

Projet de Recherche et d'Innovation 2024-2025

L'ENJEU DE LA COMPENSATION ECOLOGIQUE DES EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE DANS LES PROJETS DE REAMENAGEMENT DU TRAIT DE COTE.

*Cas d'étude : Projet de réaménagement des espaces publics du front de mer
de Lacanau (33).*



(Source : Durand, 2025)

L'ENJEU DE LA COMPENSATION ECOLOGIQUE DES EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE DANS LES PROJETS DE REAMENAGEMENT DU TRAIT DE COTE.

*Cas d'étude : Projet de réaménagement des espaces publics du front
de mer de Lacanau (33).*

Directrice de recherche : Mathilde Gralepois

Auteure : Ninon Durand

2024-2025

Avertissement

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

L'auteur (les auteurs) de cette recherche a (ont) signé une attestation sur l'honneur de non-plagiat

Formation par la recherche, Projet de Recherche Innovation en génie de l'Aménagement et de l'Environnement

La formation au génie de l'aménagement et de l'environnement, assurée par le département aménagement et environnement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme, de l'aménagement des espaces fortement à faiblement anthropisés, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir-faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement et de l'environnement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet de Recherche Innovation (P.R.I.), situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Dynamiques et Actions Territoriales et Environnementales de l'UMR 7324 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

Afin de valoriser ce travail de recherche nous avons décidé de mettre en ligne sur la base du Système Universitaire de Documentation (SUDOC), les mémoires à partir de la mention bien.

Remerciements

J'aimerais remercier tout particulièrement ma famille qui m'a épaulée inlassablement pendant ce semestre, qui a probablement été la période la plus compliquée de ces trois années à Tours. Une pensée toute particulière pour mes ami.es présent.es à Tours et celles à l'autre bout de l'Europe qui ont su m'aider, me rassurer, me pousser, me soutenir pendant tout ce semestre sans relâche et toujours avec des pensées positives et entraînantes car on le sait « ça va aller ». Merci à ma grand-mère, canaulaise depuis toujours, qui m'a aidée à mettre en forme ce projet et qui a su m'envoyer des photos de qualités pour illustrer mes propos lorsque je n'étais pas sur place. Merci à mon autre grand-mère pour ses relectures et sa rigueur qui m'ont permis de rendre un projet fluide, clair et concis sans un nombre affolant de fautes d'orthographe (ou presque).

Merci à Mathilde Gralepois d'avoir accepté de suivre ce projet et de m'avoir aidé à trouver le sujet qui pouvait m'intéresser, non sans peine. Merci pour ses retours constructifs et son aide pour la recherche et la rédaction. Merci pour son appui dans ma recherche de stage qui a été laborieuse. Et enfin, merci de me suivre également dans mon futur stage qui assure une certaine continuité avec ce projet.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	7
I. Méthode de collecte des données	8
a) Les recherches bibliographiques.....	8
b) Accès à la documentation du projet	10
II. Pour une compensation carbone complète	11
a) Une approche traditionnelle par le génie civil.....	11
b) Les apports des solutions alternatives : les Solutions fondées sur la Nature (SFN).....	15
c) Le cas d'étude de la ville de Lacanau : projet de réaménagement du trait de côte	18
III. Les techniques et mesures pour compenser les émissions de gaz à effet de serre dans le cadre d'un projet de réaménagement du trait de côte.....	24
a) Calcul de la compensation carbone	24
b) Quelles préconisations pour réduire et stocker les émissions de carbone dans un projet de réaménagement du trait de côte ?.....	31
c) Le Label Bas Carbone : une contribution à la réduction des émissions de gaz à effet de serre qui fait sens	34
CONCLUSION	35
BIBLIOGRAPHIE.....	37
ANNEXES.....	41

Tables des figures

Figure 1 : Capture d'écran d'une recherche google scholar avec les mots clés spécifiques et récupération de l'article de borsje et al., (2011).	9
Figure 2 : mesures de protection d'ingénierie dure déployé sur le littoral Atlantique en France : (a) Communauté de Challans Gois, perré en béton raboté (Besson, 2022) ; (b) Pose d'enrochement, les Mattes, commune Barbâtre (<i>Renforcement Digue des Mattes</i> , 2019) ; (c) épis rocheux à Lacanau (Durand, 2024) ; (d) assaut des vagues sur les épis rocheux de Lacanau (Durand, 2024)	12
Figure 3 : Taux moyens à long terme de piégeage du carbone ($\text{g C m}^{-2} \text{ an}^{-1}$) dans les sols, les forêts et les sédiments des écosystèmes côtiers végétalisés. Les barres d'erreur indiquent les taux maximaux d'accumulation (McLeod et al., 2011).	16
Figure 4 : Objectif du projet ADAPTO et photos aériennes du projet de la remise en eau des terrains François à la suite de la destruction de la digue, situé dans l'estuaire de l'Orne (<i>Adapto, s. d.</i>)	17
Figure 5 : Destruction des enrochements de protection lors de la tempête de 2014 (Durand, 2014).....	19
Figure 6 : Localisation du projet de réaménagement de Lacanau (Artelia, 2023)	21
Figure 7 : Périmètre total du projet de réaménagement du front de mer de Lacanau (Artelia, 2023).....	22
Figure 8 : méthode de calcul utilisée par Artelia pour estimer les émissions du projet de Lacanau (Artelia, 2023).....	23
Figure 9 : Répartition des émissions de G.E.S (en %) en fonction des postes d'émission pour la phase Construction (ARTELIA, 2023).....	23
Figure 10 : Postes d'émissions proposés pour le réaménagement du Front de mer de Lacanau, phase chantier et phase exploitation (Artelia, 2023).	29
Figure 11 : Schéma simplifié du cycle global du carbone, montrant les principaux réservoirs de carbone (gigatonnes [Gt] C) et les flux (données du GIEC 2007) d'après McLeod et al., 2011.	32
Figure 12 : Revégétalisation des dunes lors du projet de réaménagement des espaces du front de mer de Lacanau : plantation d'Oyat (Durand, 2025).	33

Tables des tableaux

Tableau 1 : Système d'indicateurs de comptabilisation de la valeur des services écosystémiques adaptés de Guan et al., 2024 (Durand, 2025).	25
Tableau 2 : Application des concepts de l'article de Zhai et al., (2021) au projet de réaménagement de Lacanau.....	28
Tableau 3 : Résumé des étapes des méthodes et calculs pour une compensation carbone complète.....	30

INTRODUCTION

Les zones côtières françaises, avec plus de 18 000 kilomètres de littoral, subissent une pression intense à cause de l'érosion croissante, l'urbanisation et le changement climatique. Ces changements de l'environnement sont incontestablement dus aux activités humaines selon le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du climat (GIEC) (Díaz-Carrasco *et al.*, 2021). Ces activités vont émettre une grande quantité de gaz à effet de serre (GES) tels que le CO₂ qui va entraîner un réchauffement global de l'atmosphère. Ce réchauffement a pour conséquence, entre autres, l'élévation du niveau de la mer qui entraîne l'érosion des plages, augmente le risque d'inondation et le transport sédimentaire (Díaz-Carrasco *et al.*, 2021). L'érosion côtière représente la perte progressive de sédiments le long du littoral. Cette érosion entraîne le recul du trait de côte, c'est-à-dire le recul vers l'intérieur des terres de la limite « terre-mer » (Durand, 2024).

Le littoral français est très exposé aux risques marins, ce qui motive des projets de réaménagement ambitieux comme celui de Lacanau (33), destiné à protéger les populations, les écosystèmes et les infrastructures. Ce projet, lancé en 2023, constitue un cas exemplaire d'intervention pour contrer les risques côtiers, avec une phase initiale centrée sur le rechargement en sable et le confortement des ouvrages maritimes, visant à assurer la stabilité du trait de côte et la résilience des infrastructures (Durand, 2024). Le rechargement en sable fait partie de la Stratégie Locale de Gestion de la Bande Côtière (SLGBC) mis en place en 2012 afin d'aider les communes littorales à lutter contre l'érosion de manière active souple, douce et réversible. Ces stratégies sont mises en place afin de réduire durablement et efficacement la vulnérabilité des personnes, des biens, et des activités côtières (*Stratégie Régionale de Gestion de la Bande Côtière / GIP Littoral*, s. d.). Le rechargement en sable est une technique qui a pour but de déplacer le sable venant de la même cellule sédimentaire pour créer un effet tampon lors des épisodes de tempêtes ou de fortes marées. Cet apport de sable sera emporté par la marée à la place du sable constituant la dune. Le sable est ensuite redistribué naturellement grâce à la dérive littorale (dynamique sédimentaire naturelle) (De Communes des Grands Lacs, s. d.). L'ouvrage en place à Lacanau est situé à la frontière entre la dune et la plage, c'est un empilement de roche blanche sur 1200 mètres et sur deux étages. Cet ouvrage a pour but de protéger la ville et de réduire l'impact de l'océan lors des grandes marées et tempêtes.

Si ces projets de réaménagement sont indispensables pour répondre aux défis environnementaux et sociaux, ils engendrent cependant des impacts écologiques significatifs. Ceux-ci incluent des perturbations directes sur les habitats naturels et des émissions de gaz à effet de serre liées aux activités de construction. Traditionnellement, la compensation écologique des projets d'infrastructures repose sur la séquence ERC (Éviter, Réduire, Compenser). Cette séquence permet aux porteurs d'un projet de mettre en place dans l'ordre de priorité des mesures d'évitement, de réduction et en dernier recours des mesures de compensations. Cette séquence encadre la restauration ou la remise en état des fonctions

écologiques altérées mais sans intégrer systématiquement les gaz à effet de serre (GES). Ainsi, si l'on veut mettre en place des mécanismes de compensation écologique qui soient complets et pertinents il est essentiel d'intégrer directement les émissions de GES émises lors de la réalisation du projet. Bien que des efforts de réduction des émissions, tels que la végétalisation et l'adoption de mobilités douces, soient prévus dans les phases d'exploitation du projet de Lacanau, la compensation des GES dans les phases de construction et d'installation reste rare et peu normée (Durand, 2024). Cette compensation carbone est peu prise en compte et nécessite un cadre réglementaire plus complet, stricte et uniforme afin de pallier leurs effets sur les écosystèmes. C'est dans ce cadre que ce projet de recherche s'inscrit afin de donner une ébauche de méthode sur la mise en place d'une compensation écologique adaptée aux rejets de gaz à effet de serre.

On pourra ainsi se poser la question suivante : **Quelles techniques compensatoires spécifiques peuvent être mises en place pour neutraliser les émissions de gaz à effet de serre dans le contexte côtier de Lacanau, et comment peuvent-elles être intégrées aux mécanismes de compensation écologique ?**

On pourra émettre les hypothèses suivantes :

- 1. Les Solutions Fondées sur la Nature (revégétalisation, restauration des dunes...) semblent être l'approche la plus adaptée afin de lutter contre l'érosion du trait de côte et la submersion marine tout en amortissement les émissions de gaz à effet de serre émises lors de la conception d'un projet.**
- 2. Une approche exhaustive et une homogénéisation des méthodes de calculs pourraient permettre de réaliser une compensation carbone plus complète.**

Dans ce document nous verrons tout d'abord comment la compensation écologique est aujourd'hui incomplète, notamment à cause de l'approche traditionnelle par le génie civile. Mais nous analyserons ensuite comment les solutions fondées sur la nature peuvent pallier les effets de ces solutions dites « dures ». Nous nous attarderons sur le cas du projet de réaménagement de Lacanau afin d'analyser le bilan carbone et de fournir des méthodes de calculs complètes afin d'harmoniser les techniques d'analyse des impacts d'un projet. Dans le but ensuite de développer des mesures d'atténuation et de compensation des effets des émissions de gaz à effet de serre et de permettre dans un futur proche de réaliser une compensation carbone plus efficace au sein même de la séquence ERC.

