

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

LES FORÊTS DE VARECH ET LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ(E)

COMME EXIGENCE PARTIELLE

MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

PAR

LAURENCE LABELLE

JANVIER 2025

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL  
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce document diplômant se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév. 12-2023). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

## REMERCIEMENTS

J'aimerais d'abord remercier ma directrice de maîtrise, madame Catherine Trudelle, qui a toujours eu les bons mots et qui a su croire en moi, même dans les moments où j'étais au plus bas. Elle a su m'inspirer, m'encadrer et m'aider à développer tout mon potentiel. J'en profiterais aussi pour remercier tout le corps professoral de l'Institut des sciences de l'environnement (ISE) de l'UQAM, mais aussi celui du département de géographie de la même institution. Chaque cours, chaque exercice, chaque excursion, chaque travail m'a permis de développer ma compréhension du monde dans lequel on vit, et surtout, à quel point il est important de le protéger.

J'aimerais par la suite remercier ma mère, Dominique Nadon, ma sœur, Maude Labelle, mon frère Pierre-Olivier Labelle et mon père André Labelle. Tous ont su m'encourager et m'aider à cheminer à travers mon parcours scolaire atypique. De plus, j'aimerais remercier mon parrain, Claude Gravel, ainsi que ma marraine, son épouse Lise Pelletier, pour leur soutien et leurs encouragements. Ensuite, j'aimerais remercier ma grand-mère Lise Labelle, qui tout au long de mon parcours à toujours su trouver les bons mots pour m'encourager dans mes nombreux défis. J'aimerais remercier mon grand-père Robert Nadon, surnommé affectueusement « Pépé » et ma grand-mère Marie-Reine Pelletier, qui m'ont toujours dit que j'étais capable d'y arriver. Par la suite, j'aimerais remercier tous mes amis, Helena, Ivan, Gabriel, Nicolas, Kelly et j'en passe, qui ont su m'épauler à travers tous ces grands chapitres de ma maîtrise et de ma vie personnelle.

Être entourée de toutes ces belles personnes m'a permis de compléter ce gros chapitre dans ma vie et laissera place à de nouveaux défis. Je suis simplement très reconnaissante envers toutes les personnes qui ont su m'épauler tout au long de mon parcours et fière de moi d'avoir réussi à atteindre cet objectif.

## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS .....	ii
LISTE DES FIGURES.....	v
RÉSUMÉ .....	vi
INTRODUCTION .....	7
CHAPITRE 1 Problématique et méthodologie de recherche .....	8
1.1 Présentation de la problématique .....	8
1.2 Cadre conceptuel et méthodologie utilisée .....	8
CHAPITRE 2 Les forêts de varech, des milieux complexes .....	9
2.1 La répartition planétaire .....	9
2.2 La structure des varechs et ses composantes.....	10
2.3 Les méthodes de reproduction, les facteurs de croissance, les cycles de déforestation et la productivité .....	11
2.4 La biodiversité de ces écosystèmes .....	13
2.4.1 Les invertébrés.....	14
2.4.2 Les poissons .....	14
2.4.3 Les oiseaux.....	14
2.4.4 Les mammifères.....	15
2.5 La structure des forêts d'algues .....	16
2.5.1 La côte est de l'Amérique du Nord : de l'Alaska au Mexique .....	17
2.5.2 La côte est de l'Amérique du Nord .....	18
2.6 L'importance historique des forêts de varech et leur valeur économique .....	19
2.7 Conclusion de chapitre.....	21
CHAPITRE 3 Les répercussions des changements climatiques sur ces forêts complexes .....	22
3.1 Hausse des températures de l'eau.....	22
3.2 Acidification des océans et les conséquences sur les forêts de varech.....	24
3.3 L'activité anthropique et les pratiques d'aménagement côtier .....	25
3.4 Les conséquences des déversements pétroliers sur les milieux côtiers.....	27
3.5 Surpêche et pêche récréative .....	27
3.6 Débalancement des écosystèmes.....	28
3.6.1 Les prédateurs des varechs : les poissons herbivores et les oursins.....	28
3.6.2 La présence d'espèces invasives.....	29
3.7 Conclusion de chapitre.....	30

CHAPITRE 4 Quel avenir pour les forêts de varech ?.....	31
4.1 Séquestration de carbone : l'un des rôles du varech.....	31
4.2 La conservation et les mesures qui la soutiennent.....	34
4.2.1 La gestion des eaux usées.....	34
4.2.2 Les aires marines protégées .....	35
4.2.3 <i>Ecosystem-Based Management (EBM)</i> .....	35
4.3 La restauration des forêts de varech .....	38
4.4 Conclusion de ce chapitre .....	40
CONCLUSION .....	42
ANNEXE A .....	44
ANNEXE B .....	45
ANNEXE C .....	46
ANNEXE D .....	47
BIBLIOGRAPHIE.....	48

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 Distribution approximative des varechs.....	9
Figure 2 General Structure of a West Coast Kelp forest, with a complex understory of plants beneath the dominant <i>Macrocystis</i> or <i>Nereocystis</i> .....	10
Figure 3 Présentation des composantes d'une algue .....	11
Figure 4 Représentation graphique de la chaîne alimentaire de l'île Natividad au Mexique Source : Tiré de Schlenger et al. (2021, p.7).....	16
Figure 5 Distributions des forêts de varech et leur valeur économique par région .....	20
Figure 6 Réponse des forêts de varech et des écosystèmes à l'augmentation de la température de l'océan .....	22
Figure 7 Diagramme représentant la séquestration de carbone .....	33
Figure 8 Méthodes utilisées pour la restauration des forêts de varech .....	39
Figure 9 Exemples récents de changements observés (ou de manque de changement) dans la distribution et la structure des forêts de varech associé à la hausse des températures des océans.....	44
Figure 10 Biogéographie des <i>Laminaria</i> au nord-est de l'océan Atlantique .....	45
Figure 11 Pourcentage de changement dans la biomasse des différentes espèces.....	46
Figure 12 Contribution des différentes espèces d'algue aux sites de pêches .....	47

## RÉSUMÉ

Les forêts de varech sont des forêts de macroalgues que l'on retrouve sur toutes les côtes des continents. Ce sont des écosystèmes importants où vivent un grand nombre d'espèces animales et végétales. La structure sous-étagée et la fonction du milieu varient selon la région où le varech pousse. Plusieurs secteurs économiques dépendent aussi du varech, tels que la pêche commerciale et récréative. Les changements climatiques modifient les paramètres de survie des forêts de varech, avec une hausse des températures de l'eau apportant des changements dans les courants, l'acidification de l'eau, les déséquilibres dans la chaîne alimentaire, etc. Les activités anthropiques, quant à elles, comme la surpêche, l'aménagement côtier, la gestion des eaux usées vont aussi affecter les forêts de varech. Enfin, des mesures de protection, telles que les aires marines protégées, ainsi que des méthodes d'aménagement et de gestion, comme l'*Ecosystem-Based Management*, permettent de conserver les forêts de varech ainsi que de restaurer ces écosystèmes importants. Notre essai présente l'histoire des varechs et explique de quelle façon la communauté scientifique observe les modifications importantes de ces milieux.

Mots clés : Varech, Changement climatique, Aménagement, Oursins, Déforestation, Biodiversité, réchauffement des océans.

## INTRODUCTION

Les changements climatiques ont à l'heure actuelle des répercussions sur tout type de vie sur Terre. En effet, « les conséquences [en] sont déjà visibles, en particulier par des événements extrêmes plus fréquents et plus intenses, affectant aussi bien les activités humaines que les écosystèmes terrestres et marins » (IPCC, 2018). L'augmentation de l'effet de serre et du CO<sup>2</sup> modifie les paramètres et les cycles dans l'atmosphère, ce qui vient aussi perturber les milieux marins puisque les masses atmosphériques et les masses d'eau sont inextricablement liées. Les échanges énergétiques entre l'eau et l'atmosphère font en sorte que tout type de perturbations est observable dans les deux milieux. 93 % de l'énergie supplémentaire emmagasinée dans le système climatique entrera directement dans l'océan, ce qui en augmentera considérablement la température en surface, mais aussi en profondeur (Masson-Delmotte, 2021). Il est important de noter que l'océan est en quelque sorte le « climatiseur » du système climatique. Le mélange des masses d'eaux redistribue graduellement l'énergie qui était initialement accumulée dans l'atmosphère (Masson-Delmotte, 2021). Ce phénomène crée des vagues de chaleur marines de plus en plus intenses qui perdurent sur de plus longues périodes (Masson-Delmotte, 2021).

Tous les changements qui découlent de ces modifications de température ont déjà des conséquences directes sur la biodiversité. Une analyse de 100 000 espèces de plantes, d'insectes et d'invertébrés a permis d'estimer que « [...] le nombre d'espèces qui risquent de perdre leur habitat double entre un réchauffement de 1,5 °C et 2 °C [...] » (Masson-Delmotte, 2021). Ces importants changements de température auront aussi des effets majeurs sur les espèces vivant en milieux marins. De fait, les forêts de varech ne seront malheureusement pas épargnées par ces grandes modifications, mais aussi par l'activité anthropique qui se produit dans ces milieux. Plusieurs espèces d'algues sont comprises dans le nom de varech, qui est communément appelé « kelp » dans le milieu anglophone. Ce sont des forêts aquatiques majestueuses qui vivent en milieu côtier et que l'on retrouve près de tous les continents. Elles possèdent des structures étagées complexes qui créent des écosystèmes côtiers riches en biodiversité. Certains chercheurs, comme Erlandson et al. (2007), vont jusqu'à dire que ces forêts ont fortement contribué au déplacement des peuples autochtones de l'Asie jusqu'à l'Amérique du Nord et, par la suite, au peuplement du territoire (Erlandson et al., 2007). Notre travail veut exposer les caractéristiques de ces milieux, leur rôle dans les écosystèmes et les raisons pour lesquelles on doit les préserver.

## CHAPITRE 1

### Problématique et méthodologie de recherche

#### 1.1 Présentation de la problématique

Les forêts de varech sont des milieux d'une très grande richesse écologique qui sont extrêmement importants pour la préservation de la biodiversité et qui sont altérés de façon très importante par les changements climatiques. Chaque changement, tel que la hausse de température ou la modification de la salinité de l'eau, vient directement influencer les espèces de varechs qui composent ces forêts. Cependant, de quelle façon les forêts de varech sont-elles affectées par les changements climatiques et l'activité anthropique ? L'objectif principal de cet essai est de créer une synthèse de ces répercussions afin de brosser un portrait de la situation de l'espèce. Cet objectif implique le recensement de la littérature scientifique afin de comprendre la réalité de l'espèce. L'objectif secondaire est de tenter de comprendre, si possible, l'avenir de l'espèce et de mettre en lumière les mesures mises en place pour éviter la détérioration de ces forêts. Ainsi, ce travail est exécuté dans le but de contribuer aux connaissances sur les forêts de varech en plus de mettre en lumière de possibles pistes de solution pour la protection de ces milieux riches en biodiversité.

#### 1.2 Cadre conceptuel et méthodologie utilisée

Le cadre conceptuel de cette recherche repose sur deux concepts clés, soit le varech ainsi que les changements climatiques. Les dimensions qui découlent du premier concept, soit le varech, sont d'abord sa répartition planétaire, la structure et la composante de ces forêts, leur valeur historique ainsi que leur valeur économique. Parallèlement, les dimensions qui composent le concept des changements climatiques sont d'abord la hausse des températures de l'eau, le déséquilibre des écosystèmes ainsi que l'érosion des côtes. Certains impacts anthropiques seront aussi soulevés, tels que les répercussions de la surpêche dans la chaîne alimentaire de même que les conséquences des méthodes d'aménagement côtier. Toutes seront explorées dans les chapitres suivants. La technique utilisée pour la rédaction de ce document consiste à effectuer une revue des écrits scientifiques. Cela permet d'effectuer une recherche bibliographique sur le sujet à l'étude, soit les forêts de varech, afin d'analyser ce qui a été lu dans l'objectif de catégoriser l'information de sorte à répondre à la question de recherche (Dumez, 2011, p.15). Pour explorer les grands pans du sujet, une bibliographie commentée a été réalisée. Cela a permis de relever les concepts et les dimensions qui seront abordés. Les prochains chapitres de ce document sont le résultat des fruits de ce travail.

## CHAPITRE 2

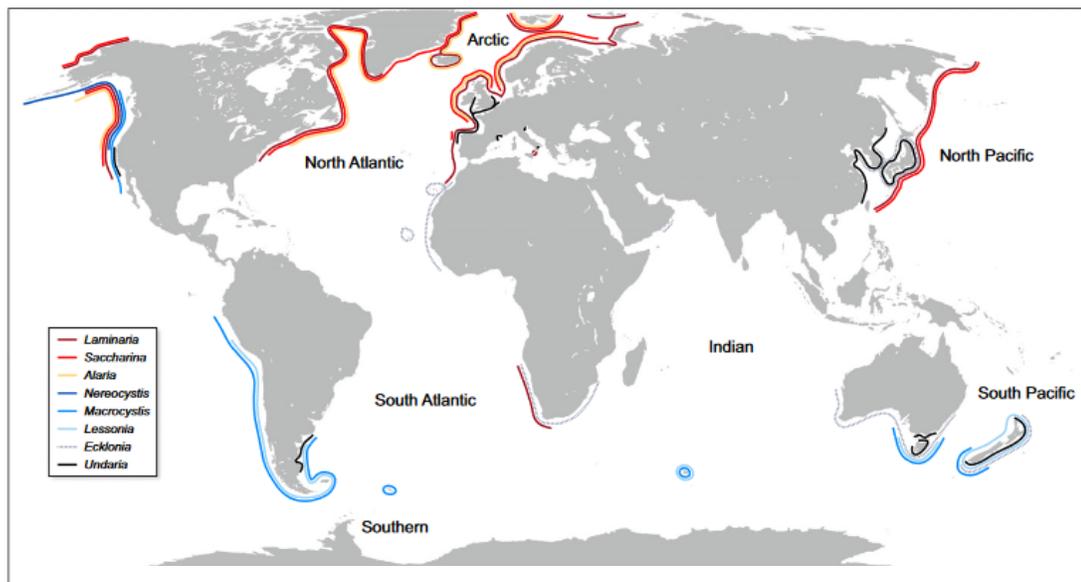
### Les forêts de varech, des milieux complexes

« *The number of living creatures of all Orders, whose existence intimately depends on the kelp is wonderful.* » – Charles Darwin, 1845

Les forêts de varech sont d'immenses forêts de macroalgues (Smale, 2020) que l'on retrouve un peu partout dans le monde et principalement en eau froide (Steneck et *al.*, 2002 ; Pita et Freire, 2019 ; Bayley et *al.*, 2021 ; Hamilton et *al.*, 2022). Une algue est un végétal qui possède la capacité à faire de la photosynthèse en raison de sa chlorophylle (Quero, 1992). Lorsqu'elles sont exposées au soleil, elles absorbent le gaz carbonique qui est dissout dans l'eau et plusieurs autres nutriments, leur permettant d'être autotrophes (Quero, 1992). Les forêts d'algues représentent la base des écosystèmes côtiers et permettent à une multitude d'espèces de survivre en leur sein (Smale, 2020).

#### 2.1 La répartition planétaire

Les forêts de varech sont des écosystèmes côtiers qui sont essentiels aux océans. Elles sont distribuées partout à travers le globe et elles recouvrent 25 % des côtes (Smale, 2020 ; Hamilton et *al.*, 2022 ; Eger et *al.*, 2022) puis occupent 43 % des écorégions marines du monde (Krumhansl et *al.*, 2016). Elles se retrouvent plus précisément dans les eaux froides, entre les eaux tempérées et les eaux



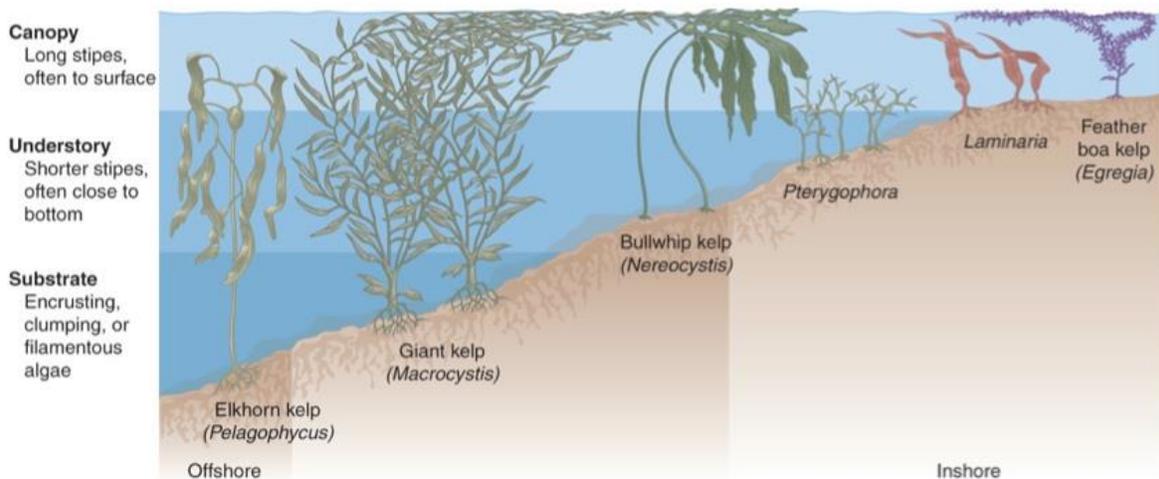
**Figure 1** Distribution approximative des varechs.

