



HAL
open science

Érosion dunaire et changement climatique. Synthèse, prospective

Ludwig Beyeler

► **To cite this version:**

Ludwig Beyeler. Érosion dunaire et changement climatique. Synthèse, prospective. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2021. dumas-03597494

HAL Id: dumas-03597494

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03597494v1>

Submitted on 4 Mar 2022

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

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

Copyright



Travail de fin d'études

pour le diplôme d'ingénieur de l'École nationale des travaux publics de l'État

Année 2020-2021

Voie d'approfondissement : Environnement
Spécialité risques, pollutions et nuisances

Soutenu le 10 septembre 2021

Devant le jury composé de :

Président du jury : Rafael ANGULO
JARAMILLO

Maître de stage : Valentin METEREAU

Expert : Vivien BAUDOIN

Par :

Ludwig BEYELER

EROSION DUNAIRE ET CHANGEMENT CLIMATIQUE

- Bibliographie, Prospective -

Office National des Forêts, DT COA



NOTICE ANALYTIQUE

| AUTEUR | | | |
|--------------------------------|--|----------------------------|--------------------|
| Nom | BEYELER | | |
| Prénom | Ludwig | | |
| ORGANISME D'ACCUEIL | | | |
| Nom de l'organisme et Localité | Office National des Forêts, agence de Nantes, service forêt | | |
| Nom du Tuteur | Valentin METEREAU | | |
| ANALYSE DU TFE | | | |
| Titre (français) | Erosion dunaire et changement climatique : Synthèse, Prospective | | |
| Titre (anglais) | Dune erosion and climate change: Synthesis, Prospective | | |
| Résumé (français) | <p>En 2021, 37% des côtes basses sableuses sont en recul en France Métropolitaine. L'Office National des Forêts gère une partie de cette bande côtière, soit plus de 400km sur la façade Atlantique. Le changement climatique regroupe l'ensemble des évolutions des paramètres climatiques mais aussi par extension les pressions anthropiques sur les écosystèmes dunaires.</p> <p>Dans un premier temps, l'objet de cette étude est de fournir une synthèse bibliographique des effets du changement climatique sur l'érosion éolienne et marine dunaire. Les rapports du GIEC insistent sur l'augmentation du niveau marin. Dans un second temps, le rapport a pour objectif de faire émerger un panel d'indicateurs et de solutions. L'Office procède depuis longtemps à un contrôle souple de la dynamique dunaire, tout en participant au mieux à la préservation des enjeux à proximité. En cas de fort recul accéléré par le changement climatique (probable), cette étude propose d'agir sur tous les leviers possibles : rechargement en sable, génie végétal et intertidal, activités agro-pastorales.</p> | | |
| Résumé (anglais) | <p>In 2021, 37% of sandy coasts are in decline in metropolitan France. The National Forestry Office manages part of this coastal strip, more than 400km on the Atlantic coast. Climate change brings together all the changes in climatic parameters but also by extension the anthropogenic pressure on dune ecosystems.</p> <p>As a first step, the purpose of this study is to provide a bibliographical summary of the effects of climate change on wind and marine dune erosion. The IPCC reports insists on the increasing sea level.</p> <p>In a second step, the study aims to create a panel of indicators and. ONF has a long history in flexible control of dune dynamics, while at the same time contributing to the preservation of nearby issues. In the case of a sharp decline accelerated by climate change (probable), this study proposes to act on all possible levers: sand reloading, plant and intertidal engineering, agropastoral activities.</p> | | |
| Mots-clés (français, 5 maxi) | Erosion, changement climatique, dunes, ONF | | |
| Mots-clés (anglais, 5 maxi) | Erosion, climate change, dunes, ONF | | |
| Termes géographique (français) | Atlantique, France Métropolitaine | | |
| COLLATION | | | |
| | Nb de pages | Nb d'annexes (nb de pages) | Nb de réf. biblio. |
| | 85 | 1 | 113 |

DECLARATION DE TRAVAIL PERSONNEL

Je déclare que ce rapport constitue l'aboutissement d'un travail personnel et ne peut être suspecté de plagiat.

Le travail présenté distingue explicitement ce que j'ai produit de ce que j'ai emprunté à d'autres. A ce titre, les citations sont clairement identifiables et les sources (écrits, images) qui ont alimenté ma réflexion sont référencées.

REMERCIEMENTS

En premier lieu, je tiens à remercier Valentin METEREAU, mon tuteur de stage à l'ONF. Il m'a offert un beau sujet de TFE, et m'a laissé une grande autonomie dans la réalisation des différents travaux. Apprendre à ses côtés, à l'agence de Nantes, sur le terrain ou à distance, m'a permis de monter en compétence sur de nombreux sujets. Ses remarques bienveillantes ont su mieux diriger mes efforts.

Je souhaiterai également remercier mon directeur de jury et tuteur universitaire, Rafael ANGULO JARAMILLO, qui s'est montré arrangeant dans l'organisation de ma soutenance et m'a permis de me lancer avec confiance dans la rédaction de ce long rapport.

5 mois, ce n'est pas rien, et j'ai eu l'occasion de croiser de nombreux personnels de l'ONF malgré un contexte sanitaire fragile. Je remercie notamment Christophe ROLLIER, et Mickaël RICORDEL grâce à qui j'ai pu découvrir le martelage, et participer à des inventaires naturalistes. L'ensemble des Techniciens Forestiers Territoriaux m'ont également réservé un très bon accueil dans les forêts domaniales d'Olonne, du Pays de Monts, et de Mervent.

SOMMAIRE

| | |
|---|-----------|
| NOTICE ANALYTIQUE..... | 1 |
| DECLARATION DE TRAVAIL PERSONNEL..... | 2 |
| REMERCIEMENTS..... | 3 |
| TABLE DES ILLUSTRATIONS..... | 5 |
| SIGLES..... | 6 |
| PROBLEMATIQUE..... | 7 |
| PARTIE 1 : NOTE DE SYNTHESE EROSION DUNAIRE ET CHANGEMENT CLIMATIQUE..... | 8 |
| Introduction..... | 8 |
| 1. Synthèse des conséquences du changement climatique dans le cadre de l'érosion dunaire..... | 11 |
| 2. Prévoir et modéliser l'érosion dunaire..... | 31 |
| Conclusion..... | 44 |
| PARTIE 2 : PISTES D'ACTION POUR AMELIORER LA RESILIENCE ET LA GESTION DES DUNES FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE..... | 45 |
| Introduction..... | 45 |
| 1. Evolution de la réglementation et des enjeux de la gestion du littoral en France.. | 47 |
| 2. Propositions de nouveaux indicateurs et méthode de suivi des impacts du changement climatique..... | 54 |
| 3. Développer la résilience de la dune..... | 58 |
| CONCLUSION..... | 69 |
| BIBLIOGRAPHIE..... | 70 |
| TABLE DES MATIERES..... | 81 |

TABLE DES ILLUSTRATIONS

| | |
|--|----|
| Figure 1 : Les différentes trajectoires de température en fonction des scénarios du GIEC (« Scénarios prospectifs du GIEC [Les enjeux pour l'industrie du futur] » s. d.)..... | 12 |
| Figure 2 : Changements passés et futurs de l'océan et la cryosphère, (GIEC)..... | 13 |
| Figure 3 : Représentation schématique de différents indicateurs de trait de côte (Boak and Turner, 2005, adapté et traduit par le BRGM) | 14 |
| Figure 4: Exemple indicateur national d'érosion, l'île d'Oléron..... | 16 |
| Figure 5 : Tendances de variation du niveau de la mer sur les côtes françaises (CEREMA) | 17 |
| Figure 6 : Zones submergées en 2050, presque île de Quiberon, dans le cadre du RCP2.6 et de la crue annuelle sur la base d'analyse topographique satellites, Climate Central..... | 19 |
| Figure 7 : Hypothèse connexion zone basse et montée du niveau marin (CEREMA)..... | 20 |
| Figure 8 : Formule d'obtention des scores (Daeden 2015) | 23 |
| Figure 9 : Synthèse des pressions humaines en France, focus sur le littoral (Daeden 2015)..... | 24 |
| Figure 10 : Fonctionnement du "biseau salé" | 26 |
| Figure 11 : Exemple cartographie de sensibilité des aquifères côtiers (ONEMA)..... | 27 |
| Figure 12 : Légende de la sensibilité des aquifères côtiers | 28 |
| Figure 13 : Effet de différents paramètres d'entrée (notamment la montée du niveau marin) sur le recul du trait de côte (Cozannet 2016)..... | 32 |
| Figure 14 : Illustration règle de Bruun (Salomon, 1995)..... | 33 |
| Figure 15 : Comparaison des modélisations et des observations (Keijzers, De Groot, et Riksen 2016)..... | 35 |
| Figure 16: Illustration simplifiée de phénomène de "compression côtière" | 37 |
| Figure 17 : Ensemble de sites dunaires sélectionnés selon leurs taux de sécheresses. | 38 |
| Figure 18 : Modélisation de l'habitat futur de lézard ocellé, témoin de l'habitat dune grise (« Programme les sentinelles du climat – Tome VIII : Écologie du changement climatique en région Nouvelle-Aquitaine - Passages » s. d.) | 40 |
| Figure 19 : Echantillon de paramètres de l'indicateur MDVI (Ciccarelli et al. 2017)..... | 41 |
| Figure 20 : Inventaire de coléoptères | 42 |
| Figure 21 : Logo communication loi Climat et Résilience (« Loi climat et résilience : l'écologie dans nos vies » s. d.) | 48 |
| Figure 22 : Zones humides, l'évolution du cadre juridique (CIZEL 2017)..... | 49 |
| Figure 23 : Réglementation Natura 2000, document interne ONF..... | 51 |
| Figure 24 : Calendrier "générique" des démarches administratives (« Fiche_05_mod.pdf » s. d.) dans le cadre d'un rechargement en sable de la plage..... | 53 |
| Figure 25 : Relation entre captage et biseau salé des aquifères dunaires (Dörfliger et Augeard 2013)..... | 56 |
| Figure 26 : Contexte rencontrés dans le cas des avants-dunes et gestion adaptative..... | 59 |
| Figure 27 : Présentation des Algobox© (Sedrati et Cochet 2015) | 61 |
| Figure 28 : Impacts positifs et négatifs de perturbations volontaires de la dune sur 3 indicateurs écologiques (52), texte traduit..... | 63 |
| Figure 29 : Guêpier d'Europe, (Roger Eritja / Biosphoto)..... | 64 |
| Figure 30 : Tableau des facteurs explicatifs de la distribution de certaines espèces d'oiseaux menacées ou à distribution limitée, à proximité des habitats dunaires (Revers et al. 2018)..... | 65 |
| Figure 31 : Herbiers de zostères (« Zostère » s. d.) | 67 |

SIGLES

ONF : Office National des Forêts

IPSL : Institut Pierre Simon Laplace

RCP : Profils représentatifs d'évolution de concentration

RID : Résumé à l'Intention des Décideurs

SHOM : Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

MEDDTL : Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

LIDAR : Méthode de télédétection par la lumière

CEFREM : Centre de Formation et de Recherche sur les Environnements Méditerranéens

SONEL : Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales

DDTM : Direction Départementale des Territoires et de la Mer

PHMA : Plus Haute Mer Astronomique

ONEMA : Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques

ONERC : Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique

OPIE : Office pour la Préservation des Insectes et leur Environnement

AMP : Aire Marine Protégée

GEMAPI : Gestion des Milieux Aquatiques et Prévention des Inondations

DOCOB : Document d'objectifs

OCLM : Observatoire Citoyen du Littoral Morbihannais

PROBLEMATIQUE

Ce sujet de stage est proposé par l'ONF, qui dans le cadre d'un mécénat et d'une mission d'intérêt général, lance un programme de 3 années sur la vulnérabilité des dunes domaniales face au changement climatique. L'ONF gère un linéaire de 400km sur la côte métropolitaine Atlantique, en première ligne face aux phénomènes réguliers d'érosion marine et éolienne, et confrontés à des risques plus ponctuels comme la submersion marine, la pression touristique, ou encore l'étalement urbain.

En cette année 2021 a lieu le projet de loi « Climat et Résilience » issue de la « Convention Citoyenne pour le Climat ». Si cette démarche politique ne traite pas directement du sujet dunaire, elle aura sûrement des conséquences sur la prise en compte du changement climatique. Le colloque « Les événements extrêmes : un avant-goût du climat futur ? », événement organisé le 4 mai dans le cadre du Forum International de la Météo et du Climat fournis quelques piste d'explication du contexte politique et scientifique national. Cet évènement évoque notamment l'augmentation en fréquence et en intensité de différentes phénomènes météorologiques extrêmes : vague de chaleur, précipitations, crues...

Alors que les pressions s'amplifient, que les paramètres climatiques évoluent, et que le GIEC souligne la nécessité de s'adapter aux risques (« Comprendre le GIEC » s. d.), comment renforcer la résilience du milieu côtier dunaire ?

En premier lieu, il s'agit de présenter les liens entre le changement climatique et l'érosion dunaire à travers une étude bibliographique. Lors de ce travail de synthèse, étudier les impacts des méthodes de gestion au regard du dérèglement climatique s'avère également pertinent.

La deuxième partie tente de répondre aux problématiques soulevées. L'étude du contexte réglementaire offre une meilleure compréhension des freins et des leviers juridiques qui interviennent dans la gestion dunaire. Enfin, l'analyse des méthodes et des principes de gestion les plus pertinents à mettre en œuvre dans une dynamique de changement climatique est complétée par un certain nombre de mesures d'accompagnements.

PARTIE 1 : NOTE DE SYNTHÈSE ÉROSION DUNAIRE ET CHANGEMENT CLIMATIQUE

Introduction

Cette synthèse bibliographique constitue la première partie de stage, qui a pour objectif d'initier le développement de nouvelles méthodes de gestion et de réponses adaptatives. « Il est temps de passer d'une science de l'alerte à une science des solutions », Hervé Le Treut (climatologue et directeur de l'IPSL, institut de sciences du climat).

La question des érosions marines et éoliennes liées au changement climatique est mondiale, il est judicieux de commencer à identifier les caractéristiques des massifs dunaires gérés par l'ONF, et les capacités (moyens, agents, expertise) de l'Office afin de sélectionner ensuite un panel d'étude cohérentes avec cette marge de manœuvre.

Comment cibler les études sur l'impact du changement climatique sur les dunes littorales les plus pertinentes ?

L'ONF est une des principales sources métropolitaines d'étude sur le sujet dunaire. Il s'agit d'aller chercher de la matière pour compléter l'expertise de l'ONF. Il s'agit de faire appel à d'autres domaines : climatologie, sédimentologie, gestion de l'eau...

De nombreuses études ou guides sont élaborés depuis le début de la fixation des dunes (première moitié du XVIII^e siècle en France). Dans cette synthèse, on essaiera d'équilibrer l'analyse de rapports internationaux sur le changement climatiques, la présentation des différents outils de gestion dunaire nationaux ou européens, ainsi que les conclusions d'études plus expérimentales. La frise bibliographique sur la page suivante expose certaines sources clés.

Comment en faire ressortir des indicateurs qui permettront à la fois de décrire l'évolution du littoral dunaire de manière objective et au regard des enjeux propres à la gestion forestière ?

Un certain nombre d'indicateurs existent et sont parfois déjà exploités dans le cadre de la gestion intégrée du littoral. On présentera les plus pertinents dans le cadre du milieu dunaire. Cette partie vise à répondre aux questions de fond suivantes :

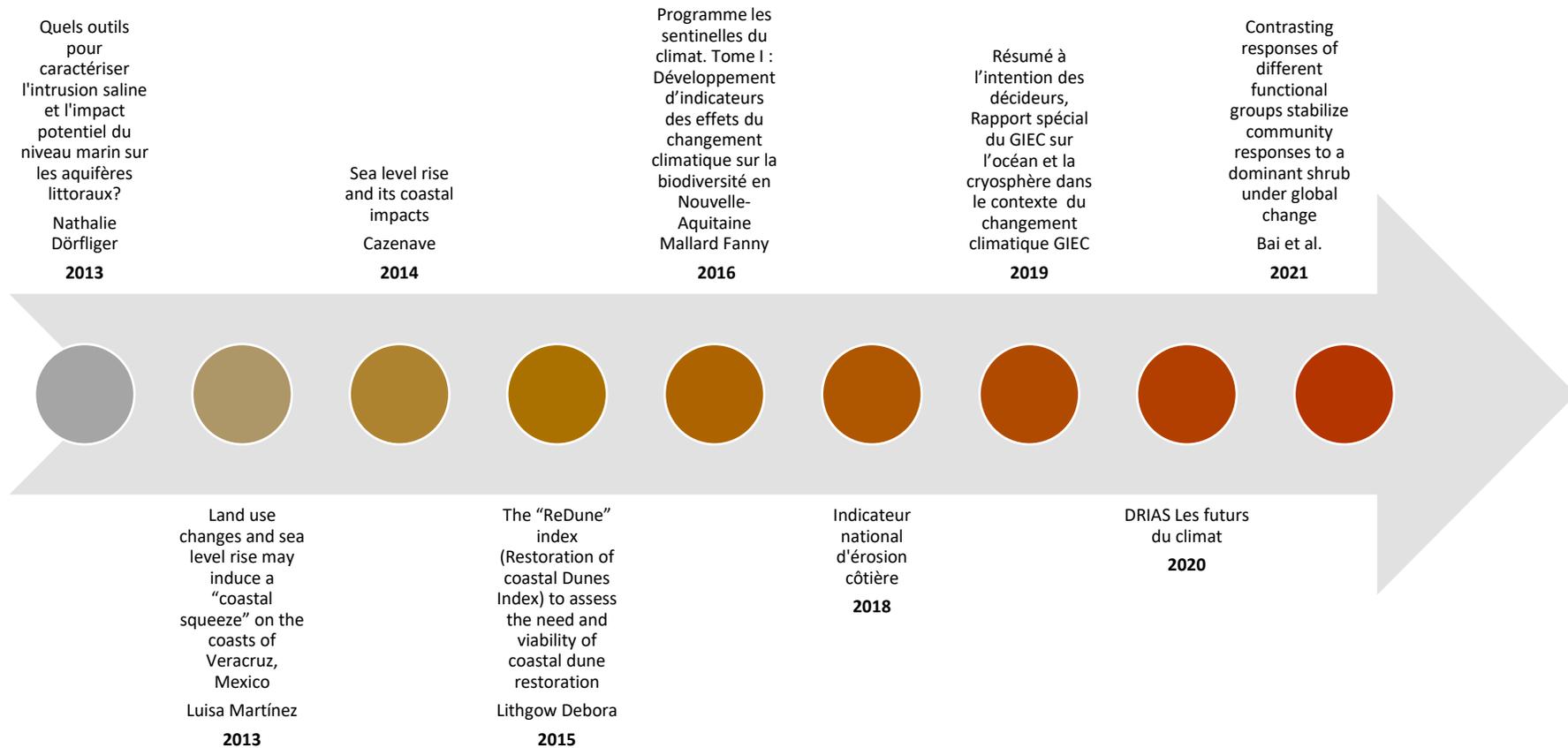
Le changement climatique aggrave-t-il, provoque-t-il l'érosion dunaire ? Dans quelle mesure cette érosion va-t-elle évoluer sur les côtes métropolitaines atlantiques au cours du XXI^e siècle ? Est-ce que la biocénose peut s'adapter à ces évolutions ?

On s'attachera d'abord à essayer de démontrer le lien entre changement climatique et vulnérabilité accrue des dunes, à travers la compilation de nombreux indicateurs climatiques, physiques et écologiques sur le littoral en général et le milieu dunaire en particulier.

Puis, on expliquera l'évolution des modélisations de l'érosion en lien avec l'adaptation de la végétation dunaire au changement climatique, certains modèles s'attachant à décrire précisément le comportement de dunes malgré l'échelle souvent très réduite des terrains d'études. Ce facteur réduit le développement de pistes d'actions.

Enfin, on verra dans quel cadre réglementaire les gestionnaires peuvent s'adapter aux contraintes amplifiées par le changement climatique et des pistes d'actions apparues récemment dans la littérature seront présentées.

Frise bibliographique :



1. Synthèse des conséquences du changement climatique dans le cadre de l'érosion dunaire

On peut définir le changement climatique comme l'évolution de l'ensemble des variables climatiques. Lesquelles affectent particulièrement le milieu dunaire et les processus d'érosion ? Le niveau de la mer et ses variations semblent être les variables qui jouent un rôle dominant dans les modification des processus érosifs et leurs relations avec le changement climatique n'est pas si évidente.

1.1 La conséquence directe du changement climatique sur le niveau de la mer

On cherche à comprendre les variations attendues/modélisées, à quelle échelle elles s'appliquent et comment les mesurer.

1.1.1. Les différents scénarios à l'échelle mondiale

Le GIEC ([sous la direction de H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. et Poloczanska, K. Mintonbeck, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama et N. M. Weyer] 2019) a élaboré et présenté différents scénarios (RCP) qui conduisent chacun à un niveau de réchauffement planétaire.

Le GIEC : Le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'évolution du climat est créé en 1988 par le Programme des Nations Unies pour l'Environnement.

- 1990 : Premier Rapport
- 1995 : Deuxième Rapport
- 2001 : Troisième Rapport
- 2007 : Quatrième Rapport
- 2013 : Cinquième Rapport
- Juillet 2021 : 1^{er} tome du Sixième Rapport

Les résultats présentés dans cette étude sont majoritairement issues du 5^e Rapport. Depuis la parution de ce 5^e rapport, le GIEC a publié 3 rapports spéciaux qui s'appuient sur les mêmes données. Ils traitent respectivement de l'océan et la cryosphère, d'un réchauffement climatique de 1.5°C, et du changement climatique et des terres émergées. Les rapports exploités ici appartiennent à la catégorie RID (Résumé à l'intérêt des décideurs). Il est compliqué de comparer les scénarios de chaque rapport. De parution en parution, les hypothèses de base évoluent, notamment sur les trajectoires socio-économiques et leurs impacts.

Dans ce rapport, les scénarios représentent chacun une évolution du forçage radiatif. Le forçage radiatif est la conséquence de la variation du bilan radiatif. Le bilan radiatif est la différence entre l'énergie reçue par le soleil et l'énergie restituée par rayonnement infrarouge. Il est donc impacté par les facteurs du climat, comme les émissions anthropiques de gaz à effet de serre. Le forçage radiatif s'exprime en W/m².

Le scénario le plus optimiste sur l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre est le **RCP2.6** qui correspond à **une augmentation moyenne de 1.6°C** de la température moyenne d'ici 2050 et d'ici la fin du siècle par rapport aux années 1850-1900.

Le climat variant annuellement, les climatologues utilisent des périodes de référence. Plus on remonte dans le temps, moins il y a de données disponibles. C'est pourquoi la période de référence témoin commence en 1850 et finit en 1900. Elle est appelée période de référence préindustrielle.

Le scénario le plus extrême est le **RCP8.5** qui prévoit une augmentation moyenne de **2°C** d'ici 2050 et de **4.3°** d'ici 2100 par rapport aux années 1850-1900. Bien que le RCP2.6 soit largement dépassé pour de nombreux pays car il nécessite une neutralité carbone atteinte en 2050, le scénario RCP8.5 semble également trop extrême selon différents spécialistes : Jean Jouzel , président de Météo Climat, Rober Vautard, directeur de l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), Jean-Michel SOUBEYROUX, directeur Adjoint Scientifique de la Climatologie et des Services Climatiques à Météo-France intervenus dans le colloque « Les événements extrêmes : un avant-goût du climat futur ? ».

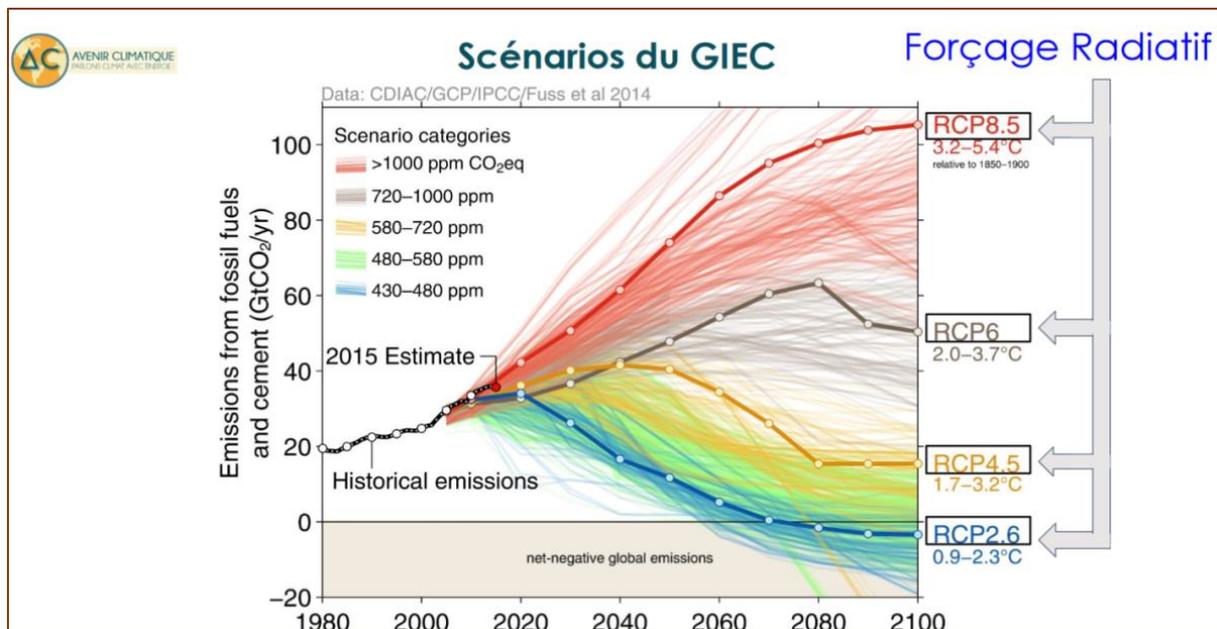


Figure 1 : Les différentes trajectoires de température en fonction des scénarios du GIEC (« Scénarios prospectifs du GIEC [Les enjeux pour l'industrie du futur] » s. d.)

Cette augmentation moyenne de la température à la surface du globe agit sur 4 paramètres physiques : contenu de chaleur de l'océan, perte de masse de la calotte glaciaire du Groenland, perte de masse de la calotte glaciaire de l'Antarctique, perte de masse des glaciers. Ce sont les facteurs principaux de modification du niveau moyen de la mer à l'échelle planétaire.

Les observations des évolutions passées combinées à une estimation des émissions de gaz à effet de serre à long terme (qui jouent un rôle dans le changement climatique) permettent de proposer ces **niveaux d'élévation moyenne projetée du niveau de la mer à l'échelle du globe** par rapport à 1986-2005 :

| Scénario | Élévation | Période 1 | Élévation | Période 2 |
|----------|------------------------|-----------|------------------------|-----------|
| RCP2.6 | 0,39 m (0,26 – 0,53 m) | 2081-2100 | 0,43 m (0,29 – 0,59 m) | 2100 |
| RCP8.5 | 0,71 m (0,51– 0,92 m) | 2081-2100 | 0,84 m (0,61– 1,10 m) | 2100 |

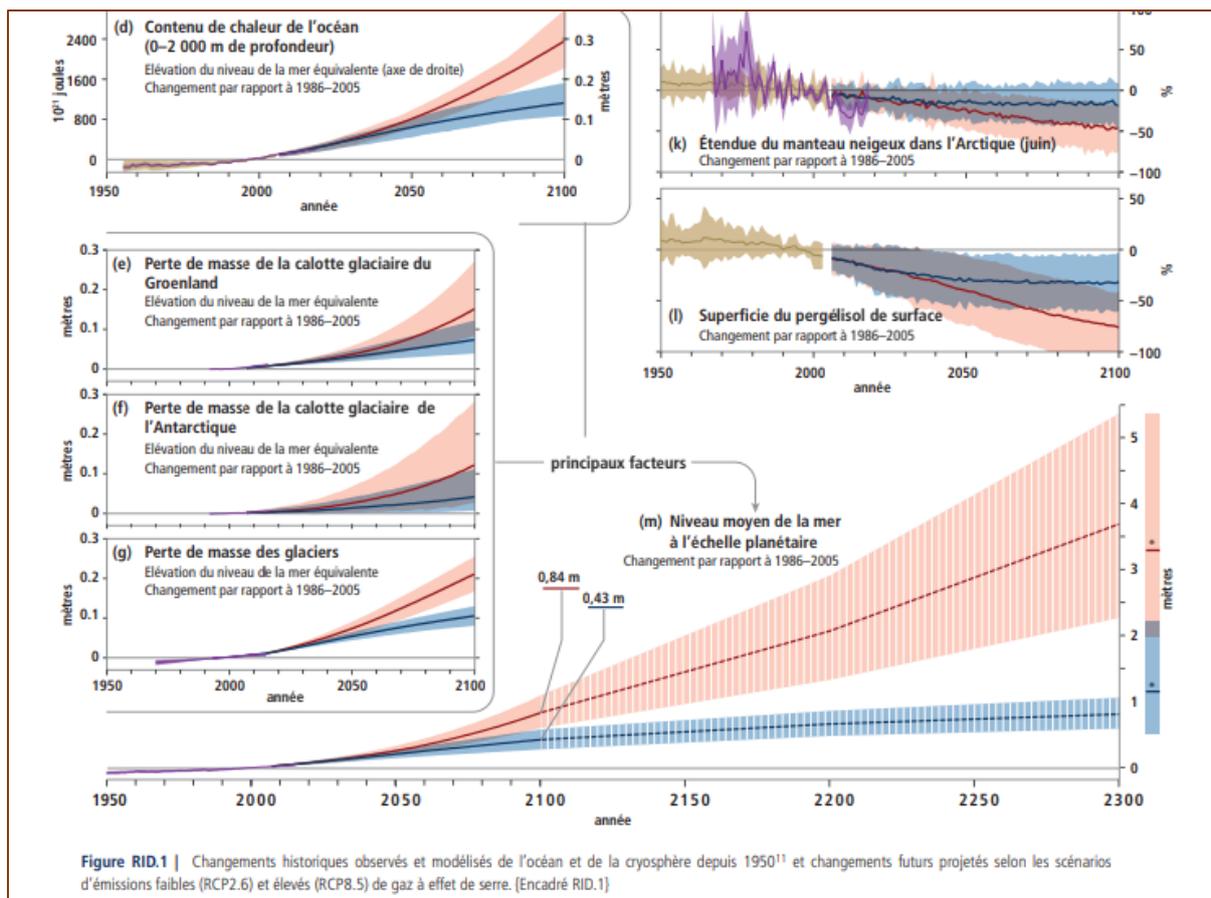


Figure 2 : Changements passés et futurs de l'océan et la cryosphère, (GIEC)

Sur la figure précédente, on observe l'évolution des facteurs principaux du niveau moyen de la mer à l'échelle planétaire selon deux modèles climatiques : RCP 8.5 en rouge et RCP 2.6 en bleu. Les courbes représentent la moyenne des observations et des modélisations, l'incertitude est modélisée par les « barres ». On constate que les incertitudes sont très importantes pour chacun des facteurs.

