10. 12p.

CABIOC'H, J. ; FLOC'H, A. ; LE TOQUIN, A. ; BOUDOURESQUE, J.-F. ; MEINESZ, A. ; VERLAQUE, M. (2014). Algues des mers d'Europe. *Paris, éditions Delachaux et Niestlé, Guide Delachaux*, 272 p.

CEBALLOS, G. ; EHRLICH, P.R. ; BARNOSKY, A.D. ; GARCIA, A. ; PRINGLE, R.M. ; PALMER, T.M. (2015). Accelerated modern human-induced species losses : Entering the sixth mass extinction. *Science Advances*, 1(5), DOI : 10.1126/sciadv.1400253.

CEBALLOS, G. ; EHRLICH, P.R. ; DIRZO, R. (2017). Biological annihilation via the ongoing sixth mass extinction signaled by vertebrate population losses and declines. *Proceedings of the National Academy of Science*, 114(30) : E6089-E6096. DOI : 10.1073/pnas.1704949114.

Charte des sciences et recherches participatives en France, 2017. Mission Sciences Participatives.

DEPARTEMENT DU FINISTERE. (2016). Atlas de la mer et du littoral, Edition 2016. 198p.

DERRAIK, J.G.B. (2002). The pollution of the marine environment by plastic debris : a review. *Marine Pollution Bulletin*, 44, pp 842-852, DOI : 10.1016/S0025-326X(02)00220-5.

DERRIEN, S. ; LE GAL, A. ; MELEDER-TARD, V. ; DERRIEN, R. ; BAJJOUK, T. ; GUILLAUMONT, B. (2009). Les Laminaires. *Fiche Natura 2000*, 3, 13p.

DIRECTIVE 2008/56/EC of the European Parliament and of the council of 17 June 2008 establishing a framework for community action in the field of marine environmental policy (Marine Strategy Framework Directive). *Official Journal of the European Union*, L 164/19 du 25.6.2008.

FOX, J.; MONETTE, G. (1992). Generalized collinearity diagnostics. *J. Am. Stat. Assoc*. 87, pp 178–183.

GALLON, R.K. ; ROBUCHON, M. ; LEROY, B. ; LE GALL, L. ; VALERO, M. ; FEUNTEUN, E. (2014). Twenty years of observed and predicted changes in subtidal red seaweed assemblages along a biogeographical transition zone : inferring potential causes from environmental data. *Journal of Biogeography*, 41, pp 2293-2306.

GASTON, K.J. ; COX, D.T.C. ; CANAVELLI, S.B. ; GARCIA, D. ; HUGUES, B. ; MAAS, B. ; MARTINEZ, D. ; OGADA, D. ; INGER, R. (2018). Population abundance and ecosystem service provision : the case of bird. BioScience, vol. 68, No. 4, pp 264-272, DOI : 10.1093/biosci/biy005.

GHOSH, S. ; KIM, K-H ; BHATTACHARYA, R. (2010). A survey on house sparrow population decline at Bandel, West-Bengal, India. *Journal of Korean Earth Science Society*, vol. 31, No. 5, pp 448-453.

GOVERNMENT OF SOUTH AUSTRALIA (2017). What is beach wrack ? *Coastline Factsheet*, 38, pp 1-2.

GUILLAUMONT, B. ; DION, P. ; PERROT, T.. ; MOUQUET, P. ; BAJJOUK, T. (2009a). Les fucales intertidales. Fiche de synthèse d'habitat No 2, 8p.

GUILLAUMONT, B. ; GRALL, J. ; BAJJOUK, T. ; GLADU, Y. (2009b). Bancs de maerl. Fiche de synthèse d'habitat No 1, 9p.

HAMDI, A. ; VASQUEZ, M. ; POPULUS, J. (2010). Cartographie des habitats physiques Eunis - Côtes de France. Convention Ifremer/AAMP n° 09/12177764/FY. http://archimer.ifremer.fr/doc/00026/13751/

HOULLIER, F. and MERILHOU-GOUDARD, J.-B. (2016). Les sciences participatives en France. Etat des lieux, bonnes pratiques et recommandations. 63p. DOI : 10.15454/1.4606201248693647E12.