I. Méthode de collecte des données

a) Les recherches bibliographiques

Pour construire ce projet en s'appuyant sur des articles scientifiques, une démarche méthodique visant à recueillir la plus grande variété d'informations en allant à l'essentiel a été mis en place. Pour satisfaire cette démarche l'utilisation du moteur de recherche Google scholar a été le principal outil (Figure 1). Ce moteur de recherche est intéressant pour ces sources pertinentes, sa richesse d'articles scientifiques et la facilité avec laquelle on peut filtrer

et étayer les recherches. Une sélection de mots-clés a été saisi dans la barre de recherche visant à avoir une partie concernant l'environnement côtier et une deuxième partie sur la compensation écologique / les émissions de GES :

- « Ecological restoration in coastal area »
- « coastal protection »
- « ecological compensation and carbon emission»
- « Civil engineering and coastal protection»
- « carbon compensation »
- « coastal protection and ecology »
- « Nature-based solution in coastal environment »
- « Coastal protection system and carbon footprint »
- « Solutions fondées sur la nature et adaptation des écosystèmes côtiers »
- «Calculation for ecological compensation in coastal habitats»
- «How to define ecological compensation for coastal protection system»

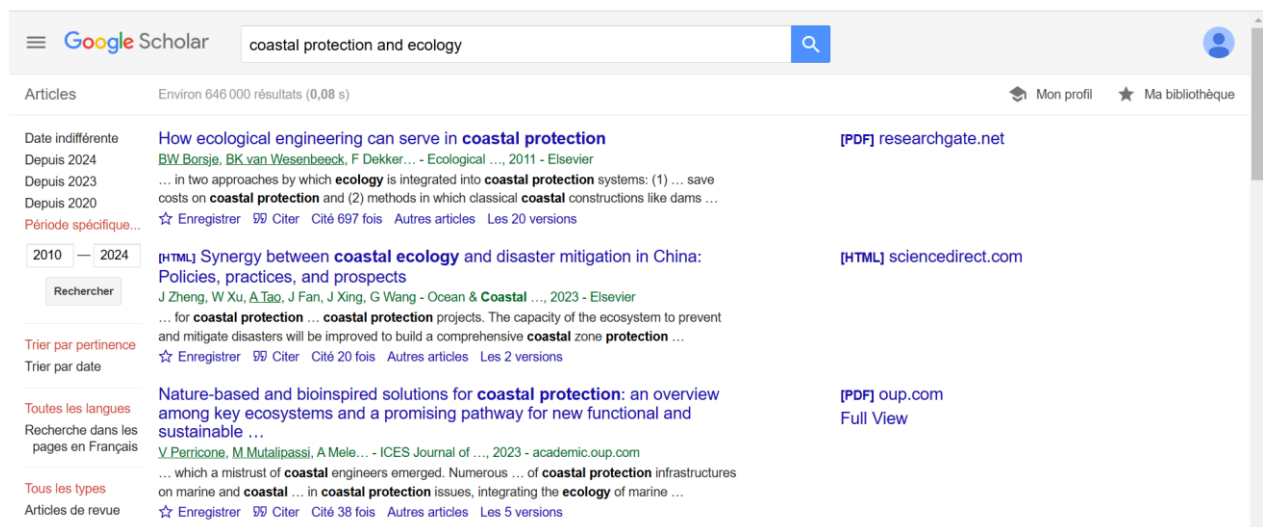


Figure 1 : Capture d'écran d'une recherche google scholar avec les mots clés spécifiques et récupération de l'article de borsje et al., (2011).

Ces mots-clés ont été choisis en lien avec les thématiques centrales du projet, comme les solutions fondées sur la nature, la compensation carbone et la protection côtière. Les articles sélectionnés devaient contenir au moins deux de ces mots-clés, afin de garantir leur pertinence. Mais il n'était jamais exclu de consulter un article même si celui-ci ne comportait qu'un seul mot clé. Pour chaque recherche, les articles datant d'au moins 2010 étaient privilégiés, en mettant l'accent sur les publications les plus récentes pour bénéficier des

avancées scientifiques les plus actuelles. Les titres, les résumés (abstract), l'introduction et les problématiques étaient relus minutieusement afin de mettre en lumière les mots-clés en lien avec le sujet.

Une fois un article sélectionné, et enregistré, la fonction "**Control + F**", raccourci clavier pour rechercher un mot ou groupe de mots spécifiques était utilisée. Ainsi il a été possible d'isoler les paragraphes contenant les termes clés. Cette méthode a permis de gagner du temps en allant immédiatement aux sections pertinentes. Pour enrichir les recherches il a été essentiel de s'appuyer sur les bibliographies des articles lus. Cela a permis de découvrir d'autres publications scientifiques souvent citées, contenant des concepts ou études de cas pertinents pour le projet. Un réseau de sources scientifiques interconnectées a pu être constitué, consolidant la validité de la documentation. Les informations pertinentes des articles sélectionnés ont été résumés dans un document Word dédié. Chaque article était analysé pour en extraire les concepts essentiels, comme les caractéristiques des solutions fondées sur la nature, les dynamiques des environnements côtiers, ou encore les indicateurs de compensation carbone. Cette synthèse structurée a ensuite servi de base à la rédaction de ce présent document, garantissant une cohérence scientifique et un ancrage solide dans la littérature existante.

Chaque fois qu'un article a été utilisé pour rédiger les différentes parties de ce document, les références au format APA étaient directement notées dans la section bibliographie et citées directement dans le texte rédigé pour n'oublier aucune référence et conserver une certaine rigueur.

b) Accès à la documentation du projet

Dans un deuxième temps, j'ai pu me déplacer sur le terrain afin de collecter des photos et voir l'avancement du projet. J'ai récupéré le numéro de téléphone d'une personne en charge du projet à Lacanau (33) grâce à une ancienne élue de la mairie. J'ai ensuite pu échanger par email avec Eléonore Geneau, responsable littoral et développement durable à la mairie de Lacanau. Elle est chargée de la gestion du projet de réaménagement côtier et fait partie du groupe de travail sur la relocalisation. Suite à plusieurs échanges par email j'ai pu recueillir des documents officiels concernant le projet d'aménagement de Lacanau mais non publiés et soumis au grand public. J'ai pu ainsi prendre connaissance du document sur le bilan carbone estimé du projet réalisé par le bureau d'étude Artelia (2023). J'ai également eu un fichier d'études d'impact du projet illustrant en détails les études menées, le cadre réglementaire, les effets sur l'environnement et les mesures associées. Ces documents réalisés par le bureau d'études Artelia seront cités en bibliographie et insérés au corps du texte.

Grâce à ses recherches transversales j'ai pu recueillir une grande quantité de document très pertinents pour mon projet de recherche. J'ai ainsi pu mettre en lumière plusieurs

concepts pour les expliquer et les intégrer aux mesures de compensation carbone possibles pour un projet de réaménagement du trait de côte.

II. Pour une compensation carbone complète

Il devient indispensable aujourd'hui de repenser notre façon de concevoir les aménagements de demain surtout en contexte côtier. Le génie civil a longtemps été considéré comme seule solution de protection efficace face aux risques marins. On sait aujourd'hui qu'une approche plus globale, durable, écologique et douce prévient davantage ces risques et engendre des bénéfices qui vont au-delà de la simple protection. On peut réussir à implémenter des solutions plus durables et respectueuses de l'environnement afin de réussir à protéger les biens, les services et les personnes vivant sur le littoral.

L'article de Yang & Liu (2023) enrichit cette approche en introduisant la notion d'empreinte écologique, qui évalue quantitativement l'impact des activités humaines sur les écosystèmes naturels en termes de demande sur les ressources biologiques. En contexte côtier, cette méthode permettrait d'évaluer la charge écologique locale, ou capacité de charge des écosystèmes côtiers à absorber les impacts sans compromettre leur durabilité (Yang & Liu, 2023). Et dans le cas présent de ce projet de recherche cette méthode pourrait évaluer la capacité d'un écosystème côtier, en fonction de son état, à absorber les GES.

Pour répondre aux exigences d'un réaménagement durable, la compensation pourrait ainsi être évaluée non seulement en fonction de la biodiversité, mais également en tenant compte des émissions de GES et de leur effet cumulé sur l'empreinte écologique du territoire. En appliquant cette logique, les projets côtiers pourraient adopter une perspective intégrée où la séquestration de carbone par des solutions fondées sur la nature compense les émissions et renforce la résilience écologique globale du site. Les co-bénéfices apportés par les solutions douces (à l'opposé de solutions dures : génie civil) pourraient grandement impacter les projets d'aménagement de demain en assurant protection et résilience écologique. Dans cet optique l'exemple du réaménagement du trait de côte de la ville de Lacanau (département de la Gironde, 33) sera exploité afin d'illustrer le bien-fondé d'une prise en compte plus stricte et sérieuse des émissions de GES dans les mécanismes de compensation écologique.

a) Une approche traditionnelle par le génie civil

Dans la majorité des projets de réaménagement côtier pour lutter contre l'érosion marine, le génie civil est la solution privilégiée. Le génie civil ou ingénierie dure se définit comme la manière traditionnelle de traiter les menaces d'origine océanographique (Messier, 2022). Le littoral français est friand de ces techniques et cela se traduit par un grand nombre de projet sur toute la côte atlantique : Ile de Ré, Ile de Noirmoutier, Lacanau... (*Renforcement Digue des Mattes*, 2019 ; Besson, 2022 ; Rakotoarivelo & Zie, 2024). On estime que 70% du

littoral européen est protégé par des ouvrages de protection tels que les enrochements, les digues, les épis, les brises-lames ou encore les portes à flots (BRGM, 2024) (Figure 2).

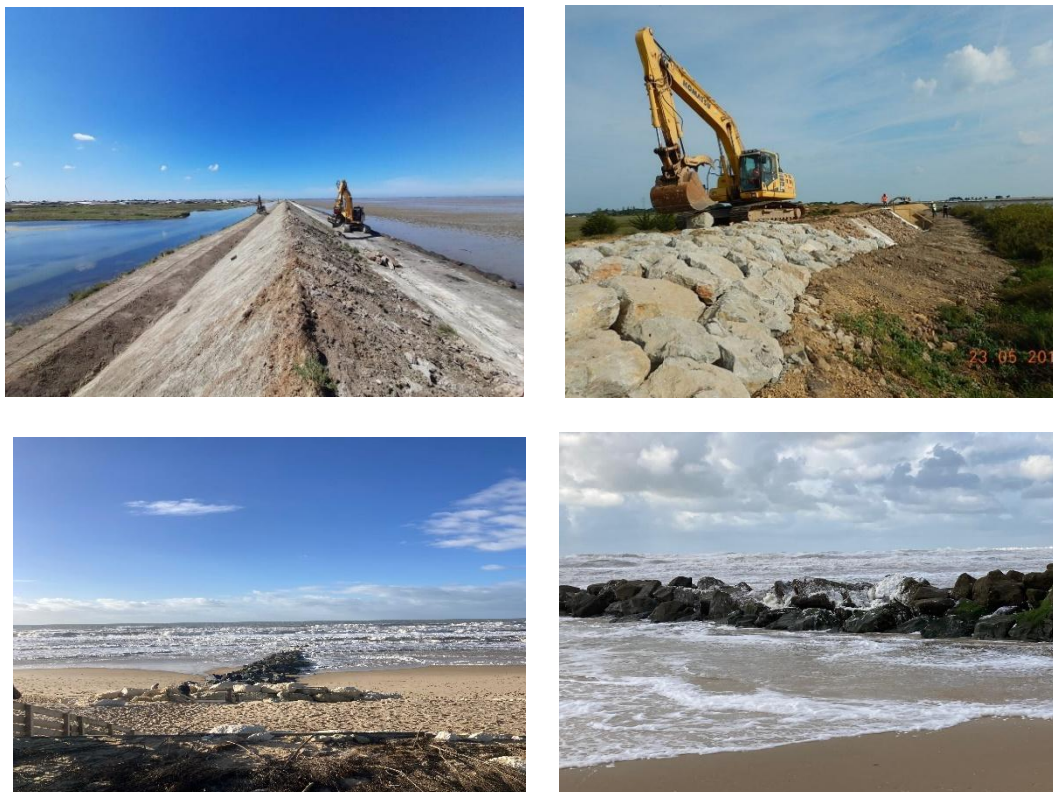


Figure 2 : mesures de protection d'ingénierie dure déployé sur le littoral Atlantique en France :
(a) Communauté de Challans Gois, perré en béton raboté (Besson, 2022) ; (b) Pose d'enrochement, les Mattes, commune Barbâtre (*Renforcement Digue des Mattes*, 2019) ; (c) épis rocheux à Lacanau (Durand, 2024) ; (d) assaut des vagues sur les épis rocheux de Lacanau (Durand, 2024)

Cette ingénierie se caractérise par des infrastructures anthropiques de grande envergure telles que les digues, l'enrochement, les épis (Messier, 2022). Elles sont statiques, dimensionnées au-delà des estimations temporelles et financières. Elles coûtent extrêmement cher à réaliser ou à consolider dans le cas où elles sont déjà présentes (Messier, 2022 ; Besson, 2022 ; Rakotoarivelo & Zie, 2024).

Mais depuis des dizaines d'années ces infrastructures sont choisies en premier lieu pour leur efficacité instantanée. Ces constructions dures sont généralement mises en place rapidement car leur structure est peu complexe et leur efficacité face aux assauts de la mer est immédiate. De plus dans le contexte d'une ville côtière fortement urbanisée le manque d'espace rend la réalisation des solutions fondées sur la Nature quasi impossible. Le gros avantage de ces solutions dures est qu'elles offrent une protection fiable et instantanée à moyen terme sur les biens, les services et les personnes vivant dans les zones côtières (Firth *et al.*, 2014). De plus, dans certains cas l'utilisation du génie civil permet de maintenir une

certaine stabilité économique en protégeant les infrastructures liées au tourisme et les activités liées à l'exploitation des ressources naturelles (agriculture, aquaculture, forages, etc...). Ces solutions sont visibles et rassurent les communautés locales. A l'inverse les Solutions fondées sur la Nature (SFN) bien que plus efficace sur le long terme prennent effet plusieurs années après leur implantation (Arnall, 2023).