Source : Modifié et adapté de Steneck et Johnson (2013, Teagle et al. (2017) et Wemberg et al. (2019) (Smale, 2020, p.1448)

subpolaires (Krumhansl et al., 2016 ; Smale, 2020) (figure 1). On les retrouve dans les zones « *intertidales* », qui sont les limites extrêmes des hautes et basses marées, ainsi que dans les zones « *subtidales* », qui sont sous le niveau des basses marées (Konig, 1995, p.1 ; Morris et al., 2020). Il existe plusieurs grandes familles dans le varech et les scientifiques les ont classées en espèces, sous-espèces, etc. Par exemple, citons les *Ecklonia*, les *Lessonia*, les *Laminaria* (maintenant *Saccharina* dans certaines régions), les *Macrocystis* et les *Nereocystis* (Eger et al., 2023, p.2). Dans les *Laminaires* seulement, il est possible de retrouver 33 sous-espèces, qui ont principalement le même type de fonction écosystémique (Eger et al., 2023, p.2). Les forêts de varech sont donc composées de différentes espèces et sous-espèces d'algues et c'est ce qui en fait, entre autres, un écosystème d'un grand intérêt scientifique.

## 2.2 La structure des varechs et ses composantes

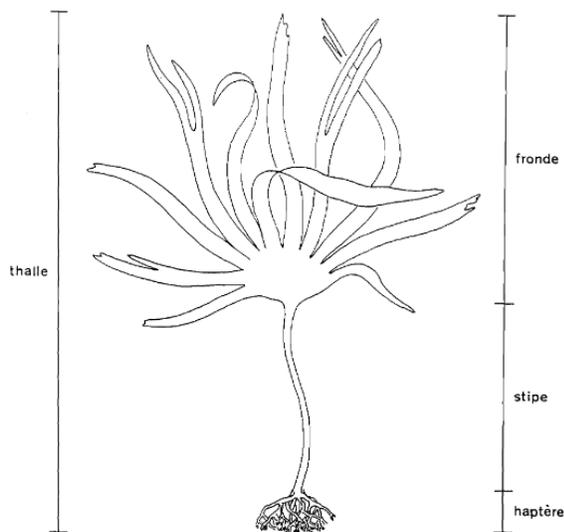
On distingue les forêts de varech par leur couleur brunâtre, car la pigmentation brune cache en fait la pigmentation verte caractéristique à la photosynthèse (Konig, 1995 ; Fredriksen et al. 2020). La structure des forêts se trouvant dans la zone « *subtidale* » est un ensemble de strates où vivent différentes espèces. Comparativement aux forêts terrestres, les forêts de varech atteignent une hauteur de canopée pouvant aller jusqu'à 15 mètres de hauteur dans une période de 1 à 3 ans (Steneck et al., 2002, p.438). Leur couvert flottant est important et est majoritairement composé d'espèces comme le *macrocystis* à feuille entières et de *nérocystes* (figure 2). L'objectif de ce couvert est de s'imbiber de lumière, mais aussi de dioxyde de carbone et d'autres substances nutritives nécessaires à leur survie (Konig, 1995). Puis, il y a le sous-étage stipité et dressé, composé de plantes à frondes comme la *Pterygophora californica*, la *Eisenia*



**Figure 2 General Structure of a West Coast Kelp forest, with a complex understory of plants beneath the dominant *Macrocystis* or *Nereocystis*.**

Source: Tiré de Clifton. K (n.d.)

*arborea* ou la *Laminaria secheli* (Konig, 1995). Ensuite, il y a la strate couchée qui tapisse le fond de l'eau avec des frondes qui reposent sur le substrat. On trouve également un mélange d'une pelouse d'algues coralliennes et d'algues rouges filamenteuses. Enfin, il existe un trottoir d'algues coralliennes encroûtantes (Konig, 1995). D'une certaine façon, la structure de ces forêts aquatiques peut être comparée à celle que l'on peut décerner dans les forêts poussant sur la terre ferme et qui atteignent des niveaux de complexité importants.



**Figure 3 Présentation des composantes d'une algue**

Source : Tiré de Quero (1992)

Les principales composantes du varech sont présentées en figure 3. D'abord, il y a des crampons à la base, sous forme de disque-ventouses ou d'haptères, qui s'accrochent au substrat (Konig, 1995, p. 3). On retrouve également le stipe, qui est en fait la tige de l'algue. Son rôle est d'apporter un soutien et d'orienter les lames et les frondes afin qu'elles puissent absorber les nutriments, tels que l'oxygène et le dioxyde de carbone, et d'assurer l'accès à la lumière (Konig, 1995, p. 3). Cette partie de l'algue varie en fonction des espèces et peut être longue ou courte, flexible ou solide. Vient ensuite la fronde, qui est en fait l'ensemble de feuilles qui capte la lumière et les nutriments qui eux servent à effectuer la photosynthèse (Konig, 1995, p. 3).

C'est aussi dans cette partie de la plante que l'on retrouve les organes reproducteurs de l'algue. Finalement, il y a les flotteurs, des chambres ou des vésicules creuses remplies de gaz qui permettent aux frondes et lames de rester à la surface de l'eau afin qu'ils s'orientent vers la lumière (Konig, 1995, p. 3).

### 2.3 Les méthodes de reproduction, les facteurs de croissance, les cycles de déforestation et la productivité

Le cycle de reproduction des varechs varie selon l'espèce. Certaines d'entre elles se reproduisent par voie sexuelle et d'autres le font de manière asexuelle (Konig, 1995, p. 3). En ce qui a trait à la reproduction par la voie sexuelle, l'algue produit des gamètes retenus dans un sac, le gamétocyte, qui les libérera lorsque l'enveloppe se déchirera (Zebsa, 2021). Ces gamètes transmettent donc l'information du parent mâle (Cerceau-Larrival, 1990). La survie de ces gamètes est aussi, en quelque sorte, assurée due à

la concurrence intraspécifique durant leurs périodes de croissance en milieu benthique (Steneck et *al.*, 2002, p. 439). Ces périodes de croissance sont influencées par différents paramètres, telles que la disponibilité de la lumière. Les gamètes auront plus de facilité à survivre s'il y a, par exemple, une ouverture dans la canopée ainsi qu'une abondance de nutriments (*Ib.*).

Plusieurs facteurs abiotiques et biotiques permettent la croissance de ces forêts et sont donc influencés par des « [...] top-down and bottom-up controls » (Dayton, 1985 ; Steneck et *al.*, 2002 ; Reed et *al.*, 2011 ; Byrnes et *al.*, 2013 ; Pérez-Matus et *al.*, 2017 ; Eisaguirre et *al.*, 2020, Fredriksen et *al.*, 2020). D'abord, il faut se rappeler que les varechs se trouvent souvent dans des zones de marées, ce qui fait qu'elles sont exposées au vent et à l'air (Konig, 1995). En effet, « [l'exposition] aux vagues, la lumière, la topographie, la température, la salinité, les substances nutritives disponibles, la sédimentation ainsi que la pente du rivage et son substrat » (Konig, 1995, p. 4) sont aussi des facteurs qui peuvent augmenter les paramètres de reproductions de l'espèce. Les vents forts provenant de la côte ainsi que l'action des vagues peuvent augmenter la quantité de nutriments et, donc, de la productivité de l'espèce (Morris et *al.*, 2020 ; Bayley et *al.*, 2021). Parmi les facteurs biotiques qui exercent une influence sur le varech figure l'effet du broutage de certaines espèces, comme les petits poissons herbivores et les oursins puis la compétition avec d'autres espèces de végétaux (Konig, 1995 ; Witman et Lamb, 2018 ; Morris et *al.*, 2020 ; Hamilton et *al.*, 2022). Tous ces facteurs mis ensemble exercent une influence sur la forme des écosystèmes, ce qui explique le fait qu'ils varient grandement d'une région à l'autre (Konig, 1995).

Dans les hautes latitudes, plusieurs facteurs influencent la croissance du varech qui dépend de certains paramètres pour assurer sa productivité. La lumière, la température, le couvert de glace, la présence de nutriments et l'évolution biologique sont des éléments qui augmentent la prolifération des varechs que l'on trouvera donc plus facilement dans la région arctique, au-dessus des 70 latitudes, ainsi qu'en Antarctique (Steneck et *al.*, 2002, p. 440). Grâce à l'évolution biologique, le varech est capable de dissoudre l'azote inorganique afin de réaliser la photosynthèse et l'entrepose donc l'hiver, la période où il y a le plus d'azote, pour l'utiliser tout au long de l'année (*Ib.*). Cependant, il importe de noter que l'espèce dans ces circonstances survit difficilement comme elle est isolée des autres et ne bénéficie pas de la sécurité d'une forêt. Le moindre changement pourrait donc catalyser l'élimination de l'espèce dans ces zones.

Les forêts de varech vivent périodiquement des cycles de déforestation. Cela s'explique par certaines anomalies dans la température, la salinité et l'apport en nutriments qui tuent le varech ou qui créent tranquillement des maladies létales pour l'espèce (Steneck et al., 2002, p. 440). Les cycles d'El Niño, qui sont de forts courants extrêmement riches en nutriments et qui augmentent la température de l'eau, exercent aussi des conséquences sur ces forêts (Steneck et al., 2002, p. 441 ; Witman et Lamb, 2018). Les grandes tempêtes qui découlent de ces événements cycliques arrachent les plants de varechs. Cela crée d'importants trous dans la canopée de ces forêts (Steneck et al., 2002). Cette déforestation a une influence sur les milieux côtiers parce que les frondes des varechs arrachés créent la majorité des débris autotrophes rejetés sur la côte (Steneck et al., 2002, p.449). En ce qui concerne des espèces de varech qui possèdent des flotteurs et des stipes, elles ont tendance à se rassembler en radeau et atteindre la côte où les flotteurs vont éclater. Cet attroupement peut être causé par le broutage ou des tempêtes. Les plantes sont souvent remportées par les vagues vers l'océan, où elles se déposeront ensuite dans le fond marin (Steneck et al., 2002). Les forêts de varech sont donc des milieux écosystémiques importants et permettent, dans chacune de leurs phases de développement, à différentes espèces de survivre ainsi que de cohabiter.

#### 2.4 La biodiversité de ces écosystèmes

Tel que le mentionnent Eisaguirre et al. dans leur article intitulé *Trophic redundancy and predator size class structure drive differences in kelp forest ecosystem dynamics* : « *Ecosystems that exhibit redundancy in important functions have been shown to be more resistant to the cascading effects of disturbance and extinction* » (Eisaguirre et al., 2020, p. 1). De fait, la structure des forêts de varech est complexe et crée plusieurs habitats qui permettent la survie d'un bon nombre d'espèces. Elles sont aussi des écosystèmes marins parmi les plus productifs au monde (Cortese, 2024). Les forêts de varech modifient l'environnement dans lequel elles croissent de même que la structure écologique de ce milieu (Steneck et al., 2002, p. 438). Les frondes amortissent les vagues, ce qui modifie la force de ces dernières et qui influence d'autres processus tels que l'érosion, la sédimentation, etc. (*Ib*; Bayley et al., 2021). La présence de cette importante canopée crée aussi des milieux de vie où le niveau de luminosité est considérablement réduit, permettant à certaines espèces adaptées à ces paramètres de survivre. Ce type d'environnement crée aussi une compétition entre les espèces d'algues pour la recherche de lumière. Les nombreux sous-étages, créés par le fait même, permettent la création d'habitats, mais aussi d'espace de ponte et de milieux où se nourrissent toutes les espèces dans la chaîne alimentaire (*Ib*. ; Fredriksen et al., 2020 ; Eger et al., 2023 p. 3). Les forêts de varech sont non seulement un habitat important, mais aussi

une source de nourriture pour plusieurs espèces animales d'abord parce qu'elles sont consommées par les espèces herbivores, mais aussi parce que de grandes pièces de varech finissent par atteindre le fond de la mer dans les zones côtières, permettant qu'elles soient aussi consommées par les espèces de fond (Steneck et *al.*, 2002, p. 438 ; Steneck et al, 2013 ; Ling et al., 2020). Ces plantes contribuent à la richesse des écosystèmes côtiers, car, lorsqu'ingérés par les différentes espèces, leurs excréments enrichissent les plages qui, à leur tour, enrichissent les sols de carbone et d'azote (Steneck et *al.*, 2002, p. 450). Cela permet à plusieurs petites îles avec des sols plus pauvres d'être productives. Les prochains sous-chapitres de cet essai présentent les différents types d'espèces qui se trouvent dans les forêts de varech.

#### 2.4.1 Les invertébrés

Les invertébrés vivent dans les forêts de varech principalement pour y trouver refuge ou s'y nourrir (Konig, 1995 ; Menzel et *al.*, 2013 ; Ling et al., 2020; Eger et *al.*, 2023, p. 1). On les retrouve soit autour des plantes ou même sur l'une d'entre elles. Les invertébrés les plus abondants dans ces forêts sont les oursins, qui ont l'habitude de brouter, majoritairement dans les zones tempérées, les algues charnues qui sont sur le substrat (Konig, 1995 ; Witman et Lamb, 2018). On y retrouve alors aussi plusieurs espèces de crabes, de langoustes, etc. (Steneck et *al.*, 2002).

#### 2.4.2 Les poissons

Plusieurs espèces de poissons trouvent refuge dans les forêts de varech, et ce, à plusieurs stades de leur vie. Certains vont s'y réfugier pour se nourrir, pour s'y reproduire en pondant leurs œufs directement sur les varechs, et enfin, certains poissons prédateurs vont s'y cacher pour embusquer de possibles proies (Konig, 1995 ; Menzel et *al.*, 2013 ; Witman et Lamb, 2018 ; Eger et *al.*, 2023, p. 1).

#### 2.4.3 Les oiseaux

Bon nombre d'espèces d'oiseaux marins dépendent de ces milieux afin de se nourrir. Ils fréquentent trois (3) habitats distincts des forêts de varech. Le couvert superficiel flottant, duquel certaines espèces comme le grand héron se sert comme perchoir pour la pêche en sont un exemple. Il y a la zone de mi-profondeur ainsi que la limite d'algue qui permettent à certaines espèces d'oiseaux plongeurs d'aller chercher leurs proies (Konig, 1995). Plusieurs espèces d'oiseaux fréquentent ces milieux pour la forte présence de poissons qu'ils consomment, comme c'est le cas pour les canards de mer (Steneck et *al.*, 2002, p. 452 ; Menzel et *al.*, 2013).

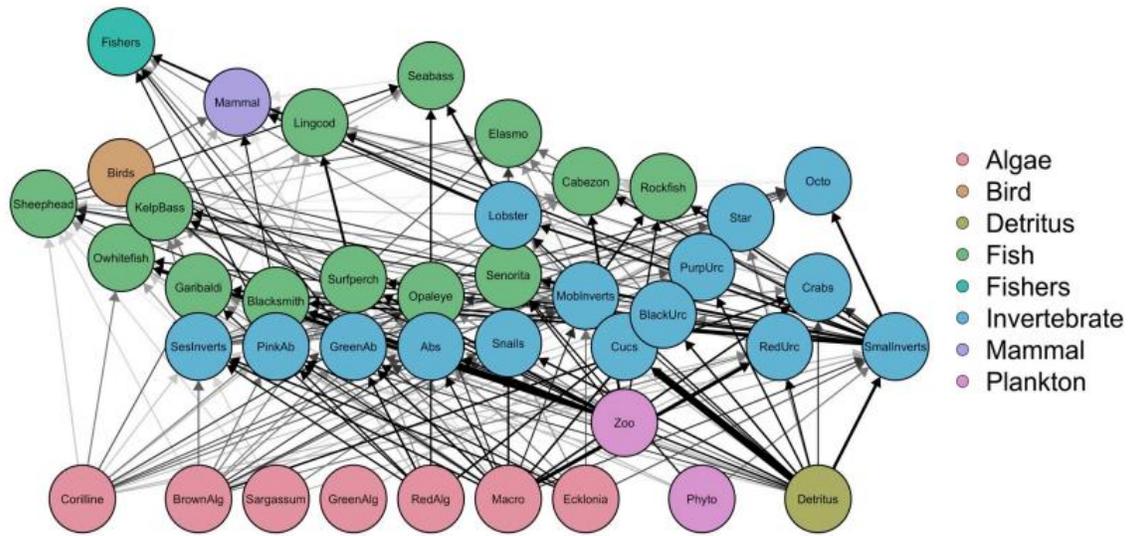
#### 2.4.4 Les mammifères

En ce qui a trait aux mammifères marins, plusieurs espèces allant de la petite loutre de mer à l'épaulard trouvent refuge dans ces forêts (Konig, 1995 ; Menzel *et al.*, 2013). Chacune des espèces vient s'y nourrir, et, en analysant la pyramide de l'écosystème marin côtier, on remarque que tous dépendent l'un de l'autre :

« L'épaulard rôde autour des forêts de varech à la recherche de phoques et de baleines grises pour se nourrir. La baleine grise suit aussi la lisière extérieure de ces forêts lors de ses migrations et y entre pour échapper aux attaques de l'épaulard et se nourrir de petits invertébrés, comme les crevettes mysidés. Le phoque commun du Pacifique fréquente ces forêts pour y capturer les poissons, comme les bistres, qui composent son menu et pour se reposer parmi les frondes du varech » (Konig, 1995, p. 7).

Il ne fait aucun doute que ces forêts sont essentielles à la survie d'une diversité d'espèces animales et végétales. On y retrouve aussi plusieurs espèces ayant un statut précaire de même que des espèces réintroduites dans leur milieu, comme la loutre des mers. Cette espèce, que l'on trouvait auparavant tout au long de la côte de l'océan Pacifique et qui se nourrissait d'invertébrés se trouvant au fond de l'eau, a été chassée pour sa peau au 18<sup>e</sup> et 19<sup>e</sup> siècle, ce qui a conduit l'espèce à sa quasi-extinction (Nichol *et al.*, 2009). Aujourd'hui, la population se porte bien et est suivie de près depuis 2001 par le ministère de Pêches et Océans Canada (Pêches et Océans Canada, 2019). Les forêts de varech ne sont donc pas seulement un amas d'algues accrochées à un substrat rocheux, mais ce sont des milieux de vie complexes et extrêmement importants pour la biodiversité aquatique.