JAQUET, K. ; PRODON, R. (2014). Analyses multivariées avec ade4 dans R. 32p.

KIRKMAN, H. ; KENDRICK, G. A. (1997). Ecological significance and commercial harvesting of drifting and beach-cast macro-algae and seagrasses in Australia : a review. *Journal of Applied Phycology*, 9, pp 311-326.

LEBŒUF, B.J. ; KENYON, K.W. ; VILLA-RAMIREZ, B. (1986). The Caribbean monk seal is extinct. Marine Mammal Science, 2(1), pp 70-72. DOI : 0.1111/j.17487692.1986.tb00028.x

LEMESLE, S. (2015). Bioindicateurs du milieu marin : Utilisation des macroalgues comme outil d'évaluation de la qualité biologique des eaux marines. Réponse à une problématique d'échouages d'algues. Thèse de doctorat, sous la direction de Pascal Claquin, Caen, Université de Caen Basse-Normandie, 390p.

LIEBOWITZ, D.M. ; NIELSEN, K.J. ; DUGAN, J.E. ; MORGAN, S.G. ; MALONE, D.P. ; LARGIER, J.L. ; HUBBARD, D.M. ; CARR, M.H. (2016). Ecosystem connectivity and trophic subsidies of sandy beaches. *Ecosphere* 7(10) :e01503. 10.1002/ecs2.1503. 19p.

MARTIN, G. ; FAMMLER, H. ; VEIDEMANE, K. ; WIJKMARK, N. ; AUNINS, A. ; HÄLLFORS, H. ; LAPPALAINEN, A. (2015). The MARMONI approach to marine biodiversity indicators, Volume I : Development of indicators for assessing the state of marine biodiversity in the Baltic Sea within the LIFE MARMONI project. *Estonian Marine Institute Report Series*, 16. 43p.

MC CLENACHAN, L. (2009). Documenting loss of large trophy fish from the Florida Keys with historical photographs. *Conservation Biology*, 23(3), pp 636-643, DOI : 10.1111/j.1523-1739.2008.01152.x.

MENESGUEN, A. (2003). Les « marées vertes » en Bretagne, la responsabilité du nitrate. 12p.

MENESGUEN, A. (2013). Les « marées vertes », une manifestation croissante et bien visible de l'eutrophisation de certaines zones côtières. 7p.

MILLWARD, G.E. ; TURNER, A. ; HE, X. (2018). Metal pollution. *Encyclopedia of the Anthropocene*, vol. 5, pp 77-85, DOI : 10.1016/B978-0-12-409548-9.11287-4.

NICHOLS, E. ; MURAKAMI, K. ; INUI, K. ; MATSUMOTO, Y. (2009). Constructing a scientifis blog corpus for information credibility analysis. *Proceedings of the 15th Annual Meeting of the Association for Natural Language Processing*, 6p, DOI : 10.1.1.532.7047

ORR, M. ; ZIMMER, M. ; JELINSKI, D.E. ; MEWS, M. (2005). Wrack deposition on different beach types : spatial and temporal variation in the pattern of subsidy. *Ecology*, 86, 6, pp 1496-1507.

PYLE, R.M. (1993). *The Thunder Tree : lessons from an urban wildland*. Oregon State University Press. Corvallis : Houghton Mifflin. 19p. ISBN : 978-087071-602-7.

REBENT Ifremer-CNRS-CEVA. (2007). Les herbiers de zostères de la région Bretagne - Inventaire 2007 des sites.

REBENT Ifremer-Université-CNRS. (2009). Source Chassé C., Glémarec M., Atlas des fonds meubles du plateau continental du golfe de Gascogne : cartes biosédimentaires, 1976.