Messier (2022) annonce dans son essai que ces techniques d'ingénierie vont à l'encontre de la nature, rejette les incertitudes et la flexibilité. Elles sont là pour contrer la nature et éliminer rapidement le danger dans un but de protection des infrastructures humaines (Messier, 2022).

Les solutions dures en plus d'être dispendieuses, nécessitent l'acheminement de matière premières très émettrices de carbone et ne peuvent s'adapter aux changements graduels dans un contexte côtier sans cesse en mouvement (Messier, 2022 ; Borsje *et al.*, 2011 ; Labrujere & Verhagen, 2012). Elles sont érigées rapidement et engendrent un changement global et drastique de l'environnement, leur emprise au sol peut cumuler plusieurs centaines de kilomètres et forment une barrière imperméable, impénétrable séparant complètement l'environnement marin du terrestre. Les interactions entre ces écosystèmes sont donc impossibles. Elles agissent comme une séparation entre l'interface terre-eau impactant l'érosion sédimentaire naturelle qui permet l'apport de nutriments pour les communautés côtières et modifie le type et la taille des sédiments acheminés (Messier, 2022 ; Borsje *et al.*, 2011). Elles altèrent dans leur globalité les écosystèmes côtiers, empêchent leur résilience et dégrade les « services écosystémiques »¹ que prodigue l'océan (en termes d'économie, de tourisme, de ressources, d'énergie...) (Bongarts Lebbe *et al.*, 2021). Ces protections dures ont pour but de stabiliser les lignes côtières et jouent un rôle crucial surtout au niveau des zones densément peuplées là où les Solutions fondées sur la Nature (SFN) peuvent être difficilement implémentées.

Comme mentionné plus haut la mise en place de ces infrastructures engendre l'émission de gaz à effet de serre accentuant ainsi le réchauffement climatique. Dans le document du bilan de GES du projet de Lacanau une estimation totale des émissions de carbone a été effectuée (Figure 9). La fabrication du béton est le pôle le plus émetteur de GES. Le ciment est responsable à 98% des émissions liées à la fabrication du béton. C'est 27,8% du montant total des GES du projet (Artelia, 2023). Sur la Figure 2 on peut voir différents types d'infrastructures dures et pour une partie de celles-ci le béton est le matériau le plus utilisé.

L'impact carbone de la production du ciment s'explique par deux phénomènes principaux :

¹ Les services écosystémiques regroupent les fonctions d'un écosystème et leurs contributions au bon fonctionnement de notre société et à notre bien-être.

- La cuisson du clinker² à 1450°C via des combustibles fossiles ou de substitution : responsable d'environ 40 % des émissions de GES ;
- La décarbonatation du calcaire lors de la cuisson : responsable d'environ 60% des émissions de GES (Artelia, 2023).

D'autres matériaux sont utilisés pour renforcer ou construire ces infrastructures tels que les granulats et les sables. Cependant l'indicateur carbone n'est pas le plus adéquat pour quantifier leur impact sur l'environnement. Il serait nécessaire de raisonner en termes d'épuisement des ressources non renouvelables (Artelia, 2023). Effectivement, on parle de bilan carbone de la production de béton mais cette fabrication utilise aussi des ressources non renouvelables qui s'épuisent rapidement alors que la demande en béton reste toujours élevée dans le secteur industriel français. Malgré les préconisations pour désartificialiser les sols face aux enjeux climatiques le béton reste très utilisé dans les secteurs de la construction et de l'aménagement (Mathilde, 2022 ; ADEME s.d.).

Il est intéressant de noter que Artelia ajoute le fret dans son calcul du bilan des émissions de la phase construction du projet (Figure 9). Ainsi Artelia annonce en conclusion que « les émissions liées aux transports de ces matériaux sont d'environ 300 tCO₂eq – 16 % du montant total des émissions des GES identifiées sur la phase construction ». Artelia préconise dans son document qu'une division par deux de la distance d'approvisionnement amène à une réduction de moitié des émissions de ce poste. Malgré la complexité et l'exhaustivité du document rédigé par Artelia et l'apport de données externes sur la fabrication du béton, on remarquera que le bilan carbone de l'extraction des ressources nécessaires pour la création de ce matériau n'est pas ajouté.

Le bilan énergétique pour l'extraction des ressources nécessaires à la production des matériaux de construction d'un projet n'est pas à négliger. On retrouve là tout l'enjeu du calcul des émissions de GES. On devrait aujourd'hui pouvoir estimer un bilan carbone global lié à toutes les activités nécessaires pour la fabrication de l'objet (au sens large) ainsi que son cycle de vie (Labrujere & Verhagen, 2012 ; Díaz-Carrasco *et al.*, 2021). Ce bilan de GES bien que complet a ses limites et c'est ce qui est mis en avant dans ce document. Comme mentionné plus haut la raréfaction des ressources, le transport, la production sont des points névralgiques et indispensables afin de dresser un bilan de GES exhaustif. Certes ce type de bilan est très difficile à mettre en place afin d'arriver à une valeur complète mais il est indispensable afin de pouvoir agir et mettre en place des actions concrètes de réduction des émissions. Une uniformisation des techniques de calcul devrait être privilégiée afin d'établir des démarches robustes et complètes de mises en place de mesures compensatoires de GES.

Certes le génie civil est souvent la solution privilégiée et surtout celle utilisée depuis plusieurs dizaines voire centaines d'années mais elle ne présente pas le monopole des

² Le clinker est un constituant du ciment, qui résulte de la cuisson d'un mélange composé d'environ 80 % de calcaire (qui apporte le calcium) et de 20 % d'aluminosilicates (notamment des argiles qui apportent le silicium, l'aluminium et le fer) (Artelia, 2023).

solutions possibles afin de protéger les sociétés face aux assauts de l'océan. Elles portent leur lot de problématiques environnementales auxquelles les solutions fondées sur la nature (SFN) apportent des réponses plus douces et résilientes.

b) Les apports des solutions alternatives : les Solutions fondées sur la Nature (SFN)

Les zones côtières, particulièrement vulnérables aux effets du changement climatique, nécessitent des approches innovantes pour compenser les émissions GES générées par les projets d'aménagement. Il est crucial d'explorer des mesures compensatoires adaptées à l'environnement côtier, qui, non seulement neutralisent les émissions de GES, mais renforcent également la résilience écologique du littoral. Les SFN émergent comme des options prometteuses pour la compensation des GES dans les zones côtières (Markov, 2023). Le concept de solutions fondées sur la Nature émerge en 2009 et est défini par l'UICN (Union Internationale pour la Conservation de la Nature) comme : *"les actions visant à protéger, gérer de manière durable et restaurer des écosystèmes naturels ou modifiés pour relever directement les défis de société de manière efficace et adaptative, tout en assurant le bien-être humain et en produisant des bénéfices pour la biodiversité"* (Admin, 2024). Mais c'est seulement à l'issue de la COP21 en 2016 que les SFN ont réellement été reconnues d'utilité internationale dans la lutte contre le réchauffement climatique.

Seddon *et al.*, (2020) soulignent le potentiel considérable des habitats côtiers pour l'atténuation et l'adaptation au changement climatique. Ces écosystèmes, tels que les zones humides, les herbiers marins, les dunes, les forêts offrent une double fonction : ils séquestrent efficacement le carbone tout en fournissant une protection naturelle contre les aléas climatiques. On parle de co-bénéfices. Dans la thèse de Markov (2023) l'utilisation des écosystèmes naturels comme solution face aux risques maritimes combinent protection contre les risques naturels et restauration écologique. La mise en œuvre de ces solutions nécessite l'identification et l'analyse du contexte local afin de fournir des solutions adaptées. Markov (2023) nous dit qu'en général des solutions uniquement basées sur la végétalisation ne peuvent fonctionner dans un environnement côtier très énergétique. L'énergie d'un environnement côtier correspond à l'intensité des processus physiques (vagues, courants, marées) qui influencent la dynamique et la morphologie de ces zones. Cette approche est indispensable pour comprendre les mécanismes d'érosion, de sédimentation afin d'engager des choix de gestion côtière adaptés (Markov, 2023).

Borsje *et al.*, (2011) mettent en lumière la notion de l'intégration des solutions fondées sur la Nature avec les méthodes traditionnelles. C'est-à-dire coupler des solutions dures telles que les digues ou les enrochements en favorisant le développement d'espèces biologiques locales côtières. On parle ici, d'espèces d'ingénierie écologique comme les moules, les huîtres, les plantes côtières (telles que l'Oyat des sables (*ammophila arenaria*)) ou encore les dunes de sables stabilisées. Dans le cas de cet article, au lieu de détruire des infrastructures déjà

présentes ce qui engendrerait des perturbations encore plus grandes on décide de s'appuyer sur ces constructions et d'ajouter la dimension biologique/écologique des SFN pour renforcer leur rôle (Borsje *et al.*, 2011). Cette idée pourrait également servir de transition et de modèle afin de rendre les SFN plus populaires auprès du grand public.

Les environnements côtiers sont soumis à de nombreux processus complexes qui varient à la fois sur des échelles temporelles : cycles des marées (par heure), grandes tempêtes (plusieurs années), et, à la fois sur des échelles spatiales : dynamiques locales des sédiments (stabilisation par les plantes), et des dynamiques régionales sur le transport long terme des sédiments le long des côtes (Borsje *et al.*, 2011). Ces zones ont la capacité de s'autoréguler, c'est-à-dire que les différentes espèces à la fois de plantes et d'animaux vont permettre de stabiliser les sédiments et de renforcer la structure des écosystèmes. L'idée des SFN est donc de s'appuyer sur ces capacités naturelles pour limiter les interventions humaines et rééquilibrer ces milieux (Borsje *et al.*, 2011).

Selon OCDE (2024), les SFN coûtent 2 à 5 fois moins cher que les infrastructures rigides sur le long terme. Les solutions dures comme vu précédemment sont très onéreuses et ne sont pas durables, elles nécessitent un entretien coûteux. Les SFN tels que la restauration des marais salants peut réduire de 30% à 70% l'énergie des vagues avant qu'elles n'atteignent le littoral. Les marais salants pourraient séquestrer jusqu'à 3,7 tonnes de CO₂ par hectare et par an (OCDE, 2024). La Figure 3 issue de l'article de McLeod *et al.*, 2011, montre les capacités de séquestration du carbone sur le long terme par plusieurs types d'écosystèmes (McLeod *et al.*, 2011).

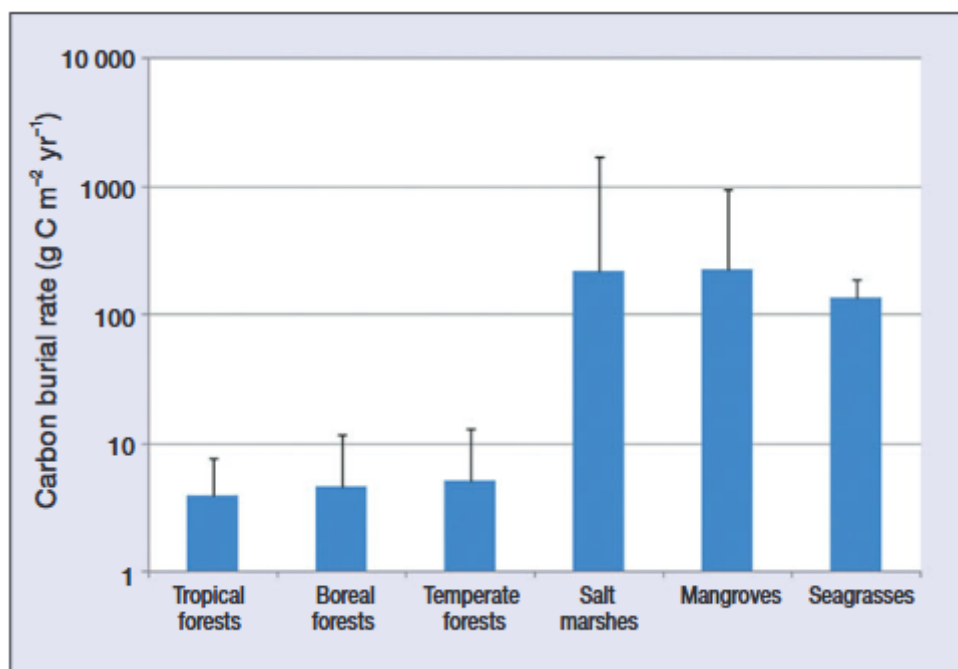


Figure 3 : Taux moyens à long terme de piégeage du carbone ($\text{g C m}^{-2} \text{ an}^{-1}$) dans les sols, les forêts et les sédiments des écosystèmes côtiers végétalisés. Les barres d'erreur indiquent les taux maximaux d'accumulation (McLeod *et al.*, 2011).

Bien que les SFN soient les solutions à privilégier aujourd'hui pour assurer la protection et la résilience des communautés du littoral toutes les interventions infrastructurelles ont un impact. Même les interventions ayant pour but de répondre aux enjeux climatiques et de protection de la biodiversité vont engendrer l'utilisation de véhicules thermiques, l'importation de ressources, la destruction d'habitats, le dérangement des espèces présentes, la modification des paysages.

