

Efficacité des Nature-inclusive Designs sur la biodiversité marine dans les parcs éoliens offshore

-

Carte systématique

Étude issue du partenariat entre la Fondation pour
la recherche sur la biodiversité (FRB) et Réseau de
transport d'électricité (RTE)

REDACTION :

Matthias GABORIAU

Joseph LANGRIDGE

Jules ENNOCHI--MIROUX

CONTRIBUTIONS :

Mathieu PINAUT

Sylvain PIOCH

Aurélie DELAVALD

Aurélie QUINARD

RELECTURES :

Hélène SOUBELET

Denis COUVET

CITATION :

Gaboriau M., Langridge J., Ennochi--Miroux J., Delavaud A., Quinard A., Pinault M., Pioch S. 2025. Efficacité des Nature-inclusive Designs sur la biodiversité marine dans les parcs éoliens offshore : Carte systématique. Paris, France : FRB, 40 p. <https://doi.org/10.5281/zenodo.18784219>

SOMMAIRE

1.	Introduction.....	1
1.1.	Contexte de l'étude.....	1
1.2.	Implication des parties prenantes et présentation de la question de recherche.....	3
2.	Méthode	5
2.1.	Sélection de la littérature	5
2.2.	Présentation des résultats et méthode de cartographie.....	6
3.	Résultats et discussion.....	7
3.1.	Composition de la base de données.....	7
3.1.1.	Littérature retenue à l'issue du processus de tri systématique	7
3.1.2.	Évolution temporelle des publications et des études comparatives	8
3.1.3.	Répartition géographique des sites d'études.....	9
3.2.	Efficacité des solutions de Nature-inclusive Design sur la biodiversité sous-marine dans les parcs éoliens en mer	12
3.2.1.	Objectifs écologiques attendus et grandes catégories de NiD	12
3.2.2.	Biodiversité étudiée selon la catégorie et le type de NiD déployés.....	12
3.2.3.	Les métriques utilisées pour mesurer l'efficacité des NiDs	16
3.2.4.	Effets énoncés des NiDs sur la biodiversité.....	17
3.3.	Limites et interprétation de l'étude	21
4.	Conclusions et opportunités.....	22
4.1.	Implications pour la recherche	23
4.2.	Implications pour les ACTEURS et POUR les politiques publiques.....	24
5.	Références bibliographiques	26
6.	Annexes.....	29
	Annexe 1 : Méthodologie complète de la carte systématique	29
	A1. 1 stratégie de recherche bibliographique	29
	A1. 2 Construction des équations de recherche	30
	A1. 3 Sollicitation et accès aux ressources bibliographiques	33
	A1. 4 Sélection de la littérature	33
	A1. 5 Extraction et représentation des données issues des publications retenues.....	35
	Annexe 2 : Liste des Références bibliographiques composant le corpus final de la carte longue	36
	Annexe 3 : Comparaison de notre carte systématique avec d'autres travaux de synthèse	37
	Annexe 4 : Données pour l'interprétation de la figure 12 « Nature des effets énoncés des NiDs »	38
	Annexe 5 : Glossaire des principales métrique recensées dans les publications	40

1. INTRODUCTION

1.1. CONTEXTE DE L'ETUDE

La structure du bouquet énergétique national fournit un contexte essentiel pour comprendre la place et le rôle des différentes sources d'énergie dans les dynamiques actuelles de transition énergétique en France. Son mix énergétique reste marqué par la prédominance du nucléaire (38,6 %) et les énergies fossiles – pétrole, gaz naturel et charbon – qui totalisent 45% (Figure 1). Les énergies renouvelables n'en représentent qu'environ 15 %, principalement sous forme de bois-énergie (4,8 % de la consommation primaire), loin devant l'éolien (2,1 %) (Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires, 2025).

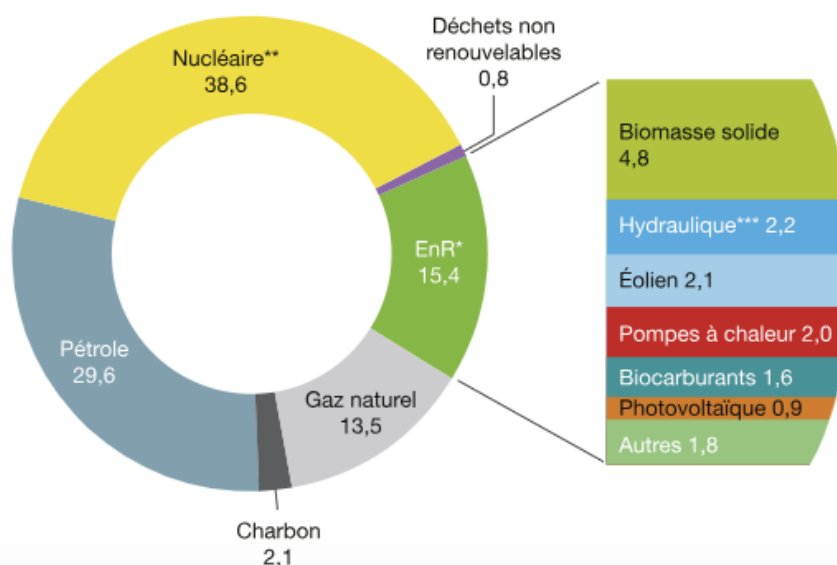


Figure 1 : Répartition de la consommation énergétique française par source de production¹ (valeurs exprimées en pourcentage, données non corrigées des variations climatiques). * EnR = énergies renouvelables, ** Correspond pour l'essentiel à la production nucléaire, déduction faite du solde exportateur d'électricité, *** Hydraulique hors pompage.

En France, la loi sur la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) du 18 août 2015 et la loi énergie-climat (LEC) adoptée le 08 novembre 2019 ont fixé des objectifs ambitieux de réduction des émissions de gaz à effet de serre et de diversification des sources d'énergie, en cohérence avec les objectifs européens. Les deux objectifs dont il est question, « neutralité carbone en 2050 » et « 33 % d'énergies renouvelables dans la consommation finale brute d'énergie en France d'ici 2030 », ont ainsi été retranscrits dans la loi française. Pour le secteur électrique, cela correspond à un objectif de 40% de la production provenant d'une source énergétique renouvelable à l'horizon 2030. De plus, dans le cadre de la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE), environ 30% de l'électricité française devra être produite par des éoliennes en mer d'ici 2050. Selon différents scénarios établis par le Réseau de transport d'électricité (RTE), le rythme actuel de construction des parcs éoliens en mer français devrait donc être multiplié par 10 à 30, pour tenter d'atteindre les objectifs précités.

L'éolien en mer, aussi appelé éolien *offshore*, est donc amené à jouer un rôle déterminant dans la transition énergétique. Néanmoins, le développement de ce secteur industriel s'accompagne d'effets sur la biodiversité et sur les écosystèmes marins. Le Syndicat des énergies renouvelables (SER) et France

¹ Ministère de la Transition Écologique, Bilan énergétique de la France, Chiffres clés de l'énergie : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/chiffres-cles-de-lenergie-edition-2025>

Renouvelables ont publié une synthèse des effets de l'éolien en mer sur l'environnement². Ce rapport a référencé 13 pressions principales générées par le développement des parcs éoliens en mer (posés et flottants) sur l'environnement en lien direct avec les grandes catégories IPBES. On peut notamment citer les quatre enjeux majeurs : le changement d'habitats marins, les émissions sonores et électromagnétiques ou encore les collisions, mais également d'autres enjeux qualifiés de « secondaires » (non prioritaires au regard des autres pressions générées), comme la perte nette d'habitat, la modification des conditions hydrodynamiques et de la température, les pollutions chimiques et la contribution à l'introduction et à la propagation d'espèces non indigènes.

Pour transiter vers des modes de production énergétique plus durables, le développement soutenu de la filière de l'éolien en mer, cadre contextuel de cette étude, doit donc s'accompagner d'évaluations systématiques et rigoureuses des impacts et dépendances du secteur à la biodiversité et aux services écosystémiques. Cette démarche d'évaluation est en effet indispensable à la mise en place de mesures de réduction de ces impacts sur la biodiversité. Cependant, la réduction seule n'étant pas suffisante pour atteindre un niveau de durabilité satisfaisant, l'évolution de la filière doit permettre également de générer des impacts positifs sur la biodiversité en déployant des solutions telles que celles proposées dans le cadre mondial pour la biodiversité.

Adopté en 2022 par 196 pays lors de la 15^{ième} Conférence des Parties sur la biodiversité (COP15), le « cadre mondial pour la biodiversité » (CMB) des accords de Kunming-Montréal³ offre aux parties prenantes une expertise d'envergure mondiale sur la réduction des impacts liés aux modes de production d'énergie. Servant de guide, ce cadre propose quatre objectifs à l'horizon 2050 et 23 cibles pour 2030, afin de vivre en harmonie avec la nature. Il comporte ainsi des cibles strictement dédiées à la protection ou la restauration des écosystèmes, mais aussi et surtout des cibles dédiées à la diminution des pressions sur la biodiversité. La cible 15, par exemple, exhorte l'ensemble des acteurs économiques à réduire progressivement leurs impacts négatifs sur la biodiversité et augmenter leurs impacts positifs avec notamment le concept de "Nature Positive" et en promouvant des actions visant à garantir des modes de production durables. La cible 8, quant à elle, vise la réduction des conséquences du changement climatique et de l'acidification des océans sur la biodiversité, par la mise en œuvre de solutions fondées sur la nature et/ou d'approches basées sur les écosystèmes. De telles mesures peuvent bien entendu être déployées pour réduire d'autres types de pressions ou d'impacts sur la biodiversité. En outre, comme tout projet d'aménagement, les parcs éoliens ont l'obligation de réaliser une étude des impacts négatifs sur l'environnement, selon la séquence hiérarchique Éviter Réduire et Compenser (ERC) avec l'objectif de viser une "Non-Perte Nette de Biodiversité" (No Net Loss) voire un gain net de biodiversité (Positive net gain) qui est exigé en Europe (Directive 2011/92/UE), ainsi que dans la majorité des pays utilisant ce type de projet énergétique (Bull et Strange 2018).

Dans le cadre du concept de "Nature positive" du Cadre mondial, un ensemble de mesures appelées « *Nature-inclusive Design* » (NiD)⁴, définies comme des **modifications et/ou ajouts à la conception d'éoliennes offshore et d'infrastructures de réseau**, peuvent être déployées dans le but d'améliorer directement ou indirectement la biodiversité et le fonctionnement écologique au sein des parcs éoliens en mer (Figure 2). Deux types de mesures caractérisent les NiDs : celles relevant d'une intégration d'objectifs écologiques par modification de l'infrastructure dès la phase de conception (éco-conception avec une durabilité la plus forte car identique à l'ouvrage) et celles relevant d'ajouts à posteriori, sans modification de l'infrastructure en elle-même (Firth et al. 2024). Dans la suite de ce rapport nous ne distinguerons pas ces deux catégories qui relèvent de choix d'ingénierie en génie civil, pour nous concentrer sur les effets écologiques, objet de cette revue de littérature. Les NiDs présentent donc un potentiel intéressant pour

² <https://www.france-renouvelables.fr/etudes-et-publications/livret-sur-les-effets-de-leolien-en-mer-sur-lenvironnement/>

³ [15/4. Cadre mondial de la biodiversité de Kunming-Montréal](#)

⁴ Sous le terme de *Nature-inclusive Design* sont considérées les infrastructures grises-vertes (*green-grey infrastructures*), les éco-design et les éco-conceptions.

atténuer (réduire et dans certains cas compenser) les effets négatifs des infrastructures en améliorant la prise en compte de la biodiversité lors des phases de planification, d'implantation et d'exploitation des parcs éoliennes marins et des infrastructures marines associées (Pioch et Souche 2021). Cependant, leur efficacité n'est pas toujours démontrée de manière scientifique et la littérature établissant le bilan des connaissances sur le sujet est relativement pauvre (Firth et al. 2024). Seulement deux publications ont dressé un état des lieux des connaissances sur cette thématique. La publication de Pardo et al. (2023) est une synthèse des « approches positives pour la nature », regroupant « solutions fondées sur la nature », NiDs et opportunités de coexistence de certaines activités en mer au sein des infrastructures liées à la filière éolienne en mer. Néanmoins, cette publication n'ayant pas suivi un protocole de synthèse de type systématique, l'exhaustivité des résultats concernant les NiD, approche traitée parmi d'autres, est très incertaine. Enfin, le rapport d'Hermans et al. (2020) établi une liste relativement exhaustive des mesures de NiDs existantes mais sans justification scientifique de leur efficacité et qu'il conviendrait d'actualiser (6 ans). Aucune revue systématique de la littérature (scientifique et grise) démontrant l'efficacité concrète des mesures de NiD sur la biodiversité dans les parcs éoliens offshore n'a donc encore été publiée.

1.2. IMPLICATION DES PARTIES PRENANTES ET PRESENTATION DE LA QUESTION DE RECHERCHE

Le Réseau de transport d'électricité (RTE) en tant que gestionnaire du réseau est chargé d'acheminer pour l'ensemble des parcs éoliens en mer, l'énergie produite jusqu'au réseau terrestre. Cette seule activité de raccordement des énergies renouvelables en mer représente, début 2024, 12 projets couvrant l'ensemble des façades maritimes métropolitaines. Pour rappel, quatre raccordements de parcs éoliens en mer ont déjà été mis en service (Saint-Nazaire, Saint-Brieuc, Fécamp et Courseulles-sur-Mer). RTE, de par son rôle de gestionnaire des infrastructures de raccordement existantes et de l'intégralité des raccordements des futurs parcs éoliennes marins, fait partie des acteurs du transport d'énergie les plus directement concernés par la nécessité de mettre en œuvre des mesures d'atténuations des impacts de ce secteur sur la biodiversité.

Question de recherche

RTE a donc sollicité la FRB pour produire une synthèse des connaissances existantes sur l'efficacité des mesures de Nature-inclusive Design (NiD), afin de guider leur décision quant à la mise en place de certaines d'entre elles. L'ensemble des façades maritimes françaises et la biodiversité qui les caractérise sont concernées, ainsi que l'intégralité des structures immergées présentes au sein des parcs éoliens marins, des fondations des éoliennes aux câbles de raccordement avec le réseau terrestre.