REBENT-SINP Ifremer. (2009). Cartographie des champs d'algues de Penmarc'h à Trévignon. Sources Braud J.-P., Pérez R., 1974-1977 - Echelle : 1/10000.

RODRIGUEZ, A.S.L. ; CHARPENTIER, A. ; BERNAL-CASASOLA, D. ; GARDEISEN, A. ; NORES, C. ; PIS MILLAN, J.A. ; MC GRATH, K. ; SPELLER, C.F. (2018). Forgottent Mediterranean calving grounds of grey and North Atlantic right whale : evidence from Roman archaeological records. *Proceeding of the Royal Society of London B,* 285, 9p, DOI : 10.1098/rspb.2018.0961.

SCHIELZETH, H. (2010). Simple means to improve the interpretability of regression coefficients. *Methods in Ecology and Evolution*, 1:103–113.

SUURSAAR, U. ; TORN, K. ; MARTIN, G. ; HERKÜL, K. ; KULLAS, T. (2014). Formation and species composition of storm cast beach wrack in the Gulf of Riga, Baltic Sea. *Oceanologia*, 56, 4, pp 673-695, DOI:10.5697/oc.56-4.673.

TORN, K. ; MARTIN, G. ; SUURSAAR, Ü. (2016). Beach wrack macrovegetation index for assessing coastal phytobentic biodiversity. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, 65, 1, pp 78-87, DOI: 10.3176/proc.2016.1.08.

WORM, B. ; BARBIER, E. B. ; BEAUMONT, N. ; DUFFY, E. ; FOLKE, C. ; HALPERN, B.S. ; JACKSON, J.B.C. ; LOTZE, H.K. ; MICHELI, F. ; PALUMBI, S.R. ; SALA, E. ; SELKOE, K.A. ; STACHOWICZ, J.J. ; WATSON, R. (2006). Impacts of biodiversity loss on ocean ecosystem services. Science. 314, pp 787-790, DOI : 10/1126/science.1132294.

WWF. (2016). Rapport Planète Vivante 2016 : Risque et Résilience dans l'Anthropocène. ISBN 978-2-940529-52-0.

ZEMKE-WHITE, W.L. ; SPEED, S.R. ; MC CLARY, D.J. (2005). Beach-cast seaweed : a review. *New Zealand Fisheries Assessment Report 2005/44*. 47p.

Webographie

AUTEUR INCONNU. (2010). « Définition de subtidal ». Aquaportail. Mise à jour le 14 mai 2018. Consulté le 1 septembre 2018. 1p.
Disponible sur internet : www.aquaportail.com/definition-6843-subtidal.html.

AUTEUR INCONNU. (2016). « Trait de côte Histolitt ». Data.gouv.fr. Mise à jour le 22 août 2018. Disponible sur : www.data.gouv.fr/fr/datasets/trait-de-cote-histolitt-1/ (Consulté le 2 septembre 2018).

AUTEUR INCONNU. (Non daté). « Classification des habitats EUNIS ». Inventaire National du Patrimoine Naturel. Disponible sur : https://inpn.mnhn.fr/habitat/cd_typo/7/cd_hab/79 (Consulté régulièrement entre le 3 avril 2018 et le 2 septembre 2018).

AUTEUR INCONNU. (Non daté). « Le Littoral ». BioLit : Les observateurs du littoral. Disponible sur : www.biolit.fr/le-littoral?language=fr (Consulté le 2 septembre 2018).

AUTEUR INCONNU. (Non daté). « Plan gouvernemental de lutte contre les algues vertes ». Direction Régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt de Bretagne. Mise à jour le 12 juillet 2018. Disponible sur : http://draaf.bretagne.agriculture.gouv.fr/Plan-gouvernemental-de-lutte (Consulté le 3 septembre 2018).

GEFFROY, L. (20 mars 2018). Où sont passés les oiseaux des champs ? CNRS Le Journal. Disponible sur : https://lejournal.cnrs.fr/articles/ou-sont-passes-les-oiseaux-des-champs (Consulté le 2 septembre 2018).