Pour appuyer les bénéfices des Solutions fondée sur la Nature le projet ADAPTO voit le jour en 2017 (Figure 4). Ce projet initié par le Conservatoire du littoral et financé par le programme européen LIFE vise à explorer et expérimenter des solutions de gestion souple du trait de côte face aux effets du changement climatique. Ce projet a été réparti sur 11 sites pilotes du littoral français entre 2017 et 2022. ADAPTO met en avant les solutions fondées sur la Nature et des approches innovantes pour renforcer la résilience des territoires littoraux tout en préservant leurs écosystèmes. Dans ce projet, il a été mis en évidence la réticence des habitant.es de la bande littorale face aux solutions souples. La plupart du temps les usager.ères ont évoqué une certaine appréhension ou peur vis-à-vis de ces solutions ne voyant pas comment elles pourraient réduire les assauts de l'océan. Des interventions pédagogiques ont été mises en place pendant la durée du projet permettant d'informer les personnes sur le fonctionnement et les plus-values des SFN. Aujourd'hui après la réalisation des différents projets de restauration et de renaturation, 91% pour des habitant.es sont satisfait.es (*Adapto*, s. d.).

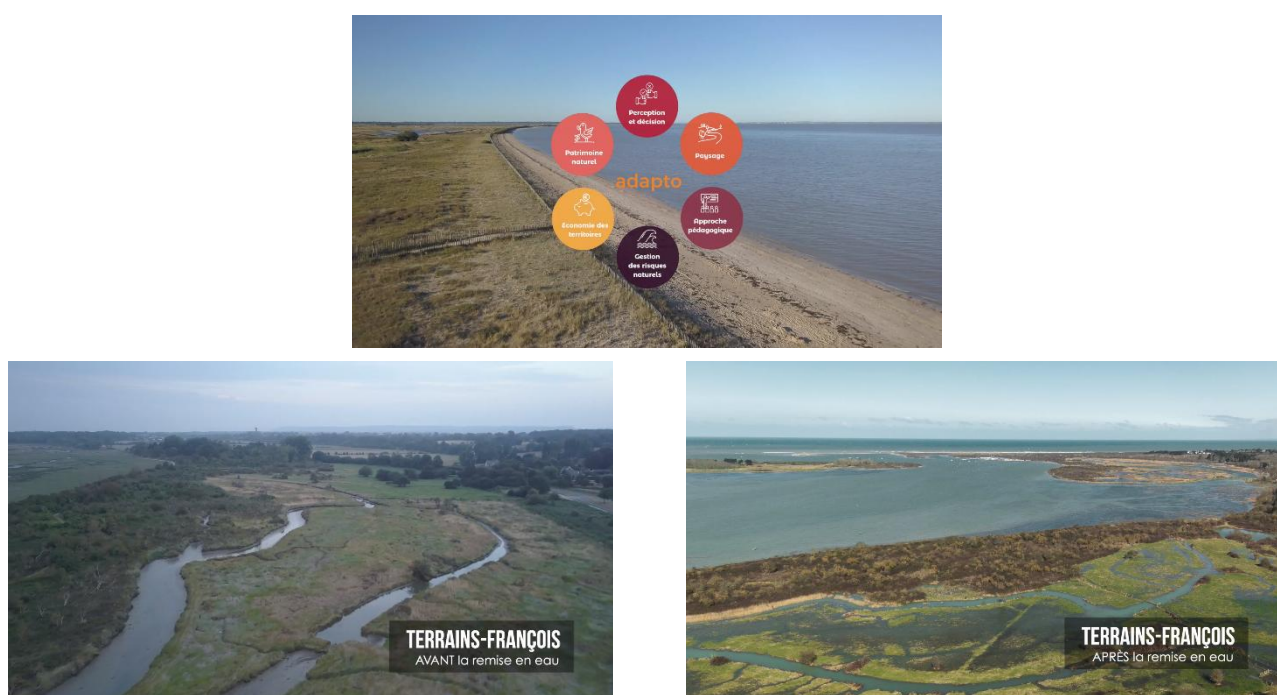


Figure 4 : Objectif du projet ADAPTO et photos aériennes du projet de la remise en eau des terrains François à la suite de la destruction de la digue, situé dans l'estuaire de l'Orne (*Adapto*, s. d.).

Les SFN semblent être des solutions à tout point de vue pertinentes pour améliorer la résilience des écosystèmes côtiers et protéger efficacement les villes côtières face aux risques maritimes elles sont encore difficilement intégrées dans les politiques locales (Pelet & Rieu, 2023). Selon Pelet & Rieu (2023) cela peut s'expliquer entre autres par la faible acceptabilité sociale et politique de ces solutions en comparaison aux solutions dures face aux menaces directes des tempêtes. On peut aussi souligner une mauvaise gestion des « après » tempêtes (Xynthia en 2010 par exemple) par les politiques publiques engendrant des sentiments de peur et d'incompréhension de la part des résident.es des zones détruites par la mer. On souligne un manque de confiance dans la mise en place de ces solutions douces notamment par le manque de preuves empiriques et de reproductibilité sur les territoires. En effet dans la thèse de Markov (2023) souligne la singularité des environnements côtiers et donc la nécessité d'adapter les solutions fondées sur la nature à chaque situation. Ce manque d'uniformisation des techniques qui est quasiment impossible ainsi que l'absence de directives claires sur le sujet rend leur implantation difficile (Pelet & Rieu, 2023 ; Markov, 2023).

Ces solutions représentent tout de même un espoir pour les sociétés de vivre en harmonie avec l'océan et ses aléas plutôt que d'aller « contre » lui. En effet, après plusieurs tempêtes qui ont balayé le littoral français engendrant des dégâts conséquents on sait qu'on ne pourra pas lutter par la force. C'est ce que mettent en avant les SFN qui prônent la résilience et surtout l'adaptabilité en conséquence du changement climatique très rapide. C'est ce que vend la ville de Lacanau dans sa démarche de « ville océane 2050 » afin d'assurer la protection des personnes, des biens et des services tout en promettant la préservation des espaces naturels emblématiques et essentiels du littoral (*Ville Océane 2050 - Lacanau*, 2025).

c) Le cas d'étude de la ville de Lacanau : projet de réaménagement du trait de côte

Le projet de réaménagement du front de mer de Lacanau, situé sur la côte atlantique française, illustre un défi majeur pour les communes littorales confrontées aux impacts croissants du changement climatique (Figure 6 & Figure 7). Cette station balnéaire, fortement exposée à l'érosion côtière et à la montée des eaux, est engagée dans une stratégie ambitieuse visant à protéger ses habitant.es, infrastructures et activités touristiques.

Dans le cadre du plan d'investissement France Relance lié à la crise COVID-19, la ville de Lacanau a répondu à un appel à projet de l'Etat afin de mobiliser l'outil « projet partenarial d'aménagement – trait de côte » (PPA). Il traduit les objectifs de la loi climat et résilience de 2021 sur l'adaptation en continu des territoires face au changement climatique. L'objectif pour Lacanau est triple :

- Accélérer le réaménagement du front de mer pour faire de Lacanau une ville océane qui accueille résident.es et activités toute l'année

- Expérimenter la relocalisation de biens et activités afin de les protéger
- Réunir les éléments et les conditions pour la prise de décision sur le scénario érosion du trait de côte à l'horizon 2100.

En réponse aux tempêtes répétées (Figure 5) et au recul alarmant du trait de côte (jusqu'à 20 mètres lors des hivers 2013-2014), le projet, lancé en 2023, est réalisé en deux étapes, regroupant d'abord les objectifs à court terme (horizon 2050) puis les objectifs à long terme (horizon 2100). Le projet est actuellement dans la première phase. Les travaux ont commencé à la fin de l'année 2023 pour réaliser un rechargement en sable et un rehaussement de toutes les plages du nord au sud. Un remaniement des allées Pierre Ortal (allée principale commerçante et piétonne) (annexe 4), la suppression des parkings en front de mer et la mise en place d'un front de mer « tout piéton » est également influé par le projet (annexe 5). Le but est de rendre cet espace plus résilient et agréable, ayant pour objectif principal la désimperméabilisation des sols et la stabilisation des dunes par la revégétalisation (France Relance *et al.*, 2021) (annexe 3 & annexe 4). L'objectif de cette première phase du projet est de continuer à protéger la ville de Lacanau face aux assauts de l'océan en attendant de prendre la décision pour une éventuelle relocalisation des biens et services.



Figure 5 : Destruction des enrochements de protection lors de la tempête de 2014 (Durand, 2014)

Le projet de Lacanau est particulièrement pertinent pour une réflexion sur la prise en compte des émissions GES dans les projets d'aménagement. Bien que des mesures

écologiques, telles que la végétalisation et la réduction des voitures, soient prévues pour atténuer les émissions à long terme, l'analyse révèle un manque de mesures compensatoires spécifiques pour les GES générés lors de la phase de construction, notamment en lien avec l'utilisation de matériaux comme le béton (Artelia, 2023). L'exemple de Lacanau met en lumière la nécessité d'intégrer des solutions fondées sur la nature (SFN), telles que la séquestration dans les dunes et les sédiments côtiers, ainsi que des approches hybrides pour concilier résilience climatique, réduction des émissions et préservation de la biodiversité. Ce cas d'étude incarne un défi universel pour les territoires côtiers et offre un cadre idéal pour interroger et améliorer les pratiques actuelles en matière de compensation écologique spécifique aux émissions de carbone dans les projets d'aménagement littoral.



Figure 6 : Localisation du projet de réaménagement de Lacanau (Artelia, 2023)



Figure 7 : Périmètre total du projet de réaménagement du front de mer de Lacanau (Artelia, 2023)

Une note de synthèse complète du bilan carbone global du projet de réaménagement de Lacanau a été réalisé par le groupe Artelia.

Ce document recense tous les pôles émetteurs de gaz à effet de serre de la phase chantier et opérationnelle du projet. Cependant il ne s'agit pas des émissions exactes mais d'une approximation afin de donner un ordre de grandeur sur l'impact carbone du projet. L'intérêt ici est de voir quel pôle d'émission est le plus important, et comment le projet compte réduire cet impact carbone. Ce document fait appel à plusieurs méthodes de calcul mais s'appuie principalement sur la méthode Bilan Carbone développée par l'ADEME (Artelia, 2023). Elle a pour vocation de donner des ordres de grandeurs. En effet, pour des questions de coût il est quasiment impossible de calculer les émissions carbone directement sur site. Lors des calculs réalisés par Artelia les émissions liées aux déplacements domiciles – chantier des employé.es ainsi que la signalisation et les panneaux ne sont pas pris en compte (leur impact est trop peu important par rapport à la globalité du projet). Comme vu en partie II.a) les intrants comptent pour plus de la moitié des GES du projet.

« La méthode de diagnostic utilisée consiste à analyser l'ensemble des flux physiques (flux de personnes, d'objets, d'énergies, de matières premières, etc.) qui concerne le projet, et de leur

faire correspondre un facteur d'émissions correspondant, qui va représenter les émissions de CO₂eq par unité de flux. » (Artelia, 2023). Le calcul (Figure 8) des émissions GES du projet consiste donc à associer à chaque activité le facteur d'émissions correspondant.

<i>émissions de GES = données d'activité * facteur d'émission</i>		
En tCO ₂ eq	En tonne par exemple	En tCO ₂ eq/ quantité

Figure 8 : méthode de calcul utilisée par Artelia pour estimer les émissions du projet de Lacanau (Artelia, 2023)

L'emprise du projet sur la ville de Lacanau océan atteint environ 59 450 m² (Figure 7). Le projet aura émis 1 917 teqCO₂ (Figure 9) et avec les préconisations de réduction des GES le projet pourra amortir 22,5teqCO₂/an au cours de trois prochaines décennies selon Artelia, (2023). En d'autres mots le bilan carbone du projet sera amorti dans 30 ans selon les estimations sans compter les potentiels retards, problèmes d'approvisionnement et autres.