Enfin, il est intéressant de noter que le lien de codépendance est étroit entre les différents groupes d'espèces et qu'ils sont en interrelation dans la chaîne alimentaire. La diversité de prédateur vient renforcer la résilience des écosystèmes créée au sein des forêts de varech (Eisaguirre *et al.*, 2020). Dans le cadre d'une étude sur la forêt de varech longeant la Isla Natividad au Mexique, une représentation graphique de cette chaîne a été créée pour se représenter ces échanges complexes (figure 4) (Schlenger *et al.*, 2021). Certaines de ces espèces ont des liens très forts avec d'autres, comme on peut le constater par l'entremise des larges traits noirs. Une modification dans la structure viendrait considérablement déséquilibrer cette chaîne alimentaire (Schlenger *et al.*, 2021).



**Figure 4 Représentation graphique de la chaîne alimentaire de l'île Natividad au Mexique**

Source : Tiré de Schlenger et al. (2021, p.7)

## 2.5 La structure des forêts d'algues

La répartition des forêts de varech couvre la majeure partie des côtes du globe (figure 1). Leur croissance est influencée par la quantité d'apport en nutriments, leur accès à la lumière, puis par les différents courants d'eau qui peuvent exercer des répercussions sur ces forêts. La compétition entre espèces d'algues a aussi des conséquences sur ces écosystèmes. Les forêts de varech se trouvant en basses latitudes, soit sous le 40<sup>e</sup> parallèle, perdent leur dominance au bord des côtes en raison de la présence d'autres espèces d'algues telles que les *Cystoseira osmundacea* et des *Sargassum* (Steneck et al., 2002, p. 439). Il n'y a cependant pas que la compétition entre les espèces d'algues qui ont une incidence sur leur survie, mais aussi les changements anthropiques et naturels dans la chaîne alimentaire de ces milieux. Certaines espèces prédatrices du varech, comme les oursins, vont modifier la structure de la forêt selon la quantité d'espèces présentes. Il est à noter que les oursins ont quatre (4) prédateurs dominants, tels que les loutres de mer (*Enhydra lutris*), les étoiles de mer portant le nom de soleil de mer (*Pycnopodia helianthoides*), le labre californien (*Semicossyphus pulcher*) et la langouste de Californie (*Panulirus interruptus*), dont les fluctuations de population ont fortement influencé les forêts de varech (Eisaguirre et al., 2020). À travers les différents écrits scientifiques et ceux provenant de la littérature grise consultée dans le cadre de cette recherche, il est clair que quelques régions du globe ressortent quant à l'évolution de la composition, de la structure de ces forêts et des conséquences de ces changements de population.

La côte est et la côte ouest de l'Amérique du Nord ont été des régions qui ont été grandement étudiées et sont présentées ci-dessous.

#### 2.5.1 La côte est de l'Amérique du Nord : de l'Alaska au Mexique

En Alaska, les chercheurs estiment que les forêts de varech sont apparues il y a 20 à 40 millions d'années (Steneck et *al.*, 2002, p. 445). Elles dominaient majoritairement les côtes qui n'avaient pas de couvert de glace important (Steneck et *al.*, 2002, p. 445). Plusieurs espèces y vivaient probablement déjà, telles que les loutres de mer et les oursins de mer, mais aussi une espèce qui est aujourd'hui disparue, soit les vaches de mer Steller's, une espèce herbivore et, probablement, de grandes consommatrices de la canopée des forêts de varech (Steneck et *al.*, 2002, p. 445). Les chercheurs estiment que les forêts de varech de cette région n'étaient pas dévastées à l'époque par le broutage des oursins de mer, car il y avait un très bon équilibre de population avec leurs prédateurs, les loutres et les étoiles de mer portant le nom de soleil de mer (Steneck et *al.*, 2002, p. 446 ; Eisaguirre et *al.*, 2020). Pour ce qui est de l'étoile soleil de mer, sa répartition était de l'Alaska jusqu'au sud de la côte de la Californie. Récemment, ces étoiles de mer ont subi un stress important provoqué par une épidémie résultant possiblement de l'association de deux types de virus causé par un mixte de différents pathogènes et de conditions environnementales défavorables, les chercheurs nomment cette épidémie *l'Asteroid Idiopathix Wasting Syndrome* (Hewson et *al.*, 2018 ; Eisaguirre et *al.*, 2020). Ces étoiles soleil de mer ont pratiquement été éradiquées et leur répartition géographique a été grandement modifiée depuis 2014 (Schultz et *al.*, 2016 ; Harvell, 2019 ; Eisaguirre et *al.*, 2020).

L'arrivée des colons entre 1700 et 1800 a, par ailleurs, modifié considérablement cet équilibre, car ils chassaient beaucoup les loutres pour la traite des fourrures (Estes and Palmisano, 1974 ; estes et *al.*, 2004 ; Eisaguirre et *al.*, 2020), ce qui a mené les forêts de varech à connaître une forte décroissance. Effectivement, elles étaient toujours grandement consommées par les oursins qui n'avaient alors plus de prédateurs (Steneck et *al.*, 2002, p. 446 ; Eisaguirre et *al.*, 2020). Les loutres de mer ont été protégées de la chasse au 20<sup>e</sup> siècle sous la protection d'un traité portant le nom de *International Fur Seal Treaty* permettant à l'espèce une mince protection des chasseurs (DFO, 2007). Malgré ces efforts, les nombreuses populations vivant sur les côtes ouest de l'Amérique du Nord ont continué de décliner tranquillement, car elles étaient maintenant les nouvelles proies des orques, qui, quant à eux, ont souffert du déclin de leur proie principale, les pinnipèdes (Steneck et *al.*, 2002, p. 446). Plusieurs chercheurs s'entendent aussi pour dire que, dans cette région du globe, les forêts de varech ont joué un rôle important quant à la survie des

populations humaines vivant en Amérique du Nord (Steneck *et al.*, 2002, p. 445). Poissons, mammifères marins et crustacés se trouvaient dans ces milieux, permettant aux populations de croître et de survivre confortablement avant la mise en place de système d'agriculture (Steneck *et al.*, 2002, p. 445).

Les forêts de varech qui se trouvent dans l'océan Pacifique et qui longent la côte de l'Amérique du Nord étaient historiquement reconnues pour les grands écosystèmes d'espèces herbivores qui n'étaient pas seulement composées d'oursins, mais aussi de petits crustacés, d'escargots, etc. (Steneck *et al.*, 2002, p. 448). Ces petites espèces avaient plusieurs prédateurs, comme la langouste et le labre californien, qui sont devenus des prédateurs importants des oursins suite au retrait des populations de loutre au 18<sup>e</sup> siècle (Steneck *et al.*, 2002, p. 448 ; Eisaguirre *et al.*, 2020 ; Hamilton *et al.*, 2022, p. 3). Cela s'explique, entre autres, par l'augmentation de la taille de leurs corps, et donc de leurs capacités de consommer les oursins (Behrens and Lafferty, 2004; Eurich *et al.*, 2014 ; Hamilton *et al.*, 2014 ; Hamilton and Caselle, 2015; Selden *et al.*, 2017 ; Eisaguirre *et al.*, 2020). Cette modification dans la chaîne alimentaire a changé de façon importante les structures des forêts de varech dans la région et a laissé des traces que l'on observe encore aujourd'hui.

### 2.5.2 La côte est de l'Amérique du Nord

Dans l'océan Atlantique, la dynamique des forêts de varech est similaire à celle du nord de l'océan Pacifique. La présence des oursins joue sur les forêts de varech de la même façon et certains facteurs ont permis aux populations de croître abondamment (Steneck *et al.*, 2002, p. 446 ; Witman et Lamb, 2018). Cependant, plutôt que d'être régulées par les loutres de mer, elles sont consommées par des espèces de poissons de fond comme la morue de l'Atlantique (Steneck *et al.*, 2002, p. 446). La grande quantité de poissons de fond et surtout de morues dans les divers golfes en Amérique du Nord a marqué les Européens lorsqu'ils sont arrivés (Steneck *et al.*, 2002, p. 446). Dans le golf du Maine, la pêche intensive de la morue de l'Atlantique n'a commencé à se faire sentir qu'autour des années 1930, surtout en raison de l'automatisation intensive de la pêche et de l'utilisation de technologies pour la conservation des poissons à bord (Steneck *et al.*, 2002, p. 447 ; Steneck *et al.*, 2013). Certes, ces espèces ont laissé place à d'autres plus petits prédateurs pour les oursins comme le chabot commun, mais cette surpêche de la morue d'Atlantique a néanmoins laissé un déséquilibre et une diminution considérable du nombre de poissons de plus grande taille (Steneck *et al.*, 2002, p. 447). Ce déséquilibre a donc permis aux oursins de continuer de croître et de « brouter » en grande partie les forêts de varech sur la côte est de l'Amérique du Nord, laissant place à des barrières de corail très importantes. À la fin des années 1980, la pêche aux oursins a

pris de plus en plus d'importance, ce qui a permis aux forêts de varech de reconquérir le territoire et d'augmenter la biodiversité de ces milieux (Steneck et *al.*, 2002, p. 448). Les oursins, qui comptaient autrefois jusqu'à 10 000 individus par m<sup>2</sup>, sont devenus les proies de nouveaux prédateurs de petite taille, tels les petits crabes, qui ont décimé cette population en un an. (Steneck et *al.*, 2002, p. 447).

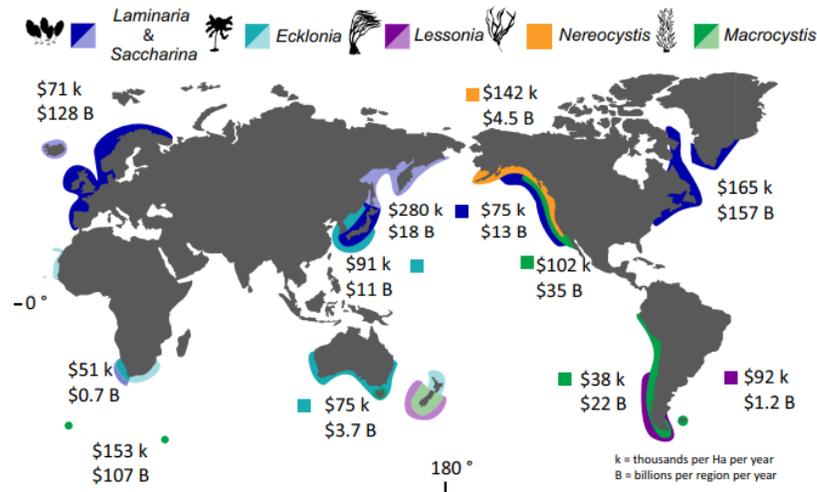
## 2.6 L'importance historique des forêts de varech et leur valeur économique

L'importance historique et l'évolution de la valeur économique des forêts de varech sont intimement liées. La colonisation de l'Amérique du Nord est généralement décrite comme une période pendant laquelle des populations provenant de l'Asie du Nord-Est ont traversé le détroit de Béring jusqu'en Amérique du Nord (Erlandson et *al.*, 2007). Or, plusieurs chercheurs et archéologues soutiennent qu'une autre voie aurait pu être utilisée lors de cette migration qui s'est produite il y a 20 000 ans et qui aurait été par l'utilisation des voies navigables (Steneck et *al.*, 2002 ; Eger et *Al.*, 2023, p. 1). Certes, les chercheurs disent que les premières traces de la présence de populations sur les côtes de l'Alaska remontent à environ 9 000 – 10 000 ans, mais il faut se rappeler que la montée des eaux a été importante à l'époque postglaciaire et que plusieurs des sites archéologiques de la colonisation se retrouvent donc probablement submergés (Steneck et *al.*, 2002, p. 445). Durant cette migration, les chercheurs expliquent que les populations humaines basaient leur alimentation sur les espèces vivant dans les forêts de varech, et plus précisément sur les différentes espèces de poissons. Dans le nord-est du Pacifique, des méthodes d'aménagement des forêts de varech, telles que la plantation des jeunes plants, sont faites depuis 3 000 ans, principalement pour augmenter les endroits de pêche (Eger et *al.*, 2023, p. 1).

Les forêts de varech sont des milieux utilisés depuis des centaines d'années pour plusieurs secteurs d'activité économique. Le varech joue un rôle important dans l'économie de certains pays, comme le Japon, la Chine et la Corée, entre autres, et ces populations savent depuis longtemps que ces plantes sont associées à de grandes chaînes alimentaires. Ce type de forêts étaient donc des milieux très prisés pour la pêche étant donné l'abondance de crustacés (Eger et *al.*, 2023, p. 1) et étaient connues pour être des pouponnières importantes pour les poissons (Krumhansl et *al.*, 2016 ; Smale, 2019).

Les forêts de varech ont une valeur économique régionale très importante pour les différentes structures écosystémiques exploitées telles que la pêche, la récolte, le tourisme, etc. (Konig, 1995 ; Steneck et *al.*, 2002 ; Menzel et *al.*, 2013 ; Krumhansl et *al.*, 2016 ; Pita et Freire, 2019 ; Bayley et *al.*, 2021 ; Hamilton et *al.*, 2022 ;). Dans le sud de l'Afrique, les forêts de varech, qui sont majoritairement composées

d'*Ecklonia* et de *Laminaria*, et ont une valeur économique de 290 millions de dollars, tandis que les forêts de varech au nord central du Chili, composées de forêts de *Lessonia* et de *Macrocystis*, peuvent rapporter jusqu'à 540 millions de dollars par année (Eger et al., 2023, p. 2). Ces données ne sont pas standardisées et représentent une association du prix du marché de tous les types d'extraction possible des forêts de varech et, donc, ne prennent en considération que la production halieutique (Eger et al., 2023, p. 2 et 6), mais soutiennent le fait que les forêts de varech ont une valeur économique importante. Ces chiffres



**Figure 5 Distributions des forêts de varech et leur valeur économique par région**

Source : Tiré de Eger et al. (2023, p.5.)

démontrent quand même l'importance économique de ces écosystèmes qui découle de leur productivité. La figure 5 présente le lien existant entre la productivité économique d'une région et les espèces que l'on retrouve dans cette région (Eger et al., 2023, p. 5). Mentionnons que les sources de revenus sont principalement liées au secteur de la pêche (voir annexe D). Selon le type d'algue présent dans la forêt de varech, il est possible d'y associer une productivité particulière. Si on se penche plus précisément sur les *Macrocystis*, on peut observer que ces forêts sont productives en concombres de mer, en oursins, mais aussi en mollusques, en crustacés et en poissons (voir annexe D) (Eger et al., 2023, p. 4).

Cette utilisation du varech varie et est présente dans plusieurs secteurs, qui seront prochainement présentés. D'abord, le varech comporte une composante naturelle qui s'appelle l'algine, que l'on trouve dans les frondes. Elle sert non seulement à épaissir et gélifier des produits comme les crèmes glacées et des vinaigrettes, mais elle est aussi utilisée dans certains produits cosmétiques et dans la fabrication de vêtements (Konig, 1995). De plus, le varech est utilisé comme engrais et comme aliment nourrissant le

bétail (Konig, 1995). Il est aussi exploité dans les soins médicaux pour traiter les carences en iode, et ce, depuis des siècles (Eger et *al.*, 2023, p. 1). Il est aujourd’hui utilisé dans les pansements en hôpitaux (Eger et *al.*, 2023, p. 1). L’alginate, l’équivalent de l’algine extraite de la fronde, permet d’éliminer les bactéries, de calmer la douleur et d’accélérer la guérison des plaies (Konig, 1995 ; Chaby et *al.*, 2007 ; Eger et *al.*, 2023, p. 1). Il faut savoir que le varech est très résilient à la coupe de sa canopée, soit la fronde (voir figure 3), ce qui permet à plusieurs industries de se spécialiser dans la récolte durable et d’avoir de faible répercussion, voire minime, sur cesdites forêts (Steneck et *al.*, 2002, p. 445).

Finalement, les forêts de varech forment des paysages sous-marins incroyables, qui attirent une grande clientèle touristique diversifiée, comme les adeptes de la plongée sous-marine, de la photographie, de la pêche sportive ainsi que les observateurs d’oiseaux et de mammifères marins pour ne nommer que ces activités (Konig, 1995 ; Eger et *al.*, 2023 p. 7). L’économie des communautés locales est grandement basée sur cette activité touristique.

## 2.7 Conclusion de chapitre

Les forêts de varech sont des milieux complexes et riches en biodiversité. Elles longent les côtes des continents, plus précisément dans les eaux tempérées et froides. Elles sont composées de structures complexes, permettant à un grand nombre d’espèces d’y vivre et de s’y nourrir. Ces dernières connaissent des cycles de croissance et de déforestation, et sa productivité est influencée par plusieurs facteurs biotiques et abiotiques. On y retrouve plusieurs espèces de poissons, d’invertébrés, d’oiseaux et de mammifères. Ces milieux sont donc des endroits remplis de biodiversité, d’une importance historique et économique importante.

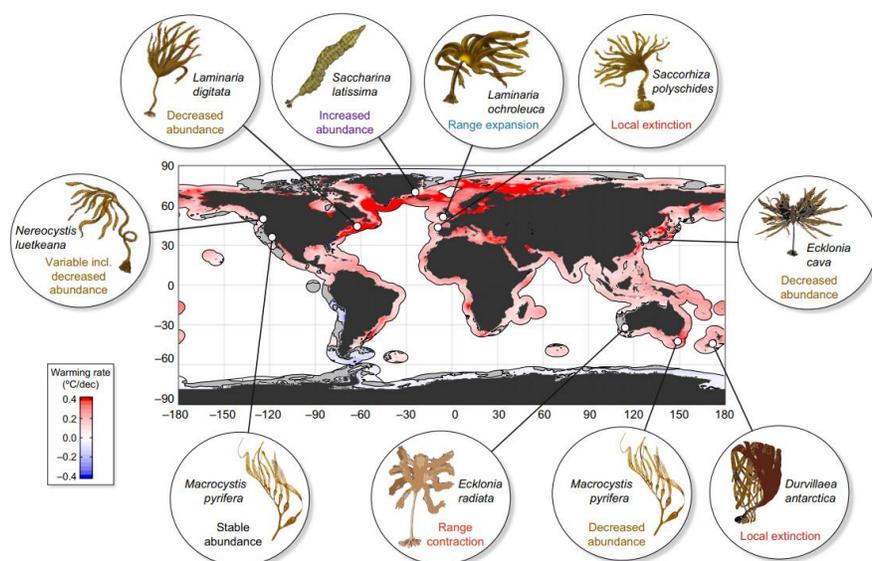
## CHAPITRE 3

### Les répercussions des changements climatiques sur ces forêts complexes

Lorsqu'on tente d'étudier les conséquences des changements climatiques sur les milieux aquatiques, il est difficile d'étudier ces derniers séparément, car tous sont interreliés. Ici sont donc discutés les changements observables sur les forêts de varech.