VivArmor Nature. (Non daté). Estran22, faune et flore de la zone de balancement des marées en Côtes d'Armor. Rubrique Algues. Disponible sur : www.nature22.com/estran22/estran.html (Consulté régulièrement entre le 20 février 2018 et le 25 août 2018).

Zoological Society of London and World Wide Fund for Nature. (2014). « Living Blue Planet Report ». Living Planet Index. Disponible sur : www.livingplanetindex.org/projects?main_page_project=Blue PlanetReport&home_flag=1 (Consulté le 27 août 2018).

Annexes

Annexe I : Modèles de départ des analyses statistiques et modèles retenus

Modèle	Modèle retenu	Modèle de départ
1.1	(Flottantes, Non Flottantes)~Exposition+ (1|site)	(Flottantes, Non Flottantes)~hab A1 200m +hab A2 200m +hab A3A4 200m +hab A5 200m +hab A1 1000m +hab A2 1000m +hab A3A4 1000m +hab A5 1000m +linéaire 200m+linéaire 1000m+type de plage+substrat proche+Exposition+ (1|site)
1.2	(Flottantes, Non Flottantes)~substrat proche+linéaire 200m+(1|site)	
1.3	(Flottantes, Non Flottantes)~linéaire 200m+ (1|site)	
2	(Zostères,Autres)~zostere200+zostere1000+(1|site)	(Zostères,Autres)~zostere200+zostere1000+(1|site)
3	Abondance zostères~zostere200+zostere1000+(1|site)	Abondance zostères~zostere200+zostere1000+(1|site)
4	indice volume~Exposition+(1|site)+(1|jour)	indice volume~hab A1 200m +Nonhab A1 200m +hab A1 1000m +Nonhab A1 1000m +zostere200+zostere1000+substrat proche+type de plage+Exposition+(1|site)
4.2	indice volume~jour+(1|site)	indice volume~jour+(1|site)
5.1	richesse~hab A5 1000m +hab A5 1000m ²+linéaire 1000m+linéaire 1000m²+type de plage+substrat proche+(1|site)	richesse~hab A2 200m +hab A5 200m +hab A2 1000m +hab A5 1000m +hab A5 1000m ²+linéaire 200m+linéaire 1000m+linéaire 1000m²+type de plage+substrat proche+Exposition+(1|site)
5.2	richesse~linéaire 1000m*type de plage + linéaire 1000m² +(1|site)	
5.3	richesse~diversité habitats 1000*substrat proche+(1|site)	richesse~diversité habitats +linéaire 1000m+linéaire 1000m²+type de plage+substrat proche+(1|site)
5.4	richesse~diversité habitats 1000+(1|site)	
5.5	richesse~indice volume +(1|site)	richesse~indice volume +(1|site)
6	Quantité laminaires ~ hab A3A4 200m +substrat proche+(1|site)	Quantité Laminaires ~ hab A1 200m +hab A2 200m +hab A3A4 200m +hab A5 200m +hab A1 1000m +hab A2 1000m +hab A3A4 1000m +hab A5 1000m +linéaire 200m+linéaire 1000m+Exposition+type de plage+substrat proche+(1|site)
7	Vertes,Non Vertes~substrat proche+ (1|site)	Vertes,Non Vertes~type de plage+substrat proche+Exposition+linéaire 1000m+linéaire 200m+hab A1 200m +hab A2 200m +hab A3A4 200m +hab A5 200m +hab A1 1000m +hab A2 1000m +hab A3A4 1000m +hab A5 1000m + (1|site)
8	richesse~tempete*Coeff + (1|site)	richesse~Tempete*Coeff +hab A5 1000m +hab A5 1000m ²+linéaire 1000m+linéaire 1000m²+type de plage+substrat proche+ (1|site)
9	richesse~jour+jour²+(1|site)	richesse~jour+jour²+(1|site)

(1|site) : effet random appliqué au site
Variable1 * Variable 2 : interaction entre deux variables

Annexe II : Matrice de corrélation des variables

En bleu : coefficients de corrélation de Spearman entre deux variables quantitatives.
En rouge : résultats du test de Kruskal-Wallis entre une variable quantitative et une variable qualitative ; en rouge foncé variables corrélées (p-value < 0.05).
En jaune : résultats du test de Fisher entre deux variables qualitatives ; en jaune foncé variables corrélées (p-value < 0.05).