Le GIEC propose d'autres indicateurs mesurés et projetés, liés à l'augmentation du niveau moyen de la mer à l'échelle du globe :

Moyenne du rythme d'élévation du niveau moyen de la mer :

| | | | | |
|-----------------------|----------|-----------|----------|-----------|
| Observée | 3.6mm/an | 2006-2015 | 1.4mm/an | 1901-1990 |
| Scénarios GIEC | | | | |
| RCP2.6 | 4 mm/an | | 2100 | |
| RCP8.5 | 15mm/an | | 2100 | |

Ces projections sont basées sur des moyennes altimétriques mondiales. De nombreux phénomènes régionaux interfèrent avec ces résultats : isostasie (variation du niveau de la lithosphère), reliefs particuliers, variations climatiques locales...

Par ailleurs, plusieurs critiques entravent le consensus scientifique du GIEC. En premier lieu, les marégraphes enregistrent une hausse de l'accélération de la montée du niveau marin depuis le XIXe siècle, juste avant l'époque industrielle (« La hausse du niveau de la mer accélère-t-elle l'érosion des côtes? (1/3) | Science, climat et énergie » s. d.). En second lieu, les relevés du niveau de la mer sont soit relatifs (marégraphes), soit absolus (satellite). Or, ces deux techniques nécessitent d'une part des ajustements complexes pour les combiner, et d'autre part l'incertitude des mesures dépassent souvent l'unité millimétrique. Enfin, des études viennent également remettre en question le caractère anthropique de l'accélération du niveau marin, ou la plage de temps sur laquelle cette accélération a eu lieu. En Europe, la fin d'un petit âge glaciaire juste avant cette accélération, complique encore plus ces analyses. Une étude récente (Wenzel et Schröter 2014) conclut même à l'absence d'accélération de l'élévation du niveau moyen de la mer à l'échelle planétaire entre 1901 et 2008. Pour cette étude, la hausse du niveau marin est d'environ $1.77 \pm 0,38$ mm/an et d'autres conclusions seraient le fruit d'une grande disparité de contextes locaux de montée du niveau de la mer.

Il est donc plus pertinent de suivre ce paramètre à l'échelle régionale. C'est un des objectifs des indicateurs de mesure du trait de côte, qui ne s'attachent plus à la description de la variation d'un niveau absolu mais bien à l'impact réel sur chaque côte.

1.1.2. Les indicateurs de mesure du trait de côte

La notion de trait de côte est complexe et définie de nombreuses manières (côte 2019) en milieu duinaire :

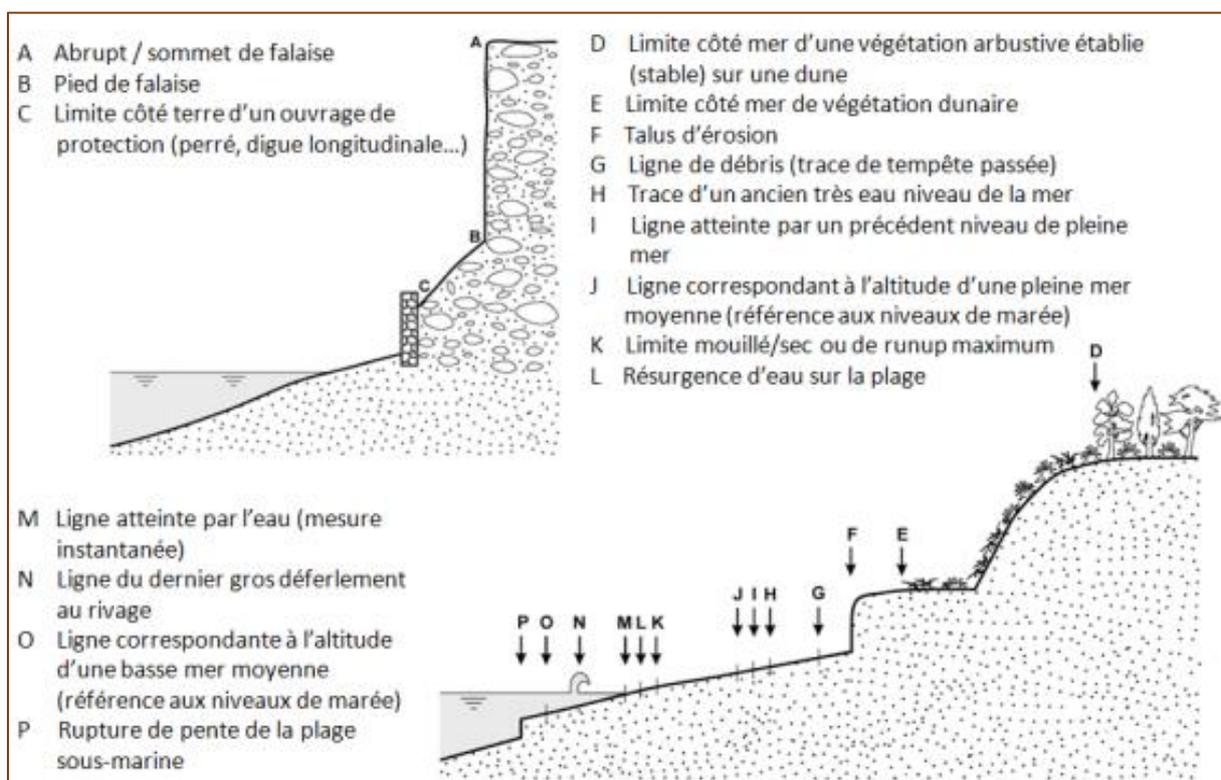


Figure 3 : Représentation schématique de différents indicateurs de trait de côte (Boak and Turner, 2005, adapté et traduit par le BRGM)

- Limite supérieure atteinte par la mer aux plus fortes marées, en conditions météorologiques normales, symbolisée par laisse de mer : retenue par le guide de **gestion du trait de côte MEDDTL et le SHOM** (J)
- Limites de végétation dunaire ou de haut de plage (E)
- Limites Talus pré-littoral (P)
- Limite du jet de rive
- Limite supérieure du sable mouillée (K)
- Dernière laisse de haute mer (I)
- Crête de la berme
- Fond de plage
- Pied de dune
- Haut de falaise dunaire
- Crête de dune

Pertinences des indicateurs (Garcin et Bulteau 2011)

« Si à l'échelle nationale ou continentale, cette zone est bien un trait, à l'échelle locale il s'agit plutôt d'une bande de territoire étroite et changeante. Sur les côtes sableuses, cette bande s'étend de la plage immergée à la dune, le trait de côte (ligne des hautes eaux) fluctuant à l'intérieur de ce ruban, en avancée ou en recul, selon la quantité de sédiment disponible » (Favennec 2021). Dans ce rapport, et plus particulièrement cette partie, on gardera le terme « trait de côte » mais il est bien sûr nécessaire de garder à l'esprit que la largeur et l'occupation de cette zone sont des indicateurs pertinents dans le cadre d'un suivi de l'érosion côtière.

Il est nécessaire de suivre le trait de côte pour permettre une évaluation de l'avancée/recul de la mer sur le littoral, et donc le suivi et la gestion d'éventuels enjeux d'érosion d'accrétion et de submersion. Le choix d'un indicateur se doit d'être adapté aux particularités morpho-dynamiques de la zone d'étude et rester identique le long du suivi. Il dépend donc également de la possibilité technologique de suivi. Le recensement des différents indicateurs par le BRGM, et la mise en place d'un indicateur national d'érosion côtière (« specif-tech-carto-indicateur-erosion.pdf » s. d.) à travers une campagne de photo-identification ont mis en évidence la pertinence des marqueurs naturels suivants :

- « Pour les côtes macrotidales d'Atlantique, Manche et Mer du Nord : **la limite de la végétation pérenne côté mer** (côtes basses meubles et rocheuses) et **la limite de haut de falaise** (côtes à falaise rocheuse ou meuble en érosion) ;
- Pour les côtes présentant un marnage faible voire nul (<50 cm) : **la limite supérieure du jet de rive** (côte basse meuble) et **la limite de la végétation pérenne côté mer** (côte à falaise). » (« specif-tech-carto-indicateur-erosion.pdf » s. d.)

La diversité des milieux rend ces indicateurs non pertinents dans certains secteurs. **L'ONF a choisi la dernière limite de végétation côté mer et le pied de falaise (dans le cas où il y a une érosion marquée).**

Historiquement, les différents acteurs ne sont pas attachés à un indicateur en particulier. On peut citer une étude du BRGM/Observatoire de la côte d'Aquitaine (trait de côte sous SIG sur la côte sableuse en Aquitaine). L'indicateur choisit était le pied de dune.

Le groupe LMUSCA du CEFREM a retenu le talus de collision (limite entre plage immergée et émergée) pour un suivi dans le Languedoc-Roussillon.

Technologie mis en œuvre

Les outils sont nombreux : Tachéomètre, DGPS, LIDAR, orthophotographie, sondeur, suivi photographique, image satellitale, imagerie vidéo, scanner 3D. Le suivi photographique et orthographique permet un suivi précis des indicateurs du trait de côte, avec cependant des marges d'erreurs importantes liées à l'angle de prise de vue photographique. Il semble que le LIDAR et l'imagerie satellitale soient aujourd'hui les outils les plus indiqués (Garcin et Bulteau 2011) pour un suivi longitudinal du trait de côte à petite échelle, combinés à des mesures au GPS/Sondeur sur le profil transversal afin de relier l'évolution du trait de côte au transit sédimentaire.

1.1.3. Avancée ou recul du trait de côte au bord des dunes domaniales françaises en 2050 et 2100

En France, l'indicateur national d'érosion côtière est la référence, bien qu'il soit sujet à des incertitudes à petite l'échelle. Selon cet indicateur :

- 20 % du trait de côte naturel est en recul dont 30% des côtes basses sableuses (métropole + DROM)
- Une surface d'environ 30 km² a été perdue au niveau des secteurs en recul en 50 ans

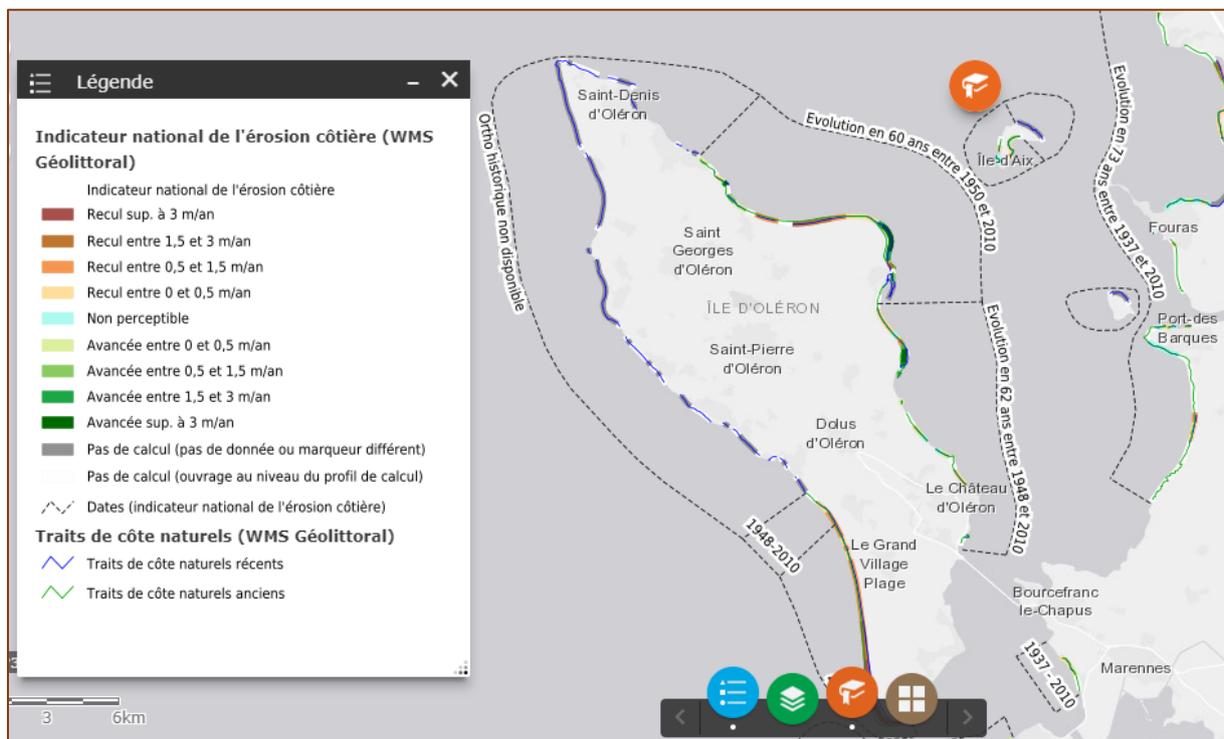


Figure 4: Exemple indicateur national d'érosion, l'île d'Oléron

L'indicateur national d'érosion côtière indique la variation du trait de côte entre une période de référence et 2018. Le trait de côte de référence est donc sujet à une incertitude relative à la nature des données : il n'y avait pas de mesures de GPS fiable, le trait de côte est ainsi souvent digitalisé à posteriori sur des photos historiques. L'indicateur donne donc l'information de recul ou d'avancée du trait de côte et son ordre de grandeur à moyenne échelle (50 ans par exemple). Cette échelle de temps peut fausser l'analyse de l'information : certains tronçons ont vu leur tendance d'érosion ou d'accrétion s'inverser depuis peu.

De même, le niveau de la mer n'évolue pas de la même manière sur tout le littoral (Laignel 2015) :

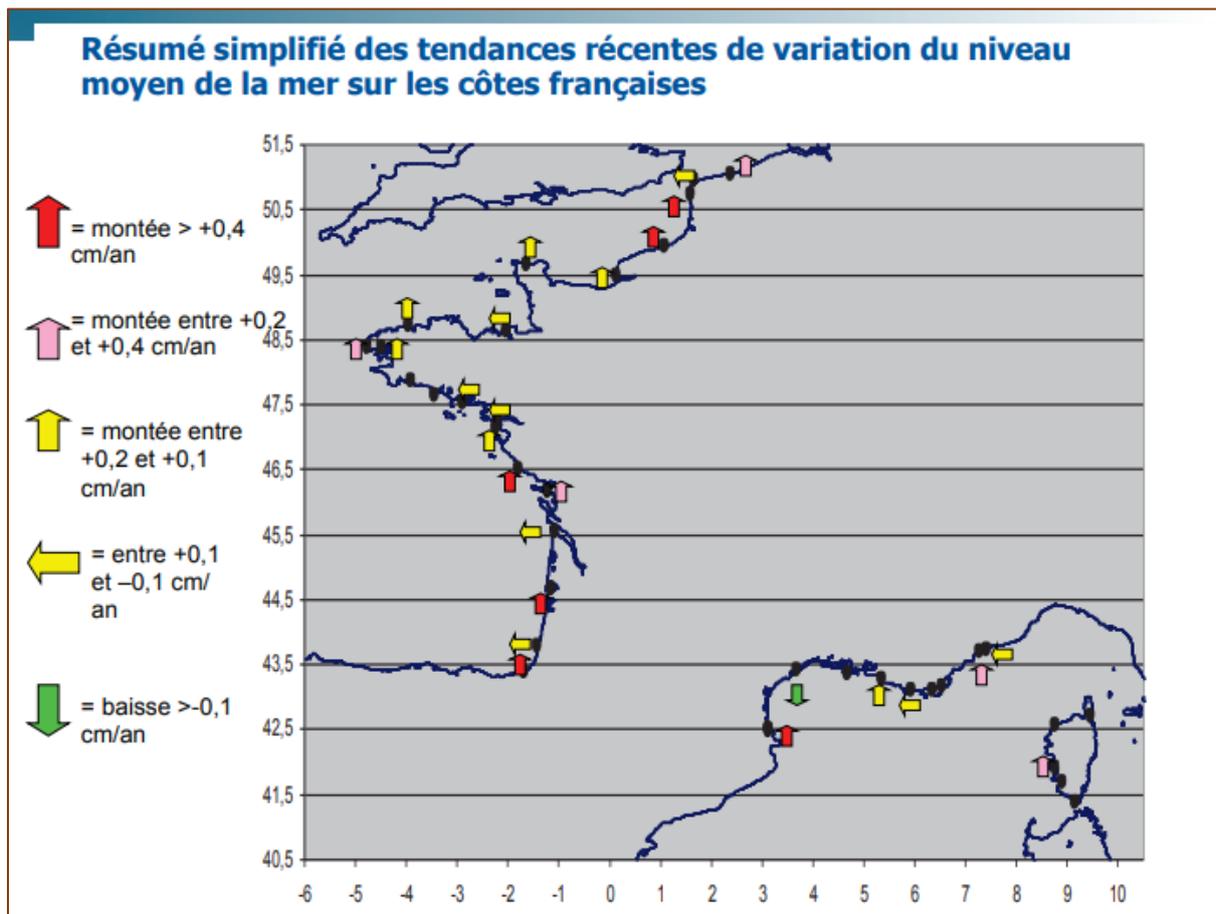


Figure 5 : Tendances de variation du niveau de la mer sur les côtes françaises (CEREMA)

Sur la figure précédente, des observations de la montée du niveau marin local à la côte sont présentées. Cette carte a été produite dans le cadre d'un état des lieux des effets du changement climatique de l'échelle globale à l'échelle locale. On s'aperçoit qu'il y a une grande disparité de comportement. Ainsi, de nombreux sites sont stables, tandis que certains dépassent les 4 mm/an d'élévation du niveau de la mer. Cette étude expérimentale nécessiterait d'être appuyée par d'autres mesures : le SONEL (« Tendances du niveau de la mer » s. d.) évalue les tendances de variation du niveau marin grâce aux marégraphes notamment. Sur la côte atlantique métropolitaine, seules les données du marégraphe de Brest et du Conquet sont jugées suffisamment fiables, et elles présentent une accélération de la hausse du niveau marin.

Par ailleurs, l'impact du recul du trait de côte sur la surface domaniale a été étudié dans le cadre d'un partenariat en 2018. Cette étude a mis en évidence qu'une partie de cette surface était d'ores et déjà passée en DPM (Domaine public maritime). A partir d'une méthode « simpliste » deux projections ont été menées pour 2050 et 2100. Ce travail présente un recul conséquent du trait de côte au droit des dunes, malgré des hypothèses basses (proches du RCP2.6) sur l'augmentation du niveau moyen de la mer, alors même qu'elles ont été revues à la hausse par le GIEC en 2018 :

Hypothèses de l'étude :

- Première hypothèse : un taux de recul est appliqué uniquement sur les secteurs en recul. Ceux-ci sont déterminés par l'indicateur national d'érosion côtière. Le même taux de recul affiché par l'indicateur est utilisé pour modéliser le futur recul jusqu'en 2100.
- Seconde hypothèse : un recul minimal est appliqué à l'ensemble des côtes en considérant notamment l'évolution du niveau de la mer. Ensuite, le taux de recul est adapté aux taux observés et à la géomorphologie des secteurs.

L'accélération de l'évolution est également négligée, le taux d'élévation étant considéré comme fixe.

Les phénomènes de submersion marine ne sont pas pris en compte, pas plus que la destruction des points hauts. **La surface perdue à horizon 2050/2100 est donc une hypothèse basse. Ainsi, entre 400 et 800 ha serait susceptible de passer du statut de dunes domaniales à celui de domaine public maritime d'ici 2040.**

Le domaine public maritime est notamment constitué « du rivage de la mer, c'est à dire tout ce qu'elle couvre et découvre en l'absence de perturbations météorologiques exceptionnelles » (« Les principes généraux applicables à la gestion du domaine public maritime | La préfecture et les services de l'État en région Corse » s. d.). Il est inaliénable mais sa limite côté terre évolue à cause des phénomènes d'érosion et d'accrétion. Généralement, il s'agit de la limite supérieure atteinte par la mer aux plus fortes marées, en conditions météorologiques normales. Les modalités de gestion et d'intervention sur le DPM ou sur les dunes domaniales privées sont différentes. Même si des accords de principe existent entre l'ONF et les gestionnaires du DPM (DDTM, Services de l'Etat), les actions envisagées par l'ONF sont souvent soumises à autorisation (détail en annexe)

D'autres outils modélisent le recul du trait de côte/la montée du niveau marin :

Corine Coastal Erosion devenu *EuroErosion* (base de données côtières européenne SIGS qui se basent sur le scénario de montée du niveau marin Kopp, 2014 (Kopp et al. 2014), *Climate central*, *Litto 3d*, *Sealevelrise* (Tellez-Arenas et al. 2018) BRGM, *MobiTC* (outil de modélisation trait de côte et profil de plage du Cerema) et les cartes *Géo littoral* (Cerema).

On peut nuancer les résultats de *Climate Central* (qui utilise la précision satellite pour vérifier la topographie, moins fiable que les relevés LIDAR), mais à ce jour c'est l'outil le plus interactif et le plus accessible. Alors que l'indicateur national de l'érosion côtière montre une simple tendance entre 1950 et 2020, *Climate Central* permet de se projeter dans le temps et ne nécessite aucune compétence de modélisation.

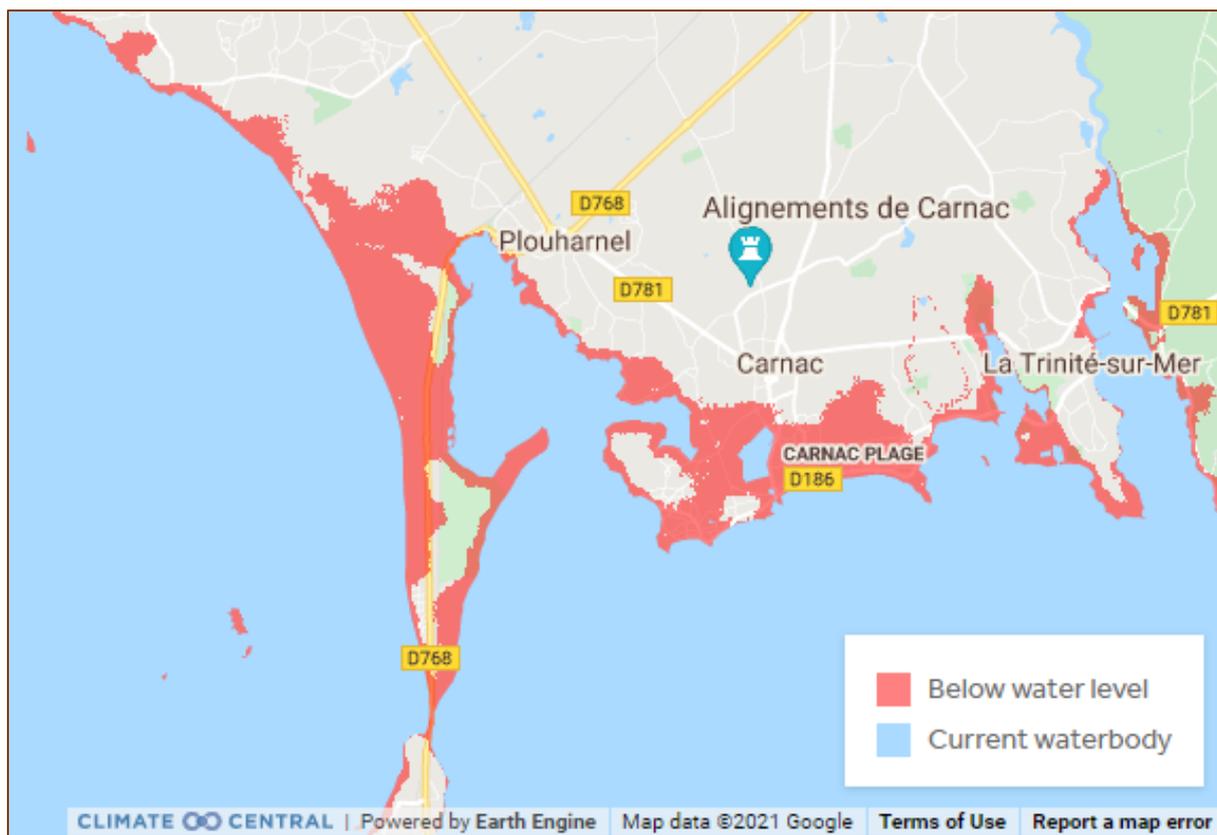


Figure 6 : Zones submergées en 2050, presqu'île de Quiberon, dans le cadre du RCP2.6 et de la crue annuelle sur la base d'analyse topographique satellites, Climate Central

Sealevelrise, est un outil similaire, mis en place par le BRGM. Il bénéficie d'une meilleure prise en compte du relief que ClimateCentral par exemple, car l'outil se base sur des données LIDAR (laser aéroporté). Cependant, la version « grand public » de la carte interactive n'offre pas de choix quant aux paramètres d'entrée et de sortie. Seule une hauteur d'eau supplémentaire par rapport à 2016 est paramétrable. En sortie, on dispose des zones exposées à la submersion marine. Pour une hauteur d'eau supplémentaire de 0 à 1m, les conséquences ne sont pas évidentes, la résolution de l'affichage ne permet pas toujours d'identifier les zones vulnérables.

Ces outils « qualifient » l'avancée ou le recul du trait de côte sur une grande plage temporelle à l'échelle locale/régionale, leurs paramètres d'entrée sont les suivants :

- Un scénario du GIEC, donc un niveau d'élévation du niveau de la mer
- Observations empiriques du trait de côte (taux accrétion/érosion)
- Un degré d'efficacité ou de gêne du transit sédimentaire du fait d'ouvrages de protection
- Choix ou non d'un modèle qui admet une submersion des zones basses malgré la présence de points hauts (« Caractérisation de la sensibilité du littoral morbihannais à l'érosion », s. d.) :

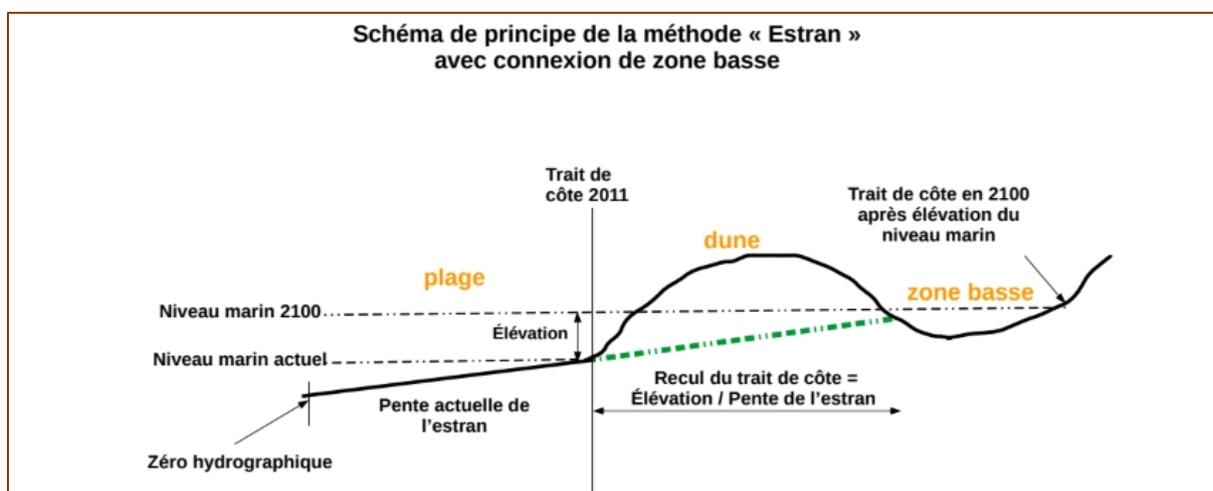


Figure 7 : Hypothèse connexion zone basse et montée du niveau marin (CEREMA)

A moyen et court terme une partie du littoral dunaire semble donc être menacée par la montée du niveau moyen de la mer puisque l'évolution de ce paramètre à travers différents outils montre une augmentation des terres submersibles et de la vulnérabilité de la bande côtière. L'accélération de la transgression marine est reconnue dans la littérature scientifique comme un facteur aggravant de l'érosion et du recul du trait de côte.

1.2 L'évolution des phénomènes de submersion marines et la dynamique éolienne

Le niveau moyen de la mer augmente, mais les phénomènes d'érosions dunaires les plus notables sont le fruit de submersions marines durant les tempêtes hivernales. Il faut donc également étudier le lien entre le niveau moyen de la mer, le changement climatique, et ces aléas précis.

1.2.1. Importance du niveau de la mer dans les évènements de transgression marine

L'augmentation du niveau moyen de la mer suffit à renforcer le phénomène d'érosion et de submersion marine auxquelles les dunes font face (Zemmour 2019). En effet, c'est l'accumulation d'eau à la côte qui peut attaquer un cordon dunaire. L'amplification de cette accumulation dans le cas de conditions météorologiques extrêmes peut entraîner une submersion ou une érosion.

Les niveaux d'eau les plus impactant sont qualifiés de niveaux extrêmes : on détaille généralement ces scénarios comme la conjonction de conditions de marée de vives eaux voir de PHMA (Plus Haute Mer Astronomique), d'une puissance/direction de houle qui va provoquer des vagues de grandes tailles en poussant l'eau à la côte, et d'une surcote atmosphérique (une pression faible entraîne une remontée du niveau de la mer). Cette surcote est plus forte (Rey et al. 2017) quand elle est provoquée par des cyclones, phénomènes rares sur les côtes atlantiques métropolitaines. La fréquence de cyclones extratropicaux devrait augmenter avec le changement climatique, dans des proportions encore inconnues (Baker et al. 2021).

Or, les hauteurs extrêmes des vagues participent à l'augmentation des niveaux marins extrêmes, et elles ont augmentés d'environ 0.8cm/an en Atlantique Nord entre 1992 et 2014. **Le GIEC se positionne à un « degré de confiance élevé » sur l'augmentation des épisodes de niveau marin extrême** ([sous la direction de H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. et Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama et N. M. Weyer] 2019). Le changement climatique est considéré comme un des facteurs l'augmentation de la puissance houlomotrice mondiale (Reguero, Losada, et Méndez 2019), **il est donc admis que le changement climatique entraîne une augmentation du niveau moyen, des niveaux extrêmes et de la contrainte exercée par la mer sur le cordon dunaire** (Mercier 2021).