#### 3.1 Hausse des températures de l'eau

Les changements climatiques, soit l'augmentation de la chaleur terrestre à l'échelle globale, ont des conséquences directes sur les températures de l'eau, car ces deux systèmes sont étroitement liés. Ces changements peuvent (et ont) des répercussions directes sur les interactions écologiques des milieux, dans ce cas-ci dans les écosystèmes côtiers (Steneck et al., 2016 ; Smale, 2020, p. 1448 ; Eger et al., 2022 ; Cortese, 2024). En 1995, l'auteur Carrie Konig parlait déjà des retombés de l'augmentation des températures de l'eau sur les forêts de varech, en mentionnant une réduction des montées de nutriments causée par les réchauffements extrêmes comme El Niño (Konig, 1995, p. 10 ; Eger et al., 2023 p. 7). Steneck et al. précisent que c'est le manque d'apport en azote, causé par cette augmentation, qui limitera considérablement la croissance de ces forêts (Steneck et al., 2002, p. 439 ; Steneck et al., 2016). Ces évènements créent de grandes tempêtes qui sont dues à l'accumulation d'énergie dans l'eau, ce qui cause



**Figure 6 Réponse des forêts de varech et des écosystèmes à l'augmentation de la température de l'océan**

Source : Tiré de Smale (2020, p. 1451).

d'énormes dommages aux varechs. Les immenses courants et vagues provoqués par des tempêtes arrachent les plantes du substrat (Konig, 1995, p. 10).

Avec les changements climatiques, on observe un recul de la présence des forêts de varech de 38 % dans les écosystèmes côtiers (Witman et Lamb, 2018 ; Smale, 2020, p. 1447). En fait, le réchauffement des masses d'eau oblige l'espèce à se déplacer puisqu'elle est à la recherche de températures plus clémentes pour sa productivité (Steneck et *al.*, 2002 ; Smale, 2020 ; Arriaga et *al.*, 2024). Ces hausses de température sont un élément qui provoque du stress sur l'espèce et sont potentiellement la cause de grandes vagues de mortalité, ce qui aurait à des conséquences sur l'abondance des populations de varech, mais aussi sur la grandeur de la structure de la forêt (Smale, 2020 ; Cortese, 2024). Il existe des exemples de ces pertes importantes de macroalgues, causées par le stress que la plante peut vivre en raison de l'augmentation de température (Pita et Freire, 2019 ; Smale, 2020). Ces changements de température sont susceptibles d'augmenter la compétition entre les espèces tels que les différentes sortes de varechs, les coraux durs, les macroalgues envahissantes et les algues formant des pelouses (Smale, 2020 ; Hamilton et *al.*, 2022, p. 3).

Dans son texte intitulé « *Impacts of ocean warming on kelp ecosystems* » Smale (2020) effectue une revue de littérature des travaux qui analysent les conséquences des changements de température de l'eau dans plusieurs régions où se trouve le varech. Cette revue de littérature a été réalisée à partir de 33 documents rédigés sur le sujet. Le tableau de l'Annexe A. tiré des travaux de Smale (2020) permet d'observer chez plusieurs espèces de varech, dans différentes régions du globe, un recul des populations, un déclin de l'abondance des espèces allant même jusqu'à l'extinction de certaines d'entre elles (Steneck et *al.*, 2016 ; Smale, 2020). Tout cela résulte d'une répercussion directe sur la production primaire de ces milieux, mais aussi sur la richesse de la biodiversité qui s'y trouve ainsi que sur le maintien des habitats pour les poissons. Les chiffres sont aussi très alarmants de même que les conclusions auxquelles arrive l'auteur. En Nouvelle-Écosse, province se trouvant dans la région des maritimes Canadiennes (Est du Canada), les chercheurs ont observé une perte importante de biomasse des forêts de varech dans les dernières décennies (Steneck et *al.*, 2016 ; Smale, 2020, p. 1449). Ces forêts sont alors remplacées par des macroalgues invasives formant de grandes canopées portant le nom de *Fucus serratus* et *Codium fragile fragile* et qui sont apparus entre les années 1800 et 1990. Ces espèces ont connues des expansions de territoire importante renforçant la dégradation de forêt de varech dans le secteur (Steneck et *al.*, 2016). Dans l'océan Indien, l'auteur mentionne que les chercheurs ont observés des vagues de chaleur qui ont en

2010-2011 augmenté la température de l'eau de 5 degrés Celsius (Smale, 2020, p. 1449). Le varech présent dans cette région, l'*Eclonia radiata*, a décliné de manière significative et il en est de même pour le *Scytothalia dorycarpal*. Ce sont habituellement des macroalgues qui sont extrêmement productives et qui ont été rapidement remplacées par des algues formant de la pelouse qui ne soutiennent pas autant de biodiversité (Smale, 2020, p. 1449). En 2015, ce sont environ 43 % des forêts de varech au sud-ouest de l'Australie qui ont été décimées ou ont connu de sévères contrecoups dus à des vagues de chaleur. En ce qui concerne l'Océan Arctique, certes, il est possible d'observer une diminution importante du couvert de glace, ce qui pourrait être une opportunité pour le varech de monter dans des latitudes plus froides, mais il est important de noter que l'apport en eau douce qui découle de cette fonte, les sédiments qui y seront mélangés et l'apport en lumière, qui diminuerait considérablement, limitent de manière significative la productivité du varech et donc l'implantation de nouvelle forêt (Smale, 2020, p. 1451).

### 3.2 Acidification des océans et les conséquences sur les forêts de varech

L'acidification des océans est un problème qui touche toutes les eaux océaniques et dont les conséquences et leurs inextricables liens sur les écosystèmes ne sont pas encore connus (Steneck et al, 2016 ; Ling et al, 2020 ; Schlenger et al., 2021). Cette acidification s'explique par l'augmentation de la concentration de carbone qui modifie la concentration chimique, ce qui diminue le pH de l'eau, limitant ainsi la possibilité de croissance des espèces (Schlenger et al., 2021). À l'aide d'un logiciel de simulation, ces auteurs Schlenger et al. ont tenté d'étudier les possibles modifications des forêts de varech dans deux régions précises, soit à Monterey Bay en Californie et dans l'île de Isla Natividad à Baja California Mexico. Cette analyse visait principalement à déterminer l'importance de ce type de forêts au niveau de la conservation de la biodiversité et de leur valeur économique (Schlenger et al., 2021). L'acidification des océans affecte plusieurs mécanismes liés aux forêts de varech, soit leur production, à un lien direct avec le niveau de mortalité et la modification des interactions trophiques. Ces dernières ont été utilisées dans le cadre de la recherche ci-haut mentionnée comme paramètre dans l'analyse des modifications qui se produisent dans les forêts de varech. Les auteurs ont noté qu'avec une baisse du pH de 0,5 sur 50 ans, il y avait dans cette région une augmentation de 16 % à 71 % du varech, principalement dû au fait que les prédateurs de varech sont très affectés par l'acidification de l'eau (voir annexe C) (Schlenger et al., 2021, p. 12). Toutefois, le stress ressenti dans l'écosystème est vécu différemment par tous, causant dans certains cas des changements parfois importants (Schlenger et al., 2021, p. 16).

Sachant qu'il est pratiquement impossible de modifier le pH d'un écosystème complet et d'en étudier concrètement les effets, les chercheurs ont aussi comparé leurs résultats avec des événements climatiques particuliers, tels que des explosions volcaniques, qui ont servi de référence pour comparer les résultats de leurs simulations (Schlenger et al., 2021, p. 18). Avec une diminution à 7,8 de pH, les chercheurs Porzio et al. ont observé une diminution de 5 % des macroalgues tandis que certaines espèces ont, quant à elles, connu une croissance (Schlenger et al., 2021, p. 18). D'autres études du même type sont aussi discutées dans ce document et « [...] *highlights the importance of indirect trophic interactions playing a major role alongside the direct effects of OA* » (Schlenger et al., 2021, p. 18). Ces auteurs expliquent aussi que la complexité des systèmes naturels peut exacerber l'acidification des océans, mais également que ce phénomène peut avoir des conséquences beaucoup plus importantes sur la santé et la stabilité des écosystèmes (Ling et al., 2020; Schlenger et al., 2021, p. 19). La conservation et la protection des forêts de varech peuvent néanmoins faire partie des solutions (Eger et al., 2023 p. 7). Bien évidemment, les conséquences de l'acidification des océans ne sont pas encore toutes connues et les corrélations entre cette acidification et la hausse des températures n'ont pu encore être toutes étudiées, mais il reste que des changements importants dans les forêts de varech se produisent, et ce, surtout au niveau de l'équilibre de la biodiversité.

### 3.3 L'activité anthropique et les pratiques d'aménagement côtier

Les changements climatiques ainsi que les pratiques d'aménagement du territoire en milieu côtier peuvent paraître comme étant deux choses totalement distinctes. Or, cette hausse des températures de l'eau et de l'air provoque une montée des eaux qui s'avère très importante même si elle est graduelle. La montée des eaux modifie considérablement les milieux côtiers, car l'érosion des côtes affecte déjà et affectera les côtes un peu partout sur le globe (Steneck et al., 2002, p. 451). Cette érosion provoque d'importants niveaux de turbidité dans l'eau, ce qui pourrait avoir des conséquences sur la reproductivité du varech ainsi que sur sa capacité à faire de la photosynthèse (*Ib.*). De plus, l'augmentation de nouveaux types de substrats dans les fonds marins pourrait limiter la présence des substrats qui sont les plus favorables à la pousse du varech (*Ib.*).

Dans leur étude intitulée « *Recovering a lost baseline: missing kelp forests from a metropolitan coast*, Connell et al. expliquent que, dans des milieux côtiers où la population humaine est installée depuis des millénaires et qui augmentent constamment (on peut penser à la Méditerranée ou même l'Europe en général), on observe un retrait important et quasi permanent des forêts de varech (Levin et Lubchenco,

2008 ; Connell et *al.*, 2008 ; Pita et Freire, 2019). Ces auteurs fondent leurs recherches sur les milieux « *subtidal* » au sud de l’Australie, plus précisément sur les côtes de la métropole Adélaïde, et qui ont été étudiés par des plongeurs scientifiques (*ib.*). Ces milieux connaissent un retrait des forêts de varech important. Cette région a connu dès le début des années 1990 une importante période de développement urbain le long des côtes rocheuses où se trouvaient d’importantes forêts de varech (Connell et *al.*, 2008, p. 65). La source primaire de pollution vient alors des usines de traitement des eaux qui traite de plus en plus d’eaux usées (dont une traite jusqu’à 103 891 millions de litres) (Connell et *al.*, 2008, p. 65). Dans le cadre de cette recherche, ces auteurs ont découvert que la perte de couverture d’algue était en fait liée à l’agrandissement des métropoles. Ils expliquent que le couvert de varech qui était autrefois présent est remplacé par des algues formant des pelouses (Connell et *al.*, 2008, p. 69). Ils ont soulevé que les contaminants et les rejets d’eau des villes n’ont pas une incidence directe sur le varech, mais favorisent la pousse des algues formant des pelouses, qui n’emmagasinent alors pas d’azote comme le ferait le varech, mais qui tolèrent des eaux où la turbidité et la teneur en contaminant est élevée (Connell et *al.*, 2008, p. 70). De surcroît, l’accumulation de sédiments limite la reproduction du varech (Connell et *al.*, 2008, p. 70). La population riveraine sur les milieux côtiers n’a pas de répercussion directe sur la canopée des forêts de varech, mais la modification des paramètres de l’eau avec une plus grande présence d’azote et de sédiments avantagera plutôt la pousse d’autres espèces et c’est cette modification qui déséquilibre l’écosystème du milieu.

L’aménagement des espaces riverains joue un rôle dans la modification des conditions de l’eau de mer. Sachant que les pratiques sont souvent reliées à la perméabilisation du sol, l’eau de ruissellement, remplie de contaminants et de particules autres, se fraiera un chemin vers l’océan, ce qui contribuera à la modification de la turbidité mentionnée plus haut (Steneck et *al.*, 2002, p. 452 ; Levin et Lubchenco, 2008). Cela force les forêts de varech à migrer ou à réduire leur territoire, car sinon elles ne sont plus dans des emplacements qui présentent les conditions optimales pour leur croissance (*ib.*). Certains contaminants exercent une influence sur la productivité du varech et se retrouvent dans les eaux rejetées par les milieux urbains, entre autres par les eaux usées. Quelques études au Japon ont aussi démontré que la déforestation terrestre ainsi que l’endommagement de rivières importantes diminuent l’apport en fer, ce qui a une incidence importante sur la croissance du varech comme il a besoin de cette ressource, et laissera place à une dominance dans certains secteurs aux coraux (Steneck et *al.*, 2002, p. 452).

### 3.4 Les conséquences des déversements pétroliers sur les milieux côtiers

Les forêts de varech, tel qu'il a été présenté dans le chapitre 2.6, sont des secteurs où la pêche, le transport de marchandises, etc., fait partie des nombreuses activités économiques qui prennent place autour ou dans ces milieux de vie. Avec ce type d'activités vient aussi le risque de possibles déversements pétroliers (Steneck et *al.*, 2002 ; Menzel et *al.*, 2013). La résilience des forêts de varech a été notée à la suite d'un déversement vers la fin des années 1980 d'un navire-citerne pétrolier portant le nom de *Exxon Valdez* en Alaska (Steneck et *al.*, 2002, p. 452). Le varech entourant le lieu de déversement a mis 2 ans à se remettre de cette urgence environnementale. En effet, ce sont principalement les mammifères marins qui ont besoin de remonter à la surface pour respirer qui ont été grandement touchés par cette catastrophe, pensons aux loutres de mer, par exemple. Le grand nombre de décès dans la population des loutres de mer fréquentant les forêts de varech touchées par le déversement a modifié les interactions entre les espèces du milieu (Steneck et *al.*, 2002, p. 452). Cet exemple n'est qu'un parmi tant d'autres. Au Canada, on notait en 2021 une totalité de déversement en milieu marin allant jusqu'à 17 000 litres (ECCC, 2021). Ces déversements, qui malheureusement augmentent chaque année, peuvent avoir des répercussions à très long terme sur l'environnement de même que sur les secteurs économiques qui dépendent de ces milieux (ECCC, 2021). Le Canada s'est donc muni de plusieurs programmes de protection et de surveillance permettant de s'assurer du suivi ainsi que du nettoyage à la suite de tels événements.

### 3.5 Surpêche et pêche récréative

Les forêts de varech sont grandement touchées par tous les changements qui se produisent dans la chaîne alimentaire. Dans les nombreuses régions étudiées, une constatation scientifique reste constante : lorsque certaines espèces sont visées par de la surpêche, on observe un important changement dans la composition (Eisaguirre et *al.*, 2020), et dans ce cas de sujet d'étude dans les forêts de varech (Steneck et *al.*, 2002 ; Connell et *al.*, 2008, p. 69 ; Krumhansl et *al.*, 2016 ; Morris et *al.*, 2020). Les pratiques de pêche non durable peuvent même mener à l'extinction de certaines espèces de même que laisser place à des espèces invasives qui remplaceront les espèces indigènes (Steneck et *al.*, 2002, p. 452, Steneck et *al.*, 2016). Cette surpêche d'espèce prédatrice permet alors aux oursins d'augmenter sans crainte de sorte qu'ils deviennent une menace importante pour les forêts de varech. Ces faits ne sont pas observés depuis seulement quelques décennies, mais bien depuis des siècles. En effet, au début des années 1800, il a été prouvé que la chasse aux loutres de mer par les communautés autochtones pour le troc de fourrure a eu une répercussion sur la déforestation des forêts de varech en Californie (Steneck et *al.*, 2002, p. 448). Certes, il y a eu un écart temporel entre l'observation de déforestation et l'extinction des loutres de mer,

mais n'ayant plus de prédateurs, les oursins se sont tranquillement surmultipliés et ce phénomène a grandement changé la chaîne alimentaire de ce milieu de vie (Steneck et *al.*, 2002, p. 448). La même chose a été observée avec les forêts de varech qui longent les côtes de l'Alaska, car, non seulement les populations de loutres de mer ont largement diminué avec la traite des fourrures, mais le changement d'alimentation des orques des lions de mer vers les loutres de mer a grandement dévasté les forêts de varech (Steneck et *al.*, 2002, p. 446). Ce phénomène de surpêche a aussi été observé pour d'autres espèces telles que la morue d'Atlantique, la langouste et le labre californien (Steneck et *al.*, 2002). Un dysfonctionnement au niveau trophique important peut survenir au sein de ces forêts d'algues, puis cette surabondance d'espèces consommatrices de ces forêts peut mener à des stades de mortalité importants liés à des vagues de maladies (Steneck et *al.*, 2002, p. 452).

On parle beaucoup des répercussions de la pêche commerciale, mais la pêche récréative a une influence sur les forêts de varech. Certaines de ces techniques de pêche, comme la pêche à la perche, ont été des domaines ciblés par des recherches permettant de mieux comprendre leurs retombées sur la chaîne alimentaire (Pita et Freire, 2019, p. 19). En effet, ce type de pêche sportive vise principalement les espèces prédatrices se trouvant dans le haut de la chaîne alimentaire, ce qui déséquilibre l'écosystème à plus petite échelle (Pita et Freire, 2019, p. 19). Les chercheurs lus ont concentré leurs études dans le sud de l'Europe et ils ont observé que les pêcheurs se chamaillent non seulement pour l'espace de pêche, mais aussi pour la ressource.