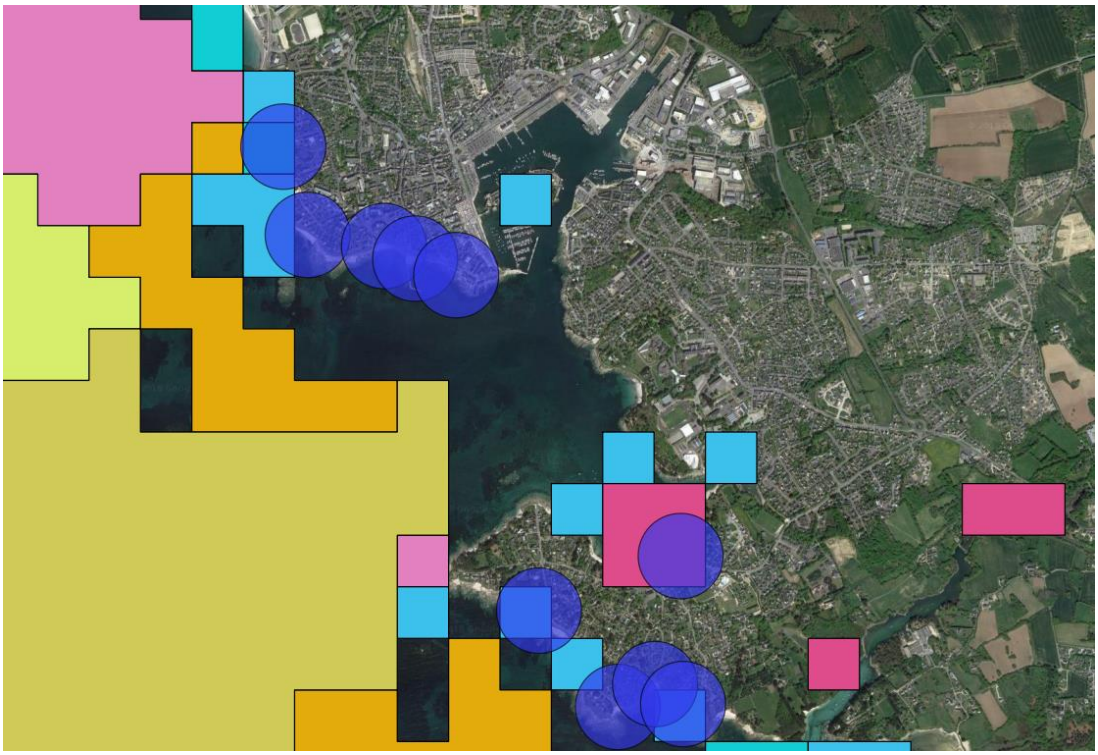
	Linéaire (200m)	Linéaire (1000m)	Type de plage	Tempête	Coefficient de marée	Substrat proche	Porportion de zostères (200m)
Linéaire (200m)	1	0.3507162	5.481e-07	0.2966	-0.1684987	0.002378	0.2297781
Linéaire (1000m)	0.3507162	1	0.1487	0.0001271	0.1404331	4.462e-09	0.09919003
Type de plage	5.481e-07	0.1487	1	0.1214	0.0001771	<2.2e-16	0.03479
Tempête	0.2966	0.0001271	0.1214	1	0.1531	6.059e-10	0.2762
Coefficient de marée	-0.1684987	0.1404331	0.0001771	0.1531	1	0.03706	-0.2054105
Substrat proche	0.002378	4.462e-09	<2.2e-16	6.059e-10	0.03706	1	3.915e-15
Porportion de zostères (200m)	0.2297781	0.09919003	0.03479	0.2762	-0.2054105	3.915e-15	1
Proportion de zostère (1000m)	0.1154608	-0.063705	0.4007	0.0205	-0.1365413	2.072e-06	0.4232821
Habitat A1 (200m)	0.1573351	-0.0715835	2.534e-11	0.004525	-0.0551223	2.2e-16	-0.0581357
Autres habitats (A2, A3/A4, A5) (200m)	-0.3354747	0.07302255	1.776e-13	0.3232	-0.0866024	2.2e-16	0.3454706
Habitat A1 (1000m)	-0.1309958	0.4434293	0.001419	3.085e-06	0.2667098	1.109e-10	-0.1721738
Autres habitats (A2, A3/A4, A5) (1000m)	0.1623722	-0.2383843	8.014e-16	0.07228	-0.1975406	1.248e-06	0.04375836
Exposition	0.0934	2.2e-16	0.0001598	5.292e-05	0.04817	2.2e-16	4.996e-07