Alors que le système plage-avant-dune-dune fixée est mobile et capable d'un retrait « naturel » dans les terres sous l'action de la transgression marine, de nombreux exemples montrent que **le recul de la ligne de rivage dans les terres est parfois trop rapide pour que ce système retrouve un équilibre** (Davidson-Arnott et Bauer 2021).

1.2.2. Synthèse des études sur une potentielle augmentation des événements météorologiques extrêmes



« On parle d'événements extrêmes ou d'extrêmes climatiques pour désigner à la fois les phénomènes météorologiques et les phénomènes climatiques. Le GIEC définit dans son cinquième rapport de synthèse les phénomènes météorologiques extrêmes comme des phénomènes rares se produisant en un endroit donné et à un moment particulier de l'année. Lorsque des conditions climatiques extrêmes se prolongent, on parle de phénomène climatique extrême. » ONERC, 2018. Il s'agit donc en général de tempêtes exceptionnelles, de vagues de chaleur ou de canicule, de vagues de froid, de fortes précipitations... Mais on peut y ajouter des niveaux marins extrêmes, voir les conséquences directes de ces phénomènes : crues, submersion marine...

Dans le cadre du réchauffement climatique, les niveaux marins extrêmes locaux centennaux seront annuels pour la plupart des régions côtières en 2100 ([sous la direction de H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. et Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama et N. M. Weyer] 2019).

Les vagues de chaleur/sécheresse seront également plus longues (Aurélien RIBES 2021) :

- Pour un réchauffement global de 1.5°, les températures extrêmes prennent 3 à 4°C
- Au niveau local, 50% des records de chaleur ont été battus depuis 2000
- D'un point de vue statistique, la probabilité de connaître une vague de chaleur en 2019 est 80% plus élevée qu'en 2015
- Il y aurait deux fois plus de sécheresse des sols qu'en 1960

La majorité des études sur l'érosion dunaire et le recul du trait de côte évoquent ce lien présumé entre changement climatique et aléa extrême, sans forcément l'intégrer dans leurs modélisations. (Hénaff, Meur-Férec, et Lageat 2013). A titre d'exemple, une étude sur le littoral métropolitain procède aux **hypothèses suivantes** dans le cadre d'une modélisation d'érosion marine : **augmentation de +/- 10% à très moyen terme (2030), de la variabilité des paramètres de hauteur et direction des vagues, et du paramètre de surcote** (« VULSACO - Vulnérabilité de plages sableuses face aux changements climatiques et aux pressions anthropiques » 2008).

Mais, en France, « aucune tendance climatique ne peut être établie sur l'évolution de l'intensité des tempêtes » (« Réchauffement climatique et tempêtes - Météo-France » s. d.) selon Météo France. Cependant, des modélisations mettent en exergue l'évolution de certains indicateurs météorologiques comme l'intensité moyenne du vent maximal hivernal, en fonction des scénarios du GIEC. Il semble que cet indicateur va effectivement augmenter ou diminuer ponctuellement sur le littoral métropolitain atlantique selon le modèle climatique ALADIN (« DRIAS les futurs du Climat », s. d.). Ces scénarios sont repris par l'ONERC (« Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique (France) - 2019 - Les événements météorologiques extrêmes dans un co.pdf » s. d.).

On peut prévoir une augmentation de la contrainte éolienne hivernale à moyen terme au Nord et une diminution au Sud de l'ordre 5% entre les périodes 2021-2050 et 2071-2100 (forte incertitude selon le rapport DRIAS 2020 (« DRIAS les futurs du Climat », s. d.)).

1.2.3. Facteurs aggravants du changement climatique

La part des pressions anthropiques est difficilement quantifiable, cependant : « **la plupart des sites littoraux en érosion sont soit fortement artificialisés** (digue, épis, enrochements, avant-dune détruite), soit en aval-dérive de secteurs fortement artificialisés et/ou endigués. **Les sites où l'érosion traduit des processus purement naturels sont plus rares** (rive d'estuaire en position de "musoir" par exemple). » (« EUCC France » s. d.)

Une étude visant à calculer un score : somme des impacts humains sur les habitats marins et terrestres montre qu'une zone de 20km autour du trait de côte métropolitain est particulièrement influencée (Daeden 2015). Les scores sont fournis pour des cellules de 5km x 5km. Ils représentent la somme des impacts humains sur chaque habitat. Une pression anthropique répond forcément aux deux conditions suivantes : être issue de l'activité humaine et avoir des conséquences néfastes prouvées. Voici les pressions sélectionnées et pondérées par des experts :

- Population
- Densité touristique
- Artificialisation
- Nombre de navires
- Aires urbanisées
- Zones industrielles et Commerciales
- Mines décharges et chantiers
- Espaces verts artificiels non agricoles
- Sols agricoles
- Réseaux routiers et ferroviaires
- Pêche artisanale
- Polluants organiques
- Polluants inorganiques
- Espèces invasives marines
- Trafic maritime

$$\text{Score} = \sum_{(i=1)}^n \sum_{(j=1)}^m D_i \times E_j \times \mu_{ij}$$

Où D_i représente la valeur standardisée (de 0 à 1) de l'intensité de l'indicateur i , E_j l'aire de l'habitat j , et μ_{ij} la note de pondération de la pression i (de 0 à 5) sur l'habitat j .

Figure 8 : Formule d'obtention des scores (Daeden 2015)

Les territoires littoraux sont donc soumis à une forte pression humaine, bien plus que le reste du territoire, surtout à proximité du trait de côte. Les milieux dunaires sont donc susceptibles d'être particulièrement menacés.

Création de cartes synthétiques d'accumulations des pressions humaines en France - Résultats

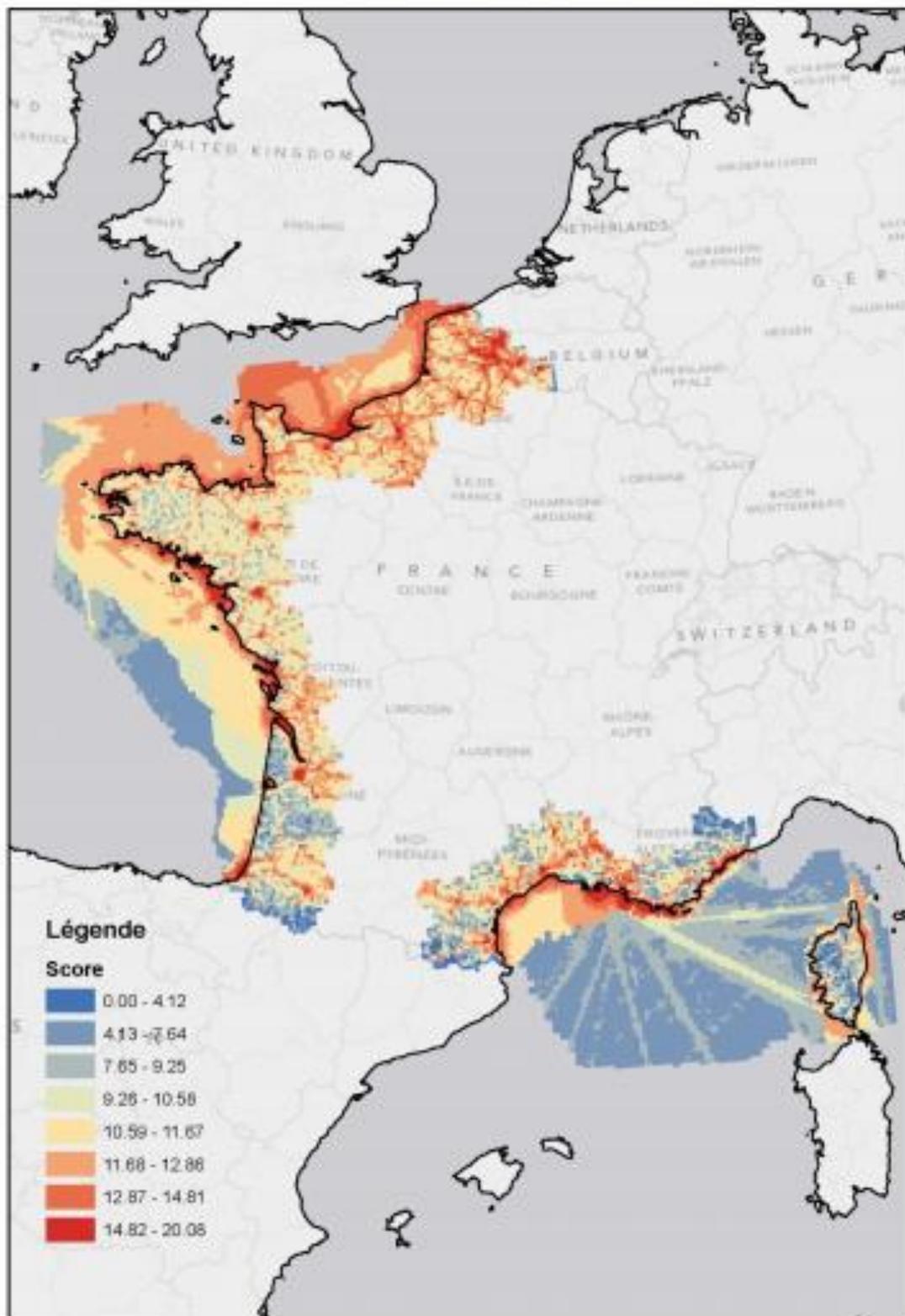


Figure 9 : Synthèse des pressions humaines en France, focus sur le littoral (Daeden 2015)

Les soldes migratoires sont globalement positifs sur la façade Atlantique métropolitaine (France, Commissariat général au développement durable, et Service de l'observation et des statistiques 2011). **On peut donc s'attendre à une augmentation du dérangement sur l'habitat dunaire** : piétinement, érosion autour des axes de passages.

Par ailleurs, **sur les 15 944 ouvrages et aménagement recensés** le long du littoral, **5712** sont identifiés comme susceptibles de modifier les dynamiques sédimentaires le long du rivage (« Premiers enseignements - Géolittoral » s. d.). Ce sont en majorité des structures transversales. Ces ouvrages peuvent aussi concentrer la contrainte érosive à leurs extrémités et subir un affouillement de leurs fondations. Alors, après l'effondrement de l'ouvrage c'est toute la plage qui s'abaisse par rapport au niveau de la mer (« Préconisations pour le recensement des ouvrages et structures de défense contre les aléas côtiers » 2011). Le trait de côte métropolitain est d'environ 5850 km. Il y a **probablement au moins 400 ouvrages** transversaux qui se situent devant les dunes domaniales, sur le DPM, et qui participent à créer des perturbations sédimentaires.

Enfin, 80 ouvrages transversaux susceptibles de modifier fortement la dynamique sédimentaire sont inclus à l'intérieur des dunes domaniales gérées par l'ONF.

Les effets des submersions marines devraient donc s'accroître, en partie à cause de la montée du niveau marin et il est certain que les ouvrages vont également participer à accentuer le recul dans les zones en érosion. Mais d'autres paramètres climatiques vont impacter le milieu dunaire : la salinité, les températures...

1.3 Aquifères, Salinité et Zones climatiques

Le milieu dunaire est souvent qualifié d'extrême au regard des conditions physico-chimiques, et de la végétation spécialisée qui y est installée. L'eau est une ressource rare mais quand même présente dans les nombreux aquifères dunaires. On verra dans quelle mesure cette ressource semble être vulnérable au changement climatique ainsi que l'évolution d'autres indicateurs qui permettent de mieux cerner le biotope et ses tendances futures.

1.3.1. Remontée du niveau de la mer et forçage des aquifères dunaires

Afin de comprendre les impacts potentiels du réchauffement climatique par une augmentation du niveau de la mer sur les aquifères, il faut d'abord étudier le fonctionnement classique de ces systèmes :

« Pour une nappe, le niveau piézométrique (niveau d'eau de l'aquifère) s'élève généralement vers l'intérieur des terres (zones de recharge de l'aquifère). L'intrusion d'eau salée a la forme d'un biseau qui plonge sous la nappe d'eau douce, d'où son appellation commune de « biseau salé » (Figure IV.8). Ce contact entre ces eaux de densités différentes va évoluer suivant les lois de la diffusion et de l'hydrodynamique en fonction d'un contexte géomorphologique, lithologique et hydrogéologique propre à chaque région mais également par rapport à la recharge et à l'exploitation de l'aquifère. À noter, que du fait de la miscibilité des fluides, l'interface n'est pas nette mais correspond à une zone de transition » (Planton et al. 2015)

Le système est donc composé de 3 parties : un compartiment d'eau douce (aquifère), un compartiment d'eau salée (nappe sous-marine) et un compartiment de transition (biseau). Ce biseau plonge à l'interface terre-mer sous l'aquifère. Plus le niveau de la mer est élevé moins cette zone de transition plonge vite et plus la nappe sous-marine s'avance dans le sous-sol terrestre. De l'eau salée peut donc affleurer dans la dune, quand le niveau de la mer est relativement élevé.

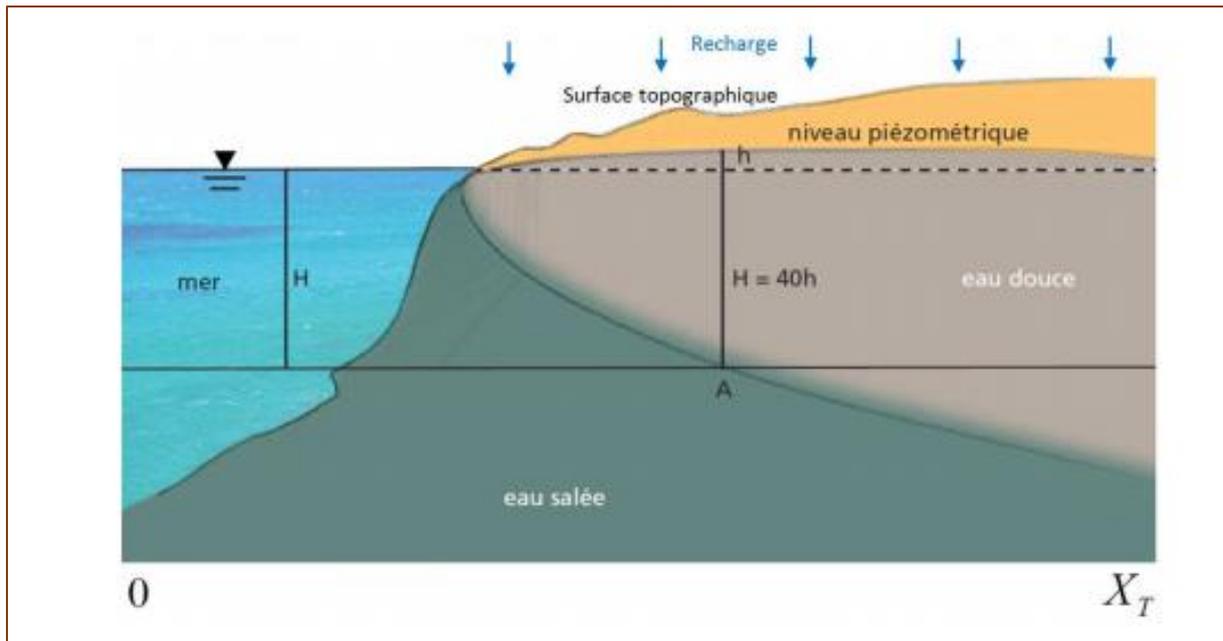


Figure 10 : Fonctionnement du "biseau salé"

La littérature admet la difficile modélisation de l'évolution du gradient de salinité des aquifères côtiers. Une étude propose différentes mesures et une synthèse des menaces auxquelles font face les aquifères dunaires. On peut retenir que c'est **principalement la combinaison de captages abusifs avec la montée du niveau de la mer qui peut notamment entraîner le risque d'une salinisation** irréversible (Jean-Philippe Bellot 2012). Enfin, des cartographies de la vulnérabilité des aquifères côtiers (notamment face au phénomène de montée du niveau de la mer) sont déjà initiées, de manière inégale selon les régions. (Nathalie Dörfliger et Bénédicte Augéard 2013) (F.Lucassou et al. 2019)

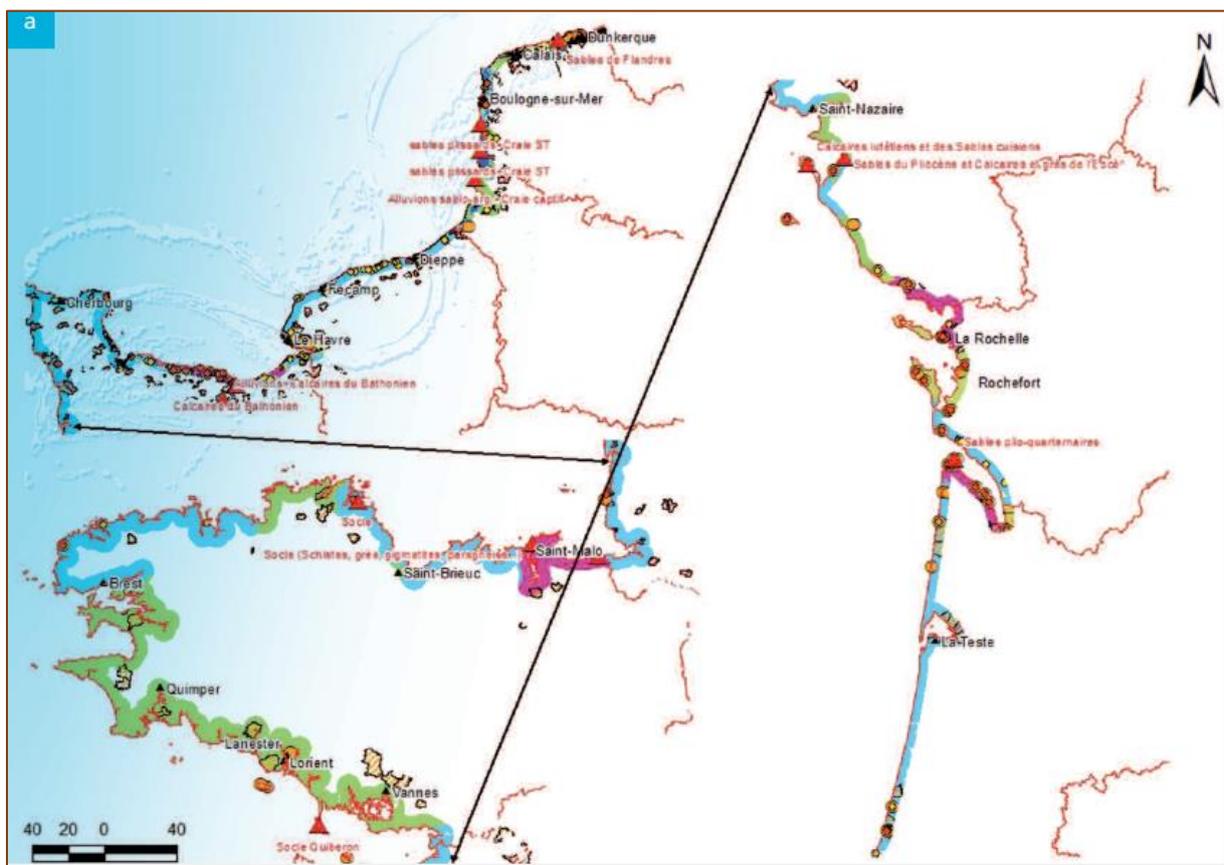


Figure 11 : Exemple cartographie de sensibilité des aquifères côtiers (ONEMA)

Les cinq classes de sensibilité des aquifères côtiers vis-à-vis de l'intrusion saline d'origine naturelle utilisées dans l'étude

« **Sensibilité faible** » : cette classe regroupe les entités de nature imperméable. Ces formations non aquifères sont en général des couches argileuses pouvant constituer une barrière de protection pour un aquifère sous-jacent ou situé en amont hydraulique vers l'intérieur des terres.

« **Sensibilité faible à moyenne** » : les entités de nature semi-perméable comprises dans cette classe sont en général des sédiments plus ou moins argileux, avec une circulation d'eau restreinte mais pouvant comporter localement des aquifères plus perméables. C'est notamment le cas pour des structures multi-couches présentes dans des zones de deltas ou de bassins sédimentaires. Des formations de socle, avec des perméabilités faibles ainsi que des aquifères compartimentés, mais localement semi-perméables font également partie de cette classe. Ces aquifères sont en général sensibles à des intrusions salines par biseau salé, qui peuvent être multiples et superposées en fonction de la configuration de la géométrie du multicouche.

« **Sensibilité moyenne** » : les entités caractérisées par une perméabilité moyenne à élevée, peuvent correspondre à des aquifères sédimentaires (craies non karstifiées mais fissurées ; aquifères poreux avec une forte perméabilité), ou à des aquifères de socle (horizon d'altérites et horizon fissuré) au niveau de la zone de contact avec présence de sources côtières.

« **Sensibilité variable – karstique** » : les aquifères karstiques de cette classe sont caractérisés par une forte hétérogénéité de la distribution des vides et des fissures ; des vides de type conduit peuvent trouver place au niveau du littoral et s'organiser dans l'espace. Du fait des variations du niveau moyen des mers par rapport au continent au cours des temps géologiques, des conduits peuvent être présents à plusieurs dizaines de mètres sous le niveau marin actuel. Ces conduits donnent lieu à des émergences – sources pouvant fonctionner comme source et comme point d'engouffrement, en fonction des variations de la charge hydraulique au sein de l'aquifère (fonction de la recharge et de l'exploitation). Un aquifère karstique côtier constitue un aquifère d'une sensibilité variable d'autant plus s'il y a des sources sous-marines étagées, mais il peut aussi être dans la classe "forte-avérée". Une sensibilité forte peut être attribuée à des zones particulières, zones de cavités et de sources (ex. source de Port Miou dans les Calanques de Marseille). L'exploitation de forages ou de puits en zones karstiques induit des phénomènes imprévisibles en terme d'intrusion saline, certains pompages étant sans effet alors que d'autres provoqueront des intrusions conséquentes. Il faut donc étudier ces zones de manière spécifique.

« **Sensibilité forte-avérée** » : cette classe comprend les secteurs caractérisés par la prédominance d'alluvions perméables et l'existence de nappes d'accompagnement de rivière. Ces secteurs sont confrontés à l'intrusion combinée du biseau salé et du rentrant salé dans les cours d'eau pouvant donner lieu à de petits biseaux salés le long des cours d'eau dans les aquifères de part et d'autre. De plus cette classe comprend les aquifères pour lesquels les intrusions salines sont existantes et où il y a un risque important d'aggravation liée aux conditions d'exploitation selon les informations des études régionales.

Figure 12 : Légende de la sensibilité des aquifères côtiers

Pour déterminer la sensibilité d'un aquifère à l'intrusion côtière, l'ONEMA se base donc sur deux critères : la perméabilité en générale de l'aquifère et la perméabilité au niveau du trait de côte. Cette perméabilité dépend notamment de la nature de l'aquifère : roches sédimentaires, aquifères alluviaux, ou roches cristallines et volcaniques. Elle dépend également de l'épaisseur des couches, et de l'agencement des fissures des roches compactes.

« Le déplacement du biseau salé reste faible (inférieur à 20 m) pour une augmentation du niveau marin de 0,6 et de 1 mètre ».

Le cortège dunaire sera donc impacté dans une proportion aujourd'hui inconnue par une augmentation du niveau marin. La frange boisée, et les forêts dunaires composées en majorité de pin maritimes (*Pinus pinaster*) résistant à une augmentation modérée de la salinité et situées à plus de 20m du trait de côte, ne sont à priori pas menacées par ce facteur (Antonellini et Mollema 2010).

1.3.2. Evolution du climat au sein des espaces dunaires

L'outil « **DRIAS les futurs du climat** » (« DRIAS les futurs du Climat », s. d.) met à disposition les modélisations climatiques locales (mailles de 12km de précision maximum) des laboratoires climatiques (IPSL, CERFACS, CNRM). Il permet d'étudier l'évolution d'un grand nombre de paramètres climatiques, selon les scénarios du GIEC, à travers différents modèles, à une échéance donnée (court terme, moyen terme, long terme). On peut donc prévoir par exemple les nouvelles plages de température moyenne, jours de gel et de fortes chaleurs auxquelles sera confrontée la végétation dunaire. Un autre outil climato-forestier, ClimEssences (« Climessences » 2021) permet de se projeter dans les climats forestiers et d'estimer la migration/l'adaptation de différentes espèces forestières en fonction du climat. Les cortèges dunaires ne sont pas fichés par cet outil, cependant les principales espèces forestières des dunes boisées le sont. On retiendra que le littoral atlantique métropolitain sera soumis à une température moyenne annuelle en augmentation :

- De plus de 1°C d'ici 2041-2070 par rapport à 1994-2005 pour le **RCP 2.6** sauf localement dans le Finistère et les Cotes d'Armor
- De plus de 1.5° sur le littoral du Nord jusqu'au Morbihan puis de plus de 2°C vers le Sud pour le **RCP 8.5**.

Enfin, une tendance se dégage à horizon 2100, les littoraux semblent bénéficier d'une augmentation plus modérée de leurs températures moyenne comparativement à l'ensemble du territoire métropolitain (Météo -France, DRIAS).

Les paramètres climatiques ont leurs importances sur la végétation mais également sur la géomorphologie, l'humidité et la sécheresse d'un milieu jouent un rôle important sur la mobilisation du sable, son colmatage, voir l'érosion éolienne.

Afin de conclure cette première partie « synthèse des conséquences dues au changement climatique dans le cadre de l'érosion dunaire », on peut dire que les impacts du changement climatique sur l'érosion dunaire sont toujours sujet à débats et variables dans la littérature. L'ONERC essaie d'offrir une traduction nationale du consensus scientifique du GIEC. Mais ce consensus reste trop précaire, et on peut regretter qu'il ne soit pas fait au niveau national le choix d'une hypothèse, d'un scénario climatique « moyen » ainsi que la modélisation précise des paramètres climatiques en découlant : température, niveau de la mer plutôt que taux d'érosion, vent, sécheresse... quitte à insister sur leur caractère incertain. Il est en effet compliqué pour le gestionnaire d'opter pour telle ou telle stratégie face à un futur climatique incertain.

Malgré cette absence de scénario « moyen » clairement affiché au niveau national, une augmentation non négligeable du niveau marin est prévue et donc un renforcement des phénomènes de submersion marine et de pression éolienne au nord du littoral. Quelques indicateurs s'attachent à évaluer ces effets au niveau régional. L'évolution de facteurs climatiques directs : température, précipitation, sécheresse est également parfois précisée.

Enfin, la pression anthropique, est un facteur aggravant pour le milieu dunaire.

Différents outils (*DRIAS, Climate Central*) permettent ainsi de prévoir à l'échelle régionale voir plus fine encore les effets du changement climatique sur le littoral. Par ailleurs, d'autres phénomènes comme l'intrusion saline sont à l'étude et permettent déjà d'anticiper certains impacts.

Les habitats verront donc une modification des conditions physico-chimiques de leurs biotopes, des caractéristiques du milieu marin, et de certains événements extrêmes. Cette évolution semble tolérable au regard des autres phénomènes bien plus dommageables pour la dune et impactant pour la dynamique éolienne que sont les tempêtes hivernales, qui ont la capacité de faire reculer considérablement le trait de côte et de remettre violemment le sable en mouvement.

Ce recul, comme l'évolution de la végétation dunaire n'est pas forcément négatif mais doit être anticipé voir contrôlé.

Ainsi il est pertinent de comprendre comment on peut modéliser la dynamique morphologique des cordons dunaires. De même, comprendre comment la biocénose peut s'adapter ou non aux variations climatiques abordées dans cette partie, permet d'appréhender la vulnérabilité du milieu dunaire face au changement climatique.

Dans quelle mesure peut-on modéliser précisément le devenir de ces cordons dunaires face à ces changements tant d'un point de vue physique qu'écologique ?

2. Prévoir et modéliser l'érosion dunaire

Prévoir l'érosion dunaire consiste à prendre en compte l'ensemble des paramètres du milieu, faire des hypothèses sur leurs évolutions et construire des modèles qui intègrent un maximum de paramètres et de contraintes. Cela consiste aussi à comprendre le degré d'adaptation des principales plantes fixatrices.

2.1 Impact et prise en compte du changement climatique sur les différents modèles numériques

Dans la partie précédente, différents outils modélisant l'augmentation du niveau marin, et l'érosion à l'échelle régionale ont été présentés. Ces outils permettent de prendre la mesure de l'évolution des facteurs érosifs liés au changement climatique. Cependant, ils ne permettent pas de déterminer l'importance relative de chacun de ces facteurs par rapport aux paramètres indépendants du changement climatique.

En effet, l'importance de la montée du niveau marin sur le recul du trait de côte n'est pas évidente (Cozannet 2016) (Cazenave et Cozannet 2014) et ne fait pas consensus.

On peut néanmoins prévoir des échéances à partir desquelles ce phénomène deviendrait déterminant au sein du phénomène global d'érosion, ici entre 2040 et 2050.

Sur la figure suivante, sont présentées **les facteurs du recul du trait de côte** à court/moyen terme : dérive littorale, morphologie des côtes sableuses, tempêtes, niveau marin, scénario de changement climatique et variabilité régionale. Ces paramètres ne sont pas forcément indépendants, comme le montrent la relation étroite entre changement climatique et niveau marin. Sur ce graphique, c'est l'importance de chaque paramètre sur la variance du modèle d'évolution du trait de côte qui est représentée à travers l'indice de Sobol. C'est un indice de « *sensibilité* », qui met principalement en lumière les incertitudes concernant la fonction modélisée (ici, le trait de côte). Les indices de Sobol permettent une appréciation des incertitudes et marges d'erreurs, mais surtout de comprendre comment ces incertitudes évoluent dans le temps.

A partir de 2050, l'incertitude du paramètre changement climatique et donc du niveau marin (puisque ces deux paramètres ne sont pas indépendants, même dans ce modèle) conditionne fortement l'ordre de grandeur du recul du trait de côte. C'est donc l'intensité du changement climatique et l'élévation marin qui sera déterminante sur l'amplitude du recul du trait de côte. L'analyse suivante explique également que les différents scénarios de changement climatique (RCP) présentent peu de différences avant 2060.