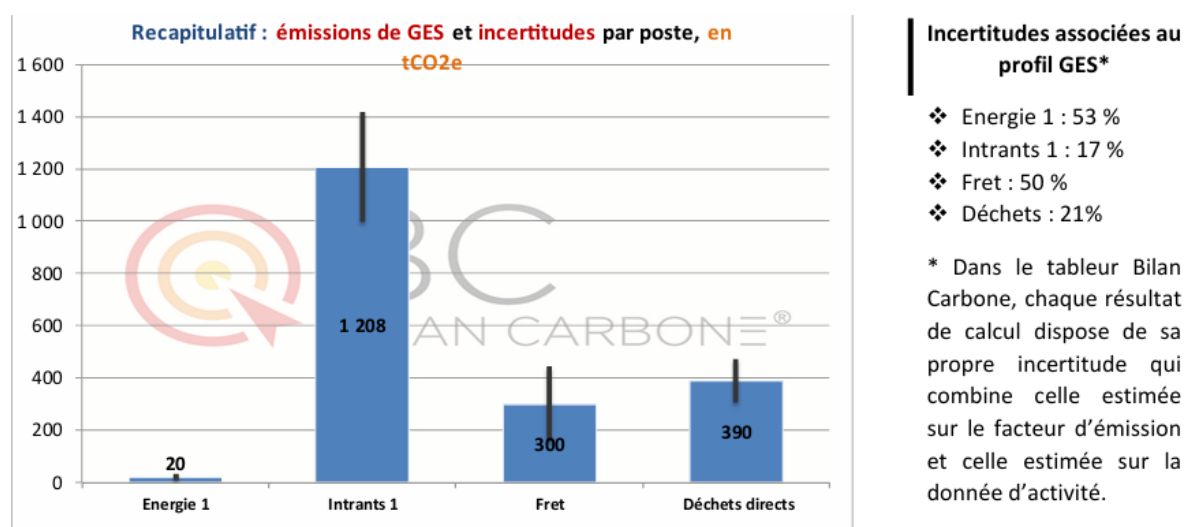


Figure 9 : Répartition des émissions de G.E.S (en %) en fonction des postes d'émission pour la phase Construction (ARTELIA, 2023)

Le projet de Lacanau représente une opportunité unique de reconsidérer la façon dont la compensation écologique est intégrée aux projets d'infrastructures côtières en incluant la gestion des émissions de GES. En structurant une approche de compensation élargie dans la séquence ERC, il devient envisageable d'atteindre une neutralité carbone tout en garantissant la résilience des écosystèmes et la protection des ressources côtières à long terme

L'objectif ici est de trouver des solutions concrètes et techniques applicables à chaque étape de la séquence ERC afin d'arriver à un bilan carbone acceptable pour un projet de réaménagement avant 2050. En sachant que le projet a déjà été réalisé nous émettrons seulement des hypothèses sur ce qu'il adviendrait de faire pour un futur projet similaire.

Nous examinerons ici les méthodes de mise en œuvre, les calculs, et les indicateurs de suivi nécessaires pour assurer la mise en place à long terme de ces solutions de compensation des GES. Nous explorerons en détail ces différentes mesures d'évitements, de réductions et de compensations, en évaluant leur potentiel d'application dans le contexte spécifique de Lacanau.

III. Les techniques et mesures pour compenser les émissions de gaz à effet de serre dans le cadre d'un projet de réaménagement du trait de côte

a) Calcul de la compensation carbone

Yang et Liu (2023) proposent d'utiliser l'analyse de l'empreinte écologique pour évaluer de manière quantitative les besoins de compensation écologique. Cette approche est particulièrement pertinente dans les zones côtières, où la dégradation environnementale affecte la capacité de charge écologique locale. La compensation est calculée en évaluant la valeur des services écosystémiques, et l'efficacité de l'empreinte écologique, permettant ainsi d'estimer la compensation nécessaire pour compenser les impacts écologiques liés aux émissions de carbone.

L'objectif principal est de déterminer la quantité de compensation nécessaire pour restaurer l'équilibre écologique perturbé par les activités humaines dans les zones côtières (Yang & Liu, 2023). Du *et al.*, 2023 réalisent une étude portant sur le calcul des mesures compensatoires basée sur les flux des services écosystémiques. Zhao *et al.*, 2005 ainsi que Zhai *et al.*, 2021 et Guan *et al.*, 2024 feront partie des références utilisées afin de déterminer le moyen le plus pertinent pour calculer les mesures compensatoires nécessaires pour pallier les émissions de GES liés à un projet. C'est sur l'appui de ces différentes références scientifiques que le modèle suivant de calcul a pu être construit :

1. **Calcul de la valeur des services écosystémiques** avec la méthode « emergy » (Yang & Liu, 2023 ; Guan *et al.*, 2024). L'analyse émergie est une méthode permettant d'évaluer l'énergie totale (humaine et naturelle) utilisée pour produire des biens ou des services. Elle repose sur des principes écologiques et systémiques et offre une mesure unifiée pour comparer les impacts environnementaux et les ressources nécessaires. L'émergie solaire, exprimée en emjoules solaires (sej), est l'unité centrale, représentant l'énergie solaire nécessaire pour générer un flux ou un stockage (Zhao *et al.*, 2005). La valeur des services écosystémiques est égale à la

somme des valeurs des différents indicateurs individuels regroupés dans le Tableau 1 (Guan *et al.*, 2024). Dans le cas de l'évaluation de la compensation carbone on pourra appliquer cette formule pour estimer les capacités du milieu à stocker du carbone suivant ses composantes écologiques (Eq. 1).

Tableau 1 : Système d'indicateurs de comptabilisation de la valeur des services écosystémiques adaptés de Guan *et al.*, 2024 (Durand, 2025).

Indicateur primaire	Indicateur secondaire	Contenu comptable
Services d'approvisionnement	Pêche	Approvisionnement en matière première
	Matériaux de construction	
Services de régulation	Stockage et séquestration carbone	Quantité de carbone stockée
	Cycle de l'eau, traitement des eaux usées	Quantité d'eau traitée
	Prévention de l'érosion	Quantité de sol retenu
Services culturels	Activité de plaisir	Revenus liés au tourisme

Formules de calcul de la valeur des services écosystémiques rendus et du ratio énergie-monnaie de la région étudiée :

$$ESV = V_{CP} + V_{AQ} + V_{WC} + V_{CS} + V_{SR} + V_{NRD} + V_{RC}$$

(Eq.1)

$$EMR = \frac{Em_T}{GDP}$$

Equations liées au calcul de la valeur des services écosystémiques rendus d'après Guan *et al.*, 2024. Ici ESV représente la valeur du service écosystémique ; Em_T est l'énergie totale de l'écosystème ; EMR est le ratio énergie-monnaie de la région étudiée ; GDP est le produit intérieur brut de la région étudiée ; V_{CP} représente la valeur du service de production végétale ; V_{AQ} représente la valeur du service d'aquaculture marine ; V_{WC} représente la valeur du service de conservation de l'eau ; V_{CS} représente la valeur du service de stockage du carbone ; V_{SR} représente la valeur du service de rétention du sol ; V_{NRD} représente la valeur du service de purification de l'eau ; V_{RC} représente la valeur du loisir.

- 2. Calcul de l'empreinte écologique (EE) et de la capacité de charge (cc) d'un écosystème.** La capacité de charge d'un écosystème représente ses limites écologiques qu'il peut supporter en termes de ressources disponibles et de gestion

des déchets (au sens très large du terme). Ainsi la capacité de charge permet de quantifier si les activités humaines sont compatibles avec les limites des systèmes naturels. Ainsi les deux concepts sont liés. L'empreinte écologique évalue la surface nécessaire pour subvenir aux besoins d'une population en termes de ressources et de gestion des déchets. La capacité de charge évalue combien d'individus un écosystème peut soutenir (Yang & Liu, 2023 ; Zhao *et al.*, 2005). La formule suivante d'après Bendewald & Zhai (2013) pourra s'appliquer au cas spécifique de la capacité de charge carbone d'un milieu ainsi la formule s'explique de la façon suivante :

$$CS(t) = NSCS - SD - C - O(t) \quad (\text{Eq.2})$$

*Equation de la capacité de stockage carbone d'un site d'après Bendewald & Zhai (2013) où **CS** = Stockage de carbone sur le site (kg CO2e); **t** = Temps (années); **NSCS** = Stockage du carbone sur le site d'origine (kg CO2e); **SD** = Émissions liées à l'aménagement du site (kg CO2e); **C** = Émissions liées à la construction (kg CO2e); **O** = Émissions liées à l'exploitation du projet (kg CO2e/an).*

Afin de calculer l'empreinte écologique du projet de réaménagement du trait de côte de Lacanau on utilisera la formule utilisée par Chen *et al.*, (2020). Celle-ci repose sur deux termes principaux :

- Le calcul de l'empreinte écologique de la consommation investie dans la construction, les opérations et la maintenance du projet (EE_c).
- Le calcul de l'empreinte écologique des déchets produits pendant la phase de construction du projet (EE_w).

On notera EF (ecological footprint), EE dans notre cas.

$$EE = EE_c + EE_w \quad (\text{Eq.3})$$

On pourra retrouver en annexe 1 le détail des calculs ainsi que celui de la capacité de charge qui a également été calculée par les auteurs Chen *et al.*, 2020. Dans le cas précis de la compensation des GES on pourra alors définir la capacité réelle de stockage du milieu dépendant de sa surface et du type d'écosystème présent. Cela appuiera le type de compensation écologique liée au carbone à mettre en place ensuite.

3. Enfin dans le cas spécifique de la compensation carbone on s'appuiera sur l'article de Zhai *et al.*, 2021 qui explore comment intégrer les notions **d'offre, de demande**

et de flux de services écosystémiques dans la compensation écologique, avec un accent particulier sur les services de séquestration de carbone.

Le Tableau 2 résume les calculs nécessaires afin de mettre en place la compensation écologique adéquate dans notre cas d'étude. Ce tableau a été construit sur la base de l'article de Zhai *et al.*, 2021 il résume la partie méthode de l'article appliquée spécifiquement au cas d'étude du projet de réaménagement du trait de côte de Lacanau. La première colonne « Concept » reprends les éléments clés des calculs d'offre, de demande, et de compensation. Ensuite, sont exposés les formules et les principes tirés de Zhai *et al.*, (2021) avec les termes modifiés et appliqués au cas d'étude. Enfin ces principes sont adaptés au contexte de l'étude et les informations et les outils nécessaires sont conciliés dans la dernière colonne. Les prochaines étapes seront d'identifier les types d'écosystèmes présents à Lacanau et leur capacité à séquestrer du carbone. Utiliser les études existantes sur les dunes littorales, les zones humides et les sols pour obtenir les coefficients nécessaires. Puis il s'agira d'appliquer les formules pour quantifier les capacités locales de séquestration (offre) et les besoins en compensation (demande). Et enfin, pour mettre en place la stratégie de compensation adaptée on pourra identifier les zones prioritaires pour la compensation écologique et monétiser les besoins pour intégrer des solutions fondées sur la nature.

Tableau 2 : Application des concepts de l'article de Zhai et al., (2021) au projet de réaménagement de Lacanau.

Concept (Zhai et al., 2021)	Equation / Principe	Application au cas d'étude du projet de Lacanau	Données nécessaires
Offre de séquestration de carbone (C_{total})	$C_{total} = (C_{above} + C_{below} + C_{dead} + C_{soil}) \times S$ <i>$C_{above/below/dead/soil}$ correspondent à la densité de carbone de chaque compartiments environnementaux (au-dessus du sol, sous le sol, matière organique morte, matière organique du sol (litière)). Ces valeurs peuvent être appliquées aux sédiments côtiers et aux dunes. S correspond à la surface étudiée.</i>	Calculer la capacité de séquestration des dunes, des forêts et des zones humides sur la zone d'exploitation du projet. Les valeurs de l'équation pourront être appliquées au système plage/dune.	Inventaires des types d'écosystèmes Densité de carbone dans les sols, les sédiments côtiers.
Demande de séquestration carbone (D_{cp})	$D_{cp} = E_{projet}$ <i>Ce sont les émissions carbonées émises lors de la phase de construction du projet.</i>	Estimer les émissions de GES totales du projet de réaménagement	Bilan carbone Artelia (2023)
Ecart Offre-Demande (DSDCS)	$DSDCS = C_{total} - D_{cp}$ <i>DSDCS: Difference between Supply and Demand of Carbon Sequestration</i>	Identifier les zones à déficit écologique	Résultats des calculs d'offre et de demande
Montant de la compensation écologique (EC)	$EC = DSDCS \times P_{carbone}$ <i>EC : Ecological compensation et $P_{carbone}$: prix du carbone sur le marché</i>	Calculer le coût monétaire nécessaire pour compenser le déficit carbone	Ecart Offre-Demande (DSDCS) et prix du marché du carbone (€ par tonne de CO ₂) / Utilisation du label bas carbone (ADEME)

Il est difficile de trouver un modèle complet et pertinent afin de calculer le type de compensation carbone à mettre en place. D'où l'utilisation ici de plusieurs articles scientifiques afin de proposer un protocole exhaustif pour les compensations carbones dans le cas spécifique du littoral.

Le Tableau 2 inclue la compensation économique qui doit être prise en compte dans cette démarche. En effet les différentes techniques de compensation carbone ne sont pas sans investissement économique. Ce sera un aspect non négligeable dans la mise en place des compensations. Le label Bas Carbone (cf partie III. c) sera une technique proposée.

En ce qui concerne le projet de Lacanau et le bilan carbone effectué par Artelia (2023) des efforts de réduction ont été réalisés mais pas suffisamment selon le bureau d'étude. Notamment concernant l'utilisation du béton pour une grande partie des travaux. Ci-dessous (Figure 9) des schémas permettant de représenter et de visualiser les différents flux ayant un impact potentiel en matière d'émissions de GES, ainsi que les postes d'émissions de la méthodologie d'évaluation des émissions de GES associés (en orange) (Artelia, 2023).