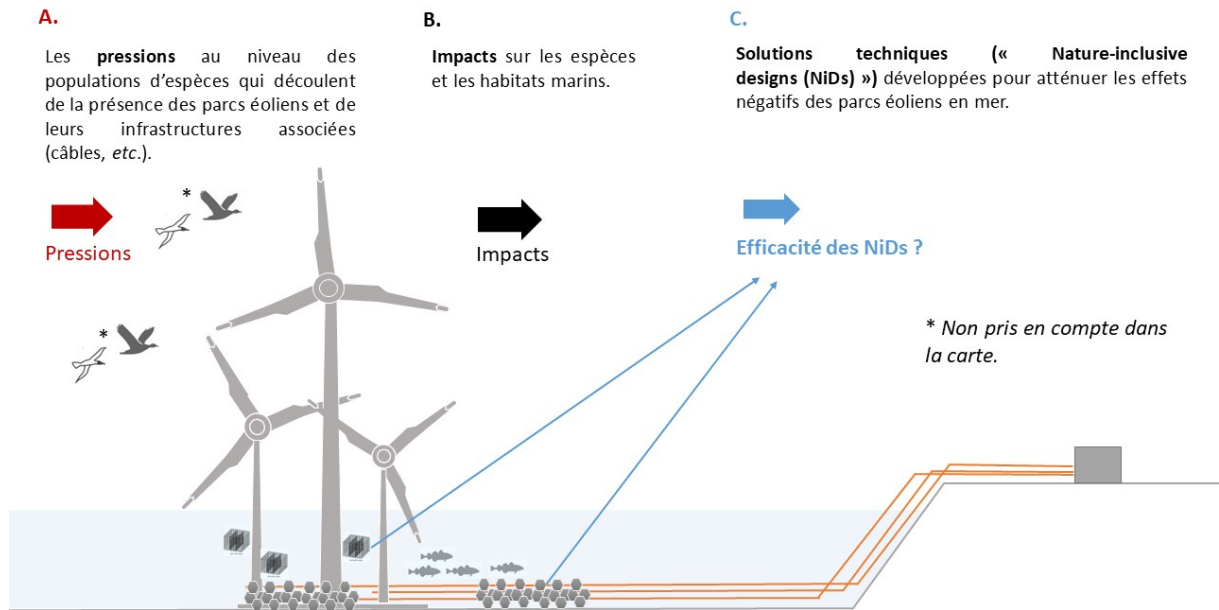


Figure 2 : Schéma illustrant le cadre conceptuel de la question de la carte systématique. Différentes mesures de Nature-inclusive Design (NiD) peuvent être utilisées pour atténuer les effets négatifs sur la biodiversité de l'expansion des parcs éoliens en mer : par exemple, protection contre l'affouillement, protection des câbles, unités additionnelles fixés et unités additionnelles indépendantes.

2. METHODE

Cette revue de littérature adopte la méthode de la carte systématique. C'est une méthode particulièrement adaptée pour dresser qualitativement un panorama structuré et exhaustif des connaissances disponibles autour d'une question donnée. Elle peut constituer d'une première étape et être ensuite développée en revue systématique, afin de permettre la réalisation d'une méta-analyse des données quantitatives extraites des publications, ce qui requiert du temps additionnel.

La présente cartographie systématique suit les lignes directrices de la *Collaboration for Environmental Evidence* (CEE) (Collaboration for Environmental Evidence 2022 ; James et al. 2016) et est conforme aux standards de *reporting* ROSES, synonymes de robustesse méthodologique et de pertinence en contexte d'aide à la décision, pour les synthèses de connaissance dans les domaines scientifiques. L'intégralité du protocole méthodologique mis en œuvre pour l'élaboration de cette carte systématique est décrit dans Langridge et al. (2025) et en Annexe 1.

2.1. SELECTION DE LA LITTERATURE

Les recherches documentaires ont été menées entre mars et avril 2025, sans restriction temporelle ni géographique. Pour la recherche de littérature scientifique publiée dans les revues à comité de lecture, les bases de données bibliographiques Scopus et Web of Science Core Collection (WoSCC), ainsi que les moteurs de recherche Google Scholar (via le logiciel Publish or Perish) et Bielefeld Academic Search Engine (BASE), ont été mobilisés. Pour Google Scholar, la requête a été adaptée conformément aux recommandations de Haddaway et al. (2015). Enfin, pour la recherche de littérature non académique (rapports techniques par exemple), des recherches manuelles ont été effectuées sur le site de l'Agence de la transition écologique (ADEME), dans les archives institutionnelles de l'Ifremer (ARCHIMER) et dans la base documentaire Tethys, afin d'intégrer également la littérature grise existante (e.g. rapports techniques et autres). La sélection des documents a été réalisée en accord avec les critères d'inclusion et d'exclusion prédéfinis lors des phases de concertation (Tableau 4), ainsi qu'en suivant les étapes de tri préconisées par la CEE (Figure 3). La description complète des phases de recherche et du processus de sélection de la littérature est présentée en Annexe 1.

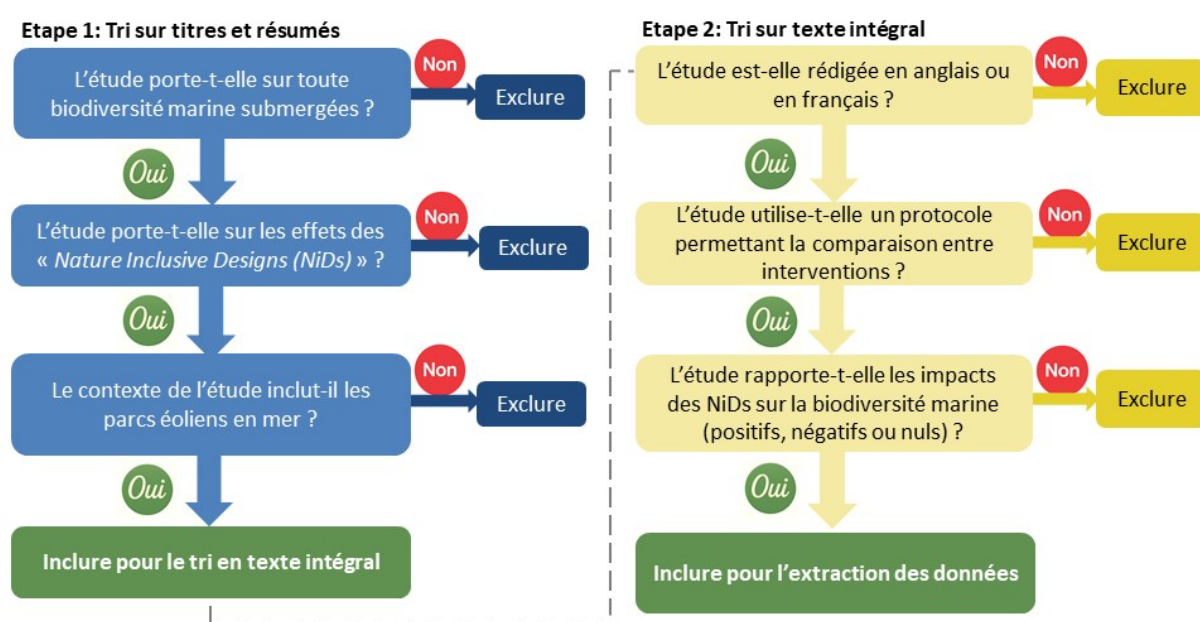


Figure 3 : Représentation schématique simplifiée des étapes du processus de sélection de la littérature pertinente pour la carte systématique longue.

La méthode est structurée par des étapes, suivant un protocole établi a priori pour rassembler et décrire, de manière exhaustive, les données de recherche existantes dans la littérature académique et grise. Elle permet ainsi d'aboutir, de façon organisée, à un paysage des connaissances en réponse à une question posée (Livoreil et al. 2017).

2.2. PRESENTATION DES RESULTATS ET METHODE DE CARTOGRAPHIE

Nous avons produit une « carte longue » (Haddaway *et al.* 2021). Cela implique de prioriser des cas comparatifs par article (ci-après appelés « études comparatives » ou « EC »). Chaque étude comparative retenue dans la présente carte systématique met donc en œuvre l'analyse d'un NiD par rapport à un comparateur bien identifié, bien souvent un substrat conventionnel (Figure 4). Ainsi, plusieurs études comparatives sont extraites par article. Ceci a pour effet de multiplier le nombre de lignes d'entrée de données par article (d'où le terme de « carte longue ») (Figure 5). La liste des neuf publications retenues est présentée en Annexe 2. La synthèse narrative répond à la question principale. Pour cela, une combinaison de visualisations et de tableaux est utilisée pour permettre d'identifier des concentrations ou 'cluster' de connaissances (thématiques bien documentées, qui peuvent permettre une analyse quantitative), mais aussi des lacunes ou 'gaps' de connaissances (thématiques peu ou pas représentées, avec peu d'études).

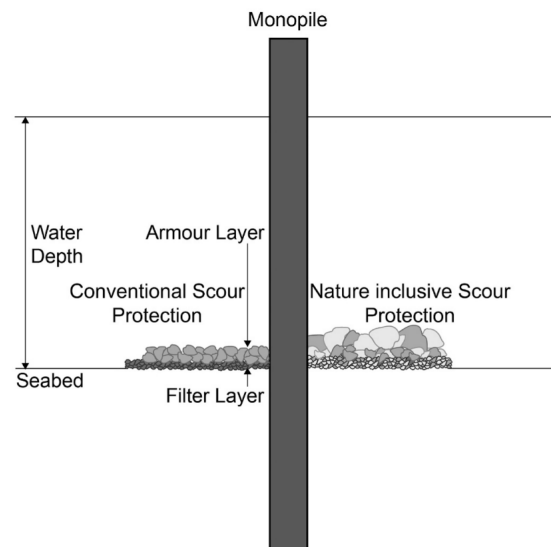


Figure 4 : Illustration d'un protocole expérimental sur éolienne monopile, visant à évaluer l'efficacité d'un NiD (optimisation de la protection contre l'affouillement « Nature inclusive Scour Protection », à droite) avec présence d'un comparateur (protection conventionnelle contre l'affouillement « Conventional Scour Protection », à gauche) issue de Kingma et al. 2024.

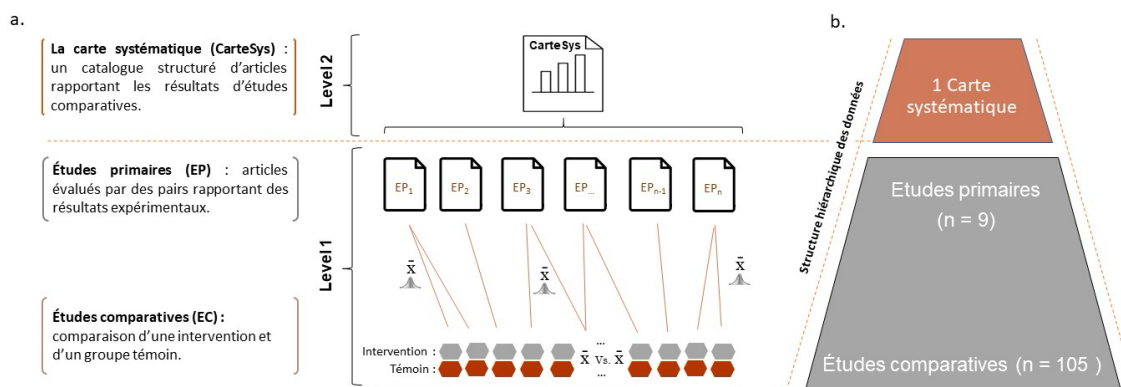


Figure 5 : Représentation conceptuelle de la nature multi-niveaux des données probantes résumées dans la carte systématique (a) et illustration de la hiérarchie des données (b). Au niveau le plus bas (level 1), les études primaires individuelles rapportent une ou plusieurs comparaisons de données appariées (appelés "études comparatives") (n = 105) sur un résultat d'intérêt. Au niveau supérieur (level 2), un état des lieux descriptif (c'est-à-dire notre cartographie systématique) de l'ensemble des articles pertinents retenus lors du processus de sélection (n = 9) mesurant l'efficacité d'un NiD sur une cible biologique est présenté. Huit articles scientifiques publiés dans les revues à comité de lecture et une thèse composent ce corpus bibliographique. Parmi les neuf publications retenues, un total de 105 comparaisons de données appariées est rapporté. Source : représentation d'après Bonfanti et al. 2025.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. COMPOSITION DE LA BASE DE DONNEES

3.1.1. Littérature retenue à l'issue du processus de tri systématique

Le nombre de publications retenues à l'issue de chaque étape du processus de tri est présenté en Figure 6. Au total, 1949 documents ont été identifiés grâce à notre requête initiale. Des références en double ont été détectées (426) puis écartées. Nous avons ainsi trié 1 523 références à travers trois étapes :

- Après tri sur titre, 337 références ont été conservées.
- Puis, à l'issue du tri sur résumés, ce sont 164 références qui ont été retenues.
- Enfin, sur les 159 publications analysées sur texte entier (cinq publications complètes n'ayant pas été retrouvées), seules 12 publications ont été conservées.

La principale raison de ce faible taux d'inclusion était souvent une intervention ou un comparateur non conforme aux critères d'éligibilité, ce qui a permis d'écarter les études primaires s'intéressant uniquement à l'effet "récif artificiel". Par exemple, si la couche de protection contre l'affouillement (CPA) conventionnelle des éoliennes était comparée avec une absence de CPA (c'est-à-dire un substrat naturel), nous ne considérons pas cette publication comme l'étude d'une mesure de type NiD (selon Hermans et al. 2020). Cela a permis de conserver uniquement les études évaluant différentes compositions du substrat ou de granulométrie utilisée pour optimiser « écologiquement » la nature et/ou la structure d'une CPA.

Un total de 12 publications a donc été retenu, parmi lesquelles trois sont des synthèses de connaissances. Les bibliographies de ces trois synthèses ont été extraites et analysées de la même manière systématique. Ainsi, 329 nouveaux articles scientifiques ont passés les différentes étapes du processus décrit précédemment, mais aucun d'entre eux n'a finalement été retenu.