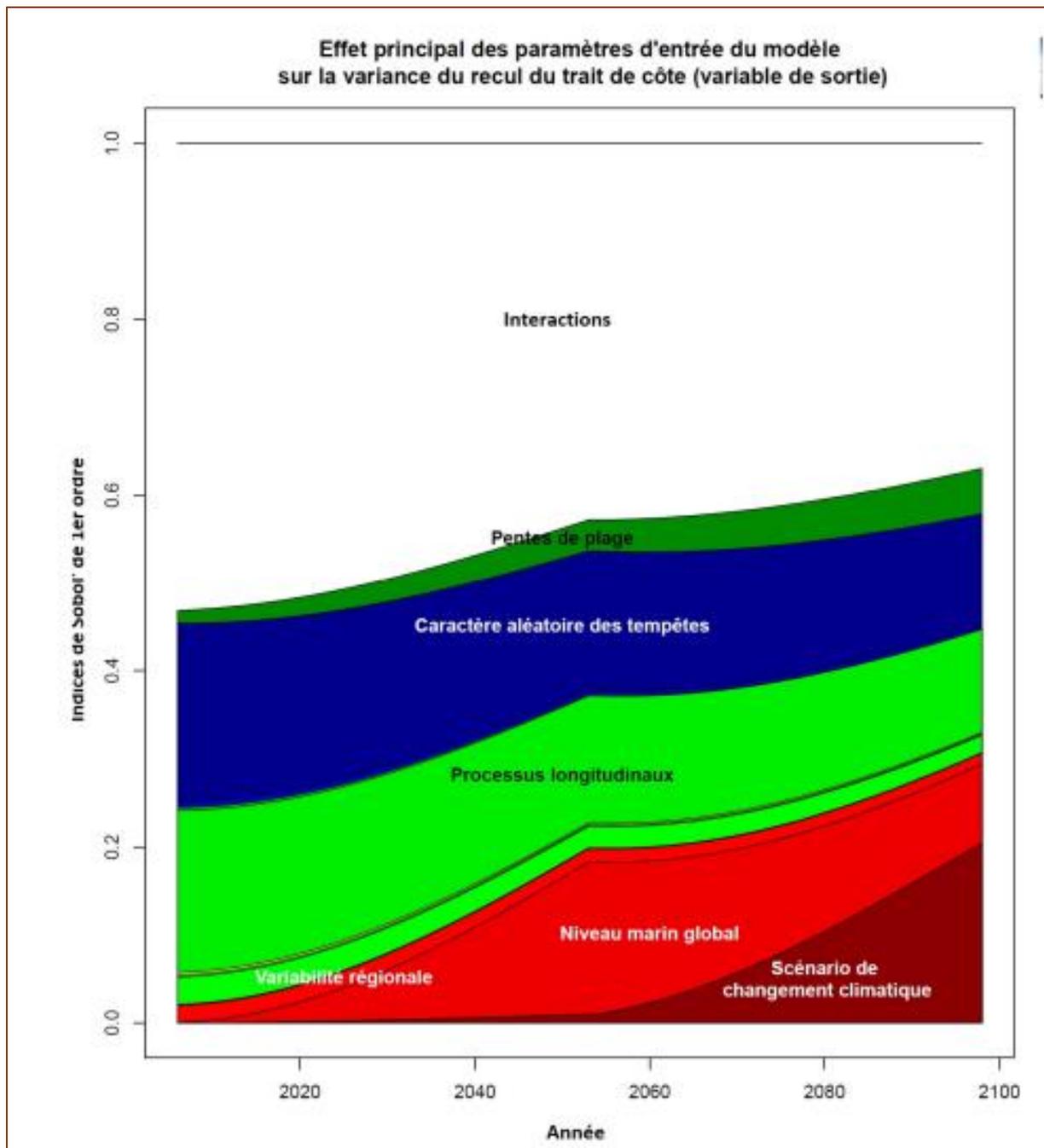


Figure 13 : Effet de différents paramètres d'entrée (notamment la montée du niveau marin) sur le recul du trait de côte (Cozannet 2016)

La plupart des modèles numériques « fins » d'évolution du trait de côte le long des littoraux bas-sableux ne prennent pas en compte la montée du niveau marin car ils se basent principalement sur une observation empirique ou sur la modélisation des processus de transports sédimentaires dominants, voir sur les évènements tempêteux uniquement.

Un modèle « simple » permet de calculer un **indice de prévision d'érosion** (Musereau 2009). Il vise principalement à caractériser en fonction de la houle, de la marée et du vent, le déséquilibre sédimentaire engendré par des phénomènes météorologiques. Basé sur un modèle prédictif de franchissement de seuil, il nécessite d'être adapté à chaque site et la collecte de nombreuses données. Une fois calé et établi, les pronostics sont plutôt fiables

Un modèle récent (Robinet 2017) : **LX Shore**, est en mesure d'intégrer un tel module. De plus, ce modèle prend en compte à la fois les processus *longshore* (transport sédimentaire longitudinal) et les processus *cross-shore* (processus transversaux). Il permettrait donc de travailler et de suivre à la fois le trait de côte et le profil transversal des milieux dunaires en recul afin de peut-être mieux adapter la gestion morphologique de la dune. L'expérimentation de ce modèle (Robinet et al. 2018) suivant la règle de Bruun a permis de prédire que l'impact de la montée du niveau marin peut se révéler aussi important qu'un évènement extrême pour le site du Truc Vert (Gironde) d'ici 2100.

Règle de Bruun

Cette loi considère que le profil de plage sous-marine s'adapte à la montée du niveau marin en conservant sa forme, mais en faisant reculer la ligne de rivage. La loi de Bruun se calcule à partir de 4 termes : **S** la montée du niveau marin, **L** la longueur de la zone de surf, **B** la hauteur de Berme, et **h** la profondeur de fermeture :

$$R = S \left(\frac{L}{B + h} \right)$$

Cette loi est souvent critiquée. En effet, elle ne prend pas en compte le transport sédimentaire parallèle au trait de côte ainsi que les échanges au-delà de la profondeur de fermeture. Une application stricte de cette loi exclurait donc les plages soumises à un régime de vague oblique, à l'érosion éolienne, à toute dérive littorale conséquente. Si on admet la loi de Bruun sans exception, les conséquences d'une élévation modérée du niveau marin seraient peu perceptibles (Cozannet 2016). Néanmoins, il s'agit du modèle le plus répandu pour estimer le recul du trait de côte. La combinaison de cette formule avec la modélisation des autres phénomènes érosifs est souvent à l'origine de nouveaux modèles plus précis.



Figure 14 : Illustration règle de Bruun (Salomon, 1995)

Enfin, les modèles classiques d'érosion ne ciblent généralement pas précisément le cordon dunaire. **Mais le DUBEVEG model** tend à montrer l'existence **d'un équilibre possible** pour les dunes végétalisées, malgré une augmentation raisonnable du niveau marin, grâce à une meilleure mobilisation éolienne du sable en pied de dune. Cet équilibre nécessite parfois le recul de la dune. Ce modèle intègre la végétation comme un facteur de fixation et de protection de la dune. Il permet de mieux comprendre comment une **dévégétalisation** ponctuelle de la dune (tempête, sécheresse) peut conduire à un mouvement de la dune immédiat vers les terres. Ce modèle montre également **qu'en dessous d'un certain seuil de revégétalisation** post-crise stabilisant/protégeant l'avant dune, **le nouvel équilibre dunaire peut se révéler impossible à atteindre** (Keijsers, De Groot, et Riksen 2016).

DUBEVEG model

Dans ce modèle informatique, 3 modules successifs traitent des phénomènes hydrodynamiques, éoliens, et biotiques.

- Transport éolien : la modélisation de ce processus est basée sur un vent d'intensité constante et direction continue. Des « dalles » de sables sont déplacées par le vent, puis sédimentent à nouveau en fonction de la pente et de la végétation.
- Végétation : Après un certain nombre de répétitions du transport éolien, le module végétation est activé (une fois/an à l'échelle de la simulation). La végétation se développe par expansion latérale, ou par germination « spontanée ». Les limites d'enfouissement par le sable et un bilan sédimentaire optimal servent à probabiliser la croissance de la végétation. La variation saisonnière ne fait pas partie de ce modèle. Lorsqu'une cellule est végétalisée à 100%, la croissance s'arrête. Les paramètres de croissance et de tolérance sont différents pour les deux « types » d'espèces modélisées : *Ammophila arenaria* et *Hippophae rhamnoides*
- Phénomènes hydrodynamiques : A l'aide des marées, des niveaux d'eau et de vagues enregistrés hebdomadairement, et des conditions locales de déferlement estimées de manière semi-empirique, une énergie hydrodynamique est calculée. Cette énergie contrôle le potentiel d'érosion et de dépôt. Au sein de chaque cellule, le profit de plage est ensuite ajusté en conséquence, y compris sur l'avant plage et les premières dunes. Le profil d'équilibre des plages recule également dans les terres en fonction de la montée du niveau marin, selon la règle de Bruun.

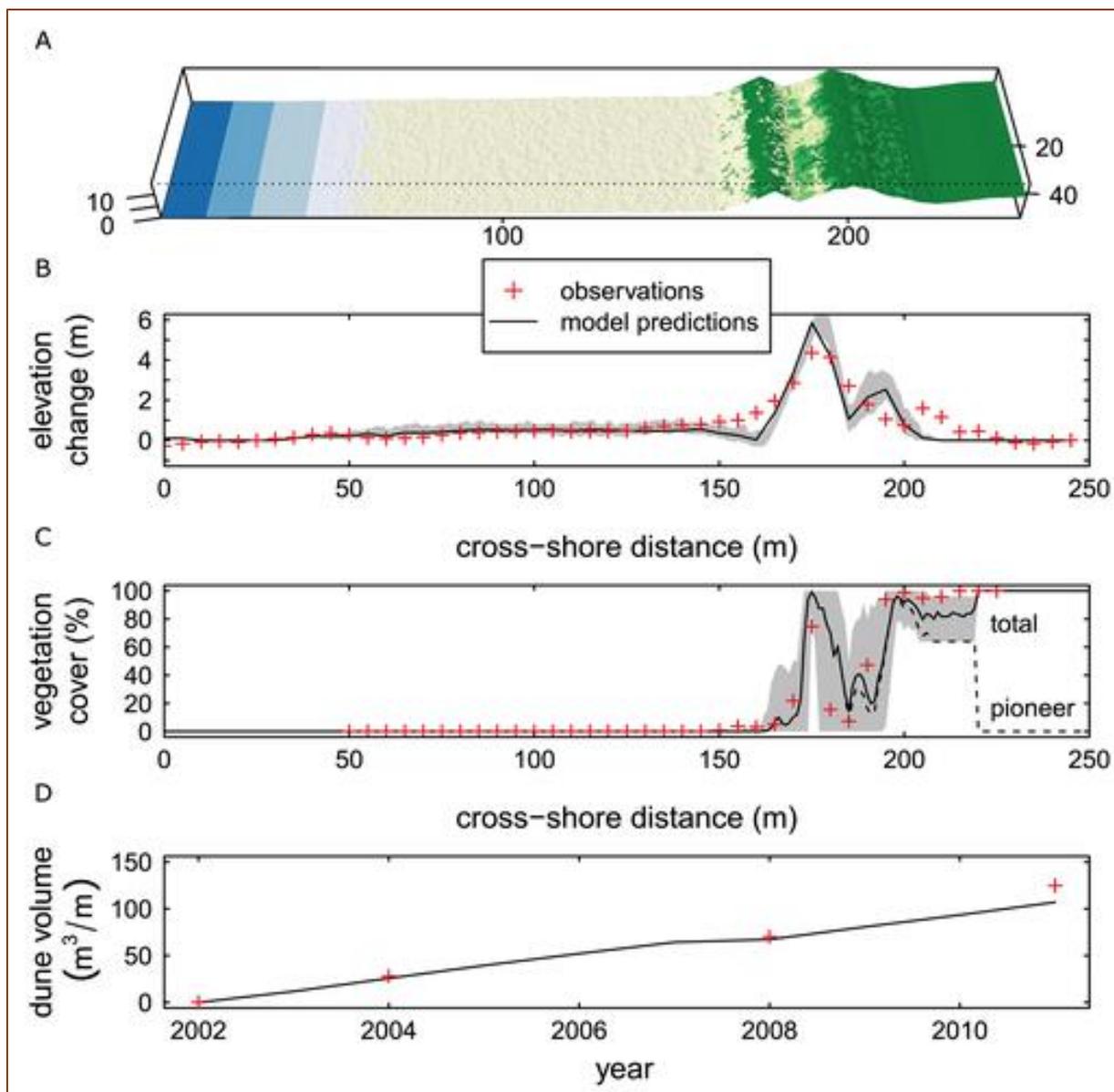


Figure 15 : Comparaison des modélisations et des observations (Keijsers, De Groot, et Riksen 2016)

Sur la figure précédente, les croix rouges représentent les observations du profil de plage, de la couverture végétale, et du volume dunaire. Les prévisions du modèle, représentées par un trait noir continu, sont très proches des observations. Un échantillonnage et recalage conséquent a permis de modéliser au mieux ces phénomènes naturels. Ce succès permet d'accorder un certain crédit à différents scénarios et d'apprécier les effets de la montée du niveau de la mer.

A travers ce dernier exemple, il apparaît que la végétation captatrice et fixatrice est donc soumise au même titre que l'ensemble dunaire au phénomène d'érosion et de submersion. On verra que le degré de résistance et de résilience de la flore face aux autres variables du changement climatique est aussi un enjeu fort de modélisation.

2.2 Vulnérabilité et mobilité des habitats et des espèces dunaires face au changement climatique

Les habitats (définition réglementaire qui semble parfois figée) n'ont pas vocation à être éternels. Par nature, un habitat est mobile puisqu'il y a une évolution permanente de la biodiversité (nouveaux individus, nouvelles espèces, nouveaux écosystèmes). Cette assertion est particulièrement vraie pour les milieux dunaires. Mais il faut essayer d'apprécier cette vitesse d'apparition et de disparition face au changement climatique à travers la notion de **résilience** et surtout de comprendre dans quelle mesure **les relations au sein de ces habitats** (ex : relations interspécifiques, chaîne trophique) sont menacées ou non.

2.2.1. Vulnérabilité des habitats dunaires atlantiques

Les espèces forestières majoritaires *Pinus pinaster* (pin maritime), *Quercus ilex* (chêne vert) sur le littoral de la Gironde jusqu'en Pays de la Loire sont considérées comme résistantes face au changement climatique pour les paramètres suivants : résistance juvénile aux fortes sécheresses, résistance adulte aux fortes sécheresses, adaptation aux climats déficitaires en eau. Au Sud de la Gironde, le chêne vert cohabite avec les espèces *Quercus robur* (Chêne pédonculé) et *Quercus suber* (chêne liège). Or *Quercus robur* est sensiblement plus menacé par les fortes sécheresses et les climats déficitaires en eau (« Chêne Pédonculé/Chêne Sessile » s. d.).

L'impact du changement climatique sur les écosystèmes est globalement anticipé par la littérature scientifique. **Les cortèges dunaires sont des communautés de végétaux aux caractéristiques biologiques semblables.** Ces plantes semblent particulièrement résistantes ou résilientes, au point que certaines études assurent **qu'ils résistent pour le moment aux effets observés du changement climatique** (Pakeman et al. 2015). **Le changement climatique semble également favoriser les espèces thermophiles (résistantes à la chaleur, affectionnant les températures de plus de 30°C)** sur les côtes méditerranéennes (italiennes).

Ainsi, les espèces : *Sporobolus virginicus* (la sporobole de Virginie), *Anthemis maritima* (L'Anthémis maritime); *Pancreatium maritimum* (Lis maritime); *Sonchus bulbosus* (Laiteron bulbeux), *Medicago littoralis* (Luzerne du littoral), *Polygonum maritimum* (Renouée maritime) sont apparues en 20 ans (Del Vecchio et al. 2015) et la couverture de *Ammophila arenaria* (Oyat) et *Elymus farctus* (Chiendent des sables), a augmenté (taux d'occupation du sol). Ces deux dernières espèces participent activement à la fixation et à la protection de la dune par la végétation.

Une autre étude sur les dunes écossaises (Pakeman et al. 2015), montre que ce sont les espèces pionnières ou de transition qui semblent les plus sensibles au changement climatique. Les espèces pionnières sont celles qui recolonisent un milieu perturbé ou un nouveau milieu puis qui laissent progressivement la place à d'autres.

La stabilité générale du cortège végétal dunaire face au changement climatique peut être aussi bien liée au caractère particulièrement résistant des plantes dunaires ou alors aux efforts de gestion de ces milieux qui empêchent leurs invasions par des espèces « sudistes ». Cette stabilité relative ne doit pas faire oublier la vulnérabilité de tout milieu naturel aux variations climatiques.

En effet, bien que les cortèges dunaires semblent résistants aux effets observés du changement climatique, certaines espèces endémiques seront limitées dans leurs migrations, prises en étau entre la montée du niveau marin et les infrastructures dunaires (Mendoza-González et al. 2013). C'est le phénomène de « **compression côtière** », notamment défini sur les côtes mexicaines de Veracruz (Luisa Martínez et al. 2014). Ce concept désigne le rétrécissement de l'estran à cause des activités humaines, de la perte de sédiments et de la montée du niveau marin (« Doody et Office for Official Publications of the European Communities - 2004 - Living with Coastal Erosion in Europe Sediment an.pdf » s. d.).

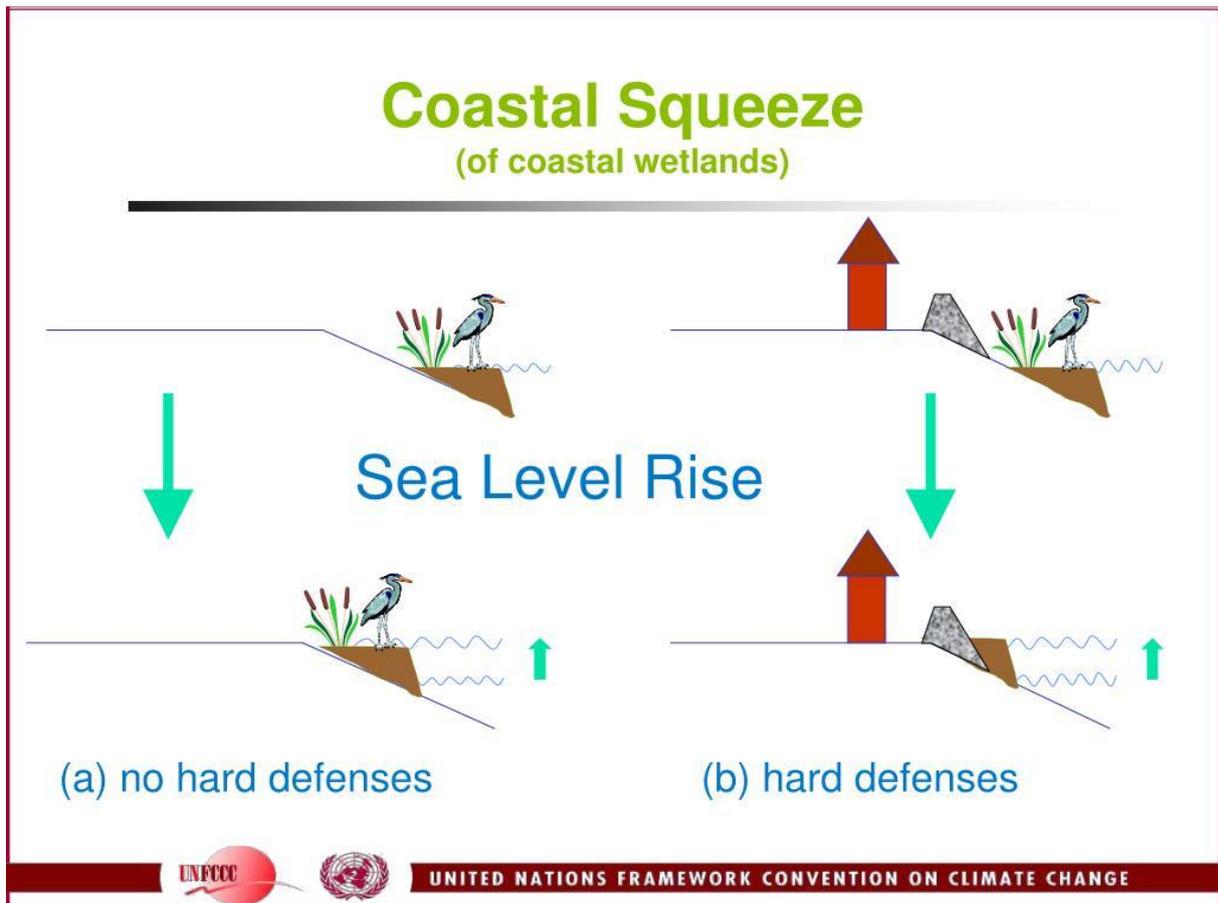


Figure 16: Illustration simplifiée de phénomène de "compression côtière".

L'urbanisation du littoral empêche la migration des habitats naturels face au phénomène de montée du niveau marin (bela 2019). Il semblerait donc que les cortèges dunaires ne soient globalement pas menacés par le changement climatique (terrains d'études : Méditerranée, Ecosse, Europe...), mais plutôt par la combinaison des pressions anthropiques et de la montée du niveau marin. **De plus, l'évolution de la température va mener à l'apparition/migration de nouvelles espèces et l'augmentation de la couverture végétale** (Jackson et al. 2019).

Aussi, les dépressions humides des dunes atlantiques (Cotentin) sont menacées par une simple variabilité de la ressource en eau. L'évolution des jours annuels de sécheresse, l'augmentation des événements extrêmes auront forcément des conséquences négatives sur ce milieu, en particulier une dynamique d'embroussaillage (Petit-Berghem 2008), problématique que les gestionnaires affrontent déjà. En Espagne et au Portugal, l'aridité a favorisé une dynamique arbustive au détriment des cortèges dunaires (Fernández-Alonso et al. 2021).

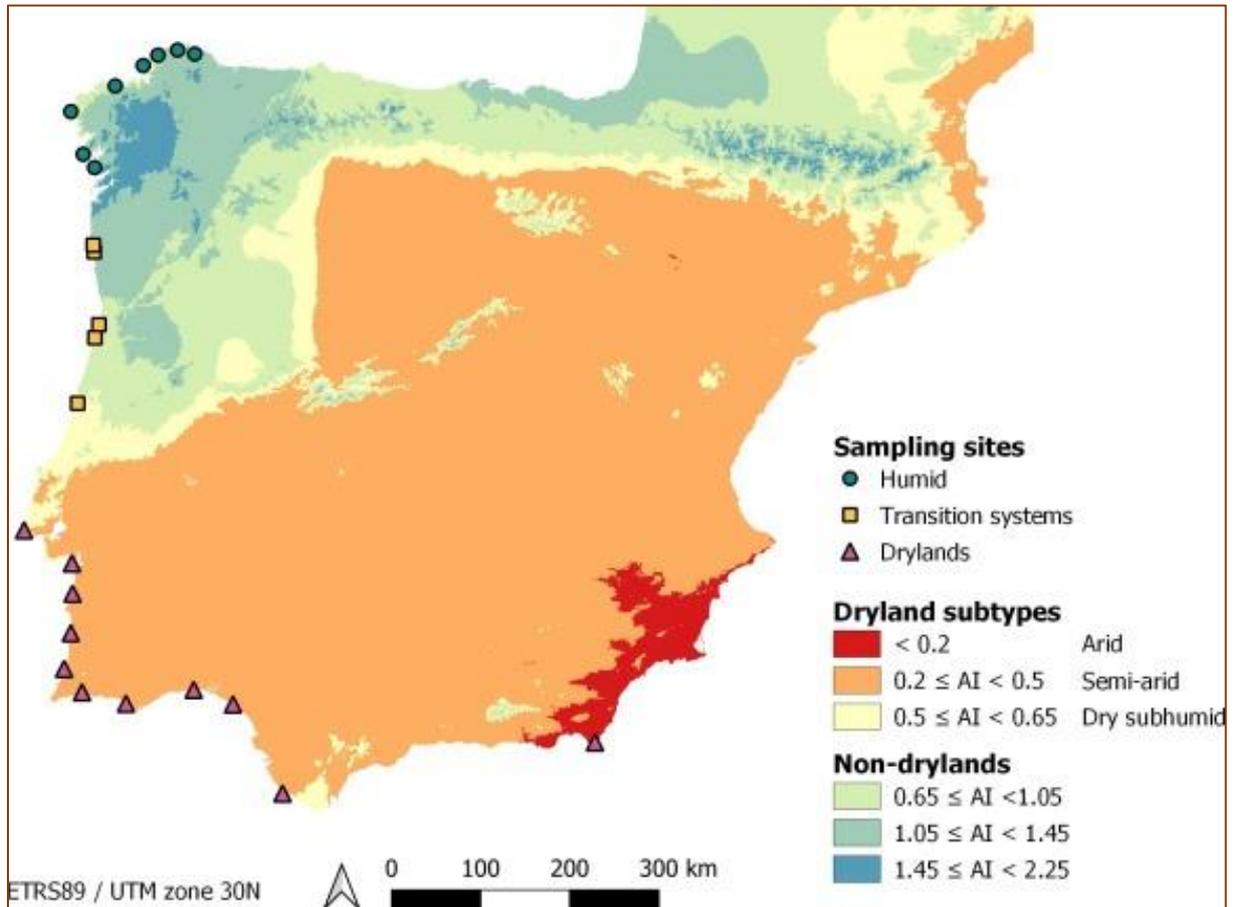


Figure 17 : Ensemble de sites dunaires sélectionnés selon leurs taux de sécheresses.

Cette étude a montré que la sécheresse affaiblit les cortèges végétaux dunaires sur ce secteur et fait chuter les populations microbiennes et fongiques ainsi que le taux de matière organique. Or c'est le couvert végétal initial qui permettait de maintenir des conditions locales biotiques stables. Préserver le couvert végétal devient essentiel quand la sécheresse devient la problématique principale.

Si on s'intéresse aux différentes typologies dunaires, **les paramètres climatiques déterminants dans la dégradation de la biodiversité pour l'avant dune, la dune blanche et l'arrière-dune ne sont pas les mêmes** : la température et les précipitations pour l'avant-dune, les submersions marines pour la dune blanche, et précipitations et submersions marines pour l'arrière-dune (Miller, Gornish, et Buckley 2010).

Là encore, les relations interspécifiques ne semblent pas beaucoup impactées par le changement climatique.

Relations interspécifiques

Il s'agit des relations entre les individus de plusieurs espèces comme la compétition, la prédation, le parasitisme, la symbiose, ou le mutualisme. Chez les plantes, ces relations sont souvent souterraines, elles vont s'associer avec des champignons (mycorhize) qui leurs permettent d'amplifier leurs capacités à partager, vampiriser des nutriments, voire de communiquer avec des végétaux voisins. Certaines plantes comme *Helichrysum stoechas* (Immortelle des dunes), régulent et dominent les autres espèces à proximité immédiate de cette manière. Dans le paragraphe suivant, la relation de cette espèce avec sa « communauté » est détaillée dans un contexte de stress. La notion de stress regroupe toutes les perturbations qu'une espèce peut subir. Le changement climatique est susceptible d'accroître ce phénomène de stress.

En faisant varier différents paramètres sur des plantes « seules » ou en communauté : *Festuca vasconensis* (Féтуque de Gascogne), *Senecio inaequidens* (sénéçon de Mazamet), *Pancratium maritimum* (Lis maritime), *Cistus salvifolius* (Ciste à feuilles de sauge), (*Elymus farctus* (Chiendent des sables), *Oenothera biennis* (Onagre bisannuelle), et le sous-arbrisseau : *Helichrysum stoechas*, il a été déterminé que la ressource en nutriments régule les interactions du sous-arbrisseau vers les autres plantes (Le Bagousse-Pinguet et al. 2013).

- Une pénurie de nutriments modifie donc le comportement d'un sous-arbrisseau dunaire dominant vis-à-vis de « sa » communauté végétale.
- La ressource en eau (qui peut plus facilement être affectée par le changement climatique) augmente également le taux de survie individuel des espèces.
- Le **stress hydrique ne semble pas être un facteur déterminant dans les interactions interspécifiques entre une communauté végétale dunaire et un arbrisseau**. Une pénurie occasionnelle d'eau, probable dans un contexte de changement climatique modéré, reste donc gérable par les espèces végétales associées.



En résumé : dans ce premier exemple est abordée la complexité des effets du changement climatique sur les communautés végétales. L'association étudiée ici dépend principalement de la ressource en nutriment, moins de la ressource en eau.

Cependant, le stress peut diminuer les interactions d'autres communautés végétales. En Aquitaine, l'observation de cortèges dunaires soumis à une année de **sécheresse** a montré que :

- **Les interactions interspécifiques ne survivaient pas à un stress intense dans les communautés les plus pauvres en diversité**
- Sauf dans le cas de *E. farctus* qui a montré un taux de survie supérieur dans la dune grise (Forey, Touzard, et Michalet 2010)



Une pénurie plus régulière d'eau, probable dans un contexte de changement climatique fort/extrême peut donc ne favoriser qu'un nombre très restreint d'espèces et faire diminuer la population de la majorité des espèces actuelles.

Les effets du changement climatique sur certaines espèces semblent globalement atténués par la combinaison des interactions au sein des communautés végétales dunaires (Bai et al. 2021). **Cependant, un changement radical des paramètres climatiques peut nuire aux relations interspécifiques des cortèges dunaires.** A partir de ces vulnérabilités plus ou moins identifiées, on peut construire des indicateurs d'habitats qui prendront en compte un maximum de paramètres.

2.3 Quels indicateurs ?

Dans la partie 1 sont présents les indicateurs d'érosion classique, à commencer par l'indicateur national d'érosion côtière. Plus localement, de nombreuses typologies ont été mis en place, qui s'appuient en général sur la présence d'enjeux qui découlent eux-mêmes d'un certain cadre socio-culturel (vision axée sur le risque, qualité paysagère, conservation de la biodiversité...) (Favennec 2007). La gestion multifonctionnelle réunit généralement tous ces aspects. Quels sont les indicateurs qui permettent de suivre l'érosion/l'évolution dunaire à travers le prisme du changement climatique ?

- **A travers le suivi de la flore/faune** : un projet spécifique à la Nouvelle-Aquitaine : les sentinelles du climat (Mallard 2016), vise à suivre un certain nombre de plantes (et d'autres taxons) « indicatrices » sur 6 ans et modéliser les effets du changement climatique sur leurs répartition. Des plantes inhérentes à la dune font partie de ce suivi comme *Ammophila arenaria* ou des amphibiens comme le reptile *Timon lepidus* (lézard ocellé). Le choix des espèces s'est fait comme tel : « Ces espèces ont été sélectionnées sur les critères suivants : capacité de déplacement faible, inféodées aux écosystèmes sensibles, sensibilité au changement climatique, biologie et écologie connues, observations faciles et objectifs de conservation des espèces ». 9 tomes ont été publiés dans le cadre de ce projet en 6 ans.