	Proportion de zostère (1000m)	Habitat A1 (200m)	Autres habitats (A2, A3/A4, A5) (200m)	Habitat A1 (1000m)	Autres habitats (A2, A3/A4, A5) (1000m)	Exposition
Linéaire (200m)	0.1154608	0.1573351	-0.3354747	-0.1309958	0.1623722	0.0934
Linéaire (1000m)	-0.063705	-0.0715835	0.07302255	0.4434293	-0.2383843	2.2e-16
Type de plage	0.4007	2.534e-11	1.776e-13	0.001419	8.014e-16	0.0001598
Tempête	0.0205	0.004525	0.3232	3.085e-06	0.07228	5.292e-05
Coefficient de marée	-0.1365413	-0.0551223	-0.0866024	0.2667098	-0.1975406	0.04817
Substrat proche	2.072e-06	2.2e-16	2.2e-16	1.109e-10	1.248e-06	2.2e-16
Porportion de zostères (200m)	0.4232821	-0.0581357	0.3454706	-0.1721738	0.04375836	4.996e-07
Proportion de zostère (1000m)	1	0.0210113	0.230105	-0.2827354	0.1695327	4.76e-07
Habitat A1 (200m)	0.0210113	1	-0.6139689	0.284804	-0.2489605	9.325e-12
Autres habitats (A2, A3/A4, A5) (200m)	0.230105	-0.6139689	1	-0.143936	0.03566532	2.2e-16
Habitat A1 (1000m)	-0.2827354	0.284804	-0.143936	1	-0.4801207	0.01243
Autres habitats (A2, A3/A4, A5) (1000m)	0.1695327	-0.2489605	0.03566532	-0.4801207	1	0.07919
Exposition	4.76e-07	9.325e-12	2.2e-16	0.01243	0.07919	1