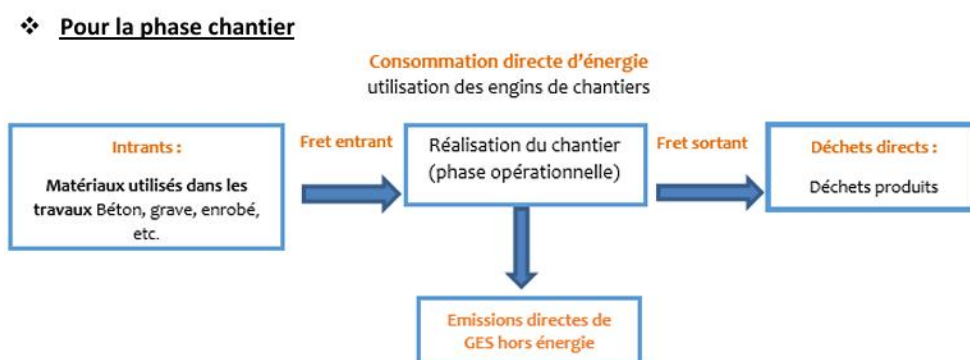


Figure 1 Postes d'émissions proposés pour le réaménagement du Front de mer de Lacanau, phase chantier

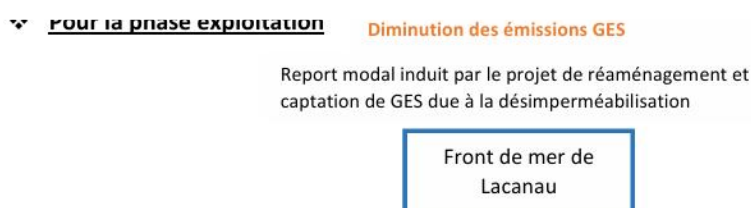


Figure 10 : Postes d'émissions proposés pour le réaménagement du Front de mer de Lacanau, phase chantier et phase exploitation (Artelia, 2023).

La quantification des besoins en compensation carbone dans le cadre du réaménagement du trait de côte de Lacanau repose sur des outils scientifiques rigoureux adaptés aux spécificités des écosystèmes côtiers. En mobilisant des méthodes variées et complémentaires issues de plusieurs articles il est possible d'établir une évaluation intégrée et multidimensionnelle des impacts écologiques du projet. Ces méthodes sont résumées dans le Tableau 3 suivant :

Tableau 3 : Résumé des étapes des méthodes et calculs pour une compensation carbone complète.

Etape	Objectif	Formule / Principe	Références
1. Calcul de la valeur des services écosystémiques (ESV)	Évaluer la contribution écologique d'un écosystème au stockage de carbone.	$ESV = V_{CP} + V_{AQ} + V_{WC} + V_{CS} + V_{SC} + V_{NRD} + V_{RC}$	Guan <i>et al.</i> , 2024
2. Calcul de l'empreinte écologique et la capacité de charge	Estimer les limites écologiques de l'écosystème et son potentiel de stockage carbone.	$EE = EE_C + EE_W$ $CS(t) = NSCS - SD - C - O(t)$	Bendewald & Zhai (2013) Chen <i>et al.</i> , 2020
3. Quantification des flux d'offre et de demande en carbone	Identifier le déficit ou surplus en stockage carbone.	$C_{total} = (C_{above} + C_{below} + C_{dead} + C_{soil}) \times S$ $D_{cp} = E_{projet}$ $DSDCS = C_{total} - D_{cp}$	Zhai <i>et al.</i> , (2021)
4. Coût monétaire de la compensation carbone	Déterminer le coût financier nécessaire pour compenser les émissions de GES.	$EC = DSDCS \times P_{carbone}$	Zhai <i>et al.</i> , (2021)

Ces approches mettent en lumière l'importance de tenir compte des capacités naturelles de stockage de carbone des écosystèmes locaux (dunes, sédiments côtiers, zones humides...). Des efforts de réduction ont été entrepris (comme le souligne le bilan Artelia, 2023), mais la compensation carbone nécessite une approche exhaustive et adaptée pour répondre aux objectifs de neutralité carbone d'ici 2050. Cela met en exergue la nécessité d'associer rigueur méthodologique et innovation écologique pour minimiser les impacts des projets d'aménagement tout en maximisant leur contribution à la résilience climatique.

Si la quantification des émissions et des besoins en compensation constitue une première étape essentielle, il est tout aussi crucial de s'interroger sur les moyens de réduire et de stocker les GES directement au sein des projets de réaménagement. La partie suivante explorera les leviers d'actions disponibles, tels que l'utilisation de matériaux à faible empreinte carbone, la végétalisation des espaces côtiers, et le potentiel des solutions fondées sur la nature.

b) Quelles préconisations pour réduire et stocker les émissions de carbone dans un projet de réaménagement du trait de côte ?

Seront exposées ici des préconisations afin d'assurer une compensation carbone complète et durable pour pallier les effets négatifs d'un projet de réaménagement qui va émettre des gaz à effet de serre et endommager les écosystèmes capables de séquestrer du carbone. Il devient essentiel aujourd'hui de faire de la réduction des GES le cheval de bataille des futurs projets d'aménagement et pas seulement en contexte côtier. Cette partie permettra d'exposer des solutions innovantes et adaptées afin d'engager de mesures de compensation complètes dans le cas des émissions de GES. L'importance de la prise en compte des compensations carbone dans un environnement côtier est illustré dans la Figure 11 qui représente les principaux réservoirs de carbone sur terre.

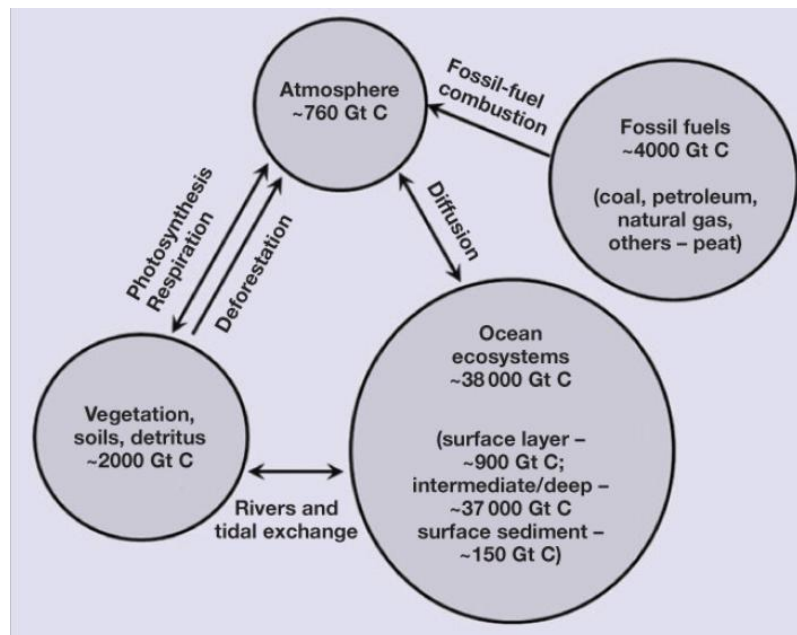


Figure 11 : Schéma simplifié du cycle global du carbone, montrant les principaux réservoirs de carbone (gigatonnes [Gt] C) et les flux (données du GIEC 2007) d'après McLoed et al., 2011.

La réduction des émissions de GES doit être pensée dès la phase de planification d'un projet. L'utilisation de matériaux à faible empreinte carbone est un levier essentiel pour réduire l'empreinte carbone d'un projet. Comme souligné dans le bilan carbone d'Artelia (2023) l'utilisation du béton compte pour quasiment 30% de la totalité des émissions de GES du projet. Ainsi l'utilisation d'un béton bas carbone et de matériaux recyclés peuvent réduire les émissions de 15 à 20% (Artelia, 2023)

D'après Labrujere & Verhagen, 2012 des colonnes de béton atteignent un bilan carbone de 8992 kg CO₂/m sur un cycle de vie complet. La sélection de matériaux locaux permettrait également de limiter les émissions liées au transport. Sur le chantier, l'utilisation d'équipements électrifiés et de carburants alternatifs, ainsi qu'une optimisation des trajets de transport, sont autant de leviers pour limiter les émissions directes. Ces pratiques permettent de réduire la consommation énergétique et les émissions associées (Labrujere & Verhagen, 2012).

La végétalisation locale représente une solution clé pour séquestrer le carbone émis lors des travaux. Les dunes, en particulier, offrent un potentiel de stockage de 2 à 5 tCO₂/ha/an, grâce à des espèces adaptées comme l'oyat, dont les racines profondes stabilisent les sédiments et piègent le carbone (McLeod et al., 2011) (Figure 12). Les arbustes côtiers tels que le tamaris complètent cette stratégie par leur résilience et leur longévité. Les critères pour le choix des espèces incluent (McLeao et al., 2011 ; Labrujere & Verhagen, 2012) :

- Une croissance rapide pour une absorption rapide de CO₂.
- Une longévité élevée pour un stockage durable.
- Une adaptation aux conditions locales pour garantir la survie des plantes.



Figure 12 : Revégétalisation des dunes lors du projet de réaménagement des espaces du front de mer de Lacanau : plantation d'Oyat (Durand, 2025).

Dans l'article de Beaumont *et al.*, 2014 sur l'étude de la capacité de séquestration carbone des dunes de sables ils obtiennent des valeurs entre 59,5g C/m²/an à 73g C/m²/an pour les zones humides associées ce qui équivaut au 2 t CO₂/ha/an mentionné plus haut.

Les écosystèmes côtiers tels que les herbiers marins, les marais salants et les sédiments jouent un rôle clé dans le stockage de carbone, appelé « carbone bleu » ou « blue carbon ». Ces milieux peuvent stocker jusqu'à 10 fois plus de carbone par unité de surface que les écosystèmes terrestres (McLeod *et al.*, 2011). Pour le projet de Lacanau, la restauration et la protection de ces écosystèmes permettraient non seulement de compenser les émissions résiduelles mais également de fournir une défense naturelle contre l'érosion. Ces écosystèmes côtiers vont pouvoir séquestrer le carbone à la fois sur le court terme (quelques décennies) dans leur biomasse et pour plusieurs millénaires sur le très long terme dans leurs sédiments (Beaumont *et al.*, 2014 ; McLeod *et al.*, 2011). La Longévité des puits de carbone bleu est bien supérieure à celle des forêts tropicales qui peuvent séquestrer le carbone pour des décennies ou des siècles. Les dunes représentent le principal habitat à Lacanau mais offrent des réservoirs de carbone modérés comparés aux marais salants, aux herbiers marins ou aux mangroves en milieu tropical. Leur capacité à stocker du carbone dépend de leur couverture végétale, de leur stabilité et de leur humidité. Les dunes mobiles vont avoir tendance à

séquestrer moins de carbone que les dunes stabilisées (Beaumonts *et al.*, 2014). Ainsi une végétalisation dense avec des plantes adaptées telles que l'oyat améliore significativement le stockage de carbone dans les dunes. De plus les dunes humides vont stocker plus de carbone que les dunes sèches de par leur teneur en eau et leur accumulation en matière organique.

Pour le projet de réaménagement du front de mer de Lacanau, il est recommandé de prioriser la revégétalisation des dunes avec des espèces adaptées telles que l'oyat et le tamaris pour stabiliser les sédiments et maximiser la séquestration du carbone. La restauration des zones humides et la protection des herbiers marins devraient également être mises en œuvre pour renforcer la résilience écologique et les capacités de stockage du « carbone bleu ». L'utilisation de matériaux bas carbone, comme des bétons décarbonés et des matériaux recyclés, ainsi que la réduction des distances de transport pour les ressources, permettraient de limiter les émissions liées à la construction. L'adoption de techniques d'équipements électrifiés sur le chantier et l'optimisation logistique des déplacements doivent compléter ces actions.

Bien que la compensation d'un point de vue de la restauration des écosystèmes et de l'utilisation de techniques et matériaux pour limiter l'impact de nos activités est aujourd'hui essentiel un autre type de compensation existe. On parlera plutôt de contribution volontaire pour la réduction des émissions de GES dans le cadre d'un projet de réaménagement à caractère indispensable tel que le projet de Lacanau.

c) Le Label Bas Carbone : une contribution à la réduction des émissions de gaz à effet de serre qui fait sens

4CE (Institute for Climate Economics) a développé des publications sur la compensation carbone volontaire dans les projets d'infrastructures : Le Label bas Carbone (LBC) (I4CE, 2024).

Le Label Bas Carbone (LBC), créé en 2018 par le ministère de la Transition écologique, est un outil de certification carbone permettant de valoriser des contributions volontaires en faveur de projets réduisant les émissions de GES et augmentant le stockage de carbone. Contrairement à une démarche de compensation classique, qui vise à annuler les émissions liées à une activité, le LBC repose sur la notion de contribution volontaire, orientant des financements vers des initiatives qui améliorent le bilan carbone d'un secteur donné (agricole, forestier, côtier...) (Label Bas Carbone, s. d.).