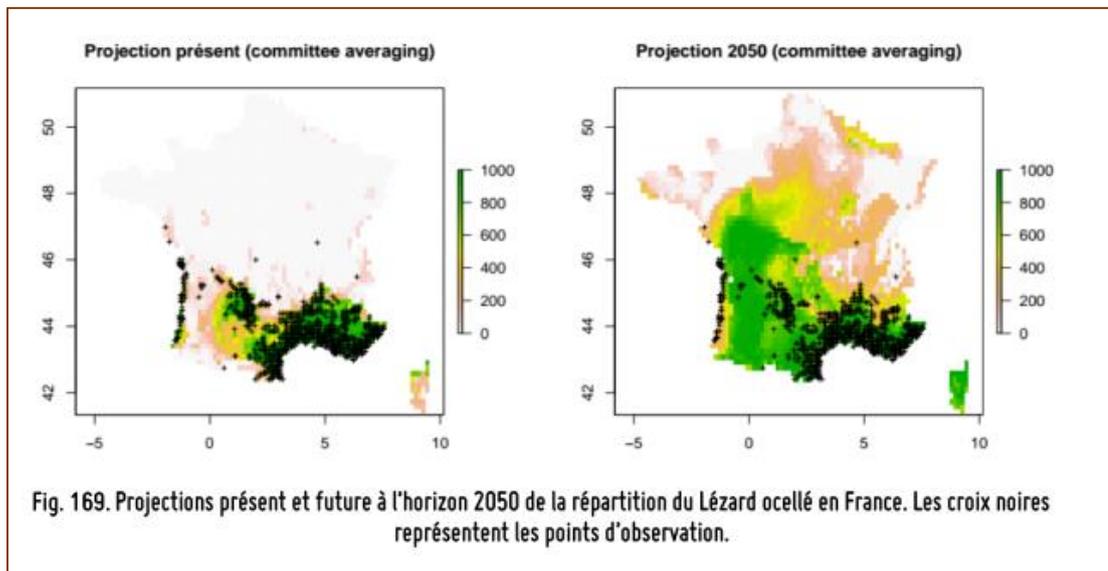


Figure 18 : Modélisation de l'habitat futur de lézard ocellé, témoin de l'habitat dune grise (« Programme les sentinelles du climat – Tome VIII : Écologie du changement climatique en région Nouvelle-Aquitaine - Passages » s. d.)

Sur la base de milliers d'observation, et de la modélisation de la niche écologique du lézard ocellé (en particulier des paramètres physico-chimiques) une aire de répartition a été projetée à l'horizon 2050. Identifier un déplacement de cette espèce sur un habitat qui lui est défavorable permettrait d'assumer que le changement climatique a perturbé les conditions écologique de l'habitat dune grise. L'étude montre qu'il est « trop tôt pour démontrer l'existence d'une pression climatique sur le Lézard ocellé par les suivis naturalistes seuls » mais qu'il est malgré tout possible de modéliser les impacts à long terme.

- **Un indicateur de vulnérabilité de la dune** (MDVI, Méditerrané) a fait l'objet d'une étude spécifique (Ciccarelli et al. 2017). Il prend en compte 5 groupes de variables : géomorphologie du système dunaire, influence marine, effets éoliens, la végétation, et la pression anthropiques pour un total de 51 paramètres, obtenus relativement facilement. Ces 5 groupes sont moyennés pour obtenir un indice final entre 0 et 1. Plus cet indice est proche de 1, plus la dune est « vulnérable ». Cet indicateur a mis en évidence que les facteurs critiques de vulnérabilité de la dune sont : l'influence des événements marins, la présence de peu de végétation fixatrice, et les pressions anthropiques. L'étude recommande de réintroduire la végétation endémique d'avant-dune. Cet indicateur a le mérite d'être multidisciplinaire et les paramètres ne nécessitent pas d'analyses trop poussées. C'est donc une piste intéressante à mettre en œuvre sur les dunes atlantiques. Cependant, les indicateurs ne laissent pas une grande marge à la « dune idéale » ce qui peut sembler en contradiction avec la stratégie de dynamique libre présentée dans la partie suivante.

| | | | | | | |
|-----------|---|-----|------|--------|-------|-------|
| 9 | Quantité de sable (%) extraite pour la construction, etc. * | 0% | <5 % | >5 % | >25 % | >50 % |
| 10 | Fréquence de nettoyage des plages en été (élevée est deux fois par jour; moyenne, quotidienne)* | Bas | | Modéré | | Haut |
| 11 | % plage supérieure nettoyée* | 0 | <25 | <50 | <75 | >75 |
| 12 | % d'infrastructures permanentes remplaçant les dunes actives (routes, maisons, etc.) * | 0 | <25 | <50 | <75 | >75 |

Figure 19 : Echantillon de paramètres de l'indicateur MDVI (Ciccarelli et al. 2017)

Sur le tableau précédent, on observe certains paramètres utilisés pour calculer l'indice de vulnérabilité. Ils appartiennent à la catégorie « effet humain ». Les paramètres sont quantifiés et séparés en 4 classes. De gauche à droite, le paramètre caractérise une plus forte vulnérabilité. L'étude souligne notamment les conséquences du nettoyage de plage, facteur de vulnérabilité.

- Etude de la conservation des dunes à travers l'observation de cortèges d'animaux spécialisés, OPIE (Jaulin et Soldati 2005): **Une grille de cotation propre à l'ordre des coléoptères** permet de déterminer un indice global de conservation du milieu (haut de plage). Cette méthode d'évaluation va voir le jour en 2021 sur la côte atlantique, déjà testée sur la côte méditerranéenne. C'est l'opportunité de diversifier cette approche entomologique. De nombreux micro-organismes peuplent également le système plage-dune. D'autres taxons pourraient se révéler être des indicateurs pertinents.



Figure 20 : Inventaire de coléoptères

- **L'indice Redune** (Lithgow, Martínez, et Gallego-Fernández 2015) repose sur 36 indicateurs et permet de diagnostiquer un site dunaire. En fonction de ce diagnostic il est alors désigné comme « à conserver », « à restaurer », « à réhabiliter », voire non restaurable. Il a été principalement testé sur le littoral mexicain, avec succès.

Dans cette seconde partie « Prévoir et modéliser l'érosion dunaire », les modèles d'érosion mixtes (qui prennent en compte les phénomènes physiques et la végétation) qui sont donc en développement, ont été abordés. Cependant, on peut retenir que la majorité des solutions techniques développées, sont compliquées à mettre en œuvre et aujourd'hui encore hors de portée des gestionnaires. La mise en place d'indicateurs remplace en quelques sorte ce travail de modélisation, mais il ne faut pas sous-estimer le nombre de paramètres à récolter pour obtenir un indicateur qui reflète bien l'ensemble des processus à l'œuvre (contraintes naturelles et anthropiques). Par ailleurs, il faut calibrer ces indicateurs de manière à intégrer la libre évolution des milieux. C'est une première piste pour s'adapter au phénomène d'érosion, la réglementation peut participer à l'élaboration de meilleurs outils également, sans oublier les études expérimentales qui ont l'intérêt de remettre en cause les acquis techniques et scientifiques et permettre aux gestionnaires de prendre du recul sur leurs propres outils.

Conclusion

Dans cette première partie, les mécanismes de la relation entre érosion dunaire et changement climatique ont été analysés au regard de la littérature scientifique et des outils techniques nationaux. La connexion entre ces deux aléas est à la fois évidente et peu caractérisable. L'érosion dunaire est un phénomène très difficilement modélisable (même à l'échelle locale) et les prévisions climatiques intègrent des incertitudes très larges qui rendent impossible tout pronostic fiable.

Le changement climatique provoque-t-il, aggrave-t-il l'érosion dunaire ?

L'érosion touche naturellement 1/3 des côtes d'accumulation et s'opère d'ordinaire à d'autres échelles de temps que celles du changement climatique. Chaque linéaire côtier réagit différemment à l'augmentation du niveau marin, cependant l'augmentation actuelle de celui-ci ne laisse guère de doute quant à un recul encore plus important de la bande côtière. Par ailleurs, la perturbation des écosystèmes due aux variations climatiques affaiblit déjà certains milieux dunaires dans le monde. Enfin, l'augmentation des événements extrêmes va forcément affaiblir la résilience d'un milieu dont l'évolution dépend énormément de phénomènes ponctuelles.

Dans quelle mesure cette érosion va-t-elle évoluer sur les côtes métropolitaines atlantiques au cours du XXI^e siècle ?

Estimer le recul du trait de côte est une entreprise hasardeuse. Le recul pronostiqué pour 2040 par le CEREMA est déjà dépassé dans certains secteurs du Sud-Ouest. Dans d'autres régions, la dune se montre plus résistante que prévue. Les modèles numériques « locaux » ne sont pas plus efficaces mais permettent d'appréhender les phénomènes dominants et ainsi de mieux apprécier la vulnérabilité d'un secteur. La part du changement climatique dans cet aléa d'érosion côtière devrait augmenter et devenir essentielle à partir de la moitié du XXI^e siècle. Le déficit sédimentaire actuel est également problématique. Sans apports sableux, les dunes ne peuvent que difficilement se reconstituer.

Est-ce que la biocénose peut s'adapter à ces évolutions ?

La biocénose est doublement menacée par ces évolutions. En effet, ces espèces « fixes » sont dépendantes de leurs biotopes et des caractéristiques biotiques et abiotiques inféodées. Ces écosystèmes possèdent une marge d'adaptation et le milieu dunaire est particulièrement résilient. Malgré tout, certaines limites sont indépassables : quand la bande côtière recule trop vite, quand la sécheresse devient la norme ou que le taux de salinité explose, peu d'espèces sont en mesure de résister. De plus, les pressions anthropiques (tourisme, urbanisation, exploitation des sédiments) freinent la plasticité des cortèges végétaux.

PARTIE 2 : PISTES D'ACTION POUR AMELIORER LA RESILIENCE ET LA GESTION DES DUNES FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Introduction

Le premier volet de l'étude explicite le lien entre une situation climatique mondiale critique et la remontée du niveau marin, et l'érosion dunaire à l'échelle régionale voire locale qui connaît des tendances contrastées.

Dans le cadre de stage, une étude de cas a été menée sur la forêt de la Coubre. Cette forêt domaniale, située en presqu'île d'Arvert (Charente-Maritime), subit une érosion chronique très forte mais sans comparaison avec certaines périodes du XXe siècle. Les habitats sont globalement restaurés et préservés, et les espèces patrimoniales n'y semblent pas particulièrement menacées. La forêt joue son rôle de protection, et hormis le phare de la Coubre, les installations humaines les plus proches ne sont pas en danger.

Cette étude a montré que le phénomène d'érosion apparaît au premier abord incontrôlable, car l'intensité moyenne de l'érosion est principalement dictée par le contexte sédimentaire. Dans un avenir proche, la montée du niveau marin pourra également devenir un paramètre déterminant. Ce secteur semble donc être soumis à des forçages naturels, sur lesquels le gestionnaire n'a pas d'emprise.

Malgré tout, cet exemple est riche d'enseignements. Si les conséquences de la montée du niveau marin évoluent selon la règle de Bruun (*cf Partie 1 2.1*), alors l'ensemble du linéaire dunaire Atlantique est susceptible de connaître une évolution aussi rapide qu'à la Coubre, avec la disparition des zones d'accumulation sédimentaire du début du XXe siècle, et la mer attaquant directement la frange forestière, sans possibilité de recul de la bande côtière dunaire non boisée. La Coubre s'est révélée assez résiliente face à l'érosion dunaire au cours du XXe siècle. Malgré le fort recul, une surface stable de dune fixée subsiste depuis sa création.

Toujours en presqu'île d'Arvert, l'abandon de toute gestion, et les dommages de la seconde guerre mondiale ont failli faire disparaître une partie du cordon dunaire et de la dune fixée. L'absence d'enjeux humains forts à la Coubre montre également qu'une forêt dunaire peut reculer sans dommages, et en préservant ses habitats et espèces patrimoniales, comme le montre « l'expansion » de la dune fixée de 1950 à nos jours.

La dynamique dunaire a trop souvent été induite par l'homme pour que ces habitats perdurent à l'identique sans mesures d'accompagnements. Cela ne signifie pas qu'il est impossible de mettre en place une libre évolution. Mais face à une pénurie sédimentaire actée, à la pression des activités humaines, et aux dynamiques végétales toujours très difficilement contrôlables de la frange forestière car les travaux sont coûteux, augmenter activement la résilience de ce milieu est nécessaire. Les efforts de fixation puis d'accompagnement semblent porter leurs fruits en presqu'île d'Arvert par exemple. Cette voie est la bonne, mais d'autres solutions pourraient encore renforcer cette tendance, ce sera l'objet de cette troisième partie.

De plus, la majorité des dunes domaniales ne peuvent pas tolérer le recul identifié en presqu'île d'Arvert sans mettre en danger les services d'accueil du public offerts par les forêts, des habitats individuels, voire des zones densément urbanisées. Même si organiser la relocalisation des biens et des activités sont de la responsabilité des pouvoirs publics et des collectivités territoriales, il est possible de renforcer la résilience de ce milieu, et ainsi de ralentir la translation de la bande côtière. Il faut donc agir, malgré l'impact parfois ténu des mesures de gestion sur la tendance de recul.

L'adaptation de la gestion des milieux dunaires face au changement climatique consiste entre autres à utiliser des outils réglementaires et à composer avec l'évolution des mentalités pour imaginer les marges de manœuvre qui s'offrent aux gestionnaires. Continuer à qualifier et quantifier l'évolution au regard du changement climatique est aussi important. Enfin, expérimenter tout en conservant un savoir empirique pertinent (l'ONF, plusieurs décennies d'un monopole de gestion des dunes domaniales) est nécessaire.

On peut également rappeler que d'après Roland PASKOFF, les solutions « ultimes » sont le rechargement des plages en sables, le rétablissement de la continuité hydro-sédimentaire, et la relocalisation des enjeux. Ces 3 actions sont enclenchées à divers degrés par les gestionnaires Français qui n'ont pas toujours la possibilité ou les moyens financiers d'agir, car ces actions dépendent profondément du contexte réglementaire. Extraire du sable en mer reste une opération profondément complexe et polémique, et la relocalisation des enjeux est le « monopole » des élus, et des services de l'Etat. Eux-seuls peuvent organiser un tel processus, or ils doivent composer avec d'autres problématiques que la gestion du seul phénomène d'érosion ou de gestion d'espaces naturels. Le rétablissement de la continuité sédimentaire est en bonne voie mais de trop nombreux épis, digues, écluses, subsistent sur le littoral Atlantique. Enfin, de nouveaux aménagements ne sont pas à exclure. Bien que le projet de création d'un port de plaisance à Brétignolles (Vendée) ait été annulé en juillet 2021 (Reporterre s. d.), la volonté de rendre le littoral attractif à l'aide d'aménagements « lourds » est encore présente.

1. Evolution de la réglementation et des enjeux de la gestion du littoral en France

La bande côtière n'est plus le terrain vague d'après-guerre, abîmé par le mur de l'Atlantique. Mais le littoral s'est rapidement confronté à de nouvelles problématiques : tourisme, urbanisation, pollution, changement climatique. Comment la réglementation s'est-elle adaptée, en particulier vis-à-vis du phénomène d'érosion dunaire ? Et comment cette réglementation influence-t-elle les principes et les méthodes des gestionnaires ?

1.1 Historique législatif et réglementaire partiel

- La **loi Littoral** (« Bilan de la loi Littoral et des mesures en faveur du littoral » s. d.), loi promulguée le 3 janvier 1986 vient régir les aménagements et protéger le littoral. Cette législation concerne 1212 communes au total et 5500 km de littoral métropolitains. Elle a notamment participé à la protection des secteurs dunaires qui n'étaient pas encore protégés ou propriété du conservatoire du littoral, par la déclaration d'une inconstructibilité sur une bande littorale de 100m. De plus « les espaces les plus remarquables et caractéristiques du littoral doivent être identifiés et préservés, seuls des aménagements très légers pouvant y être implantés », les dunes correspondant à ces espaces remarquables (L. 121-23 et R. 121-4). Enfin, cette loi régit également les extractions de sédiments dans le but de protéger notamment l'intégrité des dunes (L. 321-8 du Code de l'environnement).
- Le **Grenelle 1 et 2** de l'environnement (2009 et 2010) aboutit à la création d'un conseil national de la mer et des littoraux et la prise en compte des documents de façade maritime dans les autres documents d'aménagements du territoire (SCOT, PLU...)
- Le **grenelle de la Mer** (2010) accélère la dynamique de création d'AMP, dont font parfois parti les espaces dunaires.
- La compétence **GEMAPI** (« La compétence Gemapi intègre-t-elle la gestion de tous les ouvrages de défense contre la mer ? » s. d.) intègre la gestion des ouvrages naturels de défense contre la mer et de gestion de trait de côte et d'érosion côtière. La gestion dunaire rejoint ces deux thèmes et les cordons dunaires communaux sont pour certains supervisés par l'ONF.
- **Stratégie Nationale de gestion intégrée du trait de côte** : Dans la lignée du Grenelle de la mer, et à la suite d'un programme d'action 2012-2015, un nouveau programme a été mis en place pour 2017-2019. Il vise non seulement à engranger et partager de la connaissance sur le phénomène de recul du trait de côte et ses multiples implications, mais aussi à mettre en œuvre des actions concrètes propres au milieu dunaire (« Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte - Géolittoral » s. d.) : La mise en place du réseau national des observatoires du trait de côte auquel une dizaine d'observatoires régionaux se sont déjà rattachés.

Axe B La Sous-action 3.3 : « Préserver la dynamique des écosystèmes dunaires et leur rôle dans la prévention et la protection des risques littoraux »

Axe C action 1 : « Poursuivre et valoriser les expérimentations menées dans le cadre de l'appel à projets « expérimentation de la relocalisation des activités et des biens : vers une recomposition spatiale des territoires exposés aux risques littoraux » ; action qui peut aboutir à la suppression d'enjeux derrière le cordon dunaire et donc mener à une réactivation des dynamiques dunaires.

Ces approches permettent d'envisager d'encourager la relocalisation des services et des biens afin de peut-être plus tester la mise en place de secteurs en libre évolution. (Aucune intervention humaine, sensibilité accrue aux aléas à court terme). Elles mettent en avant le rôle croissant des observatoires et des réseaux d'observatoire du trait de côte. Ces structures peuvent servir à élaborer des indicateurs pertinents. De plus, la stratégie Nationale pour la gestion du trait de côte aborde le rôle de « dissipation d'énergie de la mer » des écosystèmes littoraux. C'est donc un premier pas vers la prise en compte « d'espaces de liberté » nécessaires aux systèmes dunaire.

- **Projet de loi Climat et Résilience** : Projet de loi n° 3875 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets



Figure 21 : Logo communication loi Climat et Résilience (« Loi climat et résilience : l'écologie dans nos vies » s. d.)

Ce projet de loi, issue d'une concertation et du travail de 150 citoyens tirés au sort « vise à accélérer la transition de notre modèle de développement vers une société neutre en carbone, plus résiliente, plus juste et plus solidaire voulue par l'Accord de Paris sur le Climat. Il a l'ambition d'entraîner et d'accompagner tous les acteurs dans cette indispensable transition. » (Nationale s. d.). Adopté en première lecture à l'Assemblée Nationale le 4 mai 2021, il est soumis au vote du Sénat le 14 juin 2021.

L'article 58 (Titre IV – Se loger – Chapitre V- Adapter les territoires aux effets du dérèglement climatique) intègre notamment la question de l'érosion côtière et du trait de côte. Les principales mesures sont : améliorer l'évaluation des territoires et des aménagements soumis au recul du trait de côte ; mettre en place un droit de préemption spécifique aux communes littorales ou EPCI.

Concrètement, cette loi aura des impacts sur l'information des habitants ou futurs habitants concernés par l'érosion côtière, le zonage des territoires exposés, et enclenchera une réduction des constructions situées dans les zones exposées. (« Climat et Résilience : l'érosion côtière a voix au chapitre » 2021) Cette loi encourage également la relocalisation des enjeux. On peut donc prévoir qu'il sera plus facile pour les gestionnaires et les collectivités associées de mettre en place des stratégies de recul de la dune. Après de nombreux débats, cette loi a finalement été adoptée le 20 juillet 2021, à la suite d'une relecture par la Commission Mixte Paritaire (Nationale s. d.).

1.2 Milieu dunaire : Protection, Risques et Aménagement

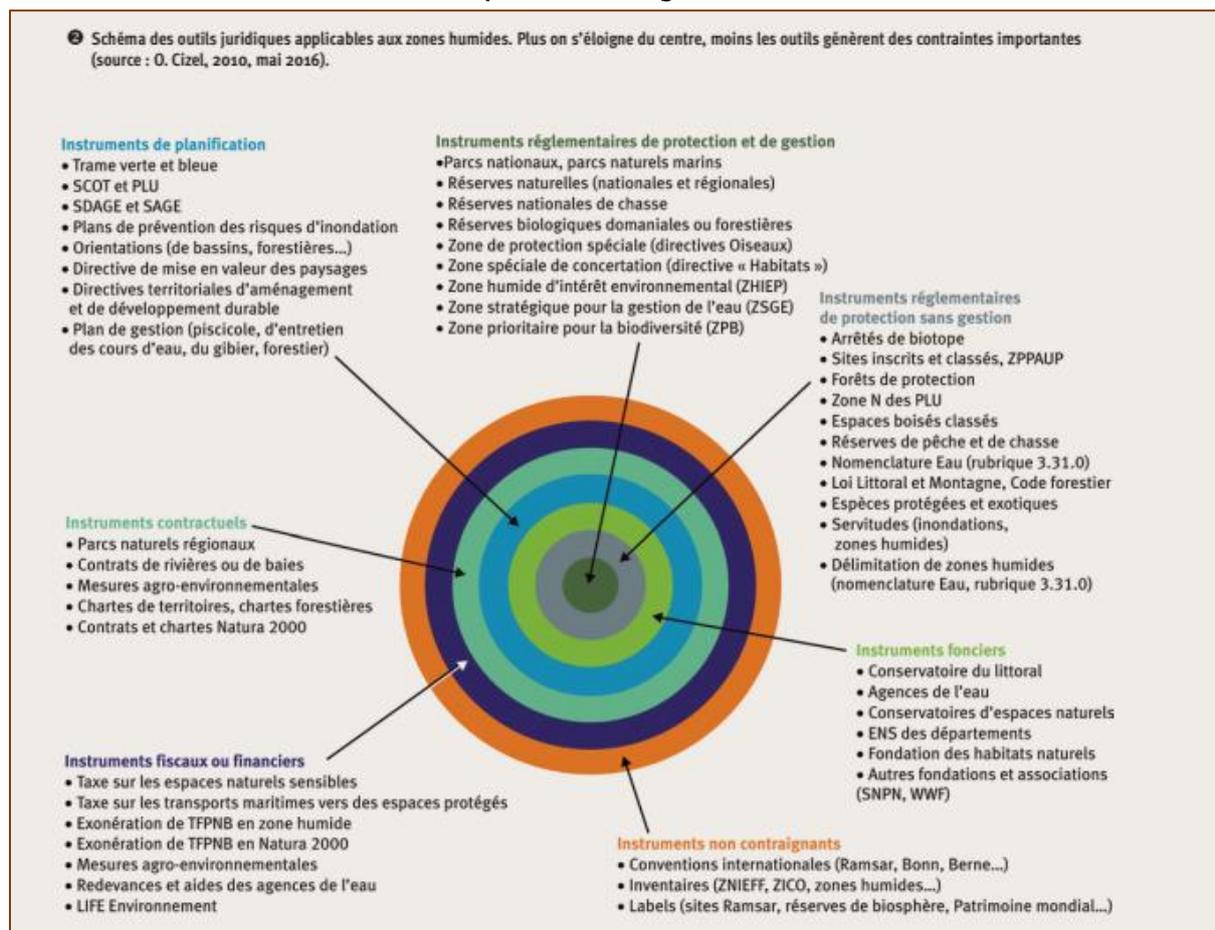


Figure 22 : Zones humides, l'évolution du cadre juridique (CIZEL 2017)

Les dunes domaniales regroupent plus de milieux que ceux défini comme « zone humide ». Pour autant, ce schéma recense la majorité des outils juridiques applicables aux dunes en tant que « milieu naturel ». Cette liste d'instruments poursuit les objectifs suivants :

- La protection de la nature
- La protection de l'eau
- La protection du patrimoine et de l'urbanisme
- La protection des sols et des peuplements
- Et le respect de réglementations diverses (déchets, réseaux...)

La dune est également un espace soumis au **risque d'érosion, de submersion et d'inondation**. Les outils de gestion du risque et de la ressource en eau sont particulièrement denses et méritent d'être explicités (Favennec 2021).

| Outils | Réglementation et descriptif | Gouvernance |
|---|---|---|
| PPRN (Les plans de prévention des risques naturels) | Loi Barnier (1995) Arrêté préfectoral Traite du risque inondation et submersion La dune est concernée quand elle protège des enjeux | Responsabilité de l'Etat au terme d'une concertation publique |
| PSR (Plan de submersion marine) | Juillet 2010 S'inscrit dans la Directive Inondation et vise à inciter les collectivités à prévenir les submersions Label PSR | Responsabilité de l'Etat |
| SNGRI (Stratégie nationale de gestion des risques d'inondation) | Octobre 2014 « Augmenter la sécurité des populations exposées Stabiliser à court terme, et réduire à moyen terme, le coût des dommages liés à l'inondation Raccourcir fortement le délai de retour à la normale des territoires sinistrés » (« Prévention des inondations » s. d.) | Responsabilité de l'Etat |
| PGRI (Plans de gestion des risques d'inondation) | 2015 Fixe les grands objectifs en matière de gestion des risques d'inondation et les objectifs Défini des TRI (Territoires à risques d'inondations importants) Basée sur une évaluation préliminaire des risques EPRI | PGRI : Responsabilité de l'Etat, préfet coordonnateur de bassin. |
| SLGRI (Stratégie locale de gestion du risque inondation) | Déclinaison du PGRI sur un TRI | EPCI (Un établissement public de coopération intercommunale à fiscalité propre) |
| GEMPAI (Gestion des milieux aquatiques et prévention des inondations) | 2018 Alinéa 5 : Gestion du trait de côte sur la base de techniques souples/dures | EPCI |
| PAPI (Programmes d'actions de prévention contre les inondations) | Programme d'action qui vise à répondre à : la prévision du risque, l'alerte et la gestion du risque, intégration du risque dans l'urbanisme, réduction de la vulnérabilité, gestion des écoulements, gestion des ouvrages hydrauliques | EPCI |

1.3 Impact de la réglementation sur la gestion dunaire

L'existence d'un mille-feuille administratif encadre les aménagements et participe à la protection du milieu dunaire. Cependant, c'est un premier frein pour le gestionnaire qui doit composer avec de nombreuses interdictions. C'est également un frein à la mise en pratique de « nouvelles » techniques de gestion, puisque celle-ci ne sont pas toujours réglementées. Enfin, c'est l'opposition du monde du vivant « dynamique », soumis à des perturbations naturelles et anthropiques, au monde juridique, figé. Or les dunes évoluent à travers la mobilité du trait de côte, la migration dunaire, la domination de certaines associations végétales, il faut donc prescrire des méthodes adaptatives, en se basant sur l'état du milieu actuel. Encourager la résilience de la dune passe par l'évolution des critères de conservation et protection dunaire. Quelques problématiques liées à une gestion dynamique sont présentées ici.

- **Habitat et espèces :** La prise en compte de la protection de la biodiversité dunaire s'inscrit principalement à travers l'**outil Natura 2000** et les arrêtés de protection (biotope, réserve biologique, groupe faunistique/floristique). Les arrêtés « priment » sur la gestion car ils interdisent explicitement les aménagements, travaux qui pourraient avoir un impact sur l'intégrité biologique des espèces ou habitats. Les stratégies d'adaptation au changement climatique (*cf 3. Développer la résilience de la dune*) participent parfois à générer de tels impacts. Leurs développements sont donc freinés par la réglementation.

Par exemple, en zone Natura 2000, toute action non soumise préalablement à autorisations ou déclarations doit malgré tout faire l'objet d'une évaluation d'incidence. Ainsi, la mise en culture des dunes (hors stabilisation), et des opérations de terrassement non urgentes doivent faire l'objet d'une évaluation d'incidence en zone Natura 2000, alors que ces opérations ne relèvent habituellement pas d'un régime administratif d'autorisation, d'approbation ou de déclaration hors zone Natura 2000.

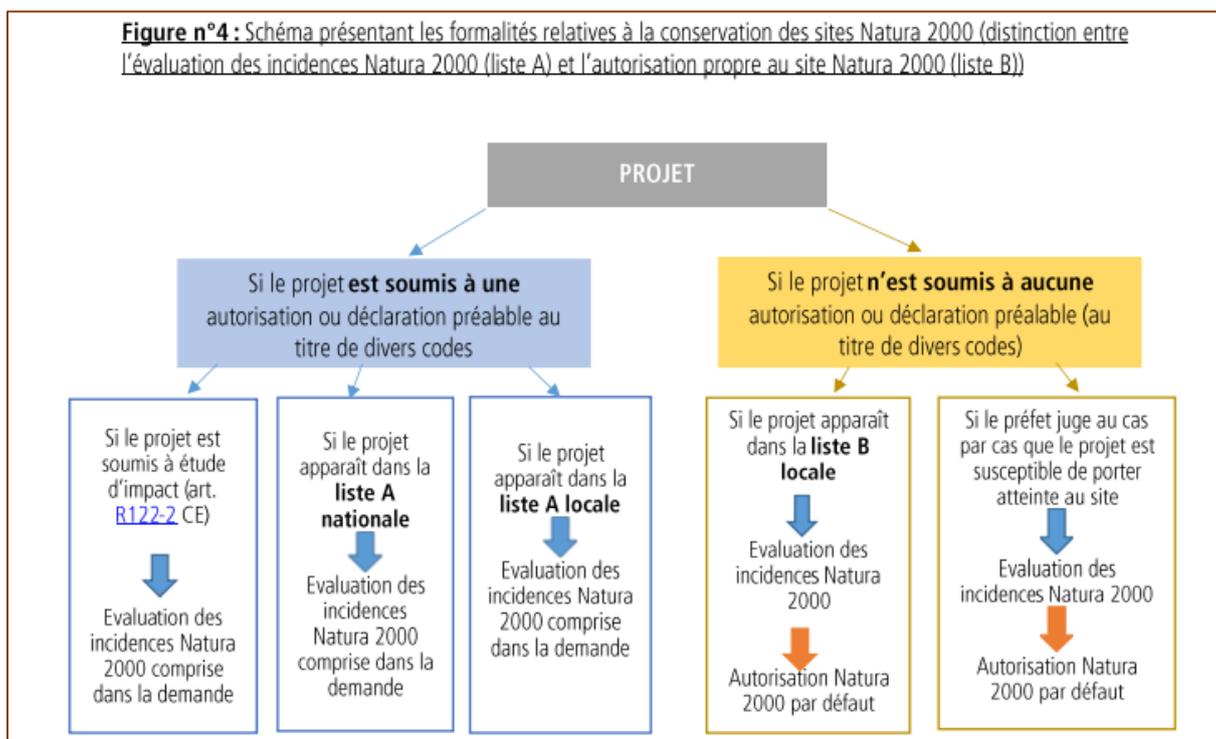


Figure 23 : Réglementation Natura 2000, document interne ONF

Par ailleurs, toute demande de dérogation portant sur des espèces protégées ne doit pas nuire au maintien de la population locale de l'espèce impactée. Il ne doit pas y avoir d'alternatives, et le projet doit répondre à un intérêt public majeur défini dans la loi. Il est souvent possible de trouver des alternatives à des travaux dunaires expérimentaux.