### 3.6 Débalancement des écosystèmes

Les changements climatiques ont des conséquences directes sur les écosystèmes. La hausse de température des eaux océaniques, signalée précédemment dans le texte, est un problème majeur, qui peut s'avérer létal pour les forêts de varech. Cependant, ces mêmes hausses profitent à d'autres espèces. Le sous-chapitre qui vient traite des déséquilibres des écosystèmes côtiers et de l'augmentation des populations de certaines espèces animales.

#### 3.6.1 Les prédateurs des varechs : les poissons herbivores et les oursins

Comme le mentionnait Dan A. Smale dans son article intitulé *Impacts of ocean warming on kelp ecosystems*, les poissons herbivores et les oursins sont deux classes d'espèces qui peuvent être une grande menace pour les forêts de varech. Comme il a été mentionné, les changements climatiques ont des conséquences directes sur la reproduction ainsi que sur la répartition des forêts de varech. En effet, ces

espèces sont sensibles au réchauffement de l'eau, ce qui provoque une importante mortalité et les rend plus vulnérables aux prédateurs. Les poissons herbivores ainsi que les oursins sont des espèces qui consomment le varech (Eisaguirre et *al.*, 2020 ; Cortese, 2024), ce qui devient problématique lors des périodes de reproduction de l'algue. Ils vont en consommer les pousses, ce qui en limite considérablement les possibilités de survie (Chapman, 1981; Eisaguirre et *al.*, 2020). Lorsque les forêts se régénèrent après des évènements ayant causé une destruction importante (tempêtes, El Niño, etc.), les nouvelles pousses sont des proies idéales pour les poissons et les oursins, ce qui crée une énorme pression pour la régénération après la déforestation (Smale, 2020). En effet, la reproduction des poissons herbivores est favorisée par la surpêche des poissons carnivores, ce qui leur permet de se nourrir plus abondamment des varechs (Smale, 2020). Pour ce qui est des oursins, ils vont quant à eux venir créer des barrières en s'empilant les uns sur les autres et vont tout consommer sur leurs passages (Eisaguirre et *al.*, 2020). La densité minimale d'oursins qui peut déclencher des changements de phases entre des forêts de varech saines et des forêts non productives se situe entre 11 et 14 oursins par mètre carré (Filbee-Dexter and Scheibling, 2014; Ling et *al.*, 2015 ; Dunn and Hovel, 2019; Eisaguirre et *al.*, 2020). Ces changements importants de densité de population peuvent avoir un impact important sur la survie des forêts de varech et de leur niveau de productivité.

### 3.6.2 La présence d'espèces invasives

Plusieurs facteurs peuvent expliquer la présence d'espèces invasives dans des régions où le varech était dominant. Premièrement, la surpêche en est l'une des principales raisons (chap. 3.5). En effet, elle cause des déséquilibres écologiques entre les espèces dans la chaîne alimentaire, ce qui modifie considérablement les milieux de vie des espèces. Plus précisément, dans le cadre de la surpêche, les auteurs Steneck et *al.* écrivaient en 2002 que le nord-ouest de l'Atlantique était envahi par des algues vertes portant le nom de *Codium fragile*, qui sont de grands compétiteurs des forêts de varech et dont la présence s'explique par des percées dans la canopée permettant à ce type d'espèce de s'installer (Steneck et *al.*, 2002, p. 452). Il n'y a pas que dans le règne végétal que s'installe cette compétition, mais aussi au niveau des crustacés/invertébrés : « *Species such as the common periwinkle (Littorina littorea) and the green and shore crabs (Carcinus maenas, Hemigrapsus sanguineus) have not only invaded, but in many cases have come to dominate the ecosystem* » (Steneck et Carlton, 2001). Ceux-ci viennent remplacer les espèces qui vivent habituellement dans les écosystèmes créés par les forêts de varech et modifient à long terme la possibilité de rétablissement.

### 3.7 Conclusion de chapitre

La hausse des températures à un impact important sur les forêts de varech et les espèces qui y vivent. Cela modifie la répartition planétaire de ces forêts et limite leurs capacités de reproduction. Nous ne connaissons pas encore tous les impacts de l'acidification des océans, mais il est notable que celui-ci ait une incidence d'abord sur la structure de la chaîne alimentaire connue, plus précisément sur certaines espèces. Les activités anthropiques telles que la pêche et la circulation de bateaux commerciales qui ne cessent d'augmenter peuvent accroître les risques de déversements pétroliers. La surpêche et la pêche récréative ont aussi un impact sur les forêts de varech considérant que les espèces prédatrices dans la chaîne alimentaire sont souvent la cible de ce secteur économique. Cela apporte des balancements importants dans la chaîne alimentaire, laissant les oursins et les poissons herbivores en grand nombre qui consomme le varech en grande quantité. Enfin, la présence d'espèces invasives végétales vient parfois dominer certains secteurs où l'on retrouvait autrefois de grandes forêts de varech.

## CHAPITRE 4

### Quel avenir pour les forêts de varech ?

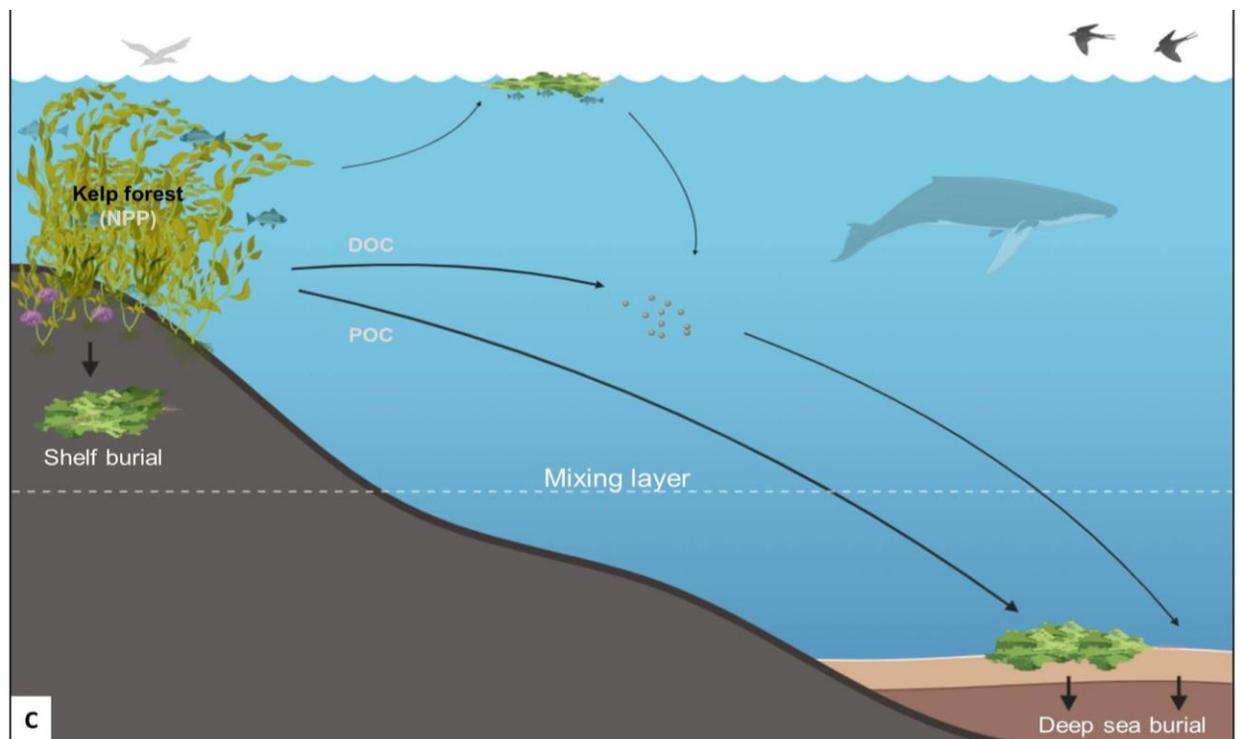
#### 4.1 Séquestration de carbone : l'un des rôles du varech

Les forêts de varech sont des milieux ayant un grand potentiel de captation de carbone, souvent discuté sous le nom de carbone bleu. Ce potentiel de rétention se trouve majoritairement dans les forêts tempérées de varech qui poussent dans les milieux côtiers (Wright et *al.*, 2022 ; Eger et *al.*, 2023 ; Liu et *al.*, 2024). En 1995, on calculait la mesure de la vitesse de fixation de carbone dans le processus de photosynthèse à 2,5 kg de carbone par m<sup>2</sup> annuellement à Pêches et Océans Canada (MPO, 2019). Il est possible aussi de calculer la valeur économique par hectare et par année, pour la séquestration d'azote, de carbone ainsi que de phosphore. Les *Ecklonia* ont une valeur de 36 109 \$, les *Laminaria/Saccharina* valent 113 681 \$ et les *Nereocystis* valent 79 956 \$ (Eger et *al.*, 2023 p. 3). Ce type de séquestration de carbone a une valeur économique importante et dépend de la région dans laquelle elle a lieu : « *Using a 10% sequestration rate estimate, the minimum regional average of carbon sequestration per m<sup>2</sup> per year was 31 g (Ecklonia in the South Atlantic) while the maximum was 214 g (Macrocystis in the Southern Ocean). Across genera, the average value (g/m<sup>2</sup>/year) per genus was 75 (Ecklonia), 109 (Laminaria/Saccharina), 151 (Lessonia), 101 (Macrocystis), 82 (Nereocystis)* » (Eger et *al.*, 2023 p. 3). Cette quantité de séquestration est très importante et n'est pas à négliger. En utilisant un pourcentage de séquestration de 10 % sur six (6) espèces de varech (*Ecklonia*, *Lessonia*, *Laminaria*, *Saccharina*, *Macrocystis*, *Nereocystis*), les auteurs Eger et *al.* estiment que les forêts de varech peuvent séquestrer entre 31 et 214 g de carbone, par m<sup>2</sup> par année. Certes, ces données varient selon l'emplacement, l'année, les conditions environnementales, etc. (Eger et *al.*, 2023 p. 6).

Les auteurs Wright et *al.* ont rédigé un article dans le *Global Change Biology* dans lequel les auteurs tentaient de comprendre comment le varech captait et séquestrait ce carbone, en le déposant dans les fonds marins lors de la décomposition de l'algue (Bayley et *al.*, 2021 ; Liu et *al.*, 2024). Liu et *al.* parlent dans leur article *Blue carbon accounting to monitor coastal blue carbon ecosystems* de « *Carbon sink* », soutient la capacité d'entreposer le carbone sur des centaines d'années dans les sédiments de fond marin. Wright et *al.*, pour soutenir leurs propos, ont basé leurs recherches sur les forêts de varech près de l'Angleterre, qui en vivent déjà les répercussions par l'augmentation de la température de l'eau et dans lesquelles on observe déjà un changement de composition de la forêt qui est tranquillement dominée par des espèces de varech tolérant de plus chaudes températures (voir Annexe B pour une représentation

géographique de cette migration) (Wright et *al.*, 2022). Cette capacité d'adaptation des espèces de varech vient alors soutenir cette possibilité d'entreposage de carbone dans les fonds marins.

Wright et *al.* expliquent le processus de décomposition et de « *remineralization* » comme étant la consommation du varech par les petits détritivores et la décomposition par les microbactéries (Wright et *al.*, 2022). Les macroalgues, qui sont dans ce cas-ci le varech, ont tendance à se décomposer plus lentement si on les compare au phytoplancton et aux herbiers marins. Il est possible d'observer une corrélation entre la lenteur de décomposition et les plantes qui ont des rapports de nutrition de carbone plus élevés, une croissance plus lente, etc. (Wright et *al.*, 2022). Cette décomposition est aussi plus lente, car le varech se déracinera, puis se dispersera et parcourra des centaines de kilomètres à cause des courants (Wright et *al.*, 2022). Celles-ci sont représentées dans la figure 7, où il est possible d'observer les différentes possibilités de séquestration (Krause-Jensen et Duarte, 2016 ; Bailey et *al.*, 2021). Wright et *al.* ont noté des différences de captation de carbone selon le type d'espèce de macroalgue, puis selon la saison. Pour certaines espèces, la séquestration de carbone se faisait tout au long de l'année, tandis que pour d'autres, ils notaient des hausses en automne (Wright et *al.*, 2022). À la suite de ces nombreuses comparaisons et analyses de capacité de séquestration de carbone, les auteurs ont conclu quant aux forêts de varech que : « *Hence, we predict that through a vicious circle, climate-driven range shifts may lead to a local reduction of a climate change mitigating ecosystem service* » (Wright et *al.*, 2022, p. 5524). Les forêts de varech vivant dans des eaux froides ont, selon cette étude, beaucoup plus de capacité de séquestration, car leurs périodes de décomposition sont beaucoup plus lentes. En modélisant les effets des changements climatiques sur différents paramètres tels que la tolérance des espèces de varech à ce type de changement basé sur des températures historiques et les prédictions de températures favorisant la captation de carbone, les chercheurs estiment que les capacités de séquestration diminuent de 0,17 % par année et vont malheureusement continuer de diminuer. Les espèces de varech boréal vont certes continuer à atteindre les fonds de sédiment de carbone, mais les mesures de mitigations locales comptant sur la captation de carbone ne permettront pas la même séquestration qu'auparavant (Wright et *al.*, 2022). Il est aussi important de noter que toute cette énergie qui est nécessaire à la séquestration de carbone génère de la chaleur, ce qui augmente aussi la quantité de bactéries dans l'eau et accélère le processus de décomposition de la plante (Wright et *al.*, 2022).



**Figure 7 Diagramme représentant la séquestration de carbone**

Source : Tiré de Krause-Jensen et Duarte (2016)

Avec la fonte du couvert glaciaire aux deux pôles, certains pourraient penser que de nouvelles régions pourraient potentiellement accueillir des espèces de varech qui préfèrent les eaux froides. Si tel est le cas, et que 118 500 km<sup>2</sup> de forêts de varech s'étendaient en Arctique, alors la séquestration de carbone par cette espèce pourrait être stabilisée, voire augmentée (Wright et *al.*, 2022). Toutefois, cette fonte des glaces vient avec une modification de la salinité de l'eau, une fonte du pergélisol et une érosion importante des côtes, ce qui modifiera considérablement la turbidité de l'eau et diminuera, par le fait même, les conditions de mise en place des forêts de varech (Wright et *al.*, 2022). Afin de pouvoir conserver cette possibilité de carbone bleu par les forêts de varech, il faudra continuer de conserver ces écosystèmes au sein des aires protégées marines, de même que de travailler sur des techniques de reforestation ainsi que de continuer à réglementer les rejets des villes (Wright et *al.*, 2022 ; Liu et al, 2024). Les auteurs Eger et *al.* soulignent ceci au sujet de la captation de carbone : « *This outcome suggests people should use caution when promoting carbon capture as a purely economic incentive for restoring or protecting kelp forests or indeed other marine ecosystem* » (Eger et *al.*, 2023 p. 6).

## 4.2 La conservation et les mesures qui la soutiennent

Dans le cadre de cette recherche, nous avons remarqué que les auteurs consultés tiennent le même discours scientifique : sachant que les forêts de varech sont des écosystèmes qui vivent près des côtes, les pratiques d'aménagement des milieux côtiers doivent tenir compte des besoins et des particularités de ces dernières, et ce, dans l'objectif de limiter au maximum, voir éviter les possibles conséquences des mauvaises pratiques (Konig, 1995 ; Wright et *al.*, 2022). Cela permettrait d'empêcher les divers contaminants et l'excès de nutriments de modifier la turbidité ainsi que les paramètres de l'eau (Schlenger et *al.*, 2021, p. 20). Des chercheurs comme Eger et *al.* soulignent néanmoins que le manque de reconnaissance de l'importance économique et culturelle du varech devient une barrière pour la conservation et la gestion des ressources naturelles en son sein (Eger et *al.*, 2023, p. 2 et 7). Ici seront présentées trois méthodes/pratiques de conservation des forêts de varech.

### 4.2.1 La gestion des eaux usées

Les modifications des paramètres de l'eau sont des facteurs de stress immenses pour les végétaux aquatiques comme les forêts de varech. Ce stress peut même causer une mortalité des plants. Les eaux rejetées par les milieux urbanisés, tant les eaux usées que les eaux de ruissellement, peuvent être composées de plusieurs sortes de contaminants et pathogènes, mais aussi de débris et de différents types de déchets (ECCC, 2017). La gestion des eaux usées au Canada est du ressort du ministère Environnement et Changement Climatique Canada (ECCC) à travers deux lois, soit la *Loi canadienne sur la protection de l'Environnement* (1999), ainsi que la *Loi sur les pêches*, qui instaure des réglementations et des barèmes que les différentes municipalités se doivent de respecter au sein de leurs installations (ECCC, 2017).

Aux États-Unis, les chercheurs Newton et McClary (2019) expliquent que ce sont 121 milliards de litres d'eaux usées et d'eaux de ruissellement qui sont retournés dans les écosystèmes par jour. À ce chiffre s'ajoutent 3,4 milliards de litres d'eaux contaminées qui n'arrivent jamais aux usines de traitement (Newton et McClary, 2019). Ces eaux contaminées, qui sont remplies de micro-organismes nuisibles pour l'environnement, s'accumulent en quantité importante dans les sédiments (Newton et McClary, 2019). Dans le sud de la Floride, une étude a démontré les conséquences des microbiomes sur les bancs de coraux, augmentant considérablement leurs chances de développer des infections (Staley et *al.*, 2017). Ces mesures et cette réglementation stricte peuvent contribuer à limiter les répercussions des changements climatiques à l'échelle locale et sur les écosystèmes côtiers (Schlenger et *al.*, 2021, p. 20).