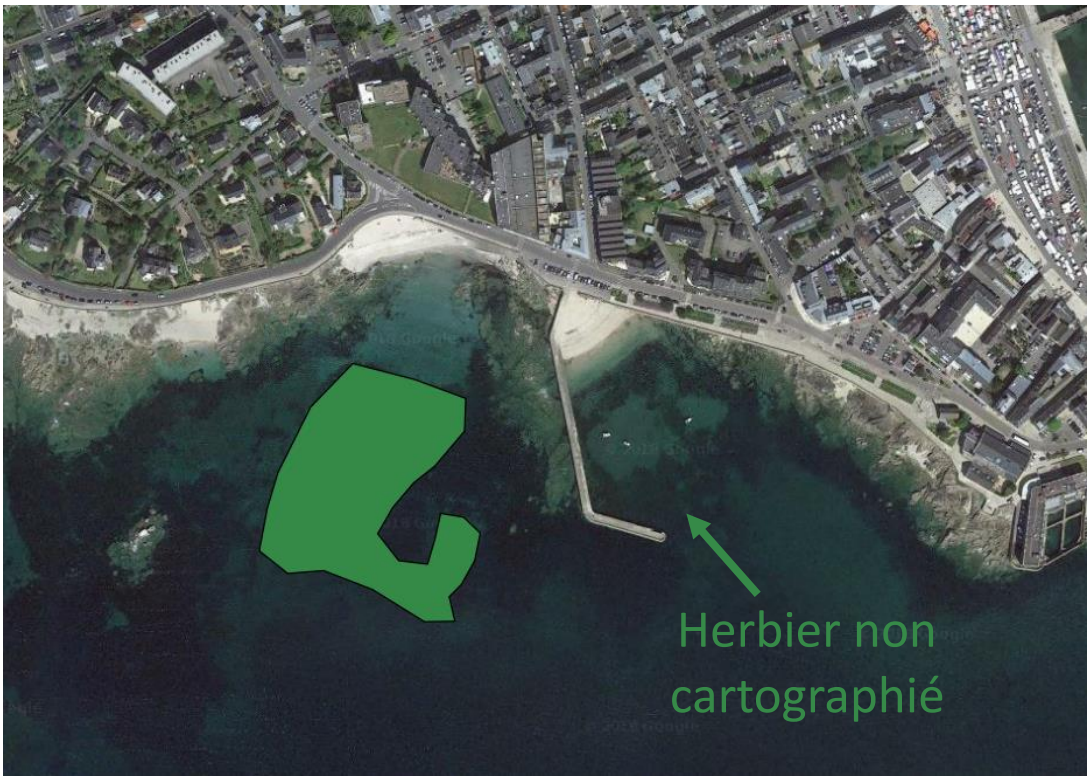
Annexe III : Liste des algues observées

Ahnfeltia plicata	Desmarestia ligulata	Laminaria digitata
Ahnfeltiopsis devoniensis	Desmarestia sp.	Laminaria hyperborea
Ascophyllum nodosum	Dictyopteris polypodioides	Laurencia sp.
Asparagopsis armata	Dictyota dichotoma	Lomentaria articulata
Bifurcaria bifurcata	Dilsea carnosa	Mastocarpus sp.
Bonnemaisonia hamifera	Dumontia contorta	Membranoptera alata
Calliblepharis ciliata	Enteromorpha sp.	Mesophyllum lichenoides
Calliblepharis jubata	Fucus ceranoides	Osmundea hybrida
Calliblepharis sp.	Fucus serratus	Osmundea pinnatifida
Callophyllis laciniata	Fucus spiralis	Osmundea sp.
Catenella caespitosa	Fucus vesiculosus	Palmaria palmata
Ceramium sp.	Fucus vesiculosus_evesiculosus	Pelvetia canaliculata
Chaetomorpha sp.	Furcellaria lumbricallis	Phycodrys rubens
Champia parvula	Gastroclonium ovatum	Phyllophora crispa
Chondracanthus acicularis	Gelidium corneum	Plocamium cartilagineum
Chondracanthus teedei	Gelidium latifolium	Polyides sp.
Chondria sp.	Gelidium sp.	Polysiphonia sp.
Chondrus crispus	Gelidium spinosum	Porphyra sp.
Chorda filum	Gigartina pistillata	Rhodymenia pseudopalmata
Chylocladia verticillata	Gracilaria multipartita	Saccharina latissima
Cladophora sp.	Gracilaria sp.	Sacchorhiza polyschides
Cladostephus spongiosus	Gracilaria verrucosa	Sargassum muticum
Codium sp.	Grateloupia turuturu	Scinaia furcellata
Colpomenia peregrina	Gymnogongrus crenulatus	Scytosiphon lomentaria
Corallinale	Halidrys siliquosa	Solieria chordalis
Cryptopleura ramosa	Halopithys incurva	Sphaerococcus coronopifolius
Cystoclonium purpureum	Halopteris scoparia	Ulva sp.
Cystoseira nodicaulis	Heterosiphonia plumosa	Vertebrata lanosa
Cystoseira sp.	Himanthalia elongata	Zostera marina
Delesseria sanguinea	Hypoglossum hypoglossoides	Zostera noltei
Delesseriale	Jania sp.	
Desmarestia aculeata	Laethesia sp.	