Par exemple, en forêt de la Coubre, c'est le volet 1 de la synthèse du DOCOB qui concentre les actions spécifiques au milieu dunaire (« Document d'Objectifs Natura 2000 de la Zone Spéciale de Conservation n° FR5400434 « Presqu'île d'Arvert » et de la Zone de Protection Spéciale n° FR5412012 « Baie de Bonne Anse, Marais de Bréjat et de Saint-Augustin » Volume de synthèse », s. d.). Or, ce volet comporte deux fiches actions intitulées « Mise en défens des secteurs de dune bordière les plus sensibles », et « Protection des habitats dunaires contre l'érosion éolienne ». **La notion de changement climatique n'apparaît pas dans les fiches actions qui détaillent les modalités d'application.**

De plus, la FD1 met en avant les enjeux écologiques (Gravelot à Collier Ininterrompu et Pipit rousseline) pour justifier de la mise en défens. La FD2 met en avant les actions « classiques » de lutte face à l'érosion éolienne : ganivelles, branchages, plantations... « L'action consistera exclusivement dans la mise en place de techniques douces ».

La possibilité d'expérimenter, d'accompagner le recul n'est donc pas explicitement inscrite dans le DOCOB.

Face aux adaptations rendues nécessaires par le changement climatique, la réglementation Natura 2000 (qui recoupe la majorité des dunes domaniales), limite fortement l'expérimentation de méthodes de gestion alternative. La remobilisation des dunes (*cf 3. Développer la résilience de la dune*) est rarement partie intégrante des travaux prévu dans les DOCOB, les plantations d'espèces « plus adaptées » également.

Ce point ressort dans les indicateurs de performance des fiches actions : évaluation de la conservation des habitats et des espèces, et de la surface de dune bordière (*cf DOCOB Coubre*). Parvenir à introduire un indicateur « d'adaptation aux pressions relatives au changement climatiques » permettrait de compléter l'évaluation des mesures.

- **Maintien de la forêt de protection, des espaces boisés classés...** : Le phénomène de « compression côtière » (*cf Partie 1 2.2. 1*) nécessite parfois d'organiser des coupes pour laisser un espace de liberté au milieu dunaire. Si en forêt domaniale, aucune autorisation n'est nécessaire pour effectuer des défrichements des « forêts de protection », il n'en va pas de même pour les forêts des collectivités. Or, il faut parfois agir vite pour laisser la dune grise migrer dans les terres avant que la ligne de rivage ne s'attaque directement à la frange forestière.
- **Les réserves biologiques** dépendent du code forestier et permettent une gestion cohérente entre les milieux boisés et les dunes. **Attention**, cela n'exclue pas que les travaux d'entretiens soient soumis à d'autres réglementations comme Natura 2000. Malgré tout, cet outil permet de limiter l'accès au site, et de multiplier les stratégies de gestion et suivi scientifique. Ainsi, ce sont des secteurs qui semblent plus propice à l'expérimentation et à l'amélioration de la résilience des dunes.

L'essence « figée » de la réglementation, qui fait en plus appel à des efforts parlementaires considérables à chaque évolution est donc principalement un frein pour le gestionnaire face au phénomène d'érosion dunaire accéléré par le changement climatique.

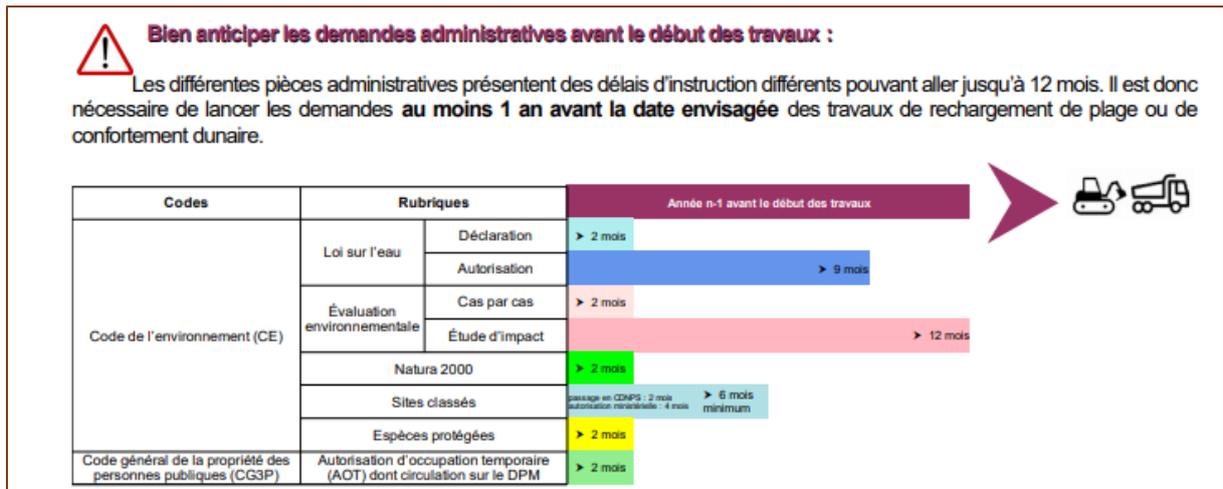


Figure 24 : Calendrier "générique" des démarches administratives (« Fiche_05_mod.pdf » s. d.) dans le cadre d'un rechargement en sable de la plage

Aujourd'hui, il est plus facile de lutter contre les perturbations « anthropiques » : tourisme, urbanisation et d'organiser la **conservation** des écosystèmes que d'encourager et d'appliquer « les solutions fondées sur la nature » ou de restaurer les stocks sédimentaire. Par exemple, le rechargement de plage subit la double peine d'être une action coûteuse **et** d'être soumis à une réglementation particulière en raison de son même coût.

Les gestionnaires ont besoin d'arguments pour faire évoluer leurs méthodes de gestion. La pression croissante du changement climatique justifie cette évolution. Ces arguments, pour être recevables, doivent provenir d'études scientifiques et d'un suivi régulier des phénomènes d'érosion et de la réponse du milieu dunaire.

La sélection d'un panel d'indicateur peut ainsi à servir à mettre en place plus d'expérimentations, ou modifier les statut réglementaire de certain milieux pour faciliter cette démarche.

2. Propositions de nouveaux indicateurs et méthode de suivi des impacts du changement climatique

La synthèse bibliographique (Partie 1) met en lumière les incertitudes liées au changement climatique. Ses impacts sont difficilement modélisés au niveau régionale et locale, or c'est à ces échelles que se jouent les stratégies de gestion dunaire, plus précisément à l'échelle des cellules hydro-sédimentaires. Il faut donc pouvoir suivre et anticiper le comportement des structures géomorphologiques et des écosystèmes en fonction des paramètres climatiques ou indirectement lié au changement climatique.

De nombreux indicateurs sont présentés dans la Partie 1 (cf Partie 1 2.3) afin de répondre à un besoin de connaissance sur :

- La vulnérabilité des dunes face aux pressions naturelles et anthropiques (hors changement climatique)
- La conservation de certaines espèces
- La possibilité, la nécessité de mettre en place des travaux de restauration, réhabilitation pour assurer la conservation des habitats

Dans cette partie, les indicateurs présentés permettront à terme de répondre à un besoin de connaissance sur la l'évolution de l'érosion en milieu dunaire face au changement climatique. **Les indicateurs prendront donc en compte des variables reliées au climat et à l'érosion.**

Comment réagit l'habitat dune grise du Pays de Monts (Vendée) face à une température moyenne plus élevée, une nappe phréatique plus saumâtre, et subissant des submersions marines occasionnelles ? Répondre à ce genre de question exige par exemple de modéliser au préalable la résilience des cortèges végétaux face à certains paramètres physico-chimiques, l'évolution des associations végétales, de tester encore les effets des perturbations naturelles, et de connaître localement les tendances d'évolution du niveau marin.

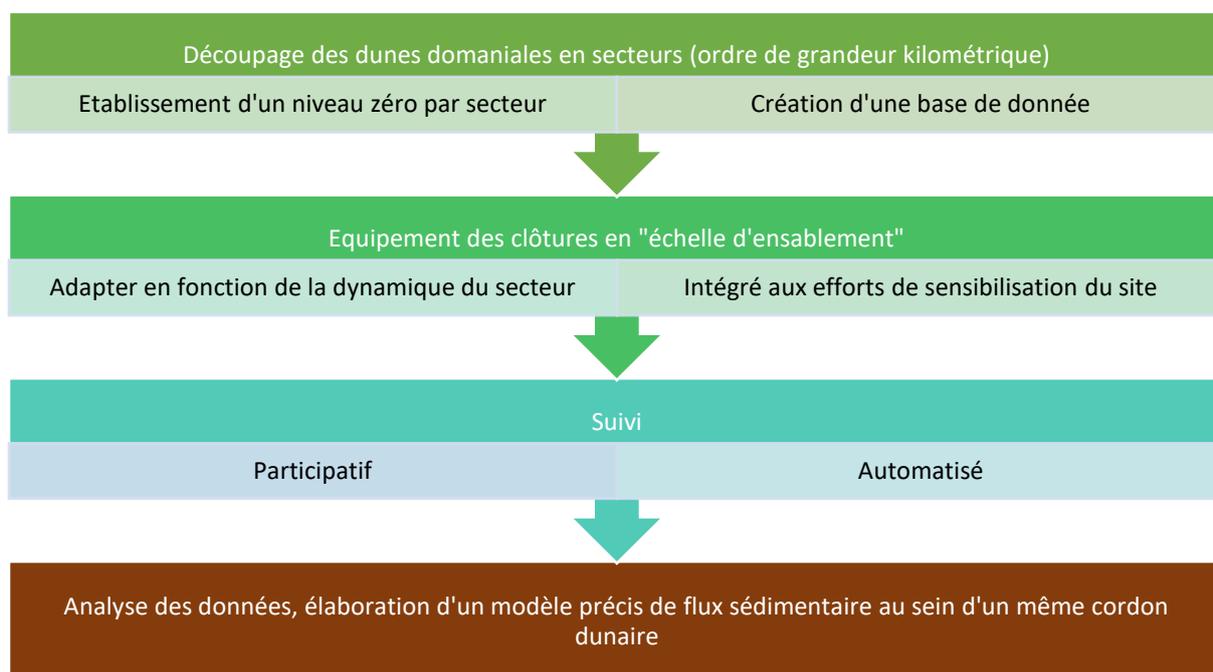
Les indicateurs retenus doivent donc permettre de répondre aux incertitudes mises en lumière par cette étude :

- Quantifier le plus simplement possible les impacts de la montée du niveau marin en fonction de la tendance sédimentaire ultra-locale
- Déterminer les conséquences de la transgression du biseau salé des aquifères côtiers sur la qualité des nappes et surtout la végétation
- Mieux connaître la résilience des espèces fixatrices ou patrimoniales à face à chaque **aléa**, savoir définir la contrainte principale d'un secteur : érosion éolienne, marine, submersion...
- Choisir et connaître les espèces indicatrices du changement climatique, à la manière des « sentinelles du climat »

2.1 Indicateur du contexte sédimentaire

Au sein d'une cellule hydro sédimentaire, il est nécessaire de connaître l'évolution du stock sédimentaire. Des services de MNT comme Litto3d© ne sont pas actualisés assez souvent pour mettre en place un suivi fin tridimensionnel des cordons dunaires. C'est pourquoi, la mise en place d'une campagne de suivi du stock de sable des dunes domaniales à l'échelle locale permettrait de mieux comprendre et mieux prévoir la dynamique érosive à petite échelle. Il serait habile d'utiliser les nombreuses clôtures, ganivelles, panneaux déjà dédiés à l'encadrement du public. Rajouter « une échelle d'ensablement » sur un maximum de ces outils.

On peut imaginer différentes techniques pour automatiser ce suivi : drones, participation citoyenne à l'image de l'OCLM (« OCLM - Observatoire Citoyen du Littoral Morbihannais » s. d.), codes colorés pour faciliter le suivi en fonction du niveau « zéro » de sable de chaque dune à partir de l'ensablement, on peut extrapoler l'évolution du volume de sable initial.



2.2 Transgression du biseau salé

Il faudrait modéliser une fourchette de salinité à laquelle sera exposé le cortège végétal dunaire à différents horizons pour les aquifères littoraux les plus sensibles, tout en menant en parallèle des études sur leur degré de tolérance. En effet, **ce facteur abiotique semble jouer notamment un rôle prépondérant sur la germination** des espèces **dunaires** (Vecchio et al. 2020). C'est pourquoi il paraît particulièrement important de mieux appréhender ce paramètre.

Ainsi, on pourrait prévoir la disparition de certaines espèces nécessaires à la fixation de la dune et **décider plus facilement de limiter les captages sur les zones les plus vulnérables**. Dans la partie 1, le phénomène de biseau salé a été évoqué. Deux paramètres principaux peuvent amener le taux de salinité de l'aquifère dunaire à augmenter : la montée du niveau de la mer qui pousse ce gradient dans les terres, et le captage qui tire les couches inférieures (concentrée en sel) de l'aquifère à travers les couches supérieures (douce). A terme, cette intrusion saline « contamine » l'eau douce de l'aquifère. Le captage est donc un levier d'action important pour stabiliser le gradient de salinité et ainsi limiter les impacts sur la flore. Afin de suivre le comportement de l'aquifère, plusieurs techniques sont employées :

- Suivi géochimique et isotopique « Des concentrations en bore élevées et une composition isotopique ($\delta^{11}\text{B}$) typique de l'eau de mer constituent un excellent traceur de l'intrusion d'eau de mer dans les aquifères côtiers et permettent des calculs précis de mélange. » (Dörfliger et Augeard 2013)
- Levés géophysiques au sol ou aéroportés pour obtenir la répartition de la conductivité électrique du sous-sol
- Suivi conductivité en forage (piézomètres)

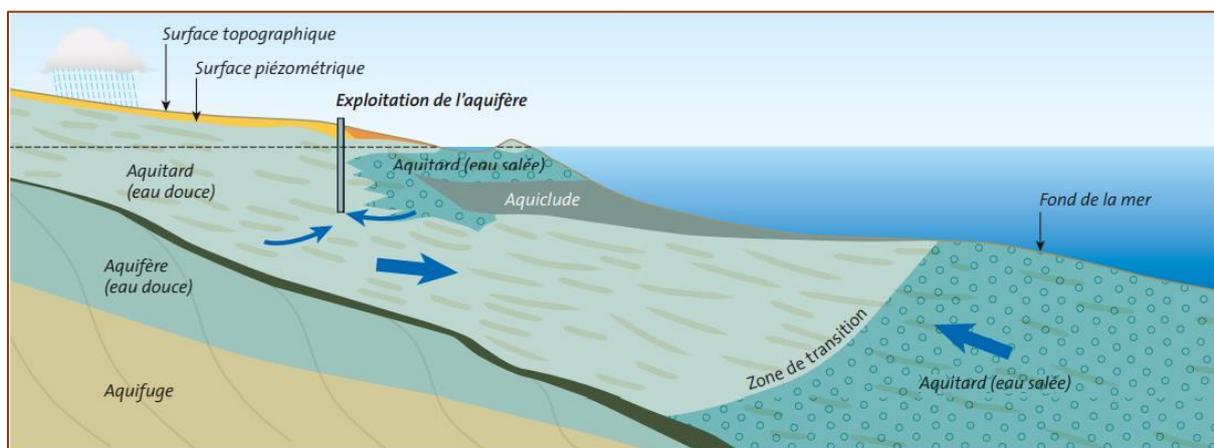


Figure 25 : Relation entre captage et biseau salé des aquifères dunaires (Dörfliger et Augeard 2013)

2.3 Résilience monospécifique des espèces patrimoniales

Il faut essayer de mieux intégrer la **vulnérabilité** propre de chacun des taxons patrimoniaux à **un type d'aléa dominant** (cf partie 1 paragraphe 2.2.2) afin de mieux évaluer les efforts de conservation.

Par exemple, des secteurs qui ne sont pas soumis à une migration dans les terres de la dune blanche vont quand même voir les espèces de la dune grise subir un stress fort si les précipitations diminuent. Par ce type d'analyse, dans le cadre d'opérations de génie végétal « lourdes », on peut envisager de sélectionner encore mieux des espèces à réintroduire au regard de la contrainte dominante du secteur.

2.4 Indicateur global sur la vulnérabilité des espèces face au changement climatique

Les données précédentes (salinité, résilience...) pourraient être intégrées à *Climessences* (« Climessences » 2021), qui présente déjà les indicateurs suivants pour les essences forestières seulement : résistance adulte/juvénile aux fortes sécheresses ; résistance aux fortes chaleurs ; aux grands froids ; aux gels précoces et tardifs... et les espèces « notées » en fonction de leurs adaptabilité au changement climatique ou de leurs résistance à un aléa.

Pour cela d'autres expérimentations sont nécessaires, avec l'observation des conséquences de perturbations volontaires sur des dunes non vulnérables. Ainsi, on peut envisager une base de données solidaire de *Climessences* sur les principales espèces dunaires et leurs « climax » climatique avec les informations suivantes :

| Données à intégrer dans un <i>Climessences</i> dunaire | Etat de l'art (Bibliographie) | Expérimentation nécessaire |
|--|-------------------------------|----------------------------|
| Synthèse écologique de l'espèce (cf (Favennec 2012) | Suffisant | Non |
| Service écosystémique primaire retenu : espèce fixatrice, captatrice, rôle dans l'association végétale | A compléter | Non |
| Service écosystémique secondaire retenu | A compléter | Non |
| « Climax » climatique | Insuffisant | Oui |
| Résistance/Résilience : perturbation éolienne, marine, sécheresse | A compléter | Oui |
| Vulnérabilité climatique de l'espèce à l'horizon 2050 et 2100 | Insuffisant | Oui |

NB : Le « climax climatique » est un état théorique, qui fait largement débat dans la communauté scientifique. Ici, on considère qu'il s'agit d'un état d'équilibre végétation-sol-climat propre à chaque espèce dunaire (Génot 2006).

La base de données pourrait ensuite servir à définir des indicateurs pour les zones Natura 2000 par exemple.

3. Développer la résilience de la dune

Face au changement climatique, stimuler la résilience de la dune est indispensable pour atténuer le recul du rivage, et favoriser l'adaptation des écosystèmes à de nouvelles conditions abiotiques. Sans prise en compte de ces enjeux, certains secteurs pourraient voir la ligne de rivage atteindre la frange forestière. Outre la disparition d'habitats protégés, cela signifierait la fin du stock sédimentaire dunaire. La bande côtière peut jouer un rôle de tampon, tout en continuant à être un réservoir de biodiversité. Ce rôle doit dans certains cas être mieux défini par les gestionnaires.

Le guide de gestion des Dunes et des plages associées, sous la direction de Loïc Gouguet, 2018, classe les grands types de stratégie de gestion suivants : **dynamique libre, contrôle souple** (choix stratégique dominant à l'ONF en France métropolitaine), contrôle renforcé, interventions lourdes. Le guide entend montrer qu'il y a autant sinon plus de modes de gestion possibles que de sites et de conditions particulières. Bien qu'il subsiste des disparités de moyens et de méthodes, cette notion de contrôle souple ou de contrôle dynamique est privilégiée dans la littérature internationale depuis la fin du XXe siècle (R Paskoff 2003), et l'ONF défend ce mode de gestion depuis encore plus longtemps (J.Y LE THERIZIEN 1974).

3.1. Principes de gestion à privilégier face au changement climatique

Le rechargement en sable de la plage, voire de la zone intertidale reste donc la meilleure solution pour accompagner, freiner, voire inverser l'érosion. En effet, dans la majorité des cas le rechargement permet à la plage de tendre « elle-même » vers un profil idéal, et l'action de la dérive littorale induit des effets sur une zone plus large que les seules plages rechargées. Le coût-bénéfice de ce type d'action est déjà traité par l'ONF. Il faut prendre en compte les nuisances liées au rechargement, le coût élevé de l'opération, mais aussi la disponibilité de sédiments dont la granulométrie est identique (Gouguet 2018). Une estimation (Rijn 2012) préconise les volumes annuels nécessaires :

| Contexte érosif | Volume nécessaire |
|--------------------|--------------------------------|
| Faiblement exposé | 10 à 50 m ³ /m/an |
| Moyennement exposé | 50 à 150 m ³ /m/an |
| Fortement exposé | 150 à 300 m ³ /m/an |

A titre d'exemple récent (Olcomendy et al. 2020), le volume nécessaire pour stabiliser 2.5km du littoral de Soulac-sur-Mer (Gironde) serait compris entre 448 000 m³ (volume moyen) et 575 000 m³ (volume maximal). Cela confirme les estimations précédentes. On peut considérer qu'environ 22% des dunes domaniales (De la Bretagne à la Nouvelle-Aquitaine) sont en recul net. Le linéaire géré est d'environ 400 km. Il y a donc 88km en recul qui nécessiteraient un **rechargement annuel de sable moyen d'environ 13.2 Millions de m³/an**. La mise en place de cette mesure à grande échelle, si les gisements identifiés sont compatibles, permettraient sans doute de faire des « économies d'échelle » grâce à la dérive littorale, et à la création de by-pass dans les ouvrages côtiers (épi, digues...). Recharger l'ensemble des plages des dunes domaniales représenterait **un coût élevé : plus de 47Millions€/an**. Cependant, des études montrent qu'une fois ce rechargement mis en place, on peut s'attendre à une meilleure résilience (« article YBQ revue maritime001.pdf » s. d.); (Fichaut et Suanez 2012) de la dune qui nécessite ainsi moins de sable chaque année (Roland Paskoff 2005). De nombreux pays comme les Pays-Bas ont fait ce choix. De plus, face aux 17% des dunes domaniales en accrétion, une fois sauvé, ce linéaire permettra sans doute de constituer des stocks de sables sur certains sites « puits ». « Le recyclage » est une autre possibilité déjà mis en œuvre sur de nombreux sites là où des stocks de sable issus de dragages, et d'entretiens d'ouvrages sont disponibles.

Quand le rechargement n'est pas envisageable et élevé au rang de principe, deux options principales s'offrent au gestionnaire vis-à-vis du changement climatique : encourager le retrait de la dune ou favoriser sa stabilité après une période de recul.

En Aquitaine, l'efficacité de **la stratégie de contrôle souple** par l'ONF sur le profil dunaire a fait ses preuves (Bossard et Nicolae Lerma 2020). Cependant, malgré un succès des méthodes de gestion du profil d'avant-dune dans ce secteur en forte érosion naturelle, certaines emprises situées loin des zones de fréquentation/enjeux nécessiteraient plus d'attention. En effet, la majorité des interventions sur le profil de dune (travaux mécaniques, branchages, plantations) ont lieu à proximité des enjeux touristiques ou d'infrastructures. Il faudrait envisager une évolution de certaines stratégies locales, et accentuer à la fois les techniques de gestion du profil de l'avant-dune. Un travail de classification des profils d'avant-dunes a été mené par le BRGM et propose différentes analyses en terme de gestion :

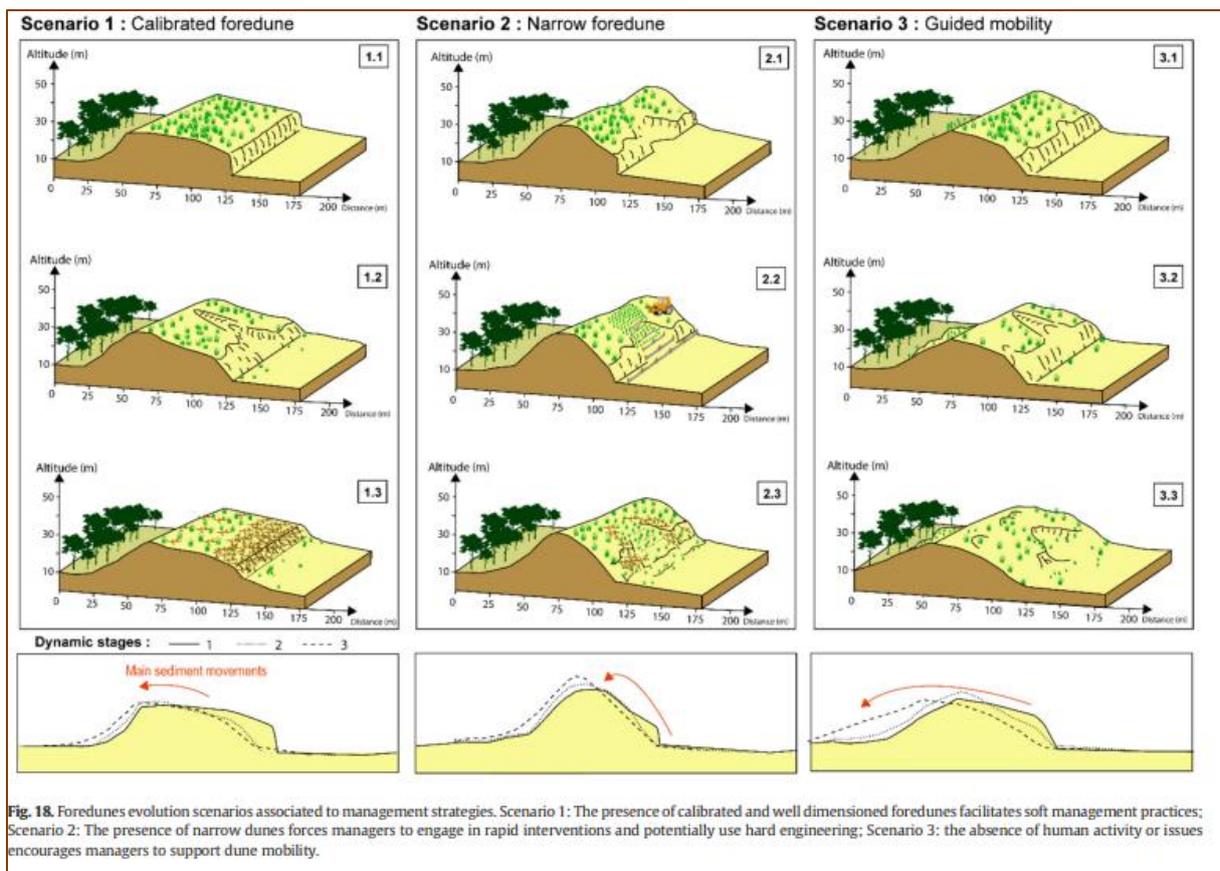


Figure 26 : Contexte rencontrés dans le cas des avants-dunes et gestion adaptative

3 scénarios illustrant différents cas d'érosion et d'intervention souhaitables sont présentés ci-dessus :

- Dans le premier cas, une dune « bien calibrée », de largeur suffisante subi un épisode d'érosion marine qui aboutit à la formation d'une falaise dunaire. Le bon état initial de la dune permet aux gestionnaires de laisser les phénomènes naturels adoucir le profil de la dune. Quand le profil s'est suffisamment adouci, les gestionnaires peuvent alors encourager la ré-végétalisation en freinant encore le transport sédimentaire : couverture de branchages, avant d'enclencher des plantations sur l'avant dune. Quand les dunes sont larges et bien engraisées le gestionnaire peut donc laisser les processus naturels agir puis favoriser l'atténuation des processus éoliens. (Ici, une à deux années après l'apparition d'une falaise dunaire). Ce type de gestion favorise donc la résilience de la végétation de l'avant-dune lorsque l'érosion éolienne et l'ensablement la dégrade.

- Le second exemple montre l'intérêt d'une dune initial « bien calibrée », puisque l'érosion sur une dune de faible largeur engendre un risque de déstructuration totale de la dune qui nécessite alors des intervention lourdes. L'absence d'enjeux humains pourrait pousser les gestionnaires à laisser la dune reculer fortement dans les terres. Cependant, dans ce cas précis et sans intervention, la perte de sédiments est importante et la dune peut mettre du temps à se « stabiliser ». Par ailleurs, elle offre une protection moindre aux habitats reculés (dune grise). Intervenir dans ce cas de figure est donc nécessaire mais ne favorise pas particulièrement la résilience de la dune.
- Le dernier scénario laisse entrevoir la possibilité de laisser complètement les processus naturels diriger le retrait de la dune, voire de l'encourager. A moyen terme, le profil de la nouvelle dune n'est pas idéal mais assure une protection suffisante. Afin de limiter la perte sédimentaire et favoriser la migration, le gestionnaire peut encourager la dynamique éolienne. Ce mode de gestion favorise la résilience de la dune mais dépend fortement du profil initial de la dune.

Une dune dont la dynamique « naturelle » est respectée bien que contrôlée présente forcément une plus grande résilience qu'une dune « stabilisée », maintenue. Une dune ou le gestionnaire laisse complètement agir les processus naturels, (en dynamique libre) fait face à différents risques, puisque des perturbations physiques croissantes (cas d'une dynamique libre) finissent par amoindrir la diversité végétale notamment, donc à terme la résilience également. Une bande côtière dont la dynamique naturelle est encouragée peut potentiellement réduire le risque de submersion et diminuer le taux d'érosion (Castelle et al. 2019).

En conclusion, **développer la résilience de la dune face au changement climatique, c'est trouver le juste milieu entre une mobilité qui fait appel à des perturbations naturelles et tous les faciès qui en découlent : caudexes, siffle-vents, falaise d'érosion... et un milieu chaotique qui peut vite se transformer en champ de sable avec une couverture végétale très dégradée.** L'objectifs sous-jacent est la capitalisation du stock sédimentaire qui passe par la polyvalence des services rendus par la flore dunale. **Maintenir un seuil suffisant de diversité est également essentiel.**

En effet, l'analyse des réponses d'espèces appartenant à quatre groupe fonctionnels différents : semi-persistantes, conifère, sclérophylles à feuilles persistantes, et légumineuses fixatrices a mis en évidence des stratégies différentes mais efficace. Les espèces étudiées étaient principalement arbustives et ne caractérise pas l'ensemble des cortèges végétaux dunales. Cependant, chaque espèce est en mesure de résister à au moins un type de perturbation naturelle ou anthropique. **Préserver l'ensemble de la biodiversité des dunes fixées permet donc d'obtenir un milieu dunale plus résilient.** (Sorce, Nannipieri, et Ciccarelli 2021). Ce n'est pas sans rappeler Vasselot de Régné (Vasselot de Régné, s. d.), qui a encouragé la plantation d'une grande diversité d'espèces dunales (autochtones ou allochtones) en forêt de la Coubre au XIXe siècle dans l'espoir de fixer le sable mais également de « peupler » la dune non boisée.