Finalement, le corpus bibliographique nous permettant de produire cette synthèse est composé de **9 publications ou études primaires**, huit articles issus de revues scientifiques à comité de lecture (facteur d'impact entre 2,3 et 8,4) et une thèse, ainsi que **105 études comparatives (EC)**.

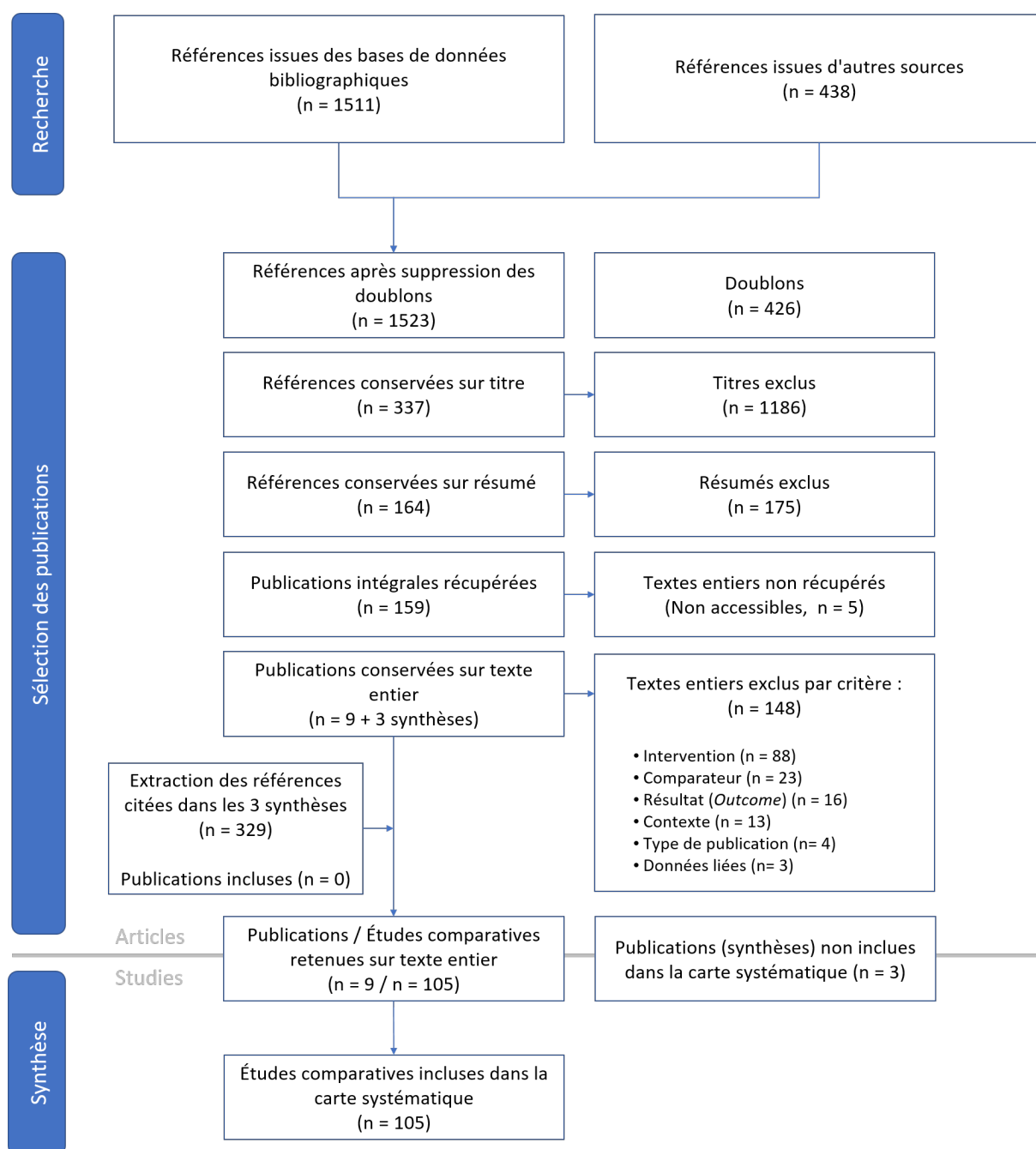


Figure 6 : Représentation schématique du processus de sélection des publications menant à la constitution du corpus final de la présente carte systématique (inspiré du diagramme de flux "ROSES", Haddaway 2020).

3.1.2. Évolution temporelle des publications et des études comparatives

Les articles retenus couvrent une période allant de janvier 2020 à février 2025, avec une quantité d'articles publiés la plus importante en 2024 (Figure 7). (NB : l'extraction des publications ayant été réalisée en mars 2025, ceci peut expliquer le faible nombre de publications par rapport à l'année 2024). Toutes les publications retenues sont des articles de revues scientifiques, à l'exception d'une thèse (Figure 7, a). Si l'on s'intéresse au nombre d'études comparatives (EC) au sein des neuf publications finalement retenues, on en dénombre 105 (Figure 7, b) : 4 en 2020, 19 en 2023, 66 en 2024 et 16 en 2025.

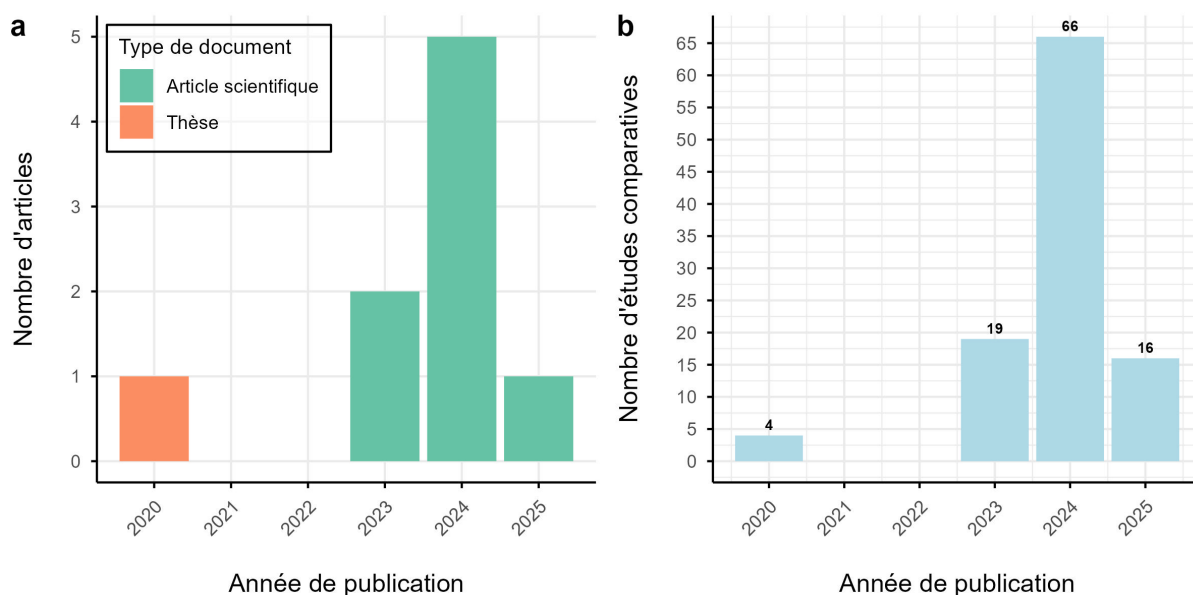


Figure 7 : Tendance temporelle du nombre de publications retenues en fonction de leur nature (a) et du nombre d'études comparatives issues de ces publications (b).

3.1.3. Répartition géographique des sites d'études

Au total, sur les neuf publications, on retrouve 12 sites d'études. Parmi ces 12 sites d'études :

- Sept sont situés dans des zones de parcs éolien (Borssele II et V, le parc de Kaskasi à proximité de l'île d'Helgoland, BelWind, C-Power, Princess Amalia, Horns Rev 1).
- Un autre site est localisé sur le tracé d'un câble électrique sous-marin de 15 km de long, reliant un site d'essais marémoteurs.
- Enfin, les quatre derniers sites sont situés hors parcs éolien (Rade de Brest, récif artificiel du parc éolien C-Power, Baie de Tralee et plateforme de recherche FINO 1 ; Figure 8). Ces publications ont été conservées, car les auteurs ont explicité l'applicabilité des NiDs étudiés sur ces sites, dans la perspective de leur future installation dans des parcs éoliens offshore.

Concernant la nature du sédiment des sites étudiés :

- Cinq sites étaient composés d'un sédiment sableux,
- Un site était composé d'un sédiment rocheux,
- Pour sept sites, le sédiment n'a pas été mentionné.

Le manque de données trop important concernant ce paramètre parmi les études retenues ne nous a pas permis d'explorer une des questions initiales portant sur lien entre l'efficacité d'un NiD et la nature du substrat sur lequel il est déployé.

Douze sites d'étude exclusivement situés en Atlantique Nord-Est

Si l'on s'intéresse à la distribution des sites d'études en fonction des sous-régions marines européennes selon la DCSMM (Directive-cadre Stratégie pour le milieu marin, Marine Strategy Framework Directive, 2008/56/EC), la Manche-Mer du Nord a été la sous-région marine européenne la plus étudiée (8 sites d'étude), suivi des Mers Celtiques (3 sites d'étude) (Figure 8). Le dernier site au sud du Royaume-Uni, bien que situé en Manche, n'est pas considéré comme appartenant à une sous-région marine (au sens de la DCSMM). Malgré le fait qu'aucun filtre géographique n'a été appliqué lors de la recherche des publications, les douze sites d'études sont tous exclusivement situés sur les côtes de pays appartenant à la zone Atlantique Nord-Est. En termes de pays, les Pays-Bas sont représentés par le plus grand nombre de sites d'études (4), suivis de la Belgique (2), de la France (2), de l'Allemagne (1), de l'Irlande (1), du Royaume-Uni

(1) et du Danemark (1) (Figure 8). Sur les 12 sites référencés, la cible biologique la plus étudiée est la macrofaune benthique (8 sites), suivi de l'huître plate européenne *Ostrea edulis* (2 sites), de la morue de l'Atlantique *Gadus morhua* (2 sites), et enfin, les algues du genre Laminaires *Laminaria sp.*, la crépidule *Crepidula fornicata* et l'acidie japonaise *Styela clava* (sur 1 seul et même site).

Ce résultat semble cohérent au vu de la distribution des éoliennes en mer dans le monde : l'espace maritime européen est le plus grand pour implanter des infrastructures d'énergie renouvelable. Cependant, on constate aussi que les Etats-Unis, la Chine, la Corée du Sud, Taiwan ou encore le Vietnam, développent rapidement ce secteur, avec des parcs éoliens en mer déjà actifs ou en cours de planification. Il est donc étonnant de ne pas retrouver de publications sur ces parcs éoliens. La littérature scientifique décrivant l'efficacité des NiDs sur la biodiversité sous-marine dans les parcs éoliens, actuellement pauvre et presque exclusivement focalisée sur la région Manche - Mer du Nord, pourrait bien s'enrichir dans les prochaines années et étendre sa couverture géographique à d'autres régions du globe.

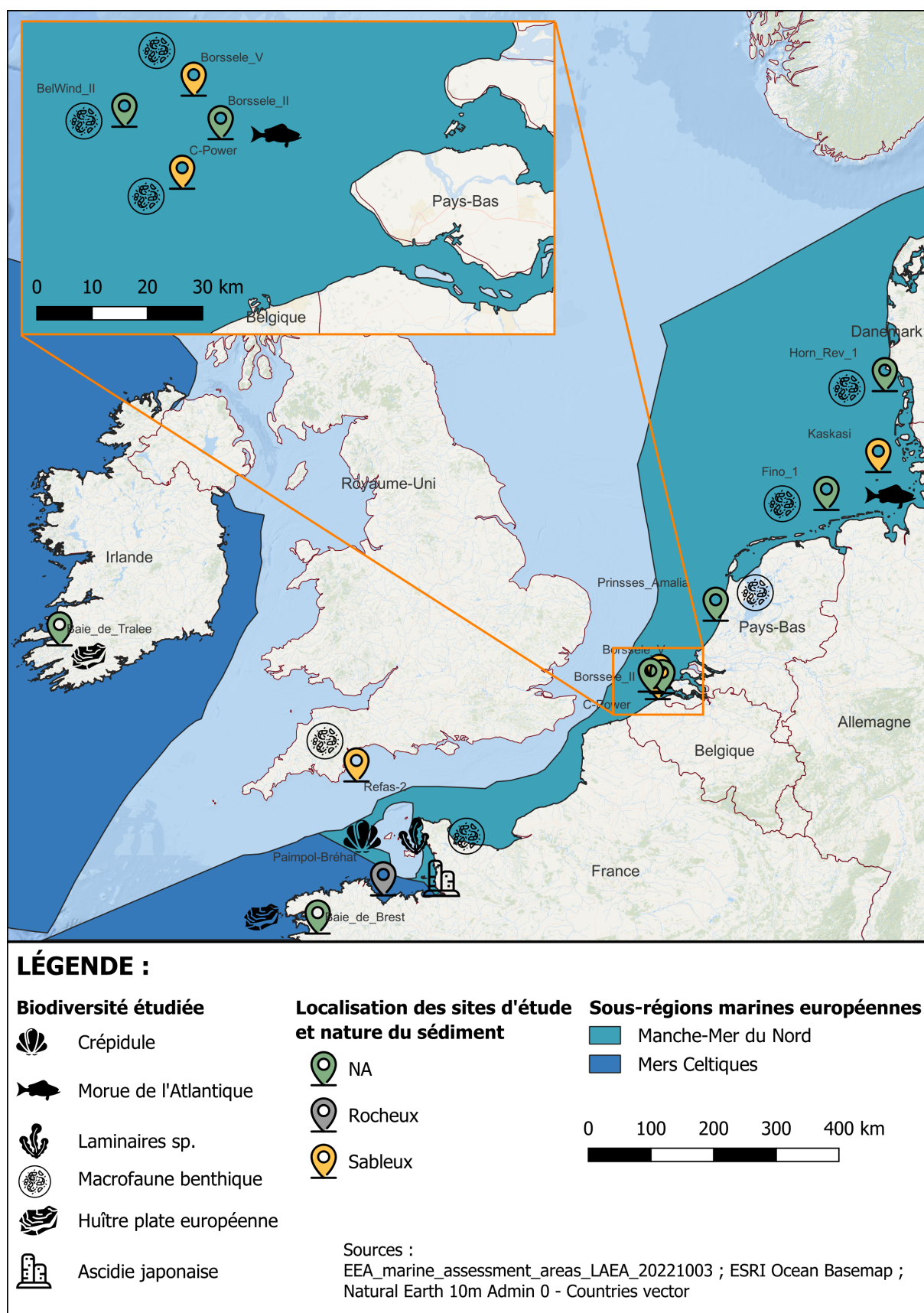


Figure 8 : Localisation au sein des différentes sous-régions marines européennes des sites d'études identifiés dans les publications retenues et mention des cibles biologiques évaluées, ainsi que de la nature du sédiment (quand précisée par les auteurs) où sont déployées les solutions de Nature-inclusive Design.