Le LBC repose sur l'achat de crédits carbone, chaque crédit représentant une tonne de CO₂ réduite ou séquestrée par rapport à une situation de référence. Ces crédits sont attribués à des projets certifiés, tels que le reboisement ou la restauration d'écosystèmes, qui démontrent une réelle efficacité dans la réduction ou la séquestration des émissions. Depuis son lancement, plus de 225 projets de boisement ont été certifiés en France, notamment dans le secteur forestier, en réponse aux enjeux climatiques et environnementaux (I4CE, 2024).

Dans le contexte du réaménagement du front de mer de Lacanau, le Label Bas Carbone pourrait être un levier pertinent pour répondre aux enjeux des 1 917 tonnes équivalent CO₂ (teqCO₂) générées par le projet (Artelia, 2023). En adhérant à cette démarche, les porteurs du projet pourraient contribuer financièrement à des projets locaux de reboisement certifiés LBC, notamment ceux visant à reconstituer les forêts brûlées lors des incendies de 2022 dans les Landes de Gascogne. Cette approche territoriale offre plusieurs avantages :

1. **Une synergie locale** : Elle soutient des initiatives proches géographiquement, favorisant une reconstitution des écosystèmes régionaux, avec un impact direct sur la biodiversité et la résilience écologique.
2. **Un engagement visible et valorisable** : Une telle démarche offre une communication positive pour les financeurs et porteurs de projets, en renforçant leur ancrage local et leur image de responsabilité environnementale.

En choisissant de financer des projets LBC, les porteurs du projet de Lacanau ne se contenteraient pas de compenser leurs émissions, mais contribueraient activement à des actions à fort impact environnemental et social. Cette démarche offre également une alternative économique avantageuse, le coût par tonne de carbone réduite étant souvent inférieur à d'autres méthodes.

Pour s'assurer de l'efficacité des contributions, des indicateurs de suivi sont essentiels (Label Bas Carbone, s. d.) :

- **Capacité de séquestration carbone** : Quantité de CO₂ séquestrée par hectare et par an.
- **Taux de capture du carbone** : Taux annuel des émissions réduites par les projets financés.
- **Traçabilité des crédits carbone** : Vérification régulière des performances des projets LBC pour garantir leur conformité avec les objectifs fixés.

Cette démarche s'intègre également dans une stratégie globale de réduction des GES, en complément des efforts déjà entrepris sur le projet, comme l'utilisation de matériaux bas carbone ou l'optimisation des transports. En combinant ces actions à des contributions carbone via le LBC, le projet de Lacanau pourrait servir d'exemple de transition écologique intégrée dans le cadre des réaménagements côtiers.

CONCLUSION

La question de la compensation carbone dans les projets de réaménagement côtier, tel que celui de la ville de Lacanau, met en lumière les enjeux environnementaux actuels et l'urgence de développer des solutions efficaces, intégrées et scientifiquement robustes. Ce

projet illustre les défis posés par l'équilibre entre la préservation de la biodiversité et la réduction des gaz à effet de serre, tout en répondant aux besoins sociaux et économiques des villes côtières. Les Solutions Fondées sur la Nature présentent des bénéfices clairs à la fois pour la séquestration du carbone mais aussi pour la préservation de la biodiversité et la résilience des écosystèmes côtiers. Elles sont cependant soumises à plusieurs contraintes notamment de l'ordre de l'acceptation sociale. Ajouter à cela les conditions environnementales variables, l'impact des changements climatiques diverses et le manque de données solides sur le bien fondées de ces solutions rendent leur application dans l'ingénierie côtière laborieuse.

Ainsi, un réel enjeu d'uniformisation se dégage de ce travail. Aujourd'hui nous avons besoin de mettre en place des techniques de calculs standardisées et homogènes afin de mettre en place des mesures de compensations efficaces, durables et pertinentes. Le manque d'homogénéité dans les méthodes de calculs des compensations limite la robustesse des études scientifiques, la comparabilité et la fiabilité des résultats produits. Une meilleure compréhension des techniques de compensations spécifiques aux émissions de GES favoriserait une meilleure reproduction des mesures compensatoires et une plus grande transparence dans les démarches. En revanche le Label Bas Carbone se présente comme une approche prometteuse afin de compenser les émissions d'un projet en soutenant des initiatives locales.

Il est impératif aujourd'hui d'adopter une approche intégrative dans les mesures de compensation des GES afin d'assurer la résilience et la protection des villes côtières. Ces démarches de compensation doivent être incluses dès la phase de planification d'un projet qui doit impérativement pallier ses émissions de carbone afin de réduire son empreinte écologique. En conclusion, ce projet illustre parfaitement la complexité des enjeux liés à la maîtrise des techniques et des outils de la compensation des GES. Il offre une opportunité de réflexion et d'innovation pour intégrer les principes de la compensation dans une démarche plus complète, qui tient compte à la fois des impératifs climatiques et de la préservation des écosystèmes. Ce travail, en mettant en lumière les limites actuelles et les pistes de solutions, appelle à une mobilisation pour développer des pratiques plus durables et résilientes en cohérence avec les enjeux environnementaux auxquels les sociétés font faces. Cependant il faut souligner que la mise en place d'un projet d'envergure tel que celui de Lacanau nécessite des ressources financières conséquentes et qui ne sont pas allouées à toutes les villes côtières et sont inégalement réparties sur le territoire. Lacanau jouit d'une très grande attractivité et popularité ce qui lui a permis en partie de réaliser ce projet. Une approche plus économique serait intéressante à mener afin d'évaluer la faisabilité de la mise en place de projet similaire en s'appuyant sur les solutions fondées sur la nature et la compensation carbone.

BIBLIOGRAPHIE

- Adapto* : Un projet Life initié par le Conservatoire du Littoral. (s. d.). Adapto. Consulté le 8 décembre 2024, à l'adresse <https://www.lifeadaptto.eu/>
- ADEME (s.d.). *Plan de transition sectoriel de l'industrie cimentière en France - La librairie ADEME.* <https://librairie.ademe.fr/energies/5041-plan-de-transition-sectoriel-de-l-industrie-cimentiere-en-france.html>
- Admin. (2024, 27 novembre). *Les Solutions fondées sur la Nature - UICN France.* UICN France. <https://uicn.fr/solutions-fondees-sur-la-nature/>
- Arnall, A. (2023). Where land meets sea: Islands, erosion and the thing-power of hard coastal protection structures. *Environment and Planning E: Nature and Space*, 6(1), 69-86.
- ARTELIA. (Novembre 2023). Réaménagement des espaces publics du front de mer de Lacanau : Evaluation des émissions de gaz à effet de serre (No 8517174).
- Artelia, (2023). Conception d'un projet urbain sur le front de mer à Lacanau (33) : DOSSIER D'ENQUETE PUBLIQUE PORTANT SUR LA DEMANDE DE PERMIS D'AMENAGER. Pièce 3 - Etude d'impact (No 4352794).
- Bendewald, M., & Zhai, Z. J. (2013). Using carrying capacity as a baseline for building sustainability assessment. *Habitat International*, 37, 22-32.
- Besson, M. (2022, 15 février). Vendée. 7,8 millions d'euros pour refaire 4 km de digues à Bouin. <https://www.ouest-france.fr>. <https://www.ouest-france.fr/pays-de-la-loire/bouin-85230/vendee-7-8-millions-d-euros-pour-refaire-4-km-de-digues-a-bouin-df516b28-8e46-11ec-ac8b-7bcc1004542a>
- Bongarts Lebbe, T., Rey-Valette, H., Chaumillon, É., Camus, G., Almar, R., Cazenave, A., ... & Euzen, A. (2021). Designing coastal adaptation strategies to tackle sea level rise. *Frontiers in Marine Science*, 8, 740602.
- Borsje, B. W., van Wesenbeeck, B. K., Dekker, F., Paalvast, P., Bouma, T. J., van Katwijk, M. M., & de Vries, M. B. (2011). How ecological engineering can serve in coastal protection. *Ecological Engineering*, 37(2), 113-122.
- BRGM. (2024, 13 juin). *Littoral et montée des eaux : des solutions fondées sur la nature* / BRGM. <https://www.brgm.fr/fr/actualite/article/littoral-montee-eaux-solutions-fondees-nature>

- Chen, R., Zhang, D., & Li, B. (2020). Spatial–temporal calculation simulation of ecological footprint of resource and environmental pollution in green communication. *EURASIP Journal On Wireless Communications And Networking*, 2020(1).
- De Communes des Grands Lacs, C. (s. d.). *Rechargements en sable : s’informer, c’est mieux ! / Les rechargements en sable : dates et processus / Gestion de la bande côtière / Aménagement et Urbanisme / Accueil - Communauté de communes des Grands Lacs*. Communauté de Communes des Grands Lacs. <https://www.ccgrandslacs.fr/Amenagement-et-Urbanisme/Gestion-de-la-bande-cotiere/Les-rechargements-en-sable-dates-et-processus/Rechargements-en-sable-s-informer-c-est-mieux>
- Durand, N. (2024). *Comment la question du bilan des gaz à effet de serre est abordée dans les mécanismes de compensation écologique. Exemple de la Ville de Lacanau et son réaménagement des espaces publics du front de mer*.
- Díaz-Carrasco, P., Croquer, S., Tamimi, V., Lacey, J., & Poncet, S. (2021). CONSÉQUENCES DU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE SUR LES STRUCTURES DE PROTECTION CÔTIÈRE. À propos, 2, 57.
- Eric Coll (2010) : Communes.com. (s. d.). <https://www.communes.com/utilisateur,20243.html>
- Firth, L. B., Thompson, R. C., Bohn, K., Abbiati, M., Aioldi, L., Bouma, T. J., ... & Hawkins, S. J. (2014). Between a rock and a hard place: environmental and engineering considerations when designing coastal defence structures. *Coastal Engineering*, 87, 122-135.
- France Relance, epfna, GIP Littoral, Ville de Lacanau, & Communauté de commune Médoc Atlantique. (2021, 14 décembre). Signature du contrat du projet partenarial d’aménagement de Lacanau [Dossier de presse].
- Guan, Q., Li, H., Guan, C., Chen, J., & Fan, Y. (2024). Identification of Ecological Compensation Zones and Compensation Amounts: A Case Study of the Yellow River Delta. *Land*, 13(10), 1582.
- I4CE. (2024, 13 mars). *Label Bas Carbone - I4CE*. <https://www.i4ce.org/projet/label-bas-carbone/>
- Label bas carbone*. Ministère de la transition énergétique. (s. d.). Label Bas Carbone - Ministère de la Transition Énergétique. <https://label-bas-carbone.ecologie.gouv.fr/>
- Labrujere, A. L., & Verhagen, H. J. (2012). Analysis of the carbon footprint of coastal protection systems. *COASTAL ENGINEERING*, 2.

- Mathilde. (2022, 29 juillet). *La filière ciment-béton : un mur face à la transition ? - Réseau Action Climat*. Réseau Action Climat. <https://reseauactionclimat.org/la-filiere-ciment-beton-un-mur-face-a-la-transition/>
- McLeod, E., Chmura, G. L., Bouillon, S., Salm, R., Björk, M., Duarte, C. M., ... & Silliman, B. R. (2011). A blueprint for blue carbon: Toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(10), 552-560.
- Messier, L., Blais, M., & Gouin, É. (2022). *Le Nord et ses rives: l'adaptation des villages côtiers nordiques à l'érosion et aux changements du niveau des eaux* (Doctoral dissertation, Université Laval).
- OCDE (2024), *Des infrastructures pour un avenir résilient face au changement climatique*, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/464404b3-fr>.
- Pelet & Rieu (2023). Les solutions fondées sur la nature dans les territoires littoraux : une adaptation au changement climatique sans transformation ? Développement durable et territoires [En ligne], Vol. 14, n°2, mis en ligne le 30 octobre 2023, consulté le 12 décembre 2024.
- Rakotoarivelo, A., & Zie, L. (2024, 24 novembre). « Un budget de 100 millions » . Des ouvriers en réinsertion réparent les digues de l'île de Ré, abimée par l'éros. *France 3 Nouvelle-Aquitaine*. <https://france3-regions.francetvinfo.fr/nouvelle-aquitaine/charente-maritime/ile-de-re/un-budget-de-100-millions-des-ouvriers-en-reinsertion-reparent-les-digues-de-l-ile-de-re-abimee-par-l-erosion-et-la-tempete-xynthia-3065395.html>
- Renforcement digue des Mattes*. (2019, 29 mai). Communauté de Communes de L'Île de Noirmoutier. <https://www.cdc-iledenoirmoutier.com/renforcement-digue-des-mattes>
- Sandro. (s. d.). *Visite Sud-Ouest de la France - Météo et climat*. Visite Sud Ouest de la France. <https://www.sudouest-visite.com/>
- Seddon, N., Chausson, A., Berry, P., Girardin, C. A. J., Smith, A., & Turner, B. (2020). Understanding the value and limits of nature-based solutions to climate change and other global challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 375(1794), 20190120.
- Stratégie régionale de gestion de la bande côtière | GIP Littoral*. (s. d.). <https://www.giplittoral.fr/ressources/strategie-regionale-de-gestion-de-la-bande-cotiere#:~:text=Les%20strat%C3%A9gies%20locales%20sont%20mises,des%20al%C3%A9as%20et%20des%20enjeux>.