#### 4.2.2 Les aires marines protégées

Afin de mieux protéger les forêts de varech, plusieurs instances gouvernementales ont créé des aires marines protégées (Marine Protected Areas [MPAs]). Ces milieux peuvent jouer un rôle important dans la conservation des milieux riches en biodiversité qui possèdent des écosystèmes complexes (Pita et Freire, 2019, p. 19 ; Eisaguirre et *al.*, 2020 ; Schlenger et *al.*, 2021, p. 20 ; Eger et *al.*, 2022 ; Cortese, 2024). Ce sont en fait des outils de gestion et de conservation essentiels qui permettent un contrôle sur le secteur économique des pêches (Pita et Freire, 2019, p. 19). Ces aires marines permettent une meilleure connectivité entre les différents milieux, ce qui aide de façon importante à soutenir les chaînes alimentaires en place et à maintenir la biodiversité (Schlenger et *al.*, 2021, p. 20). Ces milieux protégés peuvent aussi être l'occasion de mesurer la plantation de varech afin de conserver et agrandir les superficies de ces forêts dans l'objectif d'aider à lutter contre la déforestation locale, mais le coût pourrait être difficilement justifiable auprès de la population qui ne comprend pas toujours l'importance de ces milieux (Eger et *al.*, 2023, p. 2). C'est pourquoi il faut aussi faire des campagnes de sensibilisation et des activités de transfert des connaissances.

Certains chercheurs, comme Pita et Freire, soulignent que le maintien d'aires marines protégées comporte son lot de difficultés et instaure un doute au niveau de la viabilité de cette solution aux problèmes, qui sont, dans ce cas-ci, la pêche récréative dans le sud de l'Europe (Pita et Freire, 2019, p. 20). L'analyse de la chaîne alimentaire fait partie des pratiques et des analyses qui sont nécessaires pour mieux protéger et conserver la biodiversité de ces aires. La protection du *M. galloprovincialis*, le mollusque qui était au centre des recherches de Pita et Freire, permettra une chaîne alimentaire stable dans les aires marines protégées étudiées. Les instances responsables de cesdits plans s'assurent de la stabilité de l'espèce aussi par la réglementation des sites d'aquaculture cultivant ces mollusques (Pita et Freire, 2019, p. 25). De plus, l'identification d'espèces prédatrices joue un rôle clé qui permet de mieux contrôler les espèces herbivores (Pita et Freire, 2019, p. 25). En Amérique du Nord on observe que la pression de la pêche commerciale et sportive dans les aires marines protégées est complètement disparue, permettant à des espèces comme la langouste et labre californien de croître tant physiquement que sur le territoire (Lafferty, 2004 ; Hamilton et *al.*, 2010 ; Caselle et *al.*, 2015 ; Selden et *al.*, 2017 ; Eisaguirre et *Al.*, 2020).

#### 4.2.3 *Ecosystem-Based Management (EBM)*

Pour protéger les forêts de varech, d'autres méthodes peuvent aussi être mises en place, telles que l'*Ecosystem-Based Management (EBM)* (Hamilton et *al.*, 2022). Cette méthode de gestion, qui est

apparue au début des années 2000, est utilisée pour la gestion des pêches tant à petite échelle qu'à l'échelle d'un bassin versant (Hamilton et *al.*, 2022, p. 1). Cette méthode se base sur le concept des services écosystémiques dont bénéficient les populations se trouvant à proximité et tente de les préserver pour les générations futures (Levin et Lubchenco, 2008 ; Menzel et *al.*, 2013). L'objectif de cette méthode est de protéger, de maintenir et de restaurer les fonctions écosystémiques afin de s'assurer que les différentes activités soient soutenables à travers le temps (Levin et Lubchenco, 2008, p.28). Les gestionnaires des différents types de structures permettant la protection des forêts de varech doivent non seulement maintenir l'équilibre au sein de l'écosystème, mais aussi assurer la gestion de l'utilisation anthropique (Menzel et *al.*, 2013 ; Hamilton et *al.*, 2022, p. 2).

Trois (3) régions sont particulièrement étudiées dans le cadre de l'article d'Hamilton et *al.* portant le nom de *Ecosystem-based management for kelp forest ecosystems*, dont la Colombie-Britannique, où il est mis de l'avant que de nouvelles pratiques de gestion et de restauration des forêts de varech incluant les communautés autochtones portent le nom de Marine Planning Process (Hamilton et *al.*, 2022, p. 3). Cette initiative, portant aujourd'hui le nom de Planification spatiale marine du Canada, est soutenue par le ministère de Pêches et Océans (MPO) et tente de mettre en place une gestion intégrée des océans depuis 2018 en impliquant différents partenaires comme les nombreux ministères fédéraux, les gouvernements provinciaux et territoriaux, les gouvernements autochtones et les intervenants concernés à l'échelle locale (MPO, 2024). Cette pratique de gestion est aussi mise en place dans 75 autres pays en ayant pour but de protéger les espaces marins tout en atteignant les objectifs écologiques, économiques, sociaux et culturels liés à l'utilisation des océans et de ses ressources (MPO, 2024).

L'article d'Hamilton et *al.* a aussi permis d'identifier six (6) paramètres particuliers de la gestion des forêts de varech par l'*Ecosystem-Based Management*. D'abord, le paramètre un (1), soit « La surveillance à des échelles temporelles et spatiales biologiquement pertinentes », est soutenu par l'exemple présenté par les auteurs, soit la collaboration créée grâce au *Marine Planning Process* entre les différents partenaires (*First Nations Guardian Watchmen*, Chercheur de MPO, Université, etc.) au Canada. Celle-ci permet une surveillance et une analyse multidisciplinaire de ces écosystèmes (Hamilton et *al.*, 2022, p. 4). Le paramètre deux (2), soit « L'évaluation et le traitement des conséquences cumulatives », permet d'éviter ou de limiter les contreponds de ces derniers. Un exemple est donné par les auteurs de l'effondrement d'un écosystème complet de forêt de varech en Californie en 2015 qui selon les scientifiques était « [...] a perfect storm [...] ». La mise en place d'un *Ecosystem-Based Management* aurait

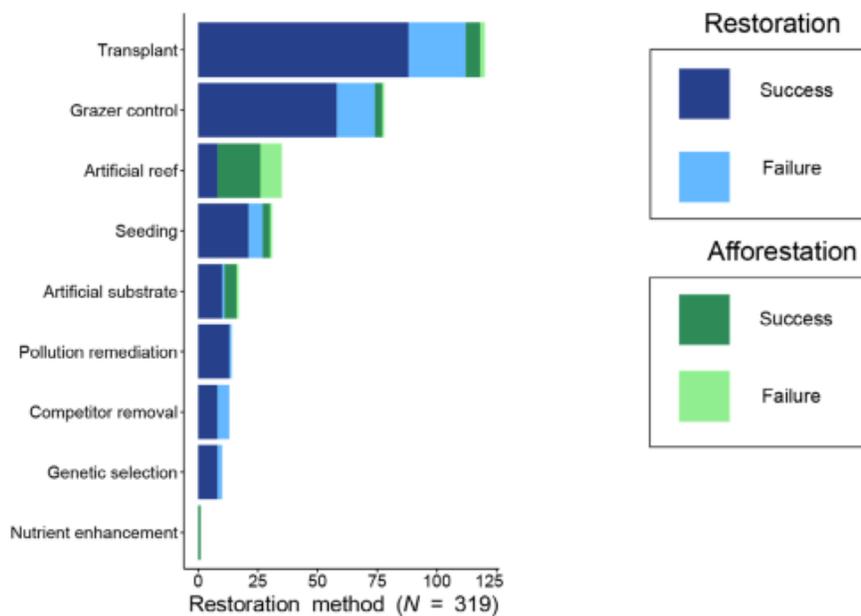
peut-être permis une meilleure gestion des problématiques, telle que la perte d'importants prédateurs qui a mené à une augmentation de la population d'oursins (Hamilton et *al.*, 2022, p. 5). Le paramètre trois (3), « La gestion des forêts à différentes échelles spatiales et institutionnelles », explique que la demande de gestion de ces milieux peut venir autant d'une directive gouvernementale que d'une pression sociale à l'échelle locale, comme c'est le cas des dépôts de déchets miniers dans les milieux côtiers du Chili. Les populations locales, voyant leur environnement se dégrader à une vitesse fulgurante, ont fait pression sur le gouvernement en place afin que la législation régule ce type d'activité et en ayant pour objectif de protéger leurs milieux côtiers (Hamilton et *al.*, 2022, p. 5). Pour ce qui est du paramètre quatre (4) « L'approche de la co-gestion », la gestion des forêts de varech en Colombie-Britannique en sont le parfait exemple, car elles sont gérées en partenariat avec le gouvernement provincial et les communautés autochtones. Cela a permis la mise en place de programmes hors du commun tel que l'expérimentation du retrait total de population d'oursins dans certaines régions de la province (Hamilton et *al.*, 2022, p. 5). Pour ce qui est du paramètre cinq (5) « L'utilisation d'une gestion adaptative rapide et se basant sur le principe de la précaution », on peut penser à la réglementation de la récolte du varech qui se doit d'être une gestion adaptative qui tient compte de l'information qui serait cumulée sur ces forêts de manière presque constante et qui permet une meilleure protection dans le temps de ces milieux (Hamilton et *al.*, 2022, p. 5). Puis enfin le paramètre six (6) « La gestion des connexions du réseau trophique » est présenté comme une gestion « *Top-Down* » de la chaîne alimentaire. Celle-ci est fortement suggérée par les auteurs, soulignant que la gestion de la chaîne alimentaire par le contrôle des prédateurs et des populations d'oursins permettrait de limiter l'effondrement d'écosystèmes comme en 2015, mais aussi d'assurer une meilleure synergie dans les chaînes alimentaires entre les différents types d'espèces (Hamilton et *al.*, 2022, p. 6).

Plusieurs nouvelles idées émergent de ce type de gestion telle que « [...] *breeding and out-planting heat tolerant strains of kelps, diverse techniques for kelp forest restoration, identifying whether Marine Planning Areas increase kelp forest resilience to climate change, creating 'spore banks' of genetic diversity for key species, recovering populations of key urchin predators, and protecting remnant patches of kelp* » (Hamilton et *al.*, 2022, p. 7). Ces différentes solutions visent la protection de ces milieux fragiles et permettront de limiter les différents éléments stressants et conséquences que le varech peut subir durant son existence.

### 4.3 La restauration des forêts de varech

La restauration d'un milieu, tel que le définit *The Society for Ecological Restoration (SER)* est « [...] *the process of assisting the recovery of an ecosystem that has been degraded, damaged or destroyed* » (Eger et al., 2022, p. 1451). Cette pratique peut être appliquée dans le cas des forêts de varech, en introduisant des espèces de varech plus résilientes dans des milieux où la croissance est faible ou inexistante (*ib.*) de même que dans des milieux où l'espèce est déjà présente. La conservation et la restauration des forêts de varech permettent le maintien d'écosystèmes marins qui sont fondamentaux et qui assurent des services écosystémiques incroyablement importants, tels que l'approvisionnement d'habitat, le cycle des éléments nutritifs et la séquestration du carbone (chapitre 4.1) (Eger et al. 2022, p. 1452).

Des traces de méthodes de restauration ont été trouvées au Japon et auraient commencé dans les années 1700. À l'époque, les pêcheurs détruisaient les barrières de corail en y lançant des roches pour favoriser la pousse de varech, qui était à récolter à des fins commerciales (Eger et al., 2022, p. 1454). Une autre méthode consistait en l'élimination des espèces compétitives à la main et à l'aide de machinerie, afin que les pousses de varech aient accès à la lumière (Eger et al., 2022, p. 1455). Aujourd'hui au Japon, une méthode préconisée est la mise en place de blocs de ciment dans des forêts de varech matures. À ces blocs s'attachent les nouvelles spores de varech et ils sont ensuite déplacés dans de nouveaux environnements (Fredriksen et al., 2020 ; Eger et al., 2022). Plusieurs autres pays ont eu recours à des méthodes ayant les mêmes objectifs. En Corée, les instances gouvernementales ont subventionné la création de forêts de varech en utilisant des matériaux artificiels qui permettront une récolte de varech plus abondante et stable (Eger et al., 2022, p. 1456). Aux États-Unis, plus précisément en Californie, plusieurs projets de plantation ont pris place à la fin des années 1950 et 1960 afin de lutter contre la récolte abusive du varech (Eger et al., 2022, p. 1457). Dans ce pays, des mesures législatives sont désormais en place pour soutenir la protection des écosystèmes côtiers, ce qui implique la restauration certes, mais aussi l'étude et le financement pour assurer cette protection (*ib.*). La figure 8 présente différentes méthodes de restauration et leur taux de succès et d'échec.



**Figure 8 Méthodes utilisées pour la restauration des forêts de varech**

Source : Tiré de Eger *et al.* (2022, p.1460)

Le succès de plusieurs projets de reforestation résulterait de la proximité de ces derniers à des forêts de varech matures et stables (Morris *et al.*, 2020 ; Eger *et al.*, 2022, p. 1462). Il est donc recommandé, par les auteurs Eger *et al.*, qui se basent sur les quelque 259 projets de restauration de forêts de varech étudiés pour cette recherche, de gérer les populations d’oursins à proximité de ces projets, puis de planter les semences ou plants de varechs à même une forêt ou a une très grande proximité de l’une d’entre elles.

Cinq (5) des méthodologies présentées dans la figure 8 ont été étudiées en profondeur dans le cadre de la recherche de Eger *et al.* : 1. la transplantation, qui consiste à la fixation de nouveaux plants sur du matériel artificiel, comme les blocs de béton mentionnés plus tôt, qui seront ensuite déposés dans les fonds marins (Fredriksen *et al.*, 2020 ; Eger *et al.*, 2022, p. 1463). La limite soulignée par les chercheurs est la difficulté d’implanter cette méthode à grande échelle, car elle implique des coûts de main-d’œuvre importants. D’autres méthodes, comme les « green gravel » sont alors mises de l’avant et consistent à une production en laboratoire de plants qui seront ensuite dispersés dans l’océan (Fredriksen *et al.*, 2020 ; Morris *et al.*, 2020 ; Eger *et al.*, 2022, p. 1463). 2. Il y a aussi l’ensemencement du varech en mer, qui est une méthode dont le taux de réussite est beaucoup plus bas, tel que présenté dans la figure 8 (Morris *et al.*, 2020 ; Fredriksen *et al.*, 2020 ; Eger *et al.*, 2022, p. 1463). L’utilisation de filets dans le fond de la mer pour préserver les différents plants est très onéreuse sachant que cette méthode nécessite plusieurs plongeurs dans l’océan (Fredriksen *et al.*, 2020 ; Eger *et al.*, 2022, p. 1464). 3. Le retrait d’espèces

compétitives, peut aussi être une option, mais elle ne peut s'appliquer qu'à petite échelle considérant l'effort de la main-d'œuvre et l'utilisation de machinerie pour retirer les autres espèces de l'océan (Morris et *al.*, 2020 ; Eger et *al.*, 2022, p. 1464). 4. Le contrôle des espèces herbivores problématiques est une méthode dont le taux de succès semble être assez élevé (voir figure 8). Cela consiste principalement au contrôle des oursins, soit en les éliminant ou en les relocalisant. Cependant, cette méthode peut être coûteuse en matière de main-d'œuvre, dangereuse selon les emplacements des populations d'oursins, dommageables pour les espèces environnantes. Elle constitue donc un grand défi puisqu'ensuite, il faut s'assurer du maintien du retrait des oursins (Eger et *al.*, 2022, p. 1464). L'une des solutions pour maintenir cette méthode est d'associer ce retrait d'espèces à un programme de pêche précis, encourageant le marché à s'intéresser à ladite espèce (Eger et *al.*, 2022, p. 1465). Toutefois, il reste que ce type de méthode doit être réglementé et surveillé, sachant qu'il peut aussi être une cause de déforestation de varech, comme il a été historiquement possible de l'observer aux États-Unis, au Japon, ainsi qu'en Australie (Eger et *al.*, 2022, p. 1465). 5. Les récifs artificiels sont aussi utilisés principalement dans les projets de création de forêts de varech et non pas en restauration, et permettent aux plants de s'ancrer sur des substrats artificiels qui sont déposés au fond de l'eau (Eger et *al.*, 2022, p. 1465).

Dans un futur proche, d'autres méthodes comme la sélection génétique de varechs plus résistants au changement de température pourraient être utilisées afin d'assurer la survie de l'espèce et faciliter la restauration des milieux. La création aussi de banques de semences de ces différentes espèces étant englobées sous le nom de varech est aussi considérée par les différents chercheurs (Eger et *al.*, 2022, p. 1466). Le développement et le maintien de microbiomes pourront aussi rendre le varech plus résistant aux différents facteurs de stress permettant aux plants de vivre (Eger et *al.*, 2022, p. 1466). Enfin, il faudra continuer de tenter de réhabiliter ces écosystèmes suite à de futures pertes et de nombreuses nouvelles méthodes semblent faire partie de la solution.

#### 4.4 Conclusion de ce chapitre

L'avenir des forêts de varech dépend des différentes mesures qui sont et peuvent être mises en place, tant à l'échelle locale ou globale. Ces dernières permettent de mieux conserver les forêts de varech qui sont des milieux remplis de biodiversité. Elles jouent un rôle important dans la séquestration de carbone, qui est l'une des méthodes clés en ce qui a trait de la lutte contre les changements climatiques. Les forêts de varech sont la cible de mesure de conservation, par exemple dans la mise en place de réglementation sur la gestion des rejets des eaux usées, ou dans le cadre de la création d'aires marines

protégées et des méthodes d'*Ecosystem-Based Management*. Ces forêts dépendent aussi des pratiques et des projets de restaurations qui vont permettre la survie de ces milieux.

## CONCLUSION

Les forêts de varech sont présentes sur la majorité des milieux côtiers sur le globe, permettant par sa structure d'être le milieu de vie pour des écosystèmes complexes. Plusieurs paramètres permettent aux espèces d'algues de grandir, soit la qualité et la température de l'eau, la quantité de luminosité ainsi que l'abondance des nutriments. Ces paramètres, lorsqu'ils sont modifiés, ont un impact sur la capacité de reproduction du varech. Les forêts de varech, qui sont d'important milieu de vie, accueillent une grande variété d'invertébrés, de poissons, d'oiseaux ainsi que des mammifères de toutes tailles, faisant de ces écosystèmes les plus importants en eau tempérée et froide. Ces forêts ont été grandement étudiées, plus particulièrement dans le nord de l'Océan Pacifique ainsi que dans le Nord de l'océan l'Atlantique, révélant non seulement le rôle historique, mais aussi l'importance économique des forêts de varech.