3.2. EFFICACITE DES SOLUTIONS DE NATURE-INCLUSIVE DESIGN SUR LA BIODIVERSITE SOUS-MARINE DANS LES PARCS EOLIENS EN MER

3.2.1. Objectifs écologiques attendus et grandes catégories de NiD

Parmi les 105 études comparatives (EC) recensées dans les neuf publications, les catégories de NiD les plus fréquemment étudiées sont d'ordre technique (ingénierie des infrastructures grises visant des objectifs écologique ou ingénierie écologique) avec : l'optimisation de la couche de protection contre l'affouillement (CPA ; 59 EC), suivi par les Unités additionnelles fixées (UAF ; 24 EC), les Unités additionnelles autonomes (UAA ; 18 EC), et enfin, l'optimisation de la couche de protection de câbles (CPC ; 4 EC) (Figure 9). À ce jour, nous constatons donc qu'aucune étude comparative ne concerne de mesures dites "d'infrastructure verte" ou de solution fondée sur la nature.

À travers les études comparatives recensées, on retrouve trois grands objectifs de la mise en place de NiD sur les structures éoliennes marines :

- Plus de la moitié des EC concernent un NiD dont l'objectif écologique attendu, ou la fonction écologique recherchée, est la **création d'habitat** (68 EC).
- On retrouve également, en quantité importante, la **restauration de populations en déclin**, pour laquelle les 34 EC concernent toutes l'Huître plate européenne (*Ostrea edulis*). Historiquement, les populations d'*Ostrea edulis* étaient très largement répandues en Mers Celtiques et Manche-Mer du Nord, formant de vastes récifs biogéniques, qui ont presque totalement disparu, suite à leur surexploitation par la pêche industrielle (Pogoda et al. 2023).
- Enfin, en quantité nettement plus faible (3 EC), la dernière fonction écologique identifiée est la **conservation ou maintien de la biodiversité établie**, principalement évaluée sur la macrofaune benthique (Figure 9).

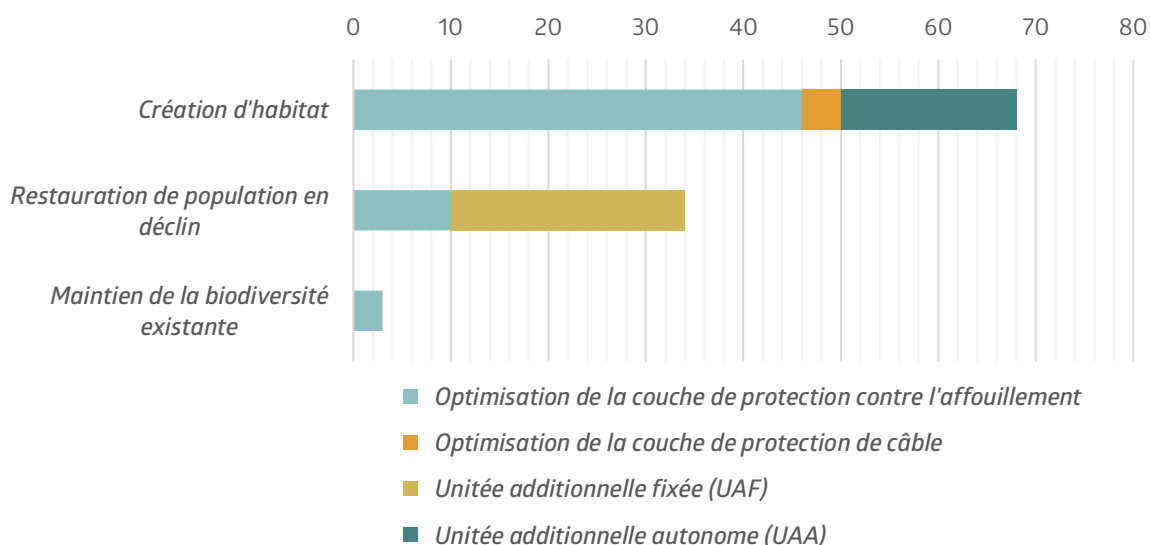


Figure 9 : Nombre d'études comparatives retenues en fonction de la catégorie de Nature-inclusive Design déployée et de la fonction écologique recherchée.

3.2.2. Biodiversité étudiée selon la catégorie et le type de NiD déployés

Si l'on s'intéresse uniquement au type de NiD, les plus étudiés sont « l'optimisation de la nature et de la structure du substrat de la couche de protection contre l'affouillement (CPA) par emploi de marbre » (30 études comparatives, EC), suivi par « l'ajout de *Reefcubes*® » sur CPA comme unité additionnelle autonome (UAA) (16 EC), et enfin, « l'optimisation de la structure du substrat de la CPA par la diminution de la granulométrie moyenne » (15 EC). À eux trois, ils représentent presque deux tiers des études comparatives (Tableau 1 : lignes surlignées en rose).

Tableau 1: Nombre d'études comparatives (EC) pour chaque type de Nature-inclusive Design (NiD) recensé et en fonction de la cible biologique étudiée. Les lignes roses matérialisent les types de NiD les plus étudiés et les cellules jaunes, les études qui concernent la macrofaune benthique.

Type de Nature-inclusive Design	Cible biologique	Nombre d'EC
Couche de protection contre l'affouillement optimisée (CPA opt.)		
Optimisation de la nature du substrat de la CPA (matériau alternatif) : Calcaire	<i>O. edulis</i>	2
Optimisation de la nature du substrat de la CPA (matériau alternatif) : Marbre	<i>O. edulis</i>	2
Optimisation de la nature et de la structure du substrat de la CPA (matériau alternatif) : Bloc de roche	<i>G. morhua</i>	1
Optimisation de la nature et de la structure du substrat de la CPA (matériau alternatif) : Grès	<i>O. edulis</i>	3
Optimisation de la nature et de la structure du substrat de la CPA (matériau alternatif) : Marbre	Macrofaune benthique	30
Optimisation de la nature et de la structure du substrat de la CPA (matériau alternatif) : Silex	<i>O. edulis</i>	3
Optimisation de la structure du substrat de la CPA : diminution de la granulométrie moyenne	Macrofaune benthique	15
Démantèlement de type 3 : CPA et fondations maintenues (coupées à + 5m au-dessus de la surface du sédiment)	Macrofaune benthique	2
Démantèlement de type 2 : CPA maintenue et fondations retirées (coupées à -1m sous la surface du sédiment)	Macrofaune benthique	1
Couche de protection de câbles optimisée (CPC opt.)		
Ajout d'une CPC : Matelas de béton	<i>C. fornicata</i> / <i>Laminaria</i> Sp. / Macrofaune benthique / <i>S. Clava</i>	4
Unité additionnelle autonome (UAA)		
Ajout d'UAA : Reef cubes®	Macrofaune benthique	16
Ajout d'UAA à proximité d'une structure éolienne avec CPA	<i>G. morhua</i>	2
Unité additionnelle fixée (UAF)		
Optimisation de la nature du substrat de l'UAF (matériau alternatif) : GEOWALL® lisse	<i>O. edulis</i>	3
Optimisation de la nature du substrat de l'UAF (matériau alternatif) : GEOWALL® rugueux	<i>O. edulis</i>	3
Optimisation de la nature du substrat de l'UAF (matériau alternatif) : Pâte pour récif	<i>O. edulis</i>	3
Optimisation de la nature du substrat de l'UAF (matériau alternatif) : SeaCrete	<i>O. edulis</i>	3
Optimisation de la nature et de la structure du substrat d'UAF (matériau alternatif) : Acier galvanisé	<i>O. edulis</i>	3
Optimisation de la nature et de la structure du substrat d'UAF (matériau alternatif) : Bloc récifaux	<i>O. edulis</i>	3
Optimisation de la nature et de la structure du substrat d'UAF (matériau alternatif) : Econcrete	<i>O. edulis</i>	3
Optimisation de la nature et de la structure du substrat d'UAF (matériau alternatif) : Moule	<i>O. edulis</i>	3

La macrofaune benthique : l'ensemble d'espèces le plus étudié

Sur l'ensemble des études comparatives recensées dans les publications, la cible biologique la plus étudiée est la macrofaune benthique (65 études comparatives, Figure 10). Les publications ou études primaires présentaient généralement des EC sur la macrofaune benthique dans son intégralité (sans distinction taxonomique), mais aussi parfois au niveau de taxons (e.g. les annélides, arthropodes, bryozoaires, chordés, cnidaires, échinodermes et mollusques, etc.), de groupes fonctionnels (tubicoles, mobiles, fixés, épibiontes, cavicoles et fouisseurs) ou encore de groupes trophiques (carnivores, suspensivores, détritivores, omnivores et brouteurs). Pour éviter des erreurs de regroupement taxonomique et faciliter la lecture et l'interprétation des données, nous avons choisi de présenter les résultats en rassemblant les EC au niveau de la communauté d'espèces sous l'intitulé général "Macrofaune benthique".

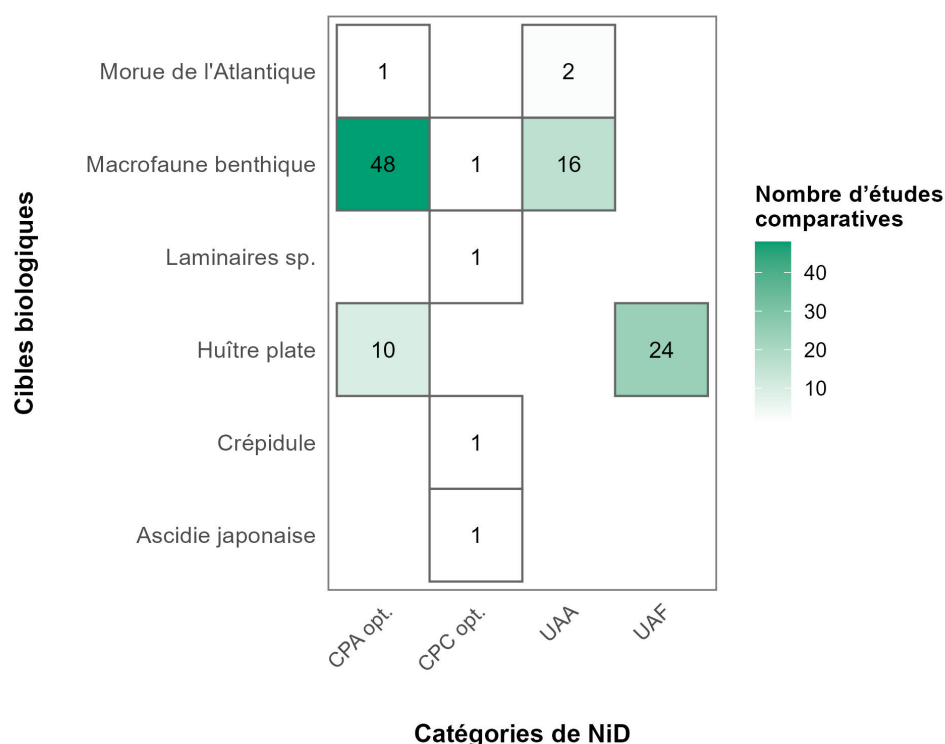


Figure 10 : Nombre d'études comparatives en fonction de la cible biologique et de la catégories de NiD étudiées. Seules quatre espèces ont été étudiées individuellement : la morue de l'Atlantique (*Gadus morhua*), l'huître plate européenne (*Ostrea edulis*), la crépidule (*Crepidula fornicata*) et l'ascidié japonaise (*Styela clava*). Pour le reste, plusieurs groupes ont été étudiés simultanément, tels que la macrofaune benthique ou les espèces de laminaires (*Laminaria*). Quatre catégories de NiD ont été recensées : l'optimisation de la couche de protection contre l'affouillement (CPA opt.), l'optimisation de la couche de protection de câble (CPC opt.), les unités additionnelles fixées (UAF) et les unités additionnelles autonomes (UAA).

Les études sur la macrofaune benthique concernent majoritairement (74 % - 48 EC) des types de NiD destinés à la couche de protection contre l'affouillement (CPA) (Tableau 1, cellules en jaune). Parmi ceux-ci, on peut retrouver l'emploi de marbre pour l'optimisation de sa nature et sa structure (30 EC), la diminution de la granulométrie moyenne de la CPA pour optimiser uniquement sa structure (15 EC) et différentes stratégies de démantèlement (3 EC) visant principalement à la conserver pour préserver la biodiversité établie sur celle-ci (Tableau 1). On retrouve ensuite 16 EC concernant la catégorie « unités additionnelles autonomes » (UAA), soit 25 % des études sur la macrofaune benthique (Fig 10). Ces

dernières sont intégralement dédiées à l'expérimentation d'un type de NiD, les *Reef cubes*⁵. Enfin, une seule étude de la macrofaune benthique porte sur la catégorie « couche de protection de câble » (CPC), dont l'unique type de NiD identifié est l'ajout de matelas en béton sur les coques protectrices conventionnelles.