Annexe IV : Limites des données cartographiques disponibles



Cartographie des habitats EUNIS (Hamdi *et al*., 2010), inadaptée à notre échelle d'étude. Cercles : buffers de 200m autour des sites.



Cartographie des herbiers de zostères (Rebent, 2007), aujourd'hui inexacte.

	Diplôme : Ingénieur Agronome Spécialité : Génie de l'Environnement (GE) Spécialisation / option : Préservation et Aménagement des milieux et Ecologie Quantitative (PAMEQ) Enseignant référent : Manuel Plantegenest

Auteur : Morgane Pronost Date de naissance : 11 juin 1995	Organisme d'accueil : Centre d'Ecologie et des Sciences de la Conservation (Muséum National d'Histoire Naturelle) Adresse : Place de la Croix, 29 182 Concarneau Maître de stage : Isabelle LE VIOL Co-encadrant : Christian KERBIRIOU
Nb pages : 33 Annexe(s) : 3	
Année de soutenance : 2018	

Titre français : Étude des déterminants environnementaux de la composition algale de la laisse de mer

Titre anglais : Study of environmental drivers of beach wrack algal composition

Résumé : Face à la crise de la biodiversité actuelle, l'approfondissement des connaissances scientifiques, la mise en place de suivis des communautés et la responsabilisation du grand public sont indispensables. Pour répondre à ces trois objectifs, nous avons étudié la composition algale de la laisse de mer afin d'en identifier les déterminants et de préparer la mise en place d'une collecte de données participative. Nous avons donc échantillonné la laisse de mer sur 138 sites à large échelle spatiale et sur 31 sites à une échelle plus réduite avec un suivi temporel réalisé de mars à mai pour ces derniers. L'analyse statistique de ces données montre que la composition des laisses dépend en partie des communautés algales proches, mais qu'il existe aussi probablement des apports en algues exogènes et que la géomorphologie de la plage (substrat, linéaire de côte) ou encore des facteurs hydrodynamiques (tempêtes, marées) influencent également la composition des laisses. En outre, les résultats mettent en lumière la forte variabilité temporelle de la composition de la laisse de mer. La formation de la laisse de mer implique certainement d'autres facteurs non identifiés par cette étude, qui pourrait être poursuivie, notamment par l'acquisition de données plus précises sur les communautés algales et les habitats. Enfin, la mise en place d'une collecte de données participative *via* le Programme Plages Vivantes permettra la production importante de données, la sensibilisation du public aux enjeux de la biodiversité en milieu marin et sa participation à la production de connaissances scientifiques.

Abstract : Given the current biodiversity crisis, it is necessary to enhance scientific knowledge, to implement monitoring of communities and to empower citizens. In order to do so, we studied the algal composition of beach wrack to identify drivers of this composition and to prepare the implementation of citizen data collection. We sampled beach wrack at 138 sites at large spatial scale and at 31 sites at reduced spatial scale with temporal monitoring from march to may for the latter. Statistical analysis of this data shows that the composition of beach wrack depends on close algal communities, although exogenous algal inputs probably exist as well, and that the beach goemorphology (substrate, coastline) or hydrodynamic factors (storm, tide) also influence beach wrack composition. Moreover, our results show a hight temporal variability in beach wrack composition. The formation of beach wrack certainly implies other drivers that we did not identify. This study shall be continued, in particular with the collection of more accurate data on algal communities and habitats. Eventually, the citizen data collection implemented by the Plages Vivantes programm will allow the production of big data, raise awareness among citizens to the challenges of marine biodiversity and establish citizen participation to scientific knowledge.

Mots-clés : communautés algales, sciences participatives, habitats marins, programme Plages Vivantes

Key Words : algal communities, citizen science, marine habitats, Plages Vivantes programm