Ces écosystèmes complexes sont impactés de plusieurs façons par les changements climatiques, mais aussi par l'activité humaine. D'abord, la hausse des températures de l'eau vient modifier l'étendue de territoire qu'occupait auparavant le varech, limitant par le fait même la possibilité de reforestation. L'augmentation du nombre de tempêtes, ainsi que la force des vagues, vient détruire et déraciner les plants existants, ce qui réduira considérablement la superficie des forêts de varech. L'augmentation des contaminants et l'acidification de l'eau viendront modifier l'équilibre de la chaîne alimentaire, ce qui réduira considérablement le nombre de prédateurs et augmentera par le fait même le nombre de poissons consommateurs de varech. Les impacts des méthodes d'aménagements côtiers ainsi que les conséquences des déversements en milieux côtiers sont aussi des activités anthropiques qui peuvent modifier totalement ces écosystèmes complexes. La surpêche de certaines espèces prédatrices ainsi que la pêche récréative peuvent aussi modifier la chaîne alimentaire de sorte qu'il y ait un déséquilibre dans la chaîne alimentaire, permettant aux oursins ainsi qu'aux poissons herbivores de croître sans limites.

Les forêts de varech sont des milieux très importants lorsqu'il s'agit du calcul de la captation de carbone. Elles sont beaucoup plus productives que certaines forêts sur terre. Le carbone est emprisonné dans la chaîne alimentaire ainsi que dans les bas-fonds des océans. Plusieurs méthodes et mesures de conservation sont mises en place pour protéger ces écosystèmes, tels que la réglementation des rejets d'eaux usées, la mise en place d'aires marines protégées puis la création de méthode d'aménagement d'*Ecosystem-Based Management*. Toutes ces méthodes permettent, en outre, de contrôler une partie des polluants et de mettre en place des pratiques de pêches durables et limitées dans certains secteurs. Enfin,

plusieurs méthodes de restaurations ont été développées au fil du temps permettant une régénération de ces milieux dans certaines régions du globe.

Les forêts de varech sont des milieux importants pour la conservation de la biodiversité et qui sont intimement liés à l'existence de plusieurs autres espèces sur terre, comme le disait si bien Charles Darwin. Elles sont à la base de presque toutes les chaînes alimentaires des milieux côtiers, offre des milieux de vies complexes et leurs importances en grandement méconnues. On peut aussi dire qu'elles sont victimes des changements climatiques, mais les forêts de varech peuvent aussi faire partie de la solution lorsqu'il s'agit d'en limiter les impacts. Il sera important dans le futur de les prendre en considération tant dans l'enseignement, mais aussi dans la mise en place de méthode de conservation strictes ainsi que par une réglementation permettant la protection de ces dernières. L'objectif étant de conserver la biodiversité que nous retrouvons encore aujourd'hui dans ces forêts majestueuses de varech.

## ANNEXE A

Ocean	Region	Species	Response	Reference
Atlantic	Norway (65–68°N)	<i>Laminaria hyperborea</i>	Increased abundance	Rinde <i>et al.</i> (2014)
	Norway (58–43°N)	<i>Saccharina latissima</i>	Decreased abundance	Moy & Christie (2012)
	Ireland (54°N)	<i>Alaria esculenta</i>	Decreased abundance	Simkanin <i>et al.</i> (2005)
	Ireland (54°N)	<i>Laminaria ochroleuca</i>	Increased abundance, range expansion	Schoenrock <i>et al.</i> (2019)
	UK (50°N)	<i>L. ochroleuca</i>	Increased abundance, range expansion	Smale <i>et al.</i> (2015)
	UK (50°N)	<i>L. ochroleuca</i>	Increased abundance, range expansion	Teagle & Smale (2018)
	Spain/Portugal (36–43°N)	<i>S. latissima</i> , <i>L. hyperborea</i> , <i>L. ochroleuca</i> , <i>Saccorhiza</i> <i>polyschides</i> *	Decreased abundances, range contractions	Casado-Amezúa <i>et al.</i> (2019)
	Spain (43°N)	<i>L. hyperborea</i> , <i>L. ochroleuca</i>	Decreased abundances	Piñeiro-Corbeira <i>et al.</i> (2016)
	Spain (43°N)	<i>L. ochroleuca</i> , <i>S. polyschides</i> *	Decreased abundances, local extinctions	Diez <i>et al.</i> (2012)
	Spain (43°N)	<i>L. hyperborea</i> , <i>L. ochroleuca</i> , <i>S. polyschides</i> *	Decreased abundances, local extinctions	Voerman <i>et al.</i> (2013)
	Spain (43°N)	<i>L. ochroleuca</i> , <i>S. polyschides</i> *	Decreased abundances, local extinctions	Fernandez (2011)
	Portugal (36–41°N)	<i>S. latissima</i> , <i>L. hyperborea</i>	Stable abundances	Lima <i>et al.</i> (2007)
	Norway (37–39°N)	<i>S. polyschides</i> *	Decreased abundance, range contraction	Assis <i>et al.</i> (2013)
	Northwest Atlantic (42–52°N)	<i>A. esculenta</i> , <i>Laminaria digitata</i> , <i>Saccharina longicuris</i> <i>S. latissima</i>	Stable abundances	Merzouk & Johnson (2011)
	Nova Scotia (45°N)	<i>L. digitata</i> , <i>S. latissima</i> , <i>Agarum</i> <i>clathratum</i>	Decreased abundances	Filbee-Dexter <i>et al.</i> (2016)
	Gulf of Maine (43°N)	<i>S. latissimi</i>	Decreased abundances	Witman & Lamb (2018)
	Rhode Island (41°N)	<i>S. latissimi</i>	Decreased abundances	Feehan <i>et al.</i> (2019)
	Pacific	Japan (41°N)	<i>Laminaria japonica</i> , <i>Kjellmaniella</i> <i>crassifolia</i> , <i>Costaria costata</i> , <i>Undaria peterseniana</i> , <i>Ecklonia</i> <i>stolonifera</i> , <i>Undaria pinnatifida</i>	Decreased biomass & occurrence of cold water kelps, increased biomass & occurrence of warm water kelps
Japan (32°N)		<i>Ecklonia</i> spp.	Decreased abundance, range contraction	Kumagai <i>et al.</i> (2018)
Japan (32°N)		<i>Ecklonia</i> spp.	Decreased abundance	Tanaka <i>et al.</i> (2012)
East Australia (30°S)		<i>Ecklonia radiata</i>	Decreased abundance, local extinction	Vergés <i>et al.</i> (2016)
Southeast Australia (38°S)		<i>E. radiata</i>	Decreased abundance	Carnell & Keough (2019)
Tasmania (42°S)		<i>Macrocystis pyrifera</i>	Decreased abundance	Johnson <i>et al.</i> (2011)
Tasmania (42°S)		<i>E. radiata</i>	Decreased abundance	Ling (2008)
New Zealand (43°S)		<i>Durvillaea</i> spp.*	Decreased abundance, local extinction	Thomsen <i>et al.</i> (2019)
British Columbia (49°N)		<i>Alaria marginata</i> , <i>C. costata</i> , <i>Ecklonia</i> <i>arborea</i> , <i>Laminaria setchellii</i> , <i>Nereocystis luetkeana</i> , <i>Lessoniopsis</i> <i>littoralis</i> , <i>Saccharina sessilis</i> , <i>Egregia</i> <i>menziesi</i>	Decreased abundances of most kelps (not at all survey sites), stable abundance of stress tolerant kelps	Starko <i>et al.</i> (2019)
Washington State (48°N)		<i>N. luetkeana</i> , <i>M. pyrifera</i>	Stable abundances	Pfister <i>et al.</i> (2018)
California (34°N)		<i>M. pyrifera</i>	Stable abundance	Reed <i>et al.</i> (2016)
Baja California (30–32°N)		<i>M. pyrifera</i>	Decreased abundance	Arafeh-Dalmau <i>et al.</i> (2019)
Indian	West Australia (30°S)	<i>Scytothalia dorycarpa</i> *	Decreased abundance, range contraction	Smale & Wernberg (2013)
	West Australia (28–32°S)	<i>E. radiata</i>	Decreased abundance, range contraction	Wernberg <i>et al.</i> (2016)
Arctic	Greenland (74°N)	<i>S. latissima</i> , <i>S. longicuris</i>	Increased abundances, Increased biomass	Krause-Jensen <i>et al.</i> (2012)
	Svalbard (78°N)	<i>L. digitata</i>	Increased abundance, Increased biomass	Bartsch <i>et al.</i> (2016)

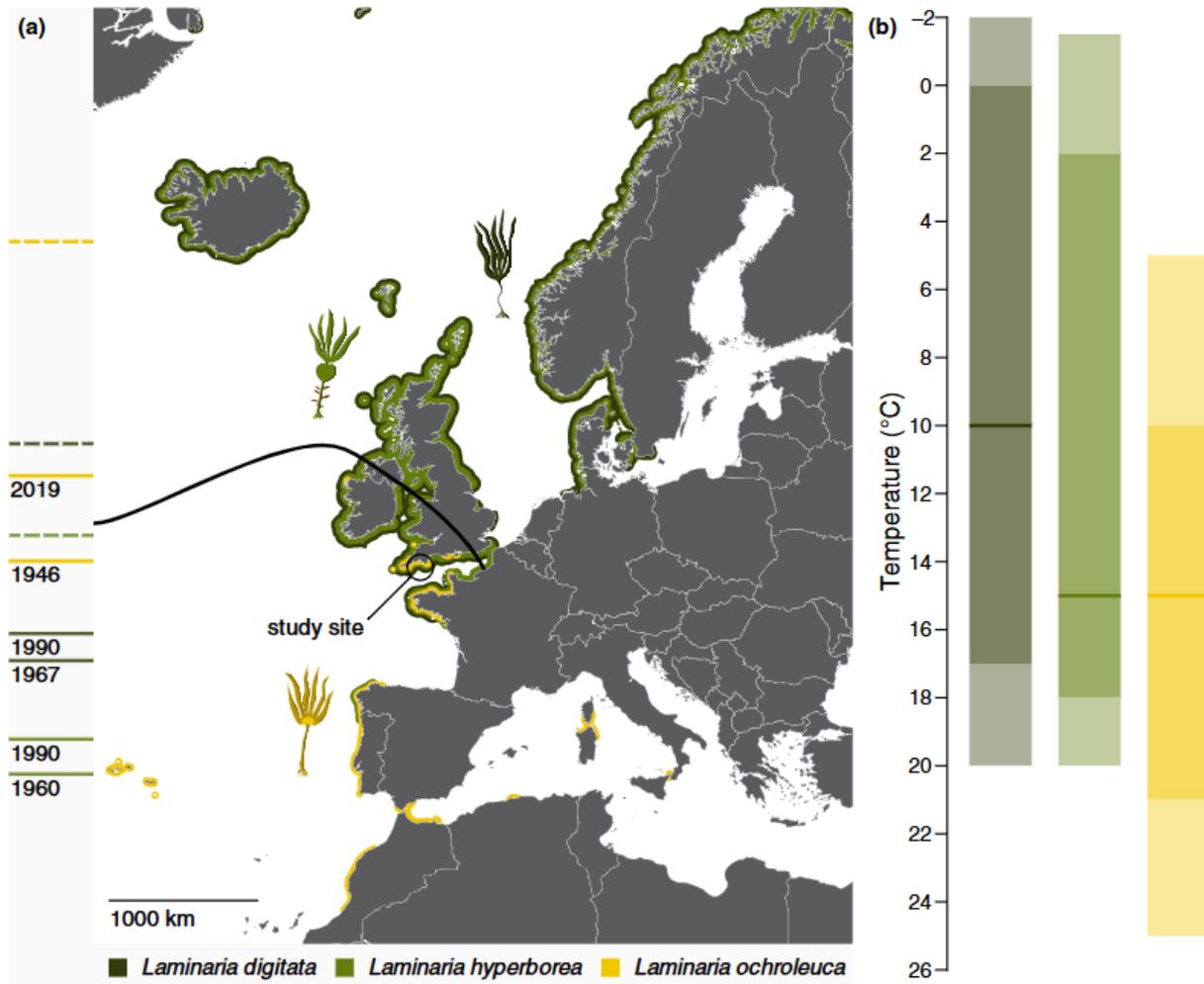
Species marked with an asterisk (\*) do not belong to the order Laminariales but serve a similar ecological function as kelps and are therefore included here.

**Figure 9 Exemples récents de changements observés (ou de manque de changement) dans la distribution et la structure des forêts de varech associé à la hausse des températures des océans**

Source : Tiré de Smale (2020)

## ANNEXE B

### Biogéographie des Laminaria au nord-est de l'océan Atlantique



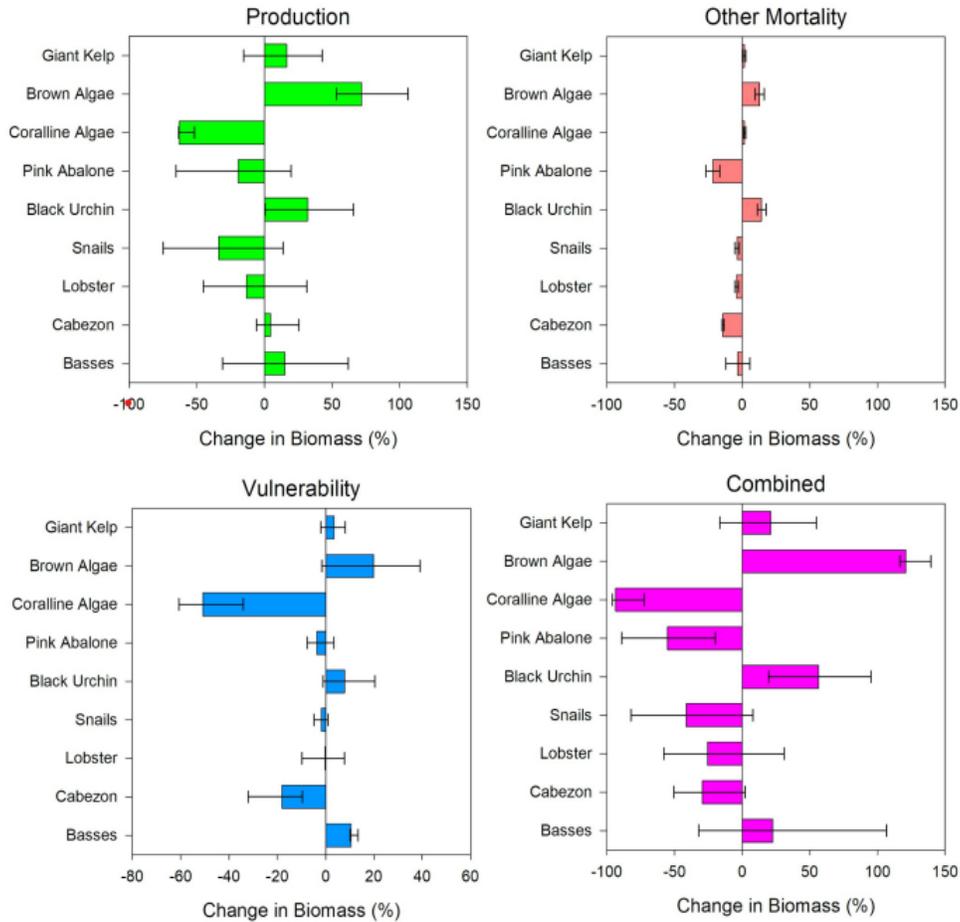
**Figure 10 Biogéographie des Laminaria au nord-est de l'océan Atlantique**

Source : Tiré de Wright et al. (2022, p.5516)

Biogeography of Northeast Atlantic Laminaria species. (a) Current approximate species distributions are shown as coloured coastlines. Past and future (SRES A2 or RCP8.5) trailing (*Laminaria digitata* and *Laminaria hyperborea*) or leading (*Laminaria ochroleuca*) range edges are indicated by solid and dashed lines in the left margin, respectively (Table S3). Kelp icons denote approximate range centres. The black line shows the northern biogeographic boundary of warm temperate kelps (Table S3). The map is based on the coordinate reference system WGS 84, rendered according to the Mercator projection and oriented north. (b) Underlying these species distributions are the species-specific temperature optima (lines) and tolerances (shaded areas) of sporophyte growth (light) and gametophyte fertility (dark; Table S4). RCP, representative concentration pathway (Wright et al., 2022, p.5516).