L'huître plate : un taxon souvent étudié

La seconde cible biologique la plus concernée parmi les 105 études recensées est l'huître plate européenne (*Ostrea edulis*) avec 34 EC. Les types de NiD identifiés, au nombre de 12, appartiennent tous aux catégories d'optimisation de la couche de protection contre l'affouillement CPA (10 EC) et d'unités additionnelles fixées (UAF) (24 EC) (Fig 10). Parmi les 10 études portant sur *O. edulis* et l'optimisation de la structure et/ou de la nature de la CPA, quatre types de NiDs testent cette optimisation par l'emploi de silex (3 EC), de grès (3 EC), de calcaire (2eEC) et de marbre (2 EC) (Tableau 1). Quant aux 24 études portant sur *O. edulis* et les unités additionnelles fixées, huit types de NiD ont été identifiés. La moitié d'entre eux portent sur l'optimisation de la nature du substrat employé (*GEOWALL*⁶ lisse ou rugueux, pâte pour récif BESE⁷ et *SeaCrete*⁸) et l'autre moitié sur l'optimisation de la nature et de la structure de ce substrat composant l'UAF (acier galvanisé, bloc récifaux, *Econcrete*⁹ et coquilles de moules). Les 24 EC concernées sont réparties de façon homogène entre ces 8 types de NiDs, soient 3 respectivement pour chacun d'entre eux (Tableau 1).

Puis, en quantité beaucoup plus faible, on retrouve les études sur la morue de l'Atlantique *Gadus Morhua* au nombre de trois. Deux études portent sur les unités additionnelles autonomes (UAA) avec, pour type de NiD, l'ajout d'une couche de protection contre l'affouillement à l'unité additionnelle autonome. Une étude porte sur l'optimisation de la nature et de la structure de la couche de protection contre l'affouillement de l'éolienne par emploi de blocs de roche (Figure 10, Tableau 1).

Enfin, la crépidule *Crepidula fornicata*, l'acidie japonaise *Styela clava* et une espèce d'algue brune (non spécifiée), appartenant au genre des Laminariales ou Kelps *Laminaria sp.*, ont toutes trois été étudiées, en compagnie de la macrofaune benthique, à travers l'expérimentation du même type de NiD, l'ajout de matelas en béton pour l'optimisation de la couche de protection de câbles sous-marins destinés à l'acheminement d'énergie électrique produite en mer vers le réseau terrestre.

Deux espèces non natives à enjeu écologique spécifique

Il est important de préciser ici que l'étude primaire portant sur les espèces *C. fornicata* et *S. clava* sur la côte nord de la Bretagne, au large de l'île de Bréhat présentent un enjeu de biodiversité particulier, puisque ce sont deux espèces non indigènes. En effet, *C. fornicata* est un mollusque gastéropode originaire de la côte atlantique d'Amérique du Nord qui a été introduite sur les côtes est de l'Angleterre à la suite d'importation d'huître américaine *Crassostrea virginica* (Blanchard 1997). Le tunicier *S. clava* est quant à lui natif du nord-ouest de l'Océan Pacifique (Japon et Corée entre autres) et aurait été identifié pour la première fois sur les côtes anglaises au début des années 50, acheminé par des navires militaires lors de la guerre de Corée (Minchin et Duggan 1988). Il convient également de souligner que ces deux espèces ont

⁵ Les *Reef cubes* sont des structures de forme généralement cubiques, mais certaines alternatives existent. Ces structures sont produites à partir de matière recyclable et exempts de plastics. Elles sont censées reproduire la complexité d'un habitat rocheux naturel généralement utilisés pour la création de récifs artificiels.

⁶ Le Geowall est un substrat produit à partir de sédiments sableux issus du dragage.

⁷ La pâte de récif BESE (*BESE-reef paste*) est un substrat constitué à 60-80 % de coquilles d'huître concassées et 20-40% d'un agent agglomérant, qui est utilisé comme revêtement et est censé favoriser le recrutement de naissains.

⁸ Le Seacrete est un substrat conçu à partir de fragments de coquilles d'huîtres concassés et agglomérés par une colle polymère fondée sur des propriétés biologiques.

⁹ L'*Econcrete* est un ciment optimisé qui améliore la croissance et le développement d'organismes marins par rapport à un ciment conventionnel.

été suivies dans le cadre de NiDs mis en place pour la création d'habitat (cf Fig 9). Or, lorsque l'objectif d'un NiD est de créer un habitat, il existe un risque réel de favoriser involontairement l'expansion d'espèces non indigènes.

3.2.3. Les métriques utilisées pour mesurer l'efficacité des NiDs

Sur la totalité des études comparatives, 13 métriques ont été identifiées dans la littérature scientifique. Les définitions des principales métriques sont rappelées dans le glossaire présent en Annexe 5. Parmi ces métriques, l'abondance est la plus fréquemment utilisée (27 études comparatives, EC), principalement appliquée à la macrofaune benthique (21 EC) et à *O. edulis* (recrutement de naissains ; 6 EC) (Figure 11). Elle est suivie par la densité (25 EC) utilisée majoritairement sur *O. edulis* (22 EC), mais également pour *S. clava* (1 EC), *Laminaria sp.* (1 EC) et *C. fornicata* (1 EC). Enfin, l'abondance relative (15 EC), et la richesse taxonomique, autre que richesse la spécifique (12 EC), sont utilisées exclusivement pour des études portant sur la macrofaune benthique. En dehors de la richesse taxonomique significativement différente, les trois autres métriques caractérisent avec plus ou moins de précision, un dénombrement rapporté à une surface ou à un volume.

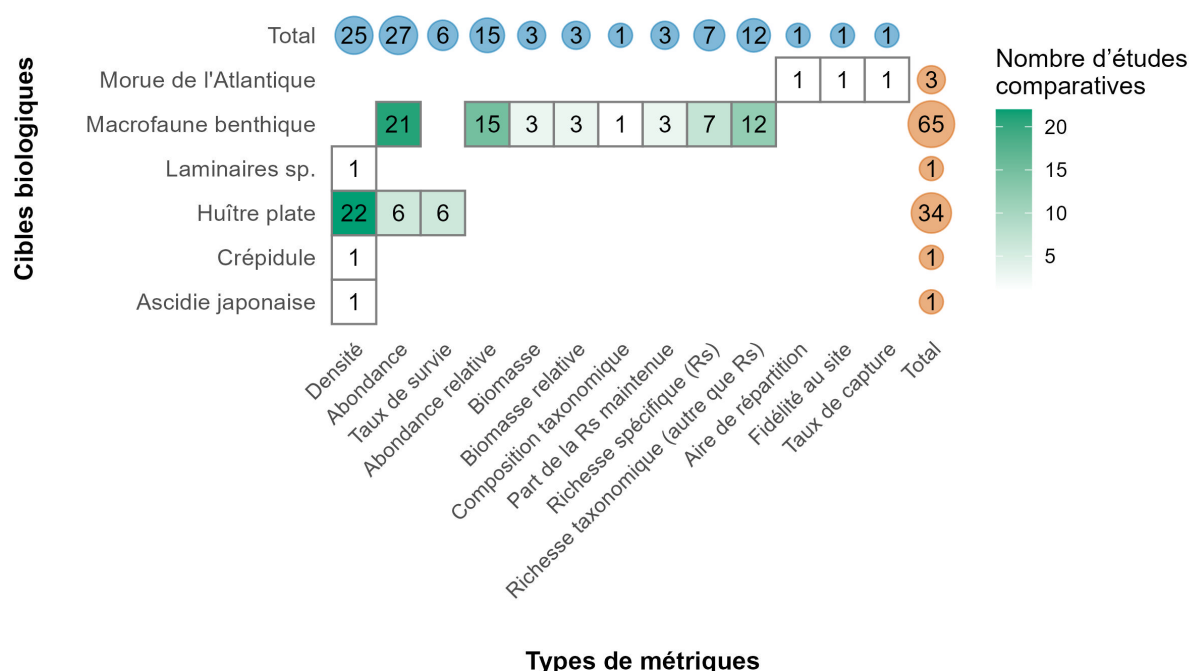


Figure 11 : Carte de chaleur des métriques utilisées en fonction de la cible de biodiversité étudiée. Quatre espèces ont été étudiées individuellement : la morue de l'Atlantique (*Gadus morhua*), l'huître plate européenne (*Ostrea edulis*), la crépidule (*Crepidula fornicata*) et l'ascidie japonaise (*Styela clava*). Pour le reste, plusieurs espèces appartenant à de grands groupes ont été étudiées simultanément, tels que la macrofaune benthique ou les espèces de laminaires sans distinction (*Laminaria sp.*)

Des métriques de biodiversité qui renseignent d'abord sur les espèces et la composition

Bien que le nombre de métriques utilisées au sein de ces études puisse paraître faible (seulement 13), cette observation peut être modérée quand elle est rapportée au nombre de cibles biologiques concernées (n = 6). Cependant, on observe sur la carte de chaleur (Figure 11) une très forte hétérogénéité dans la répartition des métriques entre les cibles biologiques. Cette hétérogénéité s'explique par deux paramètres principaux. En premier lieu, les données initiales présentent un très fort déséquilibre dans

l'échantillonnage entre les cibles biologiques, 65 EC pour la macrofaune benthique et 34 EC pour *O. edulis*, contre 3 EC ou moins pour les autres. Il est donc logique que la première soit caractérisée par huit métrique, alors qu'une seule métrique est mesurée pour étudier *C. fornicata* ou *S. clava*. Le second paramètre est le niveau écologique de ces cibles biologiques. En effet, sur les six cibles recensées dans les EC, cinq d'entre elles concernent une seule espèce (voire en réalité une seule population), alors que la « macrofaune benthique » désigne une communauté d'organismes, pouvant être plus intuitivement décrite par les trois dimensions de la biodiversité (i.e composition, structure et fonction). Ceci est également possible pour les cinq espèces, mais moins réalisé. Ainsi, l'emploi de métriques relatives (abondance et biomasse) et en lien avec la diversité taxonomique (composition, richesse spécifique et autres) ne se réfèrent qu'aux études portant sur un ensemble de groupes taxonomiques (i.e. la macrofaune benthique) plutôt que sur une espèce spécifique (Figure 11).

Des métriques particulières selon la biologie et le cycle de vie des espèces

La nature très spécifique de certaines métriques comme le taux de survie, le taux de capture et la fidélité au site s'applique la plupart du temps à un type de ressource bien définie en fonction de leur biologie et cycle de vie. Ainsi, le taux de survie est très fréquemment utilisé dans l'étude des populations d'huîtres comme *O. edulis*, ou de bivalves en général, pour évaluer les niveaux de recrutement des larves, alors que le taux de capture et la fidélité au site ne seront applicables qu'aux espèces mobiles et plus particulièrement, aux espèces de poissons d'intérêt halieutique comme *G. morhua*.

L'augmentation de métrique : un bon indicateur d'effet sur la biodiversité ?

Soulignons que l'augmentation de certaines métriques pour une espèce ou un groupe d'espèces ne constitue pas une preuve suffisante de l'efficacité d'une mesure de gestion ou de restauration écologique. L'interprétation de tels changements dépend des objectifs poursuivis et d'autres indicateurs retenus pour évaluer les résultats.

- En effet, dans les écosystèmes modifiés de manière soudaine, comme ceux affectés par la construction de parcs éoliens en mer, les modifications touchant les espèces doivent être examinées avec précaution car les hausses de densité ou de biomasse peuvent refléter une simple attraction plutôt qu'une réelle amélioration de l'habitat, pouvant même conduire parfois à constituer de véritables « pièges écologiques » (Reubens et al. 2013). Cette notion désigne l'attraction et potentiellement la résidence d'un organisme pour un habitat où les conditions de vie sont moins optimales que dans les autres habitats disponibles. Les dispositifs de concentration de poisson (DCP) pélagiques peuvent en être un exemple.
- Enfin, l'augmentation de la densité ou de l'abondance d'une population, dans le cas des espèces non-indigènes, comme c'est le cas pour *C. fornicata* et *S. clava* en Europe, ne devrait pas être interprétée comme un signe positif pour la santé des écosystèmes. En effet, les structures éoliennes en mer pourraient jouer le rôle de « *stepping stones* », sites permettant la fixation, la reproduction et la re-dispersion de certains organismes entre deux zones non connectées auparavant (Adams et al. 2014) et jouer ainsi un rôle défavorable dans l'expansion d'aires de colonisation d'espèces non-indigène (envahissantes ou pas). Les NIDs visent justement à limiter ce risque en plébiscitant des substrats supposés moins favorables aux espèces non-indigènes que le béton et l'acier (Hayek et al. 2022).

3.2.4. Effets énoncés des NiDs sur la biodiversité

La Figure 12 présente l'effet « positif » ou « négatif » ou l'absence d'effet pour chaque type de Nature-inclusive Design recensé dans les études retenues pour cette carte systématique, en fonction du lieu d'étude (au sein d'un parc ou hors parc éolien *offshore*). Un effet « positif » caractérise une augmentation de la métrique de biodiversité mesurée et, à l'inverse, un effet « négatif » caractérise une diminution de la métrique mesurée. Lorsque qu'un effet n'était interprétable qu'à partir d'une figure ou d'un graphique présent dans la publication (et non précisé par les auteurs dans le texte), cet effet a été classé comme « NS/Inconnu », respectivement soit en raison d'un résultat testé statistiquement et trouvé non significatif (NS) (et apparaissant comme tel sur la figure), soit de l'absence de test statistique explicite entre les

conditions intervention et contrôle (Inconnus) (pas d'information dans la légende de la figure et/ou dans le texte). Rappelons, pour l'interprétation de cette partie de la synthèse, que l'augmentation d'une seule métrique ne constitue qu'un indice et ne permet pas de confirmer l'efficacité d'une mesure de gestion (ici un type de Nature-inclusive Design). Elle doit être interprétée comme un élément d'information parmi d'autres.

Études *In situ* au sein des parcs éoliens offshore

Seuls cinq types de *Nature-Inclusive Design* (NiD) spécifiques ont été étudiés directement sur des sites de parcs éoliens *offshore* (Figure 12, a : « In situ (parc) »). Parmi ces travaux évaluant leurs effets ($n = 36$ EC, $n = 4$ études primaires), les résultats rapportés révèlent une variabilité des réponses de la biodiversité.

Berges et al. (2024) ont étudié à la fois la fidélité au site et l'aire de répartition de la morue de l'Atlantique (*Gadus morhua*) en comparant l'effet d'une unité additionnelle autonome (UAA) constituée de tuyaux en béton de différents diamètres en présence et en absence de couche de protection contre l'affouillement (CPA) autour de la structure éolienne, afin de savoir si l'effet escompté de cette UAA sur *G. morhua* est dépendant ou non de la présence d'une CPA à proximité. La fidélité au site avec et sans CPA autour de l'éolienne à proximité était d'une ampleur similaire (pas d'effet significatif ; NS). Concernant l'aire de répartition, aucun test statistique n'a été précisé. Par conséquent, l'effet n'est pas significativement interprétable.

Kingma et al. (2024) ont étudié l'efficacité de l'optimisation de la nature du substrat de la CPA en testant un matériau alternatif : le marbre par rapport au béton ou au granite (deux substrats conventionnels). Les arthropodes, les bryozoaires, et les cnidaires étaient plus abondants dans les échantillons de marbre lorsque comparé au granite, mais aucun effet significatif n'a été démontré (NS) par rapport au béton.

Werner et al. (2024) ont étudié le taux de capture de *G. morhua* en comparant deux types de couches de protection contre l'affouillement (CPA) : des blocs rocheux par rapport à des sacs de sable. Les résultats montrent des abondances significativement plus élevées autour des monopieux avec protection en blocs de roches qu'autour des monopieux protégés par des sacs de sable.

Spielmann et al. (2023) ont évalué l'effet de différentes stratégies de démantèlement sur le maintien et la conservation de la biodiversité existante, à partir de données sur la macrofaune benthique présente sur les fondations (de types monopieu, gravitaire et jacket), ainsi que sur les couches de protection contre l'affouillement (CPA). Les cinq sites étaient majoritairement localisés dans des parcs éoliens en mer (parcs de BelWind, C-Power, Princess Amalia, Horns Rev 1 et plateforme de recherche FINO 1). À partir des inventaires de macrofaune de l'ensemble des sites, ils ont simulé la proportion de richesse spécifique qui serait maintenue pour chacune des deux stratégies alternatives de démantèlement envisagées (démantèlement de type 3 : CPA maintenue et fondation coupée à 5 m au-dessus du fond ; démantèlement de type 2 : CPA maintenue et fondation coupée à 1 m en-dessous du fond) en les comparant à un démantèlement maximal (CPA et fondation retirées). Les résultats issus de ces modélisations ont montré que $78,2 \pm 15,7$ % de la richesse spécifique de la macrofaune benthique était maintenue dans le scénario de démantèlement de type 3, contre $69,2 \pm 23,8$ % de richesse spécifique maintenue avec la stratégie de démantèlement de type 2 et 0 % dans un scénario de démantèlement maximal. Le retrait partiel des fondations semble donc présenter un impact moindre sur la perte de la richesse spécifique de la macrofaune benthique, que le retrait intégral de la CPA, qui lui une perte bien plus significative.

Études *In situ* en dehors de parcs éoliens offshore

Au travers des études retenues, 17 types de *Nature-Inclusive Design* (NiD) spécifiques ont été étudiés en dehors de sites de parcs éoliens offshore (Figure 12, b : « In situ (hors parc) »). Si l'on observe 26 lignes d'entrée sur la Figure 12, b, ceci s'explique par le fait que le nombre d'études comparatives (EC) et la nature de l'effet soient présentés en fonction du couple "type de NiD - Comparateur" : l'effet de certains types de NiDs a parfois été évalué selon différents comparateurs. Parmi ces travaux évaluant leurs effets ($n = 69$

EC, $n = 5$ études primaires), les résultats rapportés révèlent également une variabilité des réponses dans les métriques de biodiversité mesurées.

Hofstede et al. (2024) ont étudié les opportunités que propose le remplacement d'un substrat conventionnel par un substrat alternatif, et ce, pour différentes catégories de NiD. Dans l'optique d'installer des couches de protection contre l'affouillement (CPA) composées de grès et de silex (substrat alternatif) plutôt que de granite (substrat conventionnel), l'étude démontre des différences significatives. En effet, le plus grand nombre de naissains (abondance) a été retrouvé sur le granite (comparateur), démontrant ainsi un effet négatif significatif de l'emploi de grès et de silex. Dans l'optique d'installer les unités additionnelles fixées (UAF), les auteurs ont étudié différents matériaux alternatifs : Econcrete, Acier galvanisé, et "blocs récifaux biodégradables" (BESE), par rapport au béton plus fréquemment utilisé. L'emploi des trois substrats alternatifs révèle une absence d'effet par rapport au matériau conventionnel (béton), voire un effet négatif significatif, le substrat BESE n'ayant recueilli aucun naissain d'*O. edulis*. Pour la confection d'UAF, les auteurs ont également étudié l'emploi de coquilles de moules en remplacement des tuiles d'argile couramment utilisées dans les parcs ostréicoles, mais sans succès (absence d'effet dans les trois EC concernées). Les auteurs ont également analysé le taux de survie des naissains entre le grès (substitut) et le granite (conventionnel), sans démontrer de différence significative. En revanche, lorsque les auteurs ont étudié la densité de naissains, prenant alors en compte la surface de substrat disponible, les matériaux alternatifs grès, silex, Econcrete, acier galvanisé et BESE, présentaient un taux de recrutement significativement moins élevé que le granite et le béton, (matériaux utilisés de manière conventionnelle dans la conception de CPA et d'UAF respectivement).

Kamermans et al. (2025) ont étudié la densité des naissains d'huître plate sur différents substrats, en testant des matériaux alternatifs. Ces matériaux, marbre et calcaire, ont été testés dans le but d'optimiser les CPA, ou le déploiement d'unités additionnelles fixées (UAF) pour la pâte de récif BESE, le GEOWALL et le SeaCrete, dans les parcs éoliens offshore. Ces travaux ont montré que pour les UAF, le Seacrete était le matériau le plus performant des substrats alternatifs (potentiellement bénéfique pour l'environnement) testés *in situ*. La densité de naissains y est 6 à 10 fois supérieure que sur le GEOWALL. En revanche, cette conclusion est beaucoup moins évidente quand on compare avec du béton conventionnel (résultat non précisé par les auteurs).

Hickling et al. (2023) ont étudié les groupes trophiques de la macrofaune benthique entre la présence et absence de *Reefs cubes*®. Lorsque les auteurs ont comparé la richesse taxonomique, ils ont trouvé un nombre significativement plus élevé de différents taxons de carnivores sur les sites de *Reefs cubes*® (moyenne $11 \pm 1,09$) que sur les sites témoins (moyenne $1,33 \pm$ -écart-type 0,88). Idem pour les taxons de suspensivores (moyenne $23,8 \pm 3,2$) que sur les sites témoins (moyenne $7 \pm 2,1$).

Zupan et al. (2024) ont étudié l'optimisation de la structure 3D de la CPA en modifiant sa granulométrie. Les auteurs se sont intéressés à plusieurs métriques. Lorsqu'ils ont comparé deux compositions de taille de pierres – 60 % grosses pierres + 30 % petites pierres (traitement) vs. 60% grosse pierre uniquement (témoin) –, la richesse spécifique était significativement plus élevée dans le traitement que dans les sites témoins, confirmant les études qui démontrent que les matériaux à surface rugueuse présentent une richesse supérieure aux matériaux à surface lisse.

Taormina (2019) a étudié l'efficacité de matelas en béton destinés à protéger le câble (couche de protection de câbles optimisée) de transport de l'électricité produite sur le site d'essai hydrolien de Paimpol-Bréhat. La composition taxonomique des communautés épibenthiques différait significativement entre les matelas en béton et les substrats de protection conventionnels (demi-coques en fonte). De plus, les densités de *Laminaria sp.* se sont avérées plus élevées sur les matelas en béton, atteignant une densité moyenne maximale de $185,2 \pm 43,3$ ind/m² au cours de l'étude. Enfin, Taormina (2019) a aussi mis en évidence que la densité des populations de *C. fornicata* et *S. clava* avait fortement augmentée dans les premières années, signe de la colonisation rapide du nouveau substrat, pour finalement décroître et se stabiliser à des niveaux similaires aux substrats naturels, démontrant une absence d'effet significatif du NiD. Ces organismes étant déjà présent dans le milieu d'étude, ces travaux n'ont pas démontré que cette structure avait favorisé la dispersion de ces espèces non-indigènes, mais néanmoins, qu'elles en ont le potentiel.

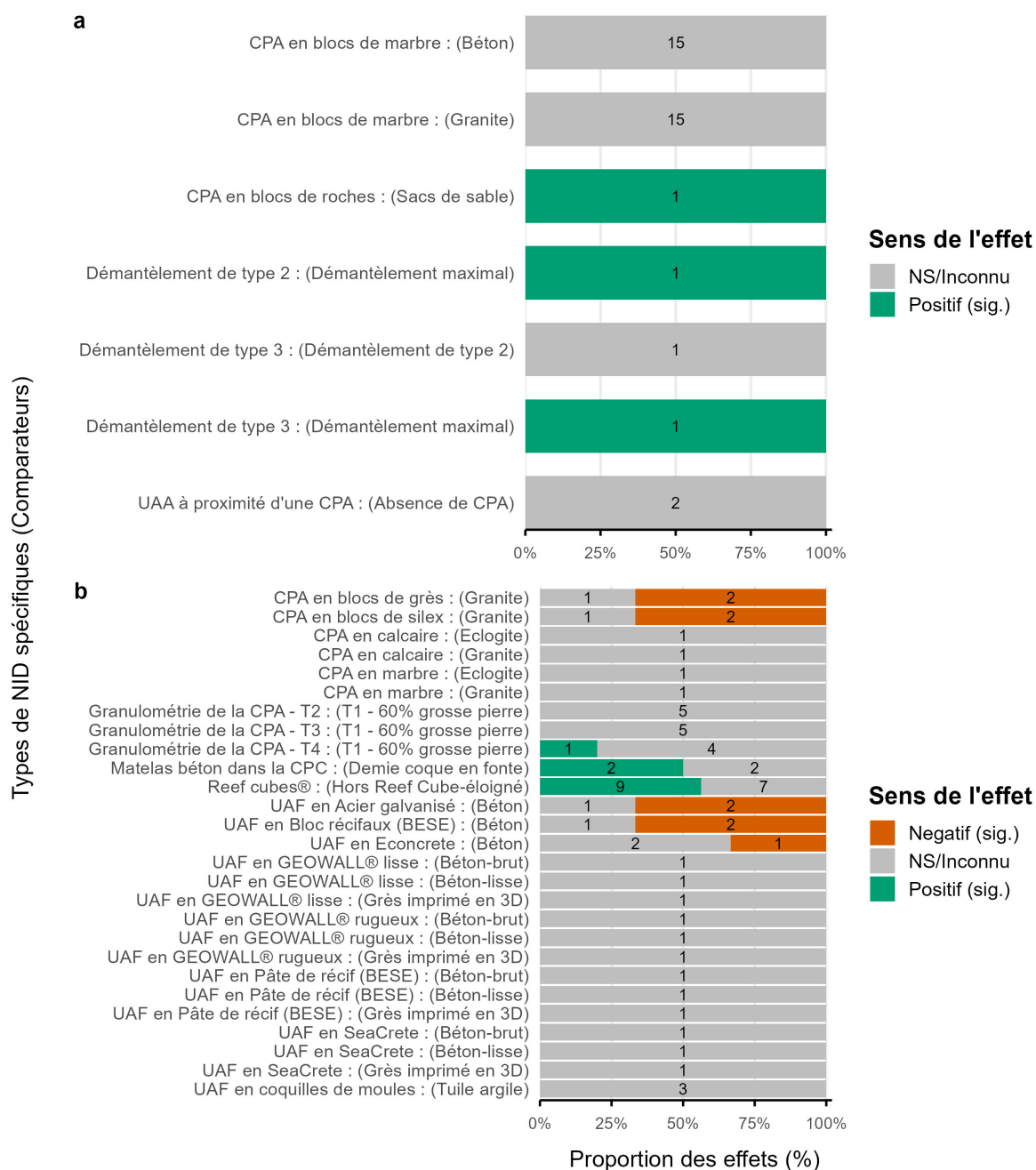


Figure 12 : Nombre d'études comparatives recensées en fonction du type de Nature-inclusive Design (NiD) et de la nature de l'effet sur la métrique de biodiversité dans les parcs éoliens marins (panel a) et en dehors des parcs, mais applicable (panel b).

CPA = Couche de protection contre l'affouillement, CPC = Couche de protection de câble, UAF = Unité additionnelle fixée, UAA = Unité additionnelle autonome. Les blocs récifaux circulaires biodégradables (UAF) sont produits par la société BESE. Démantèlement maximal = CPA et fondations retirées intégralement ; Démantèlement de type 2 = CPA conservée et fondations coupées à 1 mètre en-dessous du fond ; Démantèlement de type 3 = CPA conservée et fondations coupées à 5 mètres au-dessus du fond.

Sur l'axe-y, le NiD spécifique avec son comparateur spécifique entre parenthèses. Les effets négatifs (en orange) correspondent à une diminution de la métrique de biodiversité étudiée dans le groupe intervention et les positifs (en vert) à une augmentation de cette dernière. Lorsque qu'un effet n'était interprétable qu'à partir d'une figure ou d'un graphique présent dans la publication (et non précisé par les auteurs dans le texte), ce dernier a été classé comme « NS/Inconnu », respectivement soit en raison d'un résultat testé statistiquement et trouvé non significatif (NS), soit de l'absence de test statistique explicite entre les conditions intervention et contrôle (Inconnu).

3.3. LIMITES ET INTERPRETATION DE L'ETUDE

Un nombre important de publications a été identifié lors de la phase de recherche (1 523 mentions sans les doublons), mais seulement neuf d'entre elles (soit 0,6 %), représentant néanmoins plus d'une centaine d'études comparatives, ont été retenues pour cette « carte systématique ». Ce faible ratio, lié à l'utilisation fréquente de mots-clés relatifs aux NiDs dans des articles couvrant parfois des sujets très éloignés, démontre la rareté de la littérature existante et de protocoles scientifiques expérimentaux sur ce sujet. Cela confirme que le sujet est récent, qu'il suscite peu de projet ou que la terminologie n'est pas encore fixée. D'une part la recherche n'a pas encore établi de consensus sur ses propres termes (GGI, Eco-Design, Eco-conception, Nature Positive Design, Green Marine Construction, etc ...), d'autre part les industriels qui développent les NiDs diversifient régulièrement le vocabulaire technique et commercial. Enfin, une dernière explication pourrait être que ces mesures de NiD ne sont pas encore développées dans un but premier d'amélioration de la biodiversité. Le cadre mondial KM encore récent, n'est peut-être pas encore suffisamment entré dans les mécanismes de décision des secteurs privés et institutionnels, où les incitations réglementaires pour un gain net de biodiversité peinent encore à se mettre en place.

Ce faible nombre d'études peut également être expliqué par le choix de nos critères de sélection, en particulier concernant le comparateur. Dans le cadre de l'évaluation de l'efficacité des CPA, nous avons fait le choix explicite d'exclure les études comparant la présence d'une CPA à son absence (c.-à-d. des protocoles de type « intervention vs habitat naturel »), afin d'éviter de prendre en considération l'effet récif artificiel de la protection contre d'affouillement, observé sur tout ouvrage immergé en mer, sans apports ciblés sur des espèces par une modification avec un NiD. De plus nous avons également fait le choix d'exclure les études *ex situ*. En effet, les conditions expérimentales en bassin et en milieu naturel étant radicalement différentes, des résultats positifs observés *ex situ* n'aurait pas pu être considérés comme transposables au milieu naturel et inversement, et n'auraient donc pas pu apporter d'éléments de réponse fiables. Enfin, seuls des termes de recherche en anglais ont été utilisés. Il n'y a pas eu de recherche plus approfondie de la littérature grise en anglais et dans d'autres langues. Cela a pu influencer les résultats en termes d'identification de littérature pertinente pour un sujet aussi récent que celui-ci. Cet effet aurait été plus marginal pour une question où la littérature académique anglophone est abondante.

À notre connaissance, aucune autre carte systématique n'existe spécifiquement sur l'efficacité des *Nature-inclusive Designs*. Une autre revue de type « cartographique », ainsi qu'un travail fondé sur une consultation d'experts, offrent un état des connaissances (Annexe 3). Néanmoins, bien que ces travaux se basent sur une littérature plus abondante, d'importantes différences méthodologiques existent. Par exemple, la revue de Pardo et al. (2023) et celle de Hermans et al. (2020) ne couvrent pas l'ensemble de la biodiversité, ou leurs critères d'éligibilité sont difficiles à déterminer. Dans le cas de Pardo et al., aucun critère relatif aux comparateurs n'est précisé, alors qu'il est important de retenir et décrire des protocoles expérimentaux (c.-à-d. les études comparatives), afin de bien cibler et fournir des informations sur l'efficacité des NiDs.

Enfin, il convient de souligner qu'une prudence est nécessaire dans l'interprétation du « vote counting » illustré en Figure 12. En effet, cette illustration représente un simple dénombrement des études comparatives montrant un effet positif, négatif ou nul, de chaque type de NiD sur la métrique de biodiversité associée. Cette approche ne prenant pas en compte la taille des effets, l'effort d'échantillonnage des études, ni leur niveau de biais, il n'est donc pas possible d'accorder à ces résultats, un degré de confiance suffisant pour en déduire l'efficacité ou non d'une mesure de Nature-inclusive Design. Néanmoins, cette analyse est proposée comme un outil purement descriptif pour identifier des tendances générales. Elle permet ainsi de mettre en évidence que la plupart des mesures évaluées parmi la centaine d'études comparatives retenues dans le cadre de cette cartographie, tendent à démontrer une absence d'effet, voire un effet négatif, sur la métrique de biodiversité considérée.

4. CONCLUSIONS ET OPPORTUNITES

Cette carte systématique met en évidence les connaissances sur l'efficacité des mesures de type *Nature-inclusive Design* appliquées - ou applicables - aux parcs éoliens en mer sur la biodiversité marine. Les neuf publications primaires, retenues à l'issue de la sélection de la littérature pré-identifiée, ont permis de discriminer 105 études comparatives, mettant chacune en avant l'effet d'un type de *Nature-inclusive Design* illustré par l'évolution d'une métrique rattachée à une espèce ou un cortège d'espèces.

En contexte de parc éolien en mer, 36 études comparatives (EC) issues de quatre publications primaires présentent des résultats sur l'effet de cinq types de *Nature-inclusive design*. Le maintien de la couche de protection contre l'affouillement après le retrait de l'éolienne est un élément clé du maintien de la diversité de la macrofaune benthique existante, d'après trois études comparatives issues de modélisation. Ceci peut s'expliquer par une affinité supérieure des organismes composant ce cortège d'espèces pour les substrats durs utilisés dans la conception des CPA, par rapport aux sédiments principalement meubles des fonds marins alentours. En revanche, le maintien des fondations d'éoliennes, en les découpant à 5 m au-dessus du fond, semble jouer un rôle moins important dans le maintien de cette biodiversité benthique, et d'autant plus lorsque la CPA est déjà conservée. Le choix du type matériaux, par la nature de sa surface semble là aussi être un facteur prépondérant de gain de biodiversité, comme réel effort de NiD. Sur les 30 études comparatives analysant l'effet de l'emploi de marbre pour l'optimisation de la nature et de la structure de la couche de protection contre l'affouillement, seules quelques une présentent un effet positif sur l'abondance de taxons ou l'abondance relative de groupes fonctionnels appartenant à la macrofaune benthique, mais aucun de ces résultats n'était statistiquement significatif. Enfin, l'utilisation de blocs de roche pour l'optimisation de la nature et de la structure de la couche de protection contre l'affouillement démontre un effet positif sur le taux de capture de la Morue de l'Atlantique (*Gadus morhua*). En revanche, la présence d'une couche de protection contre l'affouillement lors du déploiement d'une unité additionnelle autonome, ne semble pas avoir d'effet significatif sur la fidélité au site ou l'aire de répartition (*home range*) des individus de cette même espèce.

Certaines études comparatives présentées dans cette synthèse ne sont pas le fruit d'un protocole expérimental déployé dans un parc éolien en mer. Néanmoins, les auteurs ont précisé dans leur publication que la mesure de *Nature-inclusive Design* évaluée était tout à fait adapté à une application en ce sens. Ces 69 études comparatives sont issues de cinq publications primaires et présentent des effets contrastés, positifs, neutres, mais également négatifs, de 17 types de NiD.

Quatre d'entre elles évaluaient l'ajout de matelas en béton conventionnel (sans rugosité à visée écologique ou éco-conçu) pour optimiser la couche de protection des câbles et ont démontré un changement significatif de la composition taxonomique de la macrofaune benthique, une augmentation significative de la densité des algues brunes du genre *Laminaria sp.*, mais pas d'évolution significative de la densité des population de la crépidule *C. fornicata* et de l'ascidie japonaise *S. clava*. Quinze études comparatives analysaient l'effet de l'optimisation de la structure de la couche de protection contre l'affouillement par la modification de la granulométrie moyenne et n'ont montré un effet positif significatif que sur la richesse spécifique de la macrofaune benthique, et ce, uniquement lorsque le mélange de granulats atteignait 30% de petites pierres. Aucun effet n'a été démontré sur l'abondance et la biomasse des individus ou encore sur l'abondance relative et la biomasse relative des groupes taxonomiques de cette même communauté. En revanche, seize études comparatives supplémentaires ont évalué l'effet des *ReefCubes* (récifs artificiels de fond) comme unité additionnelle autonome et plus de la moitié démontre une augmentation significative de la richesse taxonomique de la macrofaune benthique qui se développe sur ces structures, en comparaison avec un habitat naturel sur lequel ce type de NiD n'aurait pas été déployé.

Enfin, les 34 études comparatives restantes, réalisées hors parc éolien, étudiaient l'effet des NiDs dans une optique de restauration des populations d'Huître plate européenne. Dix d'entre elles ont analysé les effets de l'utilisation de substrats alternatifs tels que le grès, le silex, le calcaire et le marbre pour l'optimisation de la nature et/ou de la structure de la couche de protection contre l'affouillement. Elles ont toutes démontré une absence d'effet « nurserie » significatif sur l'abondance, la densité ou le taux de survie des naissains, voire un effet négatif dans le cas des quatre études évaluant le remplacement du

granite conventionnel par le grès ou le silex. De plus, les études concernant l'utilisation de matériaux alternatifs pour l'optimisation des unités additionnelles fixés apportent des résultats de nature similaire. En effet, les 24 études comparatives analysant l'effet de l'utilisation de matériaux alternatifs comme la pâte pour récif (BESE), le GEOWALL lisse, le GEOWALL rugueux, le SeaCrete ou encore l'Econcrete, l'acier galvanisé, les blocs récifaux circulaires biodégradables (BESE) et les coquilles de moules, en remplacement de bétons conventionnels, de grès ou de tuiles en argile, démontrent soit une absence d'effet, soit un effet négatif sur le taux de survie, l'abondance et/ou la densité des naissains d'Huître plate européenne.

La présente carte systématique sur l'effet des solutions de *Nature-inclusive Design* sur la biodiversité, démontre donc que la littérature disponible ne permet aujourd'hui, ni de conclure objectivement sur l'efficacité écologique des NiDs, ni même, pour plusieurs d'entre eux, d'affirmer qu'ils répondent réellement aux objectifs de restauration ou de protection de la biodiversité. En effet, pour chaque NiD, il est primordial de contextualiser les effets au regard des espèces ou fonctions ciblées, de la métrique qui le caractérise, du comparateur (substrat conventionnel par exemple) et de l'échelle de comparaison (spatiale et/ou temporelle) du protocole scientifique déployé. Enfin, le type d'habitat et la nature physico-chimique du sédiment du site de déploiement d'une solution de *Nature-inclusive Design*, éléments peu documentés dans les études recensées, sont également des déterminants essentiels des effets de ces types de mesures.

4.1. IMPLICATIONS POUR LA RECHERCHE

Le développement des éoliennes en mer, en particulier lorsqu'elles intègrent des approches de *Nature-inclusive Design* constitue un nouveau champ de recherche prometteur, car en accord avec les objectifs du Cadre mondial pour la biodiversité de la COP15. Leur développement rapide dans les années à venir, dans le cadre des objectifs de réduction des émissions de CO₂, rend l'étude de leurs impacts sur la biodiversité marine essentielle pour sa préservation et son renforcement par un gain net positif (objectif de "Nature Positive").

Comme nous l'avons montré, l'intégralité des études recensées dans cette carte systématique se concentrent sur la Manche-Mer du Nord et les Mers Celtiques, incluses, à l'échelle mondiale, à la zone « Atlantique Nord-Est ». Cependant, des parcs éoliens en service ou en phase de construction existent dans d'autres zones (en Atlantique ou Méditerranée notamment). Ces derniers impactent des écosystèmes et des cortèges d'espèces différents et présentent donc des enjeux de biodiversité potentiellement majeurs. Cela suggère que les connaissances en provenance de ces autres régions restent très limitées ou sont peu accessibles. Il semble donc important, non seulement d'augmenter les efforts de recherche sur les sites déjà étudiés afin de renforcer la connaissance existante, mais aussi d'étendre les études à ces autres régions européennes et mondiales. Enfin, il est également recommandé d'encourager la publication de ces nouvelles sources de connaissance dans des revues scientifiques anglophones, afin qu'elles puissent être diffusées, accessibles et mobilisables par le plus grand nombre.

Outre le fait que la littérature existante soit relativement rare et géographiquement contrainte, un second écueil qui ressort de ces travaux est la faible diversité des mesures prises en compte. Comme le montre cette carte systématique, la grande majorité des études reposent sur des métriques élémentaires (abondance, densité, richesse taxonomique), appliqués principalement à la macrofaune benthique ou à *Ostrea edulis*. Or ces métriques décrivent avant tout des changements de composition liés à un changement de substrat, mais pas à un état écologique de référence, ni à une trajectoire de conservation. On manque donc de référentiels établis permettant de déterminer si un effet mesuré correspond à une amélioration écologique ou simplement à une réorganisation opportuniste de la faune, voire un phénomène d'attraction sans gain fonctionnel ("piège écologique") ou encore, la dispersion d'espèces non-indigènes par des substrats non spécifiques (e.g. non biomimétiques). Dans ce contexte, il est difficile de déterminer avec ces métriques seules, si un NiD "fonctionne" réellement au regard d'objectifs de conservation. Afin de palier à cette problématique, l'analyse des changements structurels et fonctionnels des espèces, populations et communautés concernées par la mise en place de NiD, permettrait d'obtenir une vision holistique de leurs effets sur la biodiversité. Des approches fondées sur la richesse spécifique

d'espèces d'intérêt patrimonial, la dynamique de populations halieutiques menacées, ou la compétition entre clades autochtones et non indigènes semblent beaucoup plus adaptées pour évaluer si une solution de NiD contribue ou non à un gain écologique réel à l'échelle régionale.

Enfin, le sujet étant récent, la plupart des études sont relativement brèves (utilisation d'un protocole d'étude de type avant-après, ou control-intervention) et en partie en dehors des parcs éoliens. Or, comme c'est le cas pour les communautés de macrofaune benthique, les stades de colonisation intermédiaire et de climax nécessite au moins 3 à 6 ans pour se mettre en place (Degraer et al. 2020). Des études sur des temps plus long et démarrant parfois même avant la mise en fonctionnement des parcs (post-installation), permettraient de mieux suivre l'évolution de la biodiversité, sous l'influence des mesures de *Nature-inclusive Design*, jusqu'à des stades structurels plus complexes.

4.2. IMPLICATIONS POUR LES ACTEURS ET POUR LES POLITIQUES PUBLIQUES

Les résultats de notre carte systématique, mis en relation avec d'autres synthèses de la littérature, peuvent être utiles pour les gestionnaires et les décideurs. À notre connaissance, aucune autre carte systématique n'existe spécifiquement sur l'efficacité des solutions de « Nature-inclusive Designs » dans les parcs éoliens en mer. Cette étude fait donc état des effets évalués de certaines de ces mesures sur la biodiversité marine. Néanmoins, le *vote counting* présenté dans les résultats de l'étude, doit être interprété avec précaution et envisagé comme une évaluation provisoire, permettant d'identifier des tendances générales, plutôt qu'une preuve définitive de l'efficacité d'une intervention ou d'une mesure.