- Markov, A. (2023). *Nature-based solutions for coastal protection: A multi-scale investigation of wave-vegetation interactions* (Doctoral dissertation, Université d'Ottawa/University of Ottawa).
- Ville océane 2050 - Lacanau*. (2025, 7 janvier). Lacanau. <https://www.lacanau.fr/ville-oceane-2050/>
- Yang, Y., & Liu, Z. (2023). *Quantitative research on ecological compensation in coastal areas based on ecological footprint*. Coastal Environmental Science.
- Zhao, S., Li, Z., & Li, W. (2005). A modified method of ecological footprint calculation and its application. *Ecological Modelling*, 185(1), 65-75.

ANNEXES

Annexe 1 : Extrait de l'article Chen *et al.*, 2020 de la partie méthode qui expose les détails des formules de calculs utilisées.

Table 1 Carbon uptake per unit area

Global forest area (Km ²)	Aboveground dry matter weight (t/Km ² /a)	Underground dry matter weight (t/Km ² /a)	Total dry matter weight (t/Km ² /a)	Total carbon absorption (tC/km ² /a)
5120.227 × 10 ⁶	11,612 × 10 ⁶	2.27	2.84	1.42

Table 2 Global average energy footprint

	Carbon emission factor	Global average energy footprint (Cj/Km ² /a)
Coal	26	55
Oil	30	71
Gas	15.3	93

only the embedding of the corresponding land area should be considered, that is, how much land area is needed for a given consumption quantity to produce and supply [22].

2.3 The key points in the calculation of ecological footprint

Land disposal of fossil energy: Usually, the exploitation and utilization of fossil energy means the depletion of stocks and the generation of waste gas. Therefore, in view of the development and utilization of fossil energy, the fossil energy land can be treated from the point of view of flow evaluation and the land area needed to provide the energy consuming substitute and absorb the waste gas [23]. Because the natural system has the obvious absorption ability to CO₂ and the data are more abundant, this mainly deals with the waste gas of CO₂. At present, it is mainly used to estimate the land area needed to absorb the new CO₂ to calculate the demand for fossil energy land. The absorptive capacity of forests is calculated by calculating the average absorptive capacity of 26 different biota. The detailed calculation process is shown in Tables 1 and 2.

3 Method

Ecological footprint model, as a method of accounting for natural resources from an ecological point of view, has experienced the development of one-dimensional model.

3.1 Calculation method of ecological footprint model

The formula for calculating the ecological footprint of the project is as follows:

$$EF = EF_C + EF_W \quad (2)$$

in which EF_C (C=consumption) is the ecological footprint of the consumption invested in the construction, operation and maintenance phase of the project. EF_W (W=waste) is the ecological footprint of the waste produced during the construction of the project.

$$EF_C = N \cdot ef = N \cdot rj \cdot \sum_i^n (abi) = N \cdot rj \cdot \sum_i^n \left[\frac{ci}{pi} \right] \quad (3)$$

in which N is the population of the project, ef is the ecological footprint per capita, rj is the equilibrium factor ($j=1, 2 \dots 6$) to indicate the land type and abi is the per capita bioproductive land area of the class I consumption project. ci is per capita consumption for category i projects, and pi says average global production capacity for category i projects.

With the construction of the project going on, there will be some waste. Every $1m^2$ construction project in our country will produce about 60 kg waste. However, due to the lack of strict supervision and management of the treatment of Lakzaka in our country, construction waste is usually disposed of by direct stacking or landfill. The construction waste of each 1000 kg will occupy the land of $0.067m^2$, so the calculation formula of the ecological footprint of construction waste is as follows:

$$EF_W = S_{BA} \times 60 \times 0.067 \times 10^{-3}. \quad (4)$$

The calculation formula of ecological carrying capacity of the project is as follows:

$$EC = N \cdot ec = N \cdot ej \cdot yj \cdot \sum_{i=1}^n bi \quad (5)$$

in which ec is the per capita ecological carrying capacity, ej is the equilibrium factor, yj is the yield factor and bi is the per capita biological productive land area.

According to the proposal of the (WCED) of the World Commission on Environment and Development, 12% of the area of bioproductive land should be set aside for biodiversity conservation, and the actual ecological capacity of the project should be multiplied by a coefficient of 0.88. Namely,

$$EC = 0.88N \cdot ec. \quad (6)$$

Calculation of ecological surplus:

The concept of surplus (ecological deficit) is defined as follows:

$$ES = EC - EF. \quad (7)$$

If $ES > 0$, there is ecological surplus, and the ecological carrying capacity of the project is higher than that of the sustainable improvement of the project. If $EF < 0$, there will be ecological deficit, the ecological carrying capacity of the project is not as good as the ecological footprint, the sustainability of the project is poor, and the project is in a critical state between sustainability and unsustainability, such as $ES = 0$.

3.2 Three-dimensional ecological footprint model

On the basis of two-dimensional model, Niccolucci has introduced two new indexes, footprint depth and footprint breadth, to describe the ecological footprint by the volume of the cylinder, so as to explain the human occupation of the natural resource flow and the natural resource stock. The plane analysis of the two-dimensional model

is extended to the stereoscopic analysis of the three-dimensional model, and the longitudinal expansion of the ecological footprint research is realized. Compared with the two-dimensional model, the concept of natural resource stock is introduced in the three-dimensional model. The stock of natural resources is relative to the flow of natural resources; when the flow of natural resources cannot meet human consumption, additional consumption comes from the stock of natural resources. The evolution of the ecological footprint model from two to three dimensions is shown in Fig. 2.

There are the following relationships in the 3D model:

$$EF = BC + ED \quad (8)$$

in which EF is the ecological footprint; BC is the area of ecologically productive land that can be provided by region; and ED is the ecological deficit.

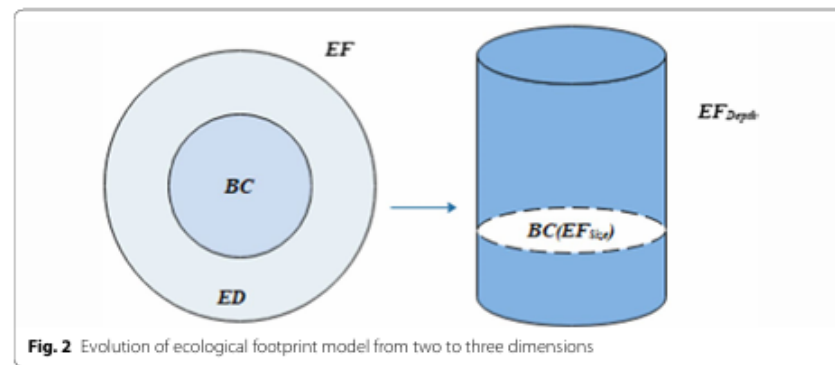
In a three-dimensional model, there are the following relationships:

$$\begin{aligned} 0 < EF_{Size} &\leq BC \\ EF &= EF_{Size} \times EF_{Depth} \\ EF_{Depth} &= 1 + \frac{EF - BC}{BC} \end{aligned} \quad (9)$$

In the three-dimensional model, when the ecological footprint is smaller than the ecological carrying capacity, the footprint breadth is used to characterize the extent of human activity occupying the natural resource flow. It can be concluded that footprint depth is an indicator of regional ecological pressure on a timescale.

3.3 Research progress in ecological footprint model

According to 175 related research papers which have been retrieved at present, the research on ecological footprint in China is mainly focused on three aspects, that is, model review, scale footprint research and specific industry/sector footprint analysis. The comparison of the content and quantity of China's ecological footprint research is shown in Fig. 3.

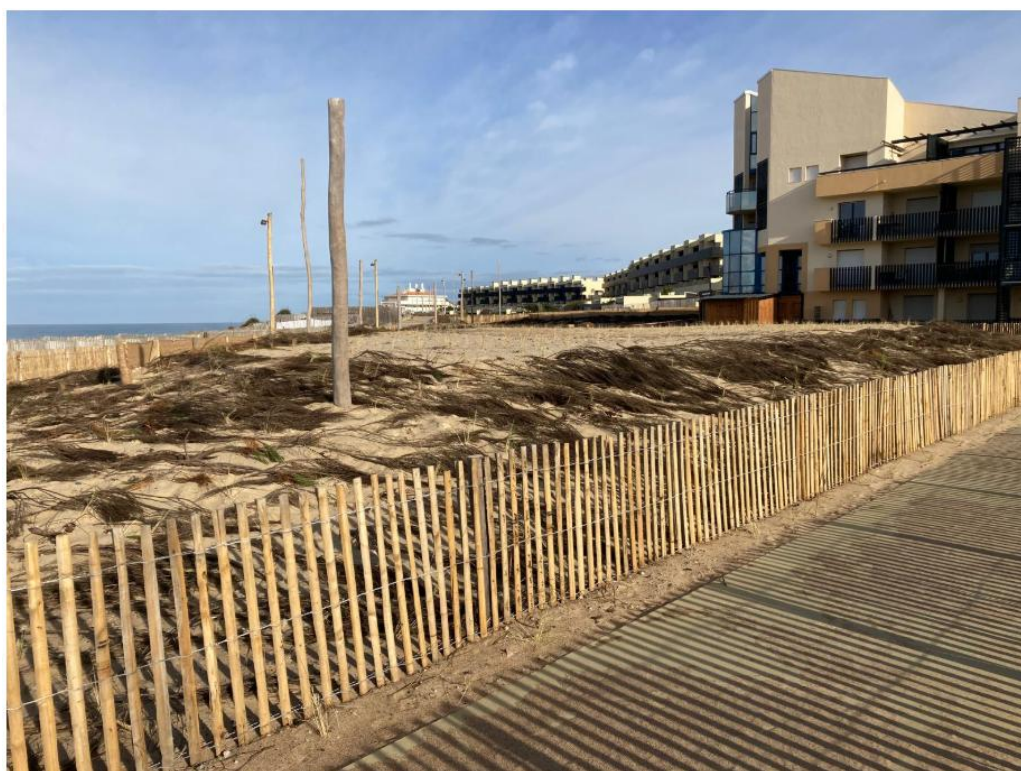


Annexe 2 : Brandes de genêts afin d'empêcher le sable d'être mobilisé pendant les grands coup de vent et tempêtes. Brandes positionnées sur les dunes revégétalisées pour protéger les Oyats tout juste plantés (Durand, 2025).



:

Annexe 3 : Avant et après revégétalisation sur la promenade Lacaze lors du projet de réaménagement du trait de côte de Lacanau (33) (source : Sandro. (s. d.). ; Durand, 2025)



Annexe 4 : Avant et après réaménagement des allées Ortales (allée piétonne et commerçante) : végétalisation et mobilités douces (source : Sandro. (s. d.) ; *Ville océane 2050 - Lacanau*)



Annexe 5 : Travaux en cours à Lacanau pour la suppression des parkings du front de mer et la revégétalisation des espaces.





Directrice de recherche : Mathilde Gralepois

Auteure : Durand Ninon

**DAE5
2024-2025**

L'enjeu de la compensation écologique des émissions de gaz à effet de serre
dans les projets de réaménagement du trait de côte

*Cas d'étude : Projet de réaménagement des espaces publics du front de mer de
Lacanau (33).*

Mots Clés : Solution fondées sur la Nature, Compensation écologique, Bilan carbone, Réaménagement du trait de côte.

Résumé : Le projet de réaménagement du front de mer de Lacanau (33) illustre les défis environnementaux des zones côtières face à l'érosion et au changement climatique. Initié en 2023, ce projet vise à protéger les habitants, infrastructures et écosystèmes en mettant l'accent sur des solutions innovantes. Traditionnellement axées sur le génie civil, ces initiatives engendrent d'importantes émissions de gaz à effet de serre et perturbent les habitats naturels. L'intégration de la compensation carbone est essentielle pour réduire ces impacts.

La séquence ERC (Éviter, Réduire, Compenser), bien que courante, ne prend pas suffisamment en compte les GES. Des solutions fondées sur la nature, comme la revégétalisation des dunes et la restauration des habitats, offrent une alternative durable, capable de séquestrer le carbone tout en renforçant la résilience écologique. À Lacanau, ces approches pourraient compléter les efforts de réduction des émissions, bien que des obstacles tels que l'acceptabilité sociale et le manque de directives claires subsistent. Une analyse menée par le bureau d'études Artelia a révélé que les émissions totales de GES du projet atteignent 1 917 tonnes équivalent CO₂. Bien que des efforts aient été faits pour limiter l'utilisation de béton, le besoin de méthodes plus exhaustives et uniformisées pour calculer et compenser ces émissions est criant. Le label Bas Carbone, par exemple, offre un cadre volontaire pour financer des initiatives locales de séquestration.

Ce projet souligne l'importance d'approches intégrées, combinant innovation technique et résilience écologique, pour relever les défis côtiers et climatiques actuels.