3.2. Méthodes de gestion du stock sédimentaire et re-végétalisation

Anticiper les effets délétères du changement climatique oblige les gestionnaires à essayer des techniques pour lutter contre le déficit sédimentaire, aider les espèces végétales à s'adapter, et atténuer les perturbations naturelles sur les secteurs déjà menacés.

Afin d'agir sur la fuite sédimentaire, sans employer des méthodes « lourdes » de reprofilage de dune, il est possible d'intervenir sur le secteur du haut de plage. Les **Algobox**® sont des « pièges à sable écologique » (Sedrati et Cochet 2015) qui permettent également d'amortir les vagues et de renforcer l'apport en matière organique propice à la colonisation végétale de l'avant-plage. Le test du dispositif a mis en évidence son efficacité pour **favoriser l'engraissement d'un site qui connaissait une érosion faible** mais régulière. De plus, **la richesse spécifique (espèces végétales) a été multipliée par 4**. Le procédé est en expérimentation depuis 2014, et semble porter ses fruits. L'efficacité à long-terme reste à évaluer, et les zones de test ne sont pas soumises à une érosion forte (supérieure à 3m/an) qui serait susceptible d'emporter les dispositifs dès la première année.

C'est une méthode assez proche des travaux d'entretien dunaire réalisés par l'ONF, comme les couvertures de branchages qui utilisent de la matière organique pour piéger le sédiment et protéger la dune. Cette méthode permet également de sensibiliser le public au phénomène d'érosion car il s'agit d'un dispositif très visible et complémentaire des fils de protection en pied de dune. Elle est d'autant plus pertinente quand la disponibilité en algues est importante (historique d'importants échouages d'algues rouges sur le site de Penvins, Sarzeau) mais peut sûrement être adaptée selon la disponibilité locale de matière organique. L'intérêt principal est de maximiser le stock sédimentaire tout en laissant une marge d'évolution à l'avant dune.

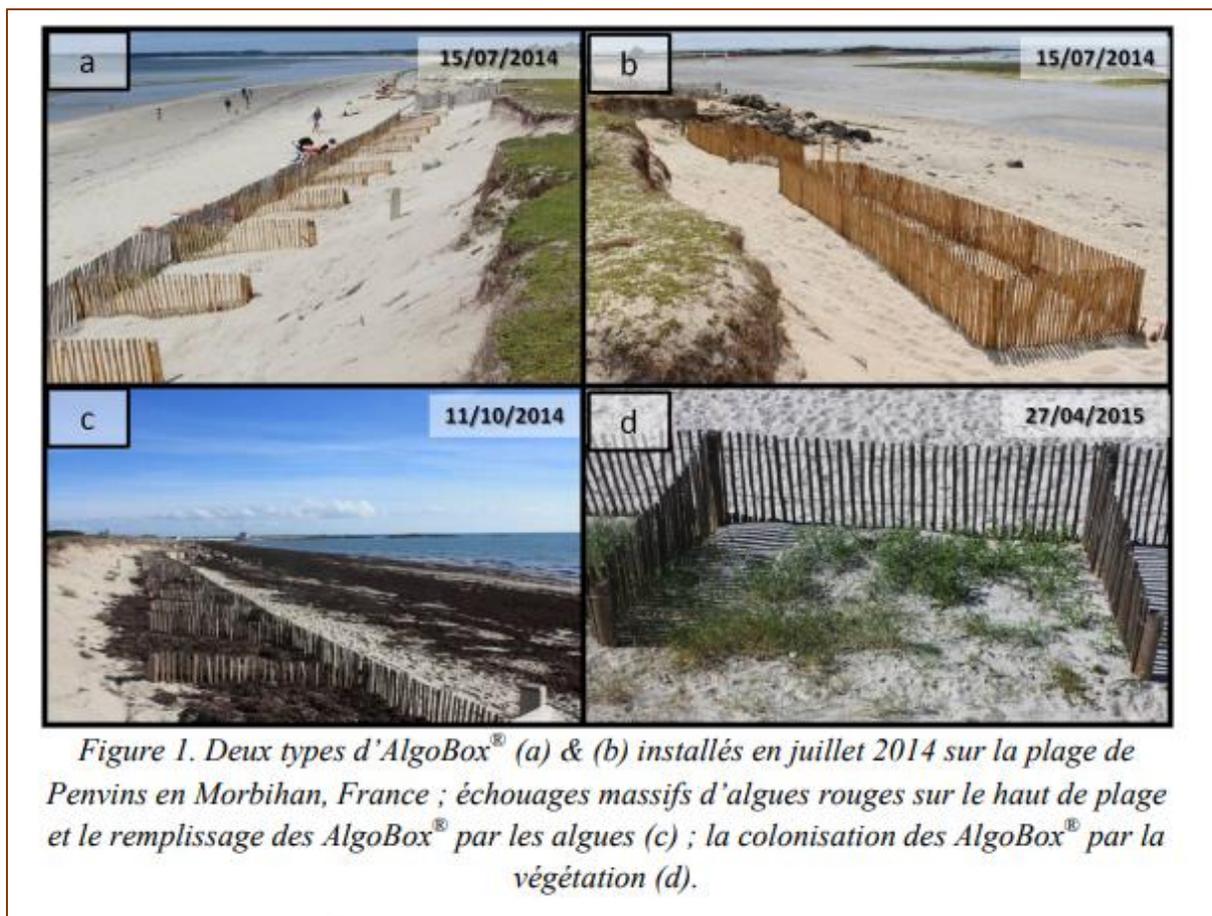


Figure 27 : Présentation des Algobox® (Sedrati et Cochet 2015)

Pour remobiliser la dune dans les secteurs trop stabilisés et améliorer la résilience, les gestionnaires peuvent expérimenter la **mise en place de perturbations**. Celles-ci prennent généralement la forme de grandes brèches à travers la dune bordière (Laporte-Fauret 2021). Faisant appel à des outils mécaniques, ces brèches permettent dans une certaine mesure de favoriser un « rajeunissement » des cortèges végétaux. Dans un contexte de changement climatique, cette remobilisation est une solution pour encourager le retrait organisé du cordon dunaire dans les terres. Ces techniques sont encore en phase d'expérimentation, et sur le long terme, elles peuvent entraîner une diminution de la diversité végétale. De plus, l'étude citée a mis en évidence la nécessité de créer une série de brèches plus rapprochées, ce qui augmente l'ampleur de travaux déjà conséquents.

Autres solutions, des opérations de déstabilisation de la végétation (mécaniques ou « naturelles ») et de dérangement (véhicules hors-routes) de la dune fixée, semi-fixée, et mobile peuvent encourager ponctuellement la diversité, l'abondance, et une variation (positive) de la composition du milieu par les différents taxons : végétaux, mammifères, insectes, reptiles (Bird et al. 2020). Cette étude s'est déroulée sur la Nizzanim Dunes Nature Reserve (NDNR) en Israël.

Sur la *figure 28*, on observe les conséquences de 3 types d'actions de dérangement sur 3 paramètres écologiques pour 4 taxons distincts. Quand le taxon est encadré en rouge, cela signifie que l'action de dérangement a un impact négatif sur le paramètre fléché. Quand il est encadré en bleu c'est un impact positif. L'impact positif de ces actions de dérangement et dé-végétalisation partielle est bien sûr nuancée et comporte également des impacts négatifs. Cependant, le point de départ de l'étude est que la mobilité et dynamique dunaire « naturelle » n'existe pas, notamment en raison de la présence de plantes fixatrices, parfois exotiques, encouragées/plantées par les gestionnaires. Or cette immobilité dunaire aurait un impact négatif sur **l'ensemble** des taxons. **Si on s'intéresse à la composition taxonomique en priorité** (indicateur différent de la richesse et de la présence d'espèces patrimoniales), **il faut alors encourager et imiter des perturbations naturelles pour remobiliser le milieu dunaire**. Transposée aux dunes métropolitaines, cette étude encourage fortement l'accompagnement des populations de lapins, principale espèce architecte de la dune fixée et semi-fixée, capable de remobiliser partiellement la dune. Attention, dans des conditions d'érosion trop marquées, ou lorsqu'une pression touristique est trop présente, toute perturbation met en danger le milieu. **Ce n'est pas une solution pour les secteurs en déficit** (Laporte-Fauret et al. 2021).

Malgré le succès apparent de **la stratégie « dynamique libre »** (Lithgow, Martínez, et Gallego-Fernández 2015) chez les gestionnaires dont le secteur ne présente pas d'enjeux ou de phénomène d'érosion marquée, c'est trop souvent la biodiversité dunaire qui reste l'objectif principal des travaux dunaires, ou qui parasite les stratégies mis en place (Cooper et Jackson 2021). **Fixer la dune semble définitivement incompatible avec l'évolution climatique, et il ne faut pas confondre les résultats d'une dynamique naturelle avec les conséquences de la pression anthropique dans les modèles de gestion : « Activity-Pressure-State-Response » d'où sont notamment tirés les indicateurs biologiques classiques.**

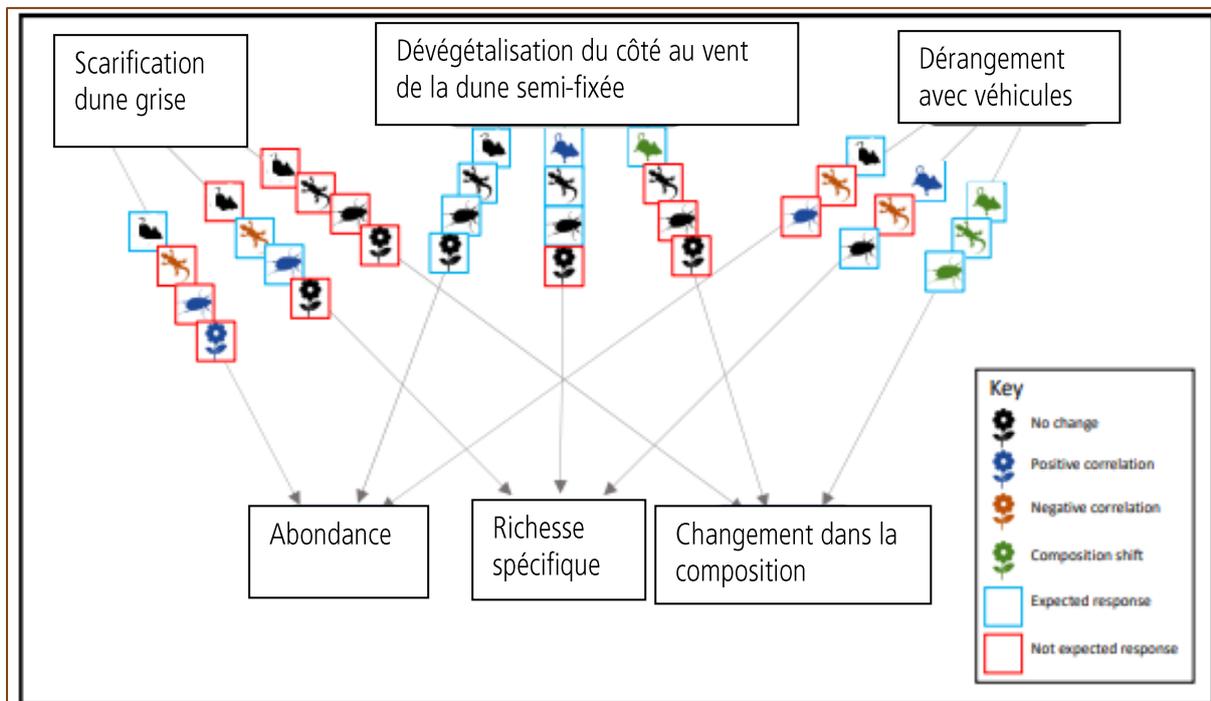


Figure 28 : Impacts positifs et négatifs de perturbations volontaires de la dune sur 3 indicateurs écologiques (52), texte traduit

Légende :

Noir : pas de changement

Bleu : corrélation positive

Orange : corrélation négative

Vert : Changement de composition

Encadré bleu : réponse attendue

Encadré rouge : réponse non attendue

Icônes

fleur : Végétaux

lézard : Reptiles

souris : Mammifères

scarabée : Insecte

Des opérations de génie végétal peuvent permettre de mieux agir sur la remobilisation et la diversité végétale pour augmenter la résilience. Les gestionnaires privilégient habituellement deux espèces : *Ammophila arenaria* et *Elymus farctus*. Des essais de plantations alternatives ont été réalisés mais peu poursuivis avec « la renouée maritime (*Polygonum maritimum*), le panicaut maritime (*Eryngium maritimum*), l'immortelle des dunes (*Helichrysum stoechas* var. *maritimum*), la julienne des sables (*Malcolmia littorea*), le liseron des sables (*Calystegia soldanella*), l'œillet de France (*Dianthus gallicus*), la diotis cotonneuse (*Otanthus maritimus*) et la roquette de mer (*Cakile maritima*) » (« Conservation des dunes côtières.pdf » s. d.). **Dans un contexte de changement climatique, et lorsque des interventions « lourdes » sont nécessaires, diversifier les semis d'espèces pourrait améliorer la résilience du milieu dunaire.**

Par ailleurs, la réflexion autour des indicateurs nécessaires a montré que chaque espèce réagit différemment aux perturbations naturelles. Il est également possible d'améliorer leurs résilience individuelle. Par exemple, il a été mis évidence qu'une dune bordière haute accroît la résistance de la végétation de type *Ammophila arenaria* et les autres espèces d'avant dunes à la submersion marine, et que le principal facteur de **résilience** de ces espèces est la ressource en nutriments (Liu, Liu, et Dong 2016). **Il faut donc étudier la pérennité des plantations fixatrices au vu du contexte géomorphologique et biotique.** Végétaliser une dune blanche soumis à la submersion marine peut simplement ne pas aboutir dans certains secteurs par manque de ressource. Dans d'autre secteurs, il faut d'abord passer par un reprofilage en hauteur de la dune avant de mettre en place des plantations.

Les végétaux ne sont pas les seules espèces à intérêt patrimonial du milieu dunaire. Le Guêpier d'Europe, comme les lapins de garenne, et l'entomofaune en général sont parfois considérés comme des espèces architectes. Elles ont donc la capacité de redynamiser le milieu dunaire à une échelle plus réduite. Ces perturbations ont un impact environnemental plus faible que les méthodes présentées ci-dessus.



Figure 29 : Guêpier d'Europe, (Roger Eritja / Biosphoto)

Le Guêpier d'Europe (Casas-Crivillé et Valera 2005) renforce notamment les réseaux trophiques et améliore la biodiversité. Il privilégie les milieux arides et n'est pas encore très présent sur les dunes domaniales françaises. Mais cette espèce est en expansion et montre que favoriser l'accueil de l'avifaune renforce la résilience des écosystèmes dunaires. **Pour favoriser ce taxon, il faut améliorer la diversité arbustive des essences en frange forestière, et limiter la perte de dune non boisée** (Revers et al. 2018).

Tableau 5: Facteurs explicatifs de la distribution des espèces menacées ou à distribution limitée

| Espèces | Latitude | Présence de dune grise | Présence d'arbustes sur dune non boisée | Présence d'arbustes sur dune boisée | Présence de ronces | Présence de zone urbaine | Présence de forêt |
|---------------------|----------|------------------------|---|-------------------------------------|--------------------|--------------------------|-------------------|
| Alouette des champs | | | | | | | |
| Cochevis huppé | -.*** | | | | | | |
| Fauvette pitchou | | | | | | | |
| Pipit rousseline | | | | | -.* | -.* | |
| Tarier pâtre | +** | | +* | | | | |

'-': indique un effet négatif de la variable environnementale; '+' indique un effet positif de la variable environnementale.
 Le nombre d'astérisques indique le niveau de significativité de la relation entre métriques de diversité et variables environnementales : plus le nombre d'astérisques est élevé, plus la significativité est forte: *** ($P < 0.001$), ** ($P < 0.01$), * ($P < 0.05$). Seuls les effets significatifs au seuil de 5% sont indiqués.

Figure 30 : Tableau des facteurs explicatifs de la distribution de certaines espèces d'oiseaux menacées ou à distribution limitée, à proximité des habitats dunaires (Revers et al. 2018)

3.3. Mesures d'accompagnement

Tendre vers une dynamique libre ne signifie pas abandonner toute gestion. Les principes et méthodes présentées ne doivent pas empêcher le gestionnaire de minimiser les aléas et les pressions que subit la dune. D'autres outils permettent de jouer sur le maintien de la diversité végétale et la protection de la bande côtière.

Les effets du pâturage sur la dune grise sont complexes car ce milieu n'est pas suffisamment résilient. Les perturbations assurées par les populations de lapins de garenne sont très efficaces, mais la présence de cette espèce n'est pas facilement contrôlable : garennes « artificielles », réintroduction... des actions existent mais leurs impacts sont limités. La réintroduction en particulier ne débouche pas sur un succès reproducteur suffisant (Letty et al. 2005). Il semblerait également qu'un des facteurs limitant au développement des populations de lapins de garenne soit la fragmentation des habitats, qui nuit à l'immunité virale de cette espèce, sujette à d'importantes épidémies. Or, les dunes sont souvent fragmentées, la bande côtière étant « entrecoupée » de stations balnéaire, d'habitats...

En revanche on pourrait imaginer la mise en place d'un pâturage ultra raisonnée, soit sur les sites où la végétation arbustive se développe trop fortement, soit de manière temporaire afin de rendre les habitats protégés de la dune grise « habités » et ainsi la protéger du public, par extension. Les moutons seraient les plus adaptés à un pâturage dunaire (Cooper et Jackson 2021). Un mouton pourrait consommer jusqu'à 10% de la végétation dunaire (Deboudt 1995), mais quels sont les impacts en terme de richesse spécifique, de biomasse, de réseau trophique ? **Les effets positifs du pâturage seraient maximisés avec la mise en place d'un roulement, de pâturages mixtes et d'une faible densité d'individu à l'hectare** (Houston et al. 2001) . Des test de pâturage sur des milieux plus humides, par exemple aux Pays-Bas (van der Hagen et al. 2020) concluent à l'absence d'effets ou de perturbations vis-à-vis des dynamiques d'ensablements et de mobilité dunaire. Dans ce cas, le pâturage remplit simplement son rôle « de garde dunaire ».

Le pâturage mixte peut encore être maximisé. En effet, selon le contexte érosif et selon la dynamique de la frange forestière différents stratégies sont souhaitables :

- Au niveau de la frange forestière, dans les secteurs en recul où la dune grise est peu large, il paraît nécessaire limiter la croissance des ligneux. Les bovins sont particulièrement indiqués pour le résultat recherché.
- Le lapin de garennes est inféodé à la dune grise. Mais sa présence ponctuelle en dune de transition est avérée. Favoriser sa présence sur ce type de dune permettrait de dynamiser ce milieu sans accroître le stress sur des espèces végétales déjà perturbées par les processus naturels. Des garennes artificielles seraient indiquées. Le contrôle du dérangement canin est également un enjeu clé.

Les herbiers de zostères (phanérogames marines) protègent efficacement le littoral de l'érosion sédimentaire (Ganthy 2011)



Figure 31 : Herbiers de zostères (« Zostère » s. d.)

Ces plantes induisent à la fois **un dépôt de sédiment dans la zone intertidale** mais également l'affaiblissement de l'énergie cinétique de la colonne d'eau. Jouant le rôle d'un **coussin protecteur sous-marin**, elles constituent par ailleurs un milieu aux multiples bénéfices biotiques : ce sont des frayères, des habitats, elles produisent de la matière organique pour l'avant plage, et piègent le CO₂ océanique. La dynamique des populations de ces espèces est complexe : courants, conditions physico-chimiques... Et la pression anthropique n'améliore pas sa situation générale : mouillage, extraction de sédiments, pêche. Renforcer la protection réglementaire est essentiel, même si ces habitats ne sont que ponctuels le long des côtes.

Sa réintroduction est jusqu'ici hasardeuse en France (Gduveau 2017) mais pourrait être une solution pour renforcer la résilience des dunes les plus en recul et pour capter de la matière sédimentaire. **En Amérique du Nord, plus de 70 millions de graines ont été introduites depuis 20 ans. A la suite de ces travaux, plus de 3600 ha d'herbiers sont fonctionnels** (Orth et al. 2020). Les lieux de réintroduction ciblés sont majoritairement des lagons ou des anses protégées de la houle. Cependant, on trouve aujourd'hui des herbiers dans des secteurs où la côte est moyennement exposée aux courants de marée ou à la houle : en baie de St Brieuc par exemple.

Les abeilles, espèce ingénieuses et sentinelles : Les dunes côtières sont des « sanctuaires » à abeilles (Abbate et al. 2019). En dehors de **la nécessité d'encourager les populations de pollinisateurs à fertiliser les Angiospermes**, l'installation de ruches dunaires de manière systématique aurait plusieurs avantages. En premier lieu, l'apiculture s'approche d'une pratique agroalimentaire durable, qui permet l'existence d'une activité économique locale. La médiation et la communication autour des espaces naturels s'en retrouve renforcé. De plus, certaines espèces sélectionnées freinent l'expansion d'espèces exotiques comme le frelon asiatique. Enfin, les abeilles et les produits de la ruche sont des bioindicateurs efficaces. L'analyse du miel par *mélessopalynologie* permet de déterminer avec précision les espèces butinées (« L'analyse pollinique des miels pour lutter contre les fraudes | Miel-Direct » 2017). Ainsi on dispose d'un indicateur supplémentaire de la présence de certains taxons. De plus, les abeilles sont un outil de diagnostic efficace de « l'état d'un milieu » en terme de pollution, d'espèces invasives...

* *mélessopalynologie* : l'étude des grains de pollen dans le miel.

CONCLUSION

A travers la synthèse bibliographique sur l'érosion dunaire et le changement climatique, plusieurs problématiques ont été mis en exergue. En premier lieu, les impacts du changement climatiques sont avérés mais sujet à de nombreuses incertitudes et intrinsèquement liés aux trajectoires mondiales d'émission de gaz à effet de serre, par exemple. L'augmentation du niveau de la mer est probablement la conséquence majeure sur le forçage des cordons dunaires puisqu'elle joue un rôle sur le comportement des dunes et participe à l'aggravation du phénomène de surcote. L'évolution du climat fragilise l'écosystème dunaire, facteur de résilience de ces structures géomorphologiques. Il faut rappeler que l'augmentation de ces risques intervient dans un contexte de pénurie sédimentaire et de développement des activités humaines.

La pénurie sédimentaire est un des processus naturels majoritaire qui détermine le recul du trait de côte à long terme. Les activités humaines freinent ou bloquent la mobilité des dunes. Or c'est cette mobilité qui permet à la fois au habitats inféodés de se renouveler et également à la dune de présenter un profil résistant aux attaques de la mer. Le changement climatique est donc un danger à moyen terme sur la stabilité des cordons dunaires qui jouent souvent le rôle de digue naturelle. Les cortèges végétaux sont particulièrement menacés.

La bibliographie sur ces thèmes montre ses limites car les études sont menées à une échelle locale, et les variations régionales des paramètres climatiques trop importantes pour établir des lois générales. Les indicateurs développés en particulier sont souvent spécifiques à un secteur.

Néanmoins, le principe de résilience est mis en avant à travers l'étude des profils dunaires, des relations interspécifiques, et des impacts des processus naturels. Il est donc à prendre en compte dans le développement d'indicateurs et comme principe de gestion.

Le développement de nouveaux outils de suivi, et de gestion est limité par la réglementation. Les documents d'objectifs Natura 2000 sont assez coercitifs et n'affichent pas toujours une volonté de lutte contre le changement climatique. Or, le milieu dunaire est fortement impacté par cette réglementation. La gestion dunaire doit maintenant intégrer et évaluer les effets du changement climatique : un meilleur suivi du contexte sédimentaire, du biseau salé des aquifères dunaires, et de la vulnérabilité de chaque espèce dunaire au changement climatique est souhaitable, afin de créer un indicateur global résolument tourné vers la vulnérabilité (et la résilience !) des espèces dunaires.

Puis, il semble judicieux de renouveler les méthodes et principes de gestion : il faut continuer à préserver voire recharger les stocks sédimentaires mais aussi arbitrer les dynamiques des écosystèmes. Certains secteurs pâtissent d'une trop grande stabilité dunaire. Maintenir un seuil minimale de diversité écologique est primordiale, quitte à remobiliser certaines dunes bordières.

Accentuer les efforts sur l'avant-plage et sur l'atténuation des processus naturels est une piste envisageable. Les secteurs en accréation ou stabilité peuvent bénéficier de la mise en place de perturbations.

Enfin, les efforts des gestionnaires doivent continuer à limiter les menaces des activités humaines, favoriser les activités agro-pastorales douces, et aider le vivant à subsister dans cet écosystème.

BIBLIOGRAPHIE

- Abbate, Anthony, Joshua W. Campbell, Chase B. Kimmel, et William H. Kern. 2019. « Urban Development Decreases Bee Abundance and Diversity within Coastal Dune Systems ». *Global Ecology and Conservation* 20 (octobre): e00711. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00711>.
- Antonellini, Marco, et Pauline Mollema. 2010. « Impact of groundwater salinity on vegetation species richness in the coastal pine forests and wetlands of Ravenna, Italy ». *Ecological Engineering* 36 (septembre). <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.12.007>.
- « article YBQ revue maritime001.pdf ». s. d. Consulté le 4 août 2021. <http://www.euccfrance.fr/images/Pdf/article%20YBQ%20revue%20maritime001.pdf>.
- Aurélien RIBES. 2021. « Les événements extrêmes : un avant-goût du climat futur ? »
- Bai, Yuxuan, Richard Michalet, Weiwei She, Yanguai Qiao, Liang Liu, Chun Miao, Shugao Qin, et Yuqing Zhang. 2021. « Contrasting Responses of Different Functional Groups Stabilize Community Responses to a Dominant Shrub under Global Change ». Édité par Eric Allan. *Journal of Ecology* 109 (4): 1676-89. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13588>.
- Baker, Alexander J., Kevin I. Hodges, Reinhard K. H. Schiemann, et Pier Luigi Vidale. 2021. « Historical Variability and Lifecycles of North Atlantic Midlatitude Cyclones Originating in the Tropics ». *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 126 (9): e2020JD033924. <https://doi.org/10.1029/2020JD033924>.
- bela. 2019. « Outline ». SlideServe. 27 mars 2019. <https://www.slideserve.com/bela/outline-powerpoint-ppt-presentation>.
- « Bilan de la loi Littoral et des mesures en faveur du littoral ». s. d. Vie publique.fr. Consulté le 15 juin 2021. <https://www.vie-publique.fr/rapport/29421-bilan-de-la-loi-littoral-et-des-mesures-en-faveur-du-littoral>.
- Bird, Tania Leah Fairfax, Amos Bouskila, Elli Groner, et Pua Bar Kutiel. 2020. « Can Vegetation Removal Successfully Restore Coastal Dune Biodiversity? » *Applied Sciences* 10 (7): 2310. <https://doi.org/10.3390/app10072310>.
- Bossard, Victor, et Alexandre Nicolae Lerma. 2020. « Geomorphologic Characteristics and Evolution of Managed Dunes on the South West Coast of France ». *Geomorphology* 367 (octobre): 107312. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107312>.
- « Caractérisation de la sensibilité du littoral morbihannais à l'érosion ». s. d. CEREMA. <https://www.cerema.fr/fr/projets/caracterisation-sensibilite-du-littoral-morbihannais-erosion>.
- Casas-Crivillé, A., et F. Valera. 2005. « The European Bee-Eater (Merops Apiaster) as an Ecosystem Engineer in Arid Environments ». *Journal of Arid Environments* 60 (2): 227-38. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2004.03.012>.
- Castelle, Bruno, Quentin Laporte-Fauret, Vincent Marieu, Richard Michalet, David Rosebery, Stéphane Bujan, Bertrand Lubac, et al. 2019. « Nature-Based Solution along High-Energy Eroding Sandy Coasts: Preliminary Tests on the Reinstatement of Natural Dynamics in Reprofiled Coastal Dunes ». *Water* 11 (12): 2518. <https://doi.org/10.3390/w11122518>.
- Cazenave, Anny, et Gonéri Le Cozannet. 2014. « Sea Level Rise and Its Coastal Impacts ». *Earth's Future* 2 (2): 15-34. <https://doi.org/10.1002/2013EF000188>.
- « Chêne Pédonculé/Chêne Sessile ». s. d. Consulté le 17 août 2021. [//www.the-forest-time.com/fr/guide-des-essences/le-chene-pedonculechene-sessile](http://www.the-forest-time.com/fr/guide-des-essences/le-chene-pedonculechene-sessile).