Aussi, cette carte met en évidence que le principe de précaution doit être déployé : décider en contexte d'incertitude, donc peser avantages et inconvénient à agir, abandonner un projet ou procrastiner. En effet les données existantes sont très parcellaires, tant sur la diversité géographique des preuves, que sur les types de Nature-inclusive Design évalués ou encore, la diversité des cibles biologiques et des métriques analysées. De plus, sur les 22 types de NiD recensés dans cette carte systématique, seulement cinq ont été étudiés in situ (en conditions naturelles) et au sein de parcs. Parmi eux, 14 se focalisent sur l'utilisation des matériaux ou substrats alternatifs. À ce stade, la littérature semble donc se concentrer davantage sur l'étude de la nature et de la structure des substrats constituant les dispositifs, que sur la diversité des designs des dispositifs eux-mêmes, qu'ils soient innovants ou déjà existants et employés par ailleurs. C'est donc une piste de recherche qui demande à être déployée.

Le choix d'une solution de NiD à déployer doit être guidé par la fonction écologique recherchée. Le rapport montre bien que la création de substrats durs entraîne systématiquement une réattribution d'habitat avec un cortège faunistique nouveau, mais cela ne préjuge ni de l'intérêt, ni de la valeur écologique de ce nouvel habitat. La complexité réside donc dans le fait de créer un nouvel habitat certes, mais un habitat "utile". La macrofaune benthique est massivement utilisée comme compartiment d'étude, vraisemblablement parce qu'elle est plus facilement accessible techniquement. Mais cela en fait un indicateur très indirect pour évaluer un changement d'habitat d'un substrat meuble vers un substrat dur. La macrofaune est avant tout structurée par la granulométrie, l'hydrodynamisme et la matière organique, des paramètres qui ne sont pas ceux qu'un NiD cherche à optimiser. De fait, observer une modification des assemblages macro-benthiques ne renseigne que très peu sur la pertinence du NiD au regard d'enjeux de conservation ou de restauration. Il serait alors stratégique de faire ce choix avec une intention claire de conservation ciblée, comme par exemple, favoriser la connectivité écologique, appuyer les efforts des AMP locales, restaurer des populations vulnérables (comme *O. edulis*, lorsqu'il existe un continuum écologique cohérent).

En plus de clarifier les objectifs écologiques, il serait également nécessaire d'étendre les études existantes à d'autres éléments de biodiversité. En terme de ressources halieutiques, seules *Ostrea edulis* et la morue de l'Atlantique *Gadus morhua* a été considérées dans le cadre de la mise en place d'un NiD. Il serait tout à fait pertinent de s'intéresser à d'autres espèces de poissons et crustacés, tout aussi fréquentes dans les régions concernées, dont les stocks sont exploités ou non, et qui pourraient réagir différemment à la mise en place de ces mesures. Les populations de moules communes (*Mytilus edulis*), de bar commun (*Dicentrarchus labrax*), de tourteau (*Cancer pagurus*), de homard européen (*Homarus gammarus*) ou de langouste commune (*Palinurus elephas*), connaissant également un fort déclin dans ces sous-régions

marines, pourrait constituer des sujets d'étude complémentaires sur cet enjeu particulier de restauration et conservation d'espèces cibles.

Mutualiser les efforts de recherche sur les effets générés par le déploiement de ces solutions innovantes avec les politiques publiques pourrait constituer une opportunité supplémentaire intéressante. En effet, la Directive-cadre sur le milieu marin (DCSMM) vise à renseigner un ensemble de descripteurs du bon état écologique des milieux marins comme la diversité biologique, les réseaux trophiques, les espèces non-indigènes ou encore les espèces commerciales. Parvenir à intégrer l'enjeu du déploiement des énergies renouvelables aux campagnes d'acquisition de données déployées dans le cadre de la DCSMM, pourrait permettre d'étendre la diversité des taxons et des métriques de biodiversité évalués pour mesurer plus finement l'efficacité des solutions de Nature-inclusive Design.

Par ailleurs, cette carte systématique met également en évidence la complexité d'interprétation des résultats issus des études, souvent liée à des protocoles perfectibles et souvent de courte durée, quelques mois voire une à deux années. Ceci s'explique en partie par le déploiement récent de ce type de solutions par les gestionnaires au sein des parcs, ainsi que par la complexité probable de mener des études de longue durée mettant en œuvre des interventions fréquentes dans ces aires marines, où l'accès et la navigation y sont relativement restreintes. L'évaluation des effets des Nature-inclusive Design sur l'évolution longue d'un ensemble d'espèces cibles et de compartiments suffisamment représentatifs de la biodiversité dans son ensemble, nécessite la mise en place de protocoles d'étude avec des comparaisons temporelles plus longues. Il serait donc intéressant de pouvoir nouer des partenariats entre la recherche, développeurs et gestionnaires de parcs éolien en mer, afin de pouvoir lever les contraintes précédemment évoquées de temporalité et de facilitation d'accès aux infrastructures concernées et à leurs modifications pour développer des NIDs pilotes. Enfin, le développement de l'éolien en mer représente une opportunité considérable pour les bureaux d'études qui ne doivent pas se satisfaire de métriques faciles à produire, mais très limitées en pouvoir explicatif. Le défi est donc de sortir de cette logique descriptive pour entrer dans une logique d'évaluation écologique robuste, adossée à des objectifs de conservation explicites à l'échelle régionale.

Globalement, cette carte met en évidence où se situent les lacunes de connaissances : plus de techniques et dispositifs d'ingénierie écologique à étudier, considérer la biodiversité en termes de groupes fonctionnels plutôt que d'espèces, et pas seulement en termes d'abondance, étudier les grandes zones marines et pas seulement l'Atlantique Nord-Est. Comblar ces lacunes dans les recherches futures permettra des synthèses plus robustes et soutiendra une prise de décision fondée sur les preuves, pour une gestion et un développement efficace de la biodiversité dans les parcs éoliens en mer. Les futurs projets éoliens pourraient mieux s'intégrer à l'environnement en adoptant des mesures de NID, notamment grâce à l'éco-conception de leurs infrastructures assurant des supports adaptés, biomimétiques efficaces pour la biodiversité, durant toute la durée de vie de ces ouvrages. Ces gains de biodiversité pourraient dès lors être quantifiés (suivis longs, métriques sur cibles ex-ante) et valorisés en réponse aux impératifs de "nature positif" d'une part, et de production d'énergie à faible émission de CO2 d'autre part. En luttant à la fois contre l'érosion de la biodiversité et le changement climatique, ces projets industriels permettrait alors d'engager une transition vers des modes de production énergétique résolument plus durables.

5. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adams, Thomas P., Raeanne G. Miller, Dmitry Aleynik, et Michael T. Burrows. 2014. « Offshore Marine Renewable Energy Devices as Stepping Stones across Biogeographical Boundaries ». *Journal of Applied Ecology* 51 (2): 330-38. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12207>.
- Berges, B. J. P., I. van der Knaap, O. A. van Keeken, J. Reubens, et H. V. Winter. 2024. « Strong site fidelity, residency and local behaviour of Atlantic cod (*Gadus morhua*) at two types of artificial reefs in an offshore wind farm ». *Royal Society Open Science* 11 (7): 240339. <https://doi.org/10.1098/rsos.240339>.
- Blanchard, Michel. 1997. « Spread of the Slipper Limpet *Crepidula Forficata* (L. 1758) in Europe. Current State Dans Consequences ». *Scientia Marina* 61 (Suppl.2): 109-18.
- Bonfanti, Jonathan, Joseph Langridge, A. Avadí, et al. 2025. « Geographic, Taxonomic and Metric Gaps in Biodiversity Research Limit Evidence-Based Conservation in Agricultural Landscapes: An Umbrella Review ». *Ecology Letters* 28 (10): e70220. <https://doi.org/10.1111/ele.70220>.
- Bull, Joseph William, et Niels Strange. 2018. « The Global Extent of Biodiversity Offset Implementation under No Net Loss Policies ». *Nature Sustainability* 1 (12): 790-98. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0176-z>.
- Collaboration for Environmental Evidence. 2022. « Guidelines and Standards for Evidence synthesis in Environmental Management. Version 5.1 (AS Pullin, GK Frampton, B Livoreil & G Petrokofsky, Eds) ».
- Degraer, Steven, Drew A. Carey, Joop W. P. Coolen, Zoë L. Hutchison, et Francis Kerckhof. 2020. « Offshore Wind Farm Artificial Reefs Affect Ecosystem Structure and Functioning: A Synthesis ». *Oceanography* 33 (4): 48-57. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2020.405>.
- Firth, Louise B., Jessica Bone, Aaron Bartholomew, et al. 2024. « Coastal greening of grey infrastructure: an update on the state of the art ». *Maritime Engineering* 177 (2): 35-67. <https://doi.org/10.1680/jmaen.2023.003>.
- Haddaway, Neal R. 2020. *ROSES_flowchart: R package and Shiny app for generating systematic review and map flow diagrams*. Zenodo, released novembre 28. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4294810>.
- Haddaway, Neal R., Charles T. Gray, et Matthew Grainger. 2021. « Novel tools and methods for designing and wrangling multifunctional, machine-readable evidence synthesis databases ». *Environmental Evidence* 10 (1): 5. <https://doi.org/10.1186/s13750-021-00219-x>.
- Haddaway, Neal Robert, Alexandra Mary Collins, Deborah Coughlin, et Stuart Kirk. 2015. « The Role of Google Scholar in Evidence Reviews and Its Applicability to Grey Literature Searching ». *PLOS ONE* 10 (9): e0138237. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0138237>.
- Harzing, Anne-Wil. 2007. « Publish or Perish ». Harzing.com_Research in International Management. <https://harzing.com/resources/publish-or-perish>.
- Hayek, M, M Salgues, J C Souche, K D Weerd, et S Pioch. 2022. « From Concretes to Bioreceptive Concretes, Influence of Concrete Properties on the Biological Colonization of Marine Artificial Structures ». *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 1245 (1): 012008. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1245/1/012008>.

- Hermans, Annemiek, Oscar Bos, et Ivana Prusina. 2020. *Nature-Inclusive Design: a catalogue for offshore wind infrastructure*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10942.02882>.
- Hickling, Samuel, James Murphy, Caitlin Cox, Sebastian Mynott, Tom Birbeck, et Steve Wright. 2023. « Benthic invertebrate biodiversity enhancement with reef cubes®, evidenced by environmental DNA analysis of sediment samples ». *Ecological Engineering* 195 (octobre): 107064. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.107064>.
- Hofstede, R. ter. 2024. « Engineering nature-inclusive marine infrastructure with an emphasis on flat oyster reef development in offshore wind farms in the Southern North Sea ». Dissertation (TU Delft). <https://doi.org/10.4233/uuid:fa230660-31cc-4ded-8b94-2aadd19038fb>.
- Hofstede, Remment ter, Sterre Witte, Pauline Kamermans, Mark van Koningsveld, et Linda Tonk. 2024. « Settlement success of European flat oyster (*Ostrea edulis*) on different types of hard substrate to support reef development in offshore wind farms ». *Ecological Engineering* 200 (mars): 107189. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2024.107189>.
- James, Katy L., Nicola P. Randall, et Neal R. Haddaway. 2016. « A methodology for systematic mapping in environmental sciences ». *Environmental Evidence* 5 (1): 7. <https://doi.org/10.1186/s13750-016-0059-6>.
- Kamermans, Pauline, Fleur Anteau, Karin Didderen, et al. 2025. « Novel settlement substrates for European flat oyster (*Ostrea edulis*) restoration ». *Ecological Engineering* 212 (février): 107532. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2025.107532>.
- Kingma, Enzo M., Remment ter Hofstede, Edwin Kardinaal, et al. 2024. « Guardians of the seabed: Nature-inclusive design of scour protection in offshore wind farms enhances benthic diversity ». *Journal of Sea Research* 199 (juin): 102502. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2024.102502>.
- Langridge, Joseph, Jules Ennochi-Miroux, Sylvain Pioch, et al. 2025. *What Evidence Exists on the Effectiveness of Nature-Inclusive Designs for Marine Biodiversity in Offshore Wind Farms? A Systematic Map Protocol*. novembre 21. <https://ecoevorxiv.org/repository/view/10839/>.
- Livoreil, Barbara, Julie Glanville, Neal R. Haddaway, et al. 2017. « Systematic searching for environmental evidence using multiple tools and sources ». *Environmental Evidence* 6 (1): 23. <https://doi.org/10.1186/s13750-017-0099-6>.
- Minchin, Dan, et Colm B. Duggan. 1988. « The Distribution of the Exotic Ascidian, *Styela clava* Herdman, in Cork Harbour ». *The Irish Naturalists' Journal* 22 (9): 388-93.
- Pardo, Juan Carlos Farias, Magnus Aune, Christopher Harman, Mats Walday, et Solrun Figenschau Skjellum. 2023. « A synthesis review of nature positive approaches and coexistence in the offshore wind industry ». *ICES Journal of Marine Science*, décembre 5, fsad191. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsad191>.
- Pioch, Sylvain, et Jean-Claude Souche. 2021. « L'écoconception des infrastructures maritimes: Vers un aménagement intégré à l'environnement ». *ISTE Group*. <https://www.istegroup.com/fr/produit/lecoconception-des-infrastructures-maritimes/>.
- Pogoda, Bernadette, Tanja Hausen, Marko Rothe, et al. 2023. « Come, Tell Me How You Live: Habitat Suitability Analysis for *Ostrea Edulis* Restoration ». *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 33 (7): 678-95. <https://doi.org/10.1002/aqc.3928>.

- Reubens, Jan T., Sofie Vandendriessche, Annemie N. Zenner, Steven Degraer, et Magda Vincx. 2013. « Offshore wind farms as productive sites or ecological traps for gadoid fishes? – Impact on growth, condition index and diet composition ». *Marine Environmental Research* 90 (septembre): 66-74. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2013.05.013>.
- Spielmann, Vanessa, Jennifer Dannheim, Thomas