## ANNEXE C

### Simulation de l'impact de l'acidification de l'eau



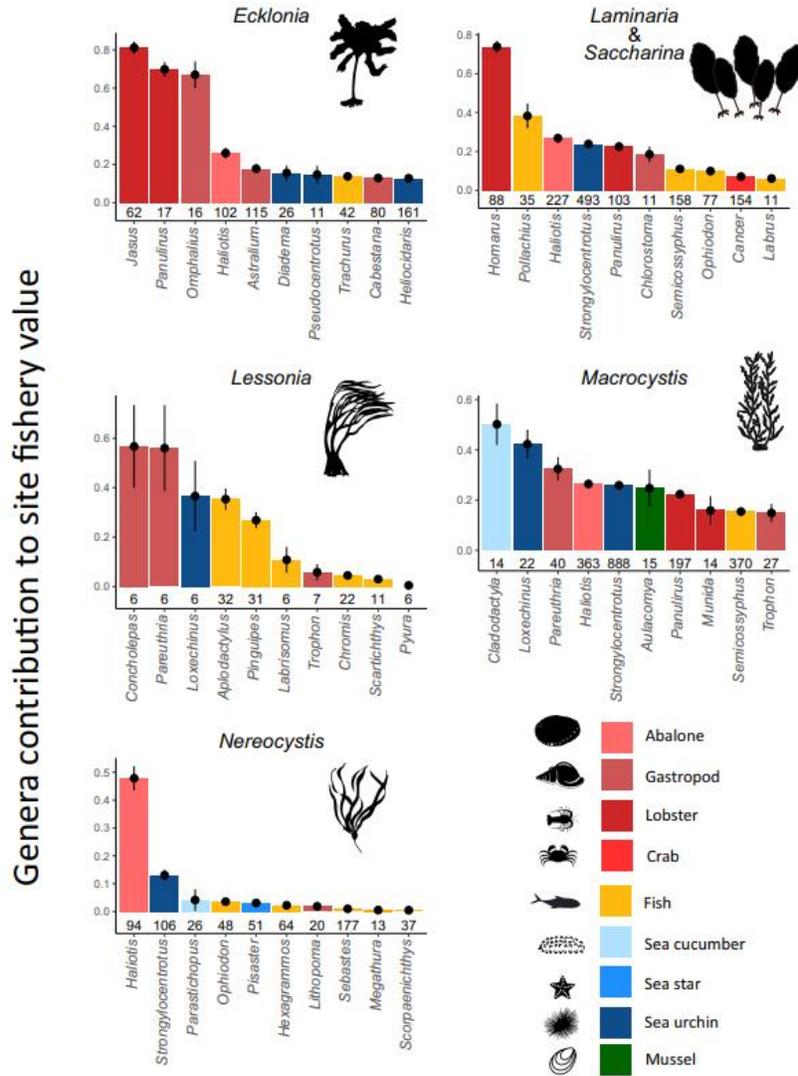
**Figure 11 Pourcentage de changement dans la biomasse des différentes espèces**

Source: Tiré de Schlenger *et al.* (2021, p.12)

Plot of percent biomass change across giant kelp, brown algae, coralline algae, pink abalone, snails, lobster, cabezon, and bass species and functional groups under production, other mortality, vulnerability and combined forcing. Error bars represent percent biomass change under upper and lower boundary survival scalars. Upper boundary scalar simulations are associated with error bars of the same directional change of the normal survival scalar while lower boundary simulations are associated with error bars of the opposite direction change (ex. *Macrocystis* and brown algae upper boundary simulations are represented by the right error bars, while snails and lobster upper boundary simulations are represented by the left error bars) (Schlenger *et al.*, 2021, p.12).

## ANNEXE D

### Contribution économique des différentes espèces d'algue



**Figure 12 Contribution des différentes espèces d'algue aux sites de pêches**

Source : Tiré de Eger et Al. (2023, p.4)

The mean proportion each genus contributed to a site's overall fisheries value per year, the lines represent plus and minus one standard error. The sample size is above the genera, n = number of surveys a genus appeared in, only genera that appeared in more than 10 surveys are represented (more than 5 for Lessonia due to fewer surveys). Image credit: Tim Carruthers, Integration and Application Network ([ian.umces.edu/media-library](http://ian.umces.edu/media-library)) for the Ecklonia, Laminaria, Lessonia, Macrocystis, Nereocystis, abalone, snail, lobster, crab, fish, sea cucumber, sea star, sea urchin, and mussel image (Eger et al., 2023, p.4)

## BIBLIOGRAPHIE

- Arriaga, O., Wawrzynkowski, P., Muguerza, N., Díez, I., González, J., Gorostiaga, J. M., ... & Becerro, M. A. (2024). Thermal refugia reinforce macroalgal resilience against climate change in the southeastern Bay of Biscay. *Global Change Biology*, 30(8), e17481.
- [IPCC, 2018] IPCC Global Warming of 1.5 C: An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5 C Above Pre-industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty, 2018 (in press)
- Daniel Bayley, Paul Brickle, Paul Brewin, Neil Golding, & Tara Pelembe. (2021). Valuation of kelp forest ecosystem services in the Falkland Islands: A case study integrating blue carbon sequestration potential. *One Ecosystem*, 6, 1–26. <https://doi.org/10.3897/oneeco.6.e62811>
- Behrens, M. D., and K. D. Lafferty (2004). Effects of marine reserves and urchin disease on southern Californian rocky reef communities. *Marine Ecology Progress Series* 279:129–139.
- Byrnes, J. E., B. J. Cardinale, and D. C. Reed (2013). Interactions between sea urchin grazing and prey diversity on temperate rocky reef communities. *Ecology* 94:1636–1646.
- Caselle, J. E., A. Rassweiler, S. L. Hamilton, and R. R. Warner (2015). Recovery trajectories of kelp forest animals are rapid yet spatially variable across a network of temperate marine protected areas. *Scientific Reports*. 5:1–14
- Cerceau-Larrival, M.-T. (1990). Le pollen : gamétophyte mâle. *Bulletin de La Société Botanique de France. Actualités Botaniques*, 137 (2), 7–30. <https://doi.org/10.1080/01811789.1990.10826996>
- Chaby, G., Senet, P., et Vaneau, M. (2009). Pansements pour des plaies aiguës ou chroniques. *Minerva*, 8 (1), 6-7.
- Chapman, A. (1981). Stability of sea urchin dominated barren grounds following destructive grazing of kelp in St. Margaret's Bay. Eastern Canada. *Marine Biology* 62:307–311.

Clifton. K (n.d.). *Biology 221 Lecture Outline*. Lewis and Clark College.

<https://webhost.lclark.edu/clifton/marbio/lectures/Lecture%2017.html>

Connell SD, Russell BD, Turner DJ, Shepherd SA, Kildea T, Miller D, Airoidi L, Cheshire A. (2008).

Recovering a lost baseline: missing kelp forests from a metropolitan coast. *Marine Ecology Progress Series* 360:63–72.

CORTESE, Mary. (2024) *Range Shifts and Altered Community Interactions in the Eastern Pacific Kelp*

*Forest Ecosystem*. Thèse de doctorat. Temple University

Darwin (1809-1882), C. *The Voyage of the Beagle* (Dutton, 1959).

David, B., Mooi, R., Néraudeau, D., Saucedo, T., et Villier, L. (2009). Évolution et radiations adaptatives chez les échinides. *Comptes Rendus - Palevol*, 8(2), 189–207.

<https://doi.org/10.1016/j.crpv.2008.09.001>

Dayton, P. K. (1985). The structure and regulation of some South American kelp communities. *Ecological Monographs* 55:447–468.

Department of Fisheries and Oceans Science (2007). Recovery potential assessment for northern fur seals (*Callorhinus ursinus*). Government of Canada <https://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/library-bibliotheque/337174.pdf>

Dumez, H. (2011). Faire une revue de littérature : pourquoi et comment ?. *Le libellio d'aegis*, 7 (2 -Eté), 15-27.

Dunn, R. P., and K. A. Hovel. (2019). Experiments reveal limited top-down control of key herbivores in southern California kelp forests. *Ecology* 100:1–10.

Eger, A. M., Marzinelli, E. M., Beas-Luna, R., Blain, C. O., Blamey, L. K., Byrnes, J. E. K., Carnell, P. E., Choi, C. G., Helsing-Lewis, M., Kim, K. Y., Kumagai, N. H., Lorda, J., Moore, P., Nakamura, Y., Pérez-Matus, A., Pontier, O., Smale, D., Steinberg, P. D., et Vergés, A. (2023). The value of ecosystem

services in global marine kelp forests. *Nature Communications*, 14(1), 1894–1894.

<https://doi.org/10.1038/s41467-023-37385-0>

Eger, A. M., Marzinelli, E. M., Christie, H., Fagerli, C. W., Fujita, D., Gonzalez, A. P., Hong, S. W., Kim, J. H., Lee, L. C., McHugh, T. A., Nishihara, G. N., Tatsumi, M., Steinberg, P. D., et Vergés, A. (2022). Global kelp forest restoration: past lessons, present status, and future directions. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 97(4), 1449–1475. <https://doi.org/10.1111/brv.12850>

Eisaguirre, J. H., Eisaguirre, J. M., Davis, K., Carlson, P. M., Gaines, S. D., & Caselle, J. E. (2020). Trophic redundancy and predator size class structure drive differences in kelp forest ecosystem dynamics. *Ecology*, 101 (5). <https://doi.org/10.1002/ecy.2993>

Environment and Climate Change Canada (ECCC) (2021). Marine pollution spills, Canadian environmental sustainability indicators. Government of Canada <https://www.canada.ca/content/dam/eccc/documents/pdf/cesindicators/marine-pollution-spills/2021/marine-pollution-spills.pdf>

Eurich, J. G., R. L. Selden, and R. R. Warner. (2014). California spiny lobster preference for urchins from kelp forests: implications for urchin barren persistence. *Marine Ecology Progress Series* 498:217–225.

Erlandson, J. M., Graham, M. H., Bourque, B. J., Corbett, D., Estes, J. A., & Steneck, R. S. (2007). The Kelp Highway Hypothesis: Marine Ecology, the Coastal Migration Theory, and the Peopling of the Americas. *The Journal of Island and Coastal Archaeology*, 2(2), 161–174. <https://doi.org/10.1080/15564890701628612>

Filbee-Dexter, K., and R. E. Scheibling. (2014). Sea urchin barrens as alternative stable states of collapsed kelp ecosystems. *Marine Ecology Progress Series*. 370:1–10

Fredriksen, S., Filbee-Dexter, K., Norderhaug, K. M., Steen, H., Bodvin, T., Coleman, M. A., ... & Wernberg, T. (2020). Green gravel: a novel restoration tool to combat kelp forest decline. *Scientific reports*, 10(1), 3983.

- Hamilton, S. L., J. E. Caselle, C. A. Lantz, T. L. Egloff, E. Kondo, S. D. Newsome, K. Loke-Smith, D. J. Pondella, K. A. Young, and C. G. Lowe. (2010) Extensive geographic and ontogenetic variation characterizes the trophic ecology of a temperate reef fish on southern California (USA) rocky reefs. *Marine Ecology Progress Series* 429:227–244.
- Hamilton, S. L., S. D. Newsome, and J. E. Caselle. (2014). Dietary niche expansion of a kelp forest predator recovering from intense commercial exploitation. *Ecology* 95:164–172.
- Hamilton, S. L., and J. E. Caselle. (2015). Exploitation and recovery of a sea urchin predator has implications for the resilience of southern California kelp forests. *Proceedings of the Royal Society B* 282:1–10.
- Hamilton, S. L., Gleason, M. G., Godoy, N., Eddy, N., et Grorud-Colvert, K. (2022). Ecosystem-based management for kelp forest ecosystems. *Marine Policy*, 136.  
<https://doi.org/10.1016/j.marpol.2021.104919>
- Harvell, C. D., et al. (2019). Disease epidemic and a marine heat wave are associated with the continental-scale collapse of a pivotal predator (*Pycnopodia helianthoides*). *Science Advances* 5:eaau7042.
- Hewson, I., K. S. I. Bistolas, E. M. Quijano Cardé, J. B. Button, P. J. Foster, J. M. Flanzenbaum, J. Kocian, and C. K. Lewis. (2018). Investigating the complex association between viral ecology, environment, and northeast pacific sea star wasting. *Frontiers in Marine Science* 5:1–77.
- Konig, C. (1995). Des forêts dans l’océan : Diversité et importance écologique des forêts de varech. Bureau de la Convention sur la biodiversité Environnement Canada [https://publications.gc.ca/collections/collection\\_2019/eccc/En40-232-1-1996-fra.pdf](https://publications.gc.ca/collections/collection_2019/eccc/En40-232-1-1996-fra.pdf)
- Krause-Jensen D, Duarte C (2016) Substantial role of macroalgae in marine carbon sequestration. *Nature Geoscience* 9 (10): 737-742. <https://doi.org/10.1038/ngeo2790>

- Krumhansl, K. A., Okamoto, D. K., Rassweiler, A., Novak, M., Bolton, J. J., Cavanaugh, K. C., Connell, S. D., Johnson, C. R., Konar, B., Ling, S. D., Micheli, F., Norderhaug, K. M., Pérez-Matus, A., Sousa-Pinto, I., Reed, D. C., Salomon, A. K., Shears, N. T., Wernberg, T., Anderson, R. J., et al. (2016). Global patterns of kelp forest change over the past half-century. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *113* (48), 13785–13790. <https://doi.org/10.1073/pnas.1606102113>
- Lafferty, K. D. (2004). Fishing for lobsters indirectly increases epidemics in sea urchins. *Ecological Applications* *14*:1566–1573.
- Levin, S. A., & Lubchenco, J. (2008). Resilience, Robustness, and Marine Ecosystem-based Management. *BioScience*, *58*(1), 27–32. <https://doi.org/10.1641/B580107>
- Ling, S. D., Cornwall, C. E., Tilbrook, B., & Hurd, C. L. (2020). Remnant kelp bed refugia and future phase-shifts under ocean acidification. *Plos one*, *15*(10), e0239136.
- Ling, S. D., et al. (2015). Global regime shift dynamics of catastrophic sea urchin overgrazing. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* *370*:20130269.
- Liu, J., Failler, P., & Ramrattan, D. (2024). Blue carbon accounting to monitor coastal blue carbon ecosystems. *Journal of Environmental Management*, *352*.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.120008>
- Masson-Delmotte, V. (2021). Réchauffement climatique : état des connaissances scientifiques, enjeux, risques et options d'action. *Comptes Rendus. Géoscience*, *352* (4–5), 251 –277.  
<https://doi.org/10.5802/crgeos.29>
- Menzel, S., Kappel, C. V., Broitman, B. R., Micheli, F., & Rosenberg, A. A. (2013). Linking human activity and ecosystem condition to inform marine ecosystem based management. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, *23*(4), 506–514. <https://doi.org/10.1002/aqc.2365>
- Ministère Pêches et Océans (2024). Planification spatiale marine. Gouvernement du Canada [Planification spatiale marine \(dfo-mpo.gc.ca\)](https://www.dfo-mpo.gc.ca/planification-spatiale-marine)

- Morris, R. L., Hale, R., Strain, E. M., Reeves, S. E., Vergés, A., Marzinelli, E. M.,... & Swearer, S. E. (2020). Key principles for managing recovery of kelp forests through restoration. *Bioscience*, 70(8), 688-698.
- Newton, R. J., et McClary, J. S. (2019). The flux and impact of wastewater infrastructure microorganisms on human and ecosystem health. *Current Opinion in Biotechnology*, 57, 145–150. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2019.03.015>
- Nichol, L. M., Boogaards, M. D., et Abernethy, R. (2009). *Recent trends in the abundance and distribution of sea otters (Enhydra lutris) in British Columbia*. Fisheries and Oceans Canada, Science.
- Pêches et Océans Canada (MPO) (2019). Programme de recherche sur la loutre de mer. Gouvernement du Canada <https://www.dfo-mpo.gc.ca/species-especes/mammals-mammiferes/seaotter-loutremer/index-fra.html>
- Pérez-Matus, A., S. A. Carrasco, S. Gelcich, M. Fernandez, and E. A. Wieters. (2017). Exploring the effects of fishing pressure and upwelling intensity over subtidal kelp forest communities in central Chile. *Ecosphere* 8:1–18.
- Pita, P., et Freire, J. (2019). Trophic ecology of an Atlantic kelp forest fish assemblage (NW Spain) targeted by recreational fishers and implications for coastal management. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 99(1), 19–29. <https://doi.org/10.1017/S0025315417001862>
- Quero, J. C. (1992). Les algues et invertébrés marins des pêches françaises.
- Reed, D. C., A. Rassweiler, M. H. Carr, K. C. Cavanaugh, D. P. Malone, and D. A. Siegel. (2011). Wave disturbance overwhelms top-down and bottom-up control of primary production in California kelp forests. *Ecology* 92:2108–2116
- Savoie-Zajc, L., et Karsenti, T. (2018). La méthodologie. In L. Savoie-Zajc et T. Karsenti (Eds.), *La recherche en éducation : Étapes et approches. 4e édition revue et mise à jour* (pp. 139–152). Presses de l'Université de Montréal. <https://doi.org/10.2307/j.ctv69sv3w.8>

- Selden, R. L., S. D. Gaines, S. L. Hamilton, and R. R. Warner. (2017). Protection of large predators in a marine reserve alters size-dependent prey mortality. *Proceedings of the Royal Society B* 284:1–9.
- Schlenger, A. J., Beas-Luna, R., et Ambrose, R. F. (2021). Forecasting ocean acidification impacts on kelp forest ecosystems. *Plos One*, 16(4), 0236218. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0236218>
- Schultz, J. A., R. N. Cloutier, and I. M. Côté. (2016). Evidence for a trophic cascade on rocky reefs following sea star mass mortality in British Columbia. *PeerJ* 4:e1980
- Smale, D. A. (2020). Impacts of ocean warming on kelp forest ecosystems. *New Phytologist*, 225 (4), 1447-1454.
- Staley, C., Kaiser, T., Gidley, M. L., Enochs, I. C., Jones, P. R., Goodwin, K. D., Sinigalliano, C. D., Sadowsky, M. J., et Chun, C. L. (2017). Differential Impacts of Land-Based Sources of Pollution on the Microbiota of Southeast Florida Coral Reefs. *Applied and Environmental Microbiology*, 83(10). <https://doi.org/10.1128/AEM.03378-16>
- Steneck, R. S., Graham, M. H., Bourque, B. J., Corbett, D., Erlandson, J. M., Estes, J. A., et Tegner, M. J. (2002). Kelp forest ecosystems: biodiversity, stability, resilience and future. *Environmental conservation*, 29(4), 436-459.
- Steneck, R. S., Leland, A., McNaught, D. C., & Vavrinec, J. (2013). Ecosystem flips, locks, and feedbacks: the lasting effects of fisheries on Maine's kelp forest ecosystem. *Bulletin of Marine Science*, 89(1), 31-55.
- Thornton, T. F. (2015) The ideology and practice of Pacific herring cultivation among the Tlingit and Haida. *Hum. Ecol.* 43, 213–223.
- Witman, J. D., & Lamb, R. W. (2018). Persistent differences between coastal and offshore kelp forest communities in a warming Gulf of Maine. *PLoS One*, 13(1), e0189388.

Wright, L. S., Pessarrodona, A., et Foggo, A. (2022). Climate-driven shifts in kelp forest composition reduce carbon sequestration potential. *Global Change Biology*, 28(18), 5514–5531.  
<https://doi.org/10.1111/gcb.16299>

ZEBSA, R. (2021). Botanique. <https://dspace.univ-guelma.dz/jspui/bitstream/123456789/14122/1/polycopie%20ZEBSA%20Rabah.pdf>