- Ciccarelli, D., M.S. Pinna, F. Alquini, D. Cogoni, M. Ruocco, G. Bacchetta, G. Sarti, et G. Fenu. 2017. « Development of a Coastal Dune Vulnerability Index for Mediterranean Ecosystems: A Useful Tool for Coastal Managers? » *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 187 (mars): 84-95. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2016.12.008>.
- « Climat et Résilience : l'érosion côtière a voix au chapitre ». 2021. Banque des Territoires. 23 mars 2021. <https://www.banquedesterritoires.fr/climat-et-resilience-lerosion-cotiere-voix-au-chapitre>.
- « Climessences ». 2021. RMT AFORCE. <https://climessences.fr/node/2>.
- « Comprendre le GIEC ». s. d. Ministère de la Transition écologique. Consulté le 24 août 2021. <https://www.ecologie.gouv.fr/comprendre-giec>.
- « Conservation des dunes côtières.pdf ». s. d. Consulté le 30 juillet 2021. <http://www.euccfrance.fr/images/Pdf/Conservation%20des%20dunes%20c%C3%B4ti%C3%A8res.pdf>.
- Cooper, Andrew, et Derek Jackson. 2021. « Dune Gardening? A Critical View of the Contemporary Coastal Dune Management Paradigm ». *Area* 53 (2): 345-52. <https://doi.org/10.1111/area.12692>.
- côte, Portail du réseau national des observatoires du trait de. 2019. « Qu'est-ce que le trait de côte ? ». 28 novembre 2019. <http://observatoires-littoral.developpement-durable.gouv.fr/qu-est-ce-que-le-trait-de-cote-r25.html>.
- Cozannet, Gonéri Le. 2016. « Les conséquences de l'élévation du niveau marin pour le recul du trait de côte ». Phdthesis, Université Panthéon-Sorbonne - Paris I. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01661291>.
- Daeden, Jonathan. 2015. « Analyse des pressions anthropiques sur l'environnement littoral européen et français ». Phdthesis, Université de La Rochelle. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01373455>.
- Davidson-Arnott, Robin G. D., et Bernard O. Bauer. 2021. « Controls on the Geomorphic Response of Beach-Dune Systems to Water Level Rise ». *Journal of Great Lakes Research*, juin. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2021.05.006>.
- Deboudt, Philippe. 1995. « L'Inch, morphologie et végétation dunaire d'une flèche littorale de la baie de Dingle (Comté de Kerry, Irlande) ». *Noroi* 168 (1): 577-93. <https://doi.org/10.3406/noroi.1995.6660>.
- Del Vecchio, Silvia, Irene Prisco, Alicia T. R. Acosta, et Angela Stanisci. 2015. « Changes in Plant Species Composition of Coastal Dune Habitats over a 20-Year Period ». *AoB PLANTS* 7 (janvier). <https://doi.org/10.1093/aobpla/plv018>.
- « Document d'Objectifs Natura 2000 de la Zone Spéciale de Conservation n° FR5400434 « Presqu'île d'Arvert » et de la Zone de Protection Spéciale n° FR5412012 « Baie de Bonne Anse, Marais de Bréjat et de Saint-Augustin » Volume de synthèse ». s. d. ONF, MEDDE. http://www.nouvelle-aquitaine.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/volume_i_tome_de_synthese_presqu_ile_d_arvert_version_du_17-02-2014.pdf.
- « Doody et Office for Official Publications of the European Communities - 2004 - Living with Coastal Erosion in Europe Sediment an.pdf ». s. d. Consulté le 17 août 2021. https://ec.europa.eu/environment/iczmpdf/brochure_fr.pdf.
- Dörfliger, Nathalie, et Bénédicte Augeard. 2013. « Quels outils pour caractériser l'intrusion saline et l'impact potentiel du niveau marin sur les aquifères littoraux ». Comprendre pour Agir. Onema. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02936895>.
- « DRIAS les futurs du Climat ». s. d. Ministère de la Transition Ecologique. <http://www.drias-climat.fr/decouverte>.
- « EUCC France ». s. d. Consulté le 29 juillet 2021. <http://www.euccfrance.fr/index.php/component/content/article/28-reflexions/42-reflexions1>.

Favennec, Jean. 2007. « Principes et évolutions de la gestion des dunes », *Rendez-vous techniques de l'ONF*, 17: 22-30.

———. 2012. *Guide de la flore des dunes littorales: de la Bretagne au sud des Landes*. 4e éd. revue et Augmentée. Bordeaux: Éd. « Sud-Ouest ».

———. 2021. « Stratégies de gestion de la bande littorale », 20.

Fernández-Alonso, María José, Alexandra Rodríguez, Laura García-Velázquez, Everaldo Dos Santos, Luciana de Almeida, Angela Lafuente, Jun-Tao Wang, Brajesh Singh, David Fanguero, et Jorge Durán. 2021. « Integrative Effects of Increasing Aridity and Biotic Cover on Soil Attributes and Functioning in Coastal Dune Ecosystems ». *Geoderma* 390 (mai): 114952. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.114952>.

Fichaut, Bernard, et Serge S. Suanez. 2012. « Suivi morpho-sédimentaire de la plage de Sainte-Anne-du-Portzic (communes de Brest et de Plouzané) après le rechargement en sable de mars 2011 ». Research Report. LETG-Brest UMR 6554 CNRS; Université de Bretagne Occidentale (UBO). <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00724188>.

« Fiche_05_mod.pdf ». s. d. Consulté le 11 août 2021.

https://www.manche.gouv.fr/content/download/42583/299827/file/Fiche_05_mod.pdf.

F.Lucassou, J.M Schroëtter, J.Baptiste, et N.Coppo. 2019. « Sensibilité des aquifères bretons aux intrusions salines ». RP-69012-FR. BRGM.

Forey, Estelle, Blaise Touzard, et Richard Michalet. 2010. « Does Disturbance Drive the Collapse of Biotic Interactions at the Severe End of a Diversity–Biomass Gradient? » *Plant Ecology* 206 (2): 287-95. <https://doi.org/10.1007/s11258-009-9642-z>.

France, Commissariat général au développement durable, et Service de l'observation et des statistiques. 2011. *Le littoral, chiffres clés*. La Défense: Commissariat général au développement durable, Service de l'observation et des statistiques.

Ganthy, Florian. 2011. « Rôle des herbiers de zostères (*Zostera noltii*) sur la dynamique sédimentaire du Bassin d'Arcachon ». Thèse de doctorat, Bordeaux 1. <http://www.theses.fr/2011BOR14436>.

Garcin, Manuel, et Thomas Bulteau. 2011. *Synthèse des travaux menés sur l'observation de l'évolution du trait de côte en France*.

gduveau. 2017. « Réimplantations expérimentales de Zostères dans l'Étang de Berre ». Text. Centre de ressources du Génie écologique. 5 avril 2017. <http://www.genieecologique.fr/reimplantations-experimentales-de-zosteres-dans-letang-de-berre>.

Génot, Jean-Claude. 2006. « Vers un changement " climacique " ? » *Le Courrier de l'environnement de l'INRA* 53 (53): 129-32. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01199275>.

Gouguet, Loïc. 2018. *Guide de gestion des dunes et des plages associées*. Guide pratique. Versailles: Quae.

Hagen, Harrie G. J. M. van der, Dan Assendorp, Wim Calame, Frank van der Meulen, Karlè V. Sýkora, et Joop H. J. Schaminée. 2020. « Is Livestock Grazing a Key Factor for Changing Vegetation Patterns in Lime Rich Coastal Dunes in the Netherlands? » *Journal of Coastal Conservation* 24 (2): 15. <https://doi.org/10.1007/s11852-020-00733-z>.

Hénaff, Alain, Catherine Meur-Férec, et Yannick Lageat. 2013. « Changement climatique et dynamique géomorphologique des côtes bretonnes. Leçons pour une gestion responsable de l'imbrication des échelles spatio-temporelles ». *Cybergeo*, septembre. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.26058>.

- Houston, John, Paul J. Rooney, Sally E. Edmondson, et P. J. Rooney. 2001. *Coastal Dune Management: Shared Experience of European Conservation Practice*. Liverpool University Press.
- Jackson, Derek W.T., Susana Costas, Rita González-Villanueva, et Andrew Cooper. 2019. « A Global 'Greening' of Coastal Dunes: An Integrated Consequence of Climate Change? » *Global and Planetary Change* 182 (novembre): 103026. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.103026>.
- Jaulin, Stéphane, et Fabien Soldati. 2005. *Les dunes littorales du Languedoc-Roussillon: guide méthodologique d'évaluation de leur état de conservation à travers l'étude des cortèges spécialisés de Coléoptères*. Millas; [Montpellier: Office pour les insectes et leur environnement du Languedoc-Roussillon ; Direction régionale de l'environnement du Languedoc-Roussillon.
- Jean-Philippe Bellot. 2012. « Comprendre les intrusions d'eau salée dans les aquifères littoraux ». <https://www.actu-environnement.com/blogs/jean-philippe-bellot/167/jean-philippe-bellot-intrusion-eau-salee-aquiferes-littoraux-248.html#:~:text=Les%20intrusions%20salines%20repr%C3%A9sentent%20un,qui%20sont%20des%20r%C3%A9servoirs%20strat%C3%A9giques.&text=Le%20ph%C3%A9nom%C3%A8ne%20de%20salinisation%20des,la%20fin%20du%20XIX%C3%A8me%20si%C3%A8cle.>
- J.Y LE THERIZIEN. 1974. « Etude de l'évolution géographique, foncière, technique, depuis le XVIIIe s du littoral de Charentes-Maritime (massifs domaniaux de la presqu'île d'Arvert et de l'île d'Oléron) ». ONF, Direction régionale Poitou-Charentes-Limousin, Centre de Gestion de la Rochelle.
- Keijsers, J. G. S., A. V. De Groot, et M. J. P. M. Riksen. 2016. « Modeling the Biogeomorphic Evolution of Coastal Dunes in Response to Climate Change: MODELING COASTAL DUNES ». *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 121 (6): 1161-81. <https://doi.org/10.1002/2015JF003815>.
- Kopp, Robert E., Radley M. Horton, Christopher M. Little, Jerry X. Mitrovica, Michael Oppenheimer, D. J. Rasmussen, Benjamin H. Strauss, et Claudia Tebaldi. 2014. « Probabilistic 21st and 22nd Century Sea-level Projections at a Global Network of Tide-gauge Sites ». *Earth's Future* 2 (8): 383-406. <https://doi.org/10.1002/2014EF000239>.
- « La compétence Gemapi intègre-t-elle la gestion de tous les ouvrages de défense contre la mer ? » s. d. La Gazette des Communes. Consulté le 15 juin 2021. <https://www.lagazettedescommunes.com/466653/la-competece-gemapi-integre-t-elle-la-gestion-de-tous-les-ouvrages-de-defense-contre-la-mer/>.
- « La hausse du niveau de la mer accélère-t-elle l'érosion des côtes? (1/3) | Science, climat et énergie ». s. d. Consulté le 15 juin 2021. <https://www.science-climat-energie.be/2019/08/15/la-hausse-du-niveau-de-la-mer-accelere-t-elle-lerosion-des-cotes-1-3/>.
- Laignel, Benoit. 2015. « Le changement climatique et ses effets de l'échelle globale à régionale : Etat des lieux ». Présenté à CEREMA, novembre 18. https://www.cerema.fr/system/files/documents/2018/01/2-Presentation_sur_le_changement_climatique_mondial-national-regional.pdf.
- « L'analyse pollinique des miels pour lutter contre les fraudes | Miel-Direct ». 2017. Miel-Direct : Gelée royale française et Miels en vente directe producteur. 18 avril 2017. <https://www.miel-direct.fr/analyse-pollinique-contre-les-fraudes/>.
- Laporte-Fauret, Quentin. 2021. « Rôle des interactions biophysiques dans la dynamique dunaire en réponse aux perturbations ». Phdthesis, Université de Bordeaux. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03258552>.
- Laporte-Fauret, Quentin, Ana Teresa Alonso Ayuso, Tiffany Rodolfo-Damiano, Vincent Marieu, Bruno Castelle, Stéphane Bujan, David Rosebery, et Richard Michalet. 2021. « The Role of Physical Disturbance for Litter Decomposition and Nutrient Cycling in Coastal Sand Dunes ». *Ecological Engineering* 162 (avril): 106181. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106181>.

Le Bagousse-Pinguet, Yoann, Estelle Forey, Blaise Touzard, et Richard Michalet. 2013. « Disentangling the Effects of Water and Nutrients for Studying the Outcome of Plant Interactions in Sand Dune Ecosystems ». Édité par Francesco de Bello. *Journal of Vegetation Science* 24 (2): 375-83. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2012.01462.x>.

« Les principes généraux applicables à la gestion du domaine public maritime | La préfecture et les services de l'État en région Corse ». s. d. Consulté le 16 août 2021. <https://www.prefectures-regions.gouv.fr/corse/Grands-dossiers/Securite/Protection-de-la-mer-et-du-littoral/Les-principes-generaux-applicables-a-la-gestion-du-domaine-public-maritime/>.

Letty, Jérôme, Guillaume Queney, A Gautier, et S Marchandeu. 2005. « Évaluation de l'efficacité des repeuplements par suivi génétique : l'exemple du lapin de garenne ». *Faune Sauvage* 265 (janvier): 39-46.

Lithgow, Debora, M. Luisa Martínez, et Juan B. Gallego-Fernández. 2015. « The "ReDune" Index (Restoration of Coastal Dunes Index) to Assess the Need and Viability of Coastal Dune Restoration ». *Ecological Indicators* 49 (février): 178-87. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.10.017>.

Liu, Fenghong, Jian Liu, et Ming Dong. 2016. « Ecological Consequences of Clonal Integration in Plants ». *Frontiers in Plant Science* 7 (juin). <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00770>.

« Loi climat et résilience : l'écologie dans nos vies ». s. d. Ministère de la Transition écologique. Consulté le 11 août 2021. <https://www.ecologie.gouv.fr/loi-climat-resilience>.

Luisa Martínez, Ma., Gabriela Mendoza-González, Rodolfo Silva-Casarín, et Edgar Mendoza-Baldwin. 2014. « Land Use Changes and Sea Level Rise May Induce a "Coastal Squeeze" on the Coasts of Veracruz, Mexico ». *Global Environmental Change* 29 (novembre): 180-88. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.09.009>.

Mallard, Fanny. 2016. « Programme les sentinelles du climat. Tome I : Développement d'indicateurs des effets du changement climatique sur la biodiversité en Nouvelle-Aquitaine ». C. Nature. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01778463v2/document>.

Mendoza-González, Gabriela, M. Luisa Martínez, Octavio R. Rojas-Soto, Gabriela Vázquez, et Juan B. Gallego-Fernández. 2013. « Ecological Niche Modeling of Coastal Dune Plants and Future Potential Distribution in Response to Climate Change and Sea Level Rise ». *Global Change Biology* 19 (8): 2524-35. <https://doi.org/10.1111/gcb.12236>.

Mercier, Denis. 2021. *Les impacts spatiaux du changement climatique*. ISTE Group.

Miller, Thomas E., Elise S. Gornish, et Hannah L. Buckley. 2010. « Climate and Coastal Dune Vegetation: Disturbance, Recovery, and Succession ». *Plant Ecology* 206 (1): 97-104. <https://doi.org/10.1007/s11258-009-9626-z>.

Musereau, Jonathan. 2009. « Approche de la gestion des cordons littoraux : mise au point et application d'un indice d'érosion (Zone des Pertuis Charentais, France) ». These de doctorat, Rennes 2. <https://www.theses.fr/2009REN20019>.

Nathalie Dörfliger et Bénédicte Augeard. 2013. « Quels outils pour caractériser l'intrusion saline et l'impact potentiel du niveau marin sur les aquifères littoraux? » ONEMA.

Nationale, Assemblée. s. d. « Lutte contre le dérèglement climatique ». Assemblée nationale. Consulté le 2 août 2021a. https://www.assemblee-nationale.fr/dyn/15/dossiers/lutte_contre_le_dereglement_climatique.

———. s. d. « Projet de loi n° 3875 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets ». Assemblée nationale. Consulté le 15 juin 2021b. https://www.assemblee-nationale.fr/dyn/15/textes/l15b3875_projet-loi.

« Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique (France) - 2019 - Les événements météorologiques extrêmes dans un co.pdf ». s. d. Consulté le 15 juin 2021. https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/ONERC_Rapport_2018_Evenements_meteorologiques_extremes_et_CC_WEB.pdf.

« OCLM - Observatoire Citoyen du Littoral Morbihannais ». s. d. OCLM - Observatoire Citoyen du Littoral Morbihannais. Consulté le 3 août 2021. <http://observatoire-littoral-morbihan.fr/>.

Olcomendy, Cédric, Floriane Bogun, Didier Rihouey, et Vincent Mazeiraud. 2020. « Définition des volumes de besoin des rechargements massifs du littoral de Soulac-sur-Mer via l'utilisation d'un modèle Xbeach calibré avec des données topographiques mensuelles ». In *XVIèmes Journées, Le Havre*, 789-96. Editions Paralia. <https://doi.org/10.5150/jngcgc.2020.088>.

Orth, Robert J., Jonathan S. Lefcheck, Karen S. McGlathery, Lillian Aoki, Mark W. Luckenbach, Kenneth A. Moore, Matthew P. J. Oreska, Richard Snyder, David J. Wilcox, et Bo Lusk. 2020. « Restoration of Seagrass Habitat Leads to Rapid Recovery of Coastal Ecosystem Services ». *Science Advances* 6 (41): eabc6434. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abc6434>.

Pakeman, Robin J., Jim Alexander, Joan Beaton, Rob Brooker, Roger Cummins, Antonia Eastwood, Debbie Fielding, et al. 2015. « Species Composition of Coastal Dune Vegetation in Scotland Has Proved Resistant to Climate Change over a Third of a Century ». *Global Change Biology* 21 (10): 3738-47. <https://doi.org/10.1111/gcb.12999>.

Paskoff, R. 2003. « La conservation des dunes littorales implique-t-elle leur stabilisation ? L'exemple de la côte atlantique Coastal dune fields in Atlantic Europe: towards a dynamic conservation ». *Nature Sciences Sociétés* 11 (3): 288-94. [https://doi.org/10.1016/S1240-1307\(03\)00086-4](https://doi.org/10.1016/S1240-1307(03)00086-4).

Paskoff, Roland. 2005. *Les Plages vont-elles disparaître ?* Humensis.

Petit-Berghem, Yves. 2008. « L'assèchement des dépressions dunaires du littoral du Cotentin : mécanismes et propositions de gestion ». *Physio-Géo. Géographie physique et environnement*, n° Volume 2 (janvier): 77-95. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.438>.

Planton, Serge, Gonéri Le Cozannet, Anny Cazenave, Stéphane Costa, Olivier Douez, Pierre Gaufrès, François Hissel, et al. 2015. « Le climat de la France au XXIe siècle. Vol 5 : Changement climatique et niveau de la mer : de la planète aux côtes françaises ». Research Report. Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01288453>.

« Préconisations pour le recensement des ouvrages et structures de défense contre les aléas côtiers ». 2011. CETMEF.

« Premiers enseignements - Géolittoral ». s. d. Consulté le 15 juin 2021. <http://www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr/premiers-enseignements-r534.html>.

« Prévention des inondations ». s. d. Ministère de la Transition écologique. Consulté le 15 juin 2021. <https://www.ecologie.gouv.fr/prevention-des-inondations>.

« Programme les sentinelles du climat – Tome VIII : Écologie du changement climatique en région Nouvelle-Aquitaine - Passages ». s. d. Consulté le 23 août 2021. <https://hal.campus-aar.fr/UMR5319/hal-02495935v1>.

« Réchauffement climatique et tempêtes - Météo-France ». s. d. Consulté le 15 juin 2021. <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/impacts-du-changement-climatique-sur-les-phenomenes-hydrometeorologiques/changement-climatique-et-tempetes>.

Reguero, Borja G., Iñigo J. Losada, et Fernando J. Méndez. 2019. « A Recent Increase in Global Wave Power as a Consequence of Oceanic Warming ». *Nature Communications* 10 (1): 205. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-08066-0>.

Reporterre. s. d. « La lutte des écolos a payé : le port de plaisance de Brétignolles ne se fera pas ». Reporterre, le quotidien de l'écologie. Consulté le 11 août 2021. <https://reporterre.net/La-lutte-des-ecolos-a-paye-le-port-de-plaisance-de-Bretignolles-ne-se-fera-pas>.

Revers, Frederic, Marie-Lise benot, David Rosebery, et Didier Alard. 2018. « La diversité de l'avifaune du cordon dunaire aquitain : quelles influences de l'environnement local et régional? » *Faune-Aquitaine.org*, n° 0053-FA2018: 1-17. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01868799>.

Rey, Tony, Loic Le Dé, Frédéric Leone, et Gilbert David. 2017. « Leçons tirées du cyclone Pam au Vanuatu (Mélanésie) : aléas côtiers, crues éclairs et dommages ». *Géomorphologie : relief, processus, environnement* 23 (4). <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.11842>.

Rijn, Leonardus C. van. 2012. *Principles of Sedimentation and Erosion Engineering Rivers, Estuaries and Coastal Seas*. Erscheinungsort nicht ermittelbar: Verlag nicht ermittelbar.

Robinet, Arthur. 2017. « Modélisation de l'évolution long-terme du trait de côte le long des littoraux sableux dominés par l'action des vagues ». Sciences de la Terre, Université de Bordeaux.

Robinet, Arthur, Déborah Idier, Goneri Le Cozannet, et Bruno Castelle. 2018. *Simulating sea-level rise impacts on shoreline change along a wave-dominated sandy coast with the LX-Shore model*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21487.28329>.

« Scénarios prospectifs du GIEC [Les enjeux pour l'industrie du futur] ». s. d. Consulté le 19 août 2021. https://moreauva.scenari-community.org/SY12/IDenUT_IntroTD_web/co/GIEC.html.

Sedrati, Mouncef, et Julia Cochet. 2015. « AlgoBox® : Un outil écologique pour la régénération des pieds de dunes grâce aux échouages de macro-algues ». In *Conférence Méditerranéenne Côtière et Maritime*, 4. Ferrara, Italy. <https://doi.org/10.5150/cmcm.2015.017>.

Sorce, Carlo, Francesca Nannipieri, et Daniela Ciccarelli. 2021. « Ecophysiological and Morpho-Functional Responses of Mediterranean Plants on Coastal Dunes: How They Vary across Seasons ». *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 259 (septembre): 107480. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2021.107480>.

[sous la direction de H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. et Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama et N. M. Weyer]. 2019. « Résumé à l'intention des décideurs, Rapport spécial du GIEC sur l'océan et la cryosphère dans le contexte du changement climatique ». GIEC.

« specif-tech-carto-indicateur-erosion.pdf ». s. d. Consulté le 15 juin 2021. <http://www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/specif-tech-carto-indicateur-erosion.pdf>.

« Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte - Géolittoral ». s. d. Consulté le 15 juin 2021. <http://www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr/strategie-nationale-de-gestion-integree-du-trait-r434.html>.

Tellez-Arenas, Agnès, Robin Quique, Faïza Boulahya, Gonéri Le Cozannet, François Paris, Sylvestre Le Roy, Fabrice Dupros, et François Robida. 2018. « Scalable Interactive Platform for Geographic Evaluation of Sea-Level Rise Impact Combining High-Performance Computing and WebGIS Client ». In *Communicating Climate Change Information for Decision-Making*, édité par Silvia Serrao-Neumann, Anne Coudrain, et Liese Coulter, 163-75. Springer Climate. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-74669-2_12.

« Tendances du niveau de la mer ». s. d. Consulté le 29 juillet 2021. <https://www.sonel.org/-Tendances-du-niveau-de-la-mer-.html?lang=fr>.

Vasselot de Régné. s. d. *Notice sur les dunes de la Coubre*. 1878^e éd.

Vecchio, Silvia Del, Edy Fantinato, Mauro Roscini, Alicia T. R. Acosta, Gianluigi Bacchetta, et Gabriella Buffa. 2020. « The Germination Niche of Coastal Dune Species as Related to Their Occurrence along a Sea–Inland Gradient ». *Journal of Vegetation Science* 31 (6): 1112-21. <https://doi.org/10.1111/jvs.12899>.

« VULSACO - Vulnérabilité de plages sableuses face aux changements climatiques et aux pressions anthropiques ». 2008. RP-56618-FR. BRGM.

Wenzel, Manfred, et Jens Schröter. 2014. « Global and Regional Sea Level Change during the 20th Century ». *Journal of Geophysical Research: Oceans* 119 (11): 7493-7508. <https://doi.org/10.1002/2014JC009900>.

Zemmour, Amar. 2019. « Étude de l'évolution des littoraux dunaires de la Côte d'Opale à différentes échelles de temps : analyse de leur capacité de régénération post-tempête ». Phdthesis, Université du Littoral Côte d'Opale. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02270709>.

« Zostère ». s. d. *Gastronomiac* (blog). Consulté le 2 août 2021. https://www.gastronomiac.com/glossaire_des_produits/zostere/.

ANNEXE

Source : Stratégie de gestion du Domaine Public Maritime des Bouches du Rhône

Les différents types d'autorisations accordées sur le DPMn sont les suivantes :

- Les autorisations ponctuelles (Articles L2122-1 à 3 du CGPPP): Il s'agit d'autorisation délivrée par le gestionnaire du DPM pour des occupations ponctuelles et de courte durée ou des travaux divers.
- Les AOT/COT (Articles 2122-1 à 3 du CGPPP): Elles sont strictement personnelles et présentent un caractère précaire et révocable. L'AOT/COT a, en principe, un caractère subsidiaire et ne peut être utilisée que si aucun autre régime spécifique n'est applicable.
- La concession d'utilisation du DPM en dehors des ports (Articles L2124-3 et R. 2124-1 à 2124-12 du CGPPP) Ce titre d'occupation est le régime juridique adapté à l'autorisation de certains ouvrages ou équipements dont les caractéristiques techniques, la nature, l'emprise et la durée d'implantation sont significatives. Les installations ou travaux doivent être affectés à l'usage du public, à un service public ou une opération d'intérêt général (au sens d'intérêt collectif).
- Les concessions de plage (Articles R. 2124-13 à 2124-38 du CGPPP) : Le public dispose d'un accès libre et gratuit aux plages et celles-ci peuvent faire l'objet de concessions de plage après enquête publique (Articles L2124-4 et L321-9 du CE). Il s'agit de l'outil destiné à l'exploitation balnéaire des plages par lequel l'État confie la gestion de la plage à un tiers. Elles sont accordées, par priorité aux communes ou groupements de communes ou, après leur avis si elles renoncent à leur priorité, à des personnes publiques ou privées après publicité et mise en concurrence préalable. Ce dispositif permet à ce gestionnaire de déléguer l'exploitation de sous-traité de plage.
- Les AOT ZMEL – zone de mouillages et d'équipements légers (Articles R. 2124-39 à 2124-55 du CGPPP): Ces titres permettent l'aménagement, l'organisation et la gestion des zones de mouillages destinés à l'accueil et au stationnement des bateaux de plaisance.
- Les transferts de gestion (Articles L2123-3 à 6 et R. 2123-9 du CGPPP): Le transfert de gestion ne constitue pas à proprement parler une modalité de gestion du DPM, puisqu'il est alors géré comme le domaine public d'une autre collectivité ou d'un autre ministère affectataire. Il est employé pour les terrains du domaine public maritime naturel devant faire l'objet de travaux destinés à leur enlever ce caractère de domanialité naturelle et à leur conférer un caractère de domanialité publique artificielle (voirie, espaces publics...). Une durée maximale peut-être prévue dans la convention.
- Les superpositions d'affectations (Articles L 2123-7 et 8 et R. 2122-2 du CGPPP) Ce titre diffère de celui du transfert de gestion en ce sens où la gestion du domaine reste partagée entre l'État et personne publique. De ce fait, la personne publique n'est gestionnaire de ce domaine que pour un objet précis, l'État restant compétent sur les autres aspects.
- La concession pour l'exploitation de culture marine (Article R923-9 du Code Rural et de la Pêche Maritime (CRPM). L'attribution d'une nouvelle concession de culture marine tout comme son renouvellement se fait dans les conditions prévues par l'article R. 923-31 du code rural et de la pêche maritime (CRPM).
- L'attribution/affectation au conservatoire du littoral La circulaire interministérielle n° 2007-17 du 20/02/2007, relative à l'intervention du Conservatoire sur le DPM, définit les conditions selon lesquelles l'établissement public peut se voir attribué ou affecté le DPMn, en concertation avec les services de l'État. La convention d'affectation ou d'attribution des biens de l'État au Conservatoire, précise les conditions dans lesquelles le Conservatoire se trouve substitué à l'État dans la gestion du domaine ainsi confié et l'usage à donner à ces terrains.

TABLE DES MATIERES

| | |
|---|-----------|
| NOTICE ANALYTIQUE..... | 1 |
| DECLARATION DE TRAVAIL PERSONNEL..... | 2 |
| REMERCIEMENTS..... | 3 |
| SOMMAIRE..... | 4 |
| TABLE DES ILLUSTRATIONS..... | 5 |
| SIGLES..... | 6 |
| PROBLEMATIQUE..... | 7 |
| PARTIE 1 : NOTE DE SYNTHESE EROSION DUNAIRE ET CHANGEMENT CLIMATIQUE..... | 8 |
| Introduction..... | 8 |
| 1. Synthèse des conséquences du changement climatique dans le cadre de l'érosion dunaire | 11 |
| 1.1 La conséquence directe du changement climatique sur le niveau de la mer..... | 11 |
| 1.1.1. Les différents scénarios à l'échelle mondiale..... | 11 |
| 1.1.2. Les indicateurs de mesure du trait de côte..... | 14 |
| 1.1.3. Avancée ou recul du trait de côte au bord des dunes domaniales françaises en 2050 et 2100 | 16 |
| 1.2 L'évolution des phénomènes de submersion marines et la dynamique éolienne..... | 21 |
| 1.2.1. Importance du niveau de la mer dans les évènements de transgression marine..... | 21 |
| 1.2.2. Synthèse des études sur une potentielle augmentation des évènements météorologiques extrêmes | 22 |
| 1.2.3. Facteurs aggravants du changement climatique..... | 23 |
| 1.3 Aquifères, Salinité et Zones climatiques..... | 25 |
| 1.3.1. Remontée du niveau de la mer et forçage des aquifères dunaires..... | 25 |
| 1.3.2. Evolution du climat au sein des espaces dunaires..... | 29 |
| 2. Prévoir et modéliser l'érosion dunaire..... | 31 |
| 2.1 Impact et prise en compte du changement climatique sur les différents modèles numériques..... | 31 |
| 2.2 Vulnérabilité et mobilité des habitats et des espèces dunaires face au changement climatique..... | 36 |
| 2.2.1. Vulnérabilité des habitats dunaires atlantiques..... | 36 |
| 2.2.2. Conséquences sur la phytosociologie des cortèges dunaires..... | 39 |
| 2.3 Quels indicateurs ?..... | 40 |
| Conclusion..... | 44 |
| PARTIE 2 : PISTES D'ACTION POUR AMELIORER LA RESILIENCE ET LA GESTION DES DUNES FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE..... | 45 |

| | |
|---|-----------|
| Introduction | 45 |
| 1. Evolution de la réglementation et des enjeux de la gestion du littoral en France | 47 |
| 1.1 Historique législatif et réglementaire partiel..... | 47 |
| 1.2 Milieu dunaire : Protection, Risques et Aménagement..... | 49 |
| 1.3 Impact de la réglementation sur la gestion dunaire..... | 51 |
| 2. Propositions de nouveaux indicateurs et méthode de suivi des impacts du changement climatique | 54 |
| 2.1 Indicateur du contexte sédimentaire..... | 55 |
| 2.2 Transgression du biseau salé..... | 56 |
| 2.3 Résilience monospécifique des espèces patrimoniales | 56 |
| 2.4 Indicateur global sur la vulnérabilité des espèces face au changement climatique | 57 |
| 3. Développer la résilience de la dune | 58 |
| 3.1. Principes de gestion à privilégier face au changement climatique..... | 58 |
| 3.2. Méthodes de gestion du stock sédimentaire et re-végétalisation..... | 61 |
| 3.3. Mesures d'accompagnement..... | 66 |
| CONCLUSION | 69 |
| BIBLIOGRAPHIE | 70 |
| TABLE DES MATIERES | 81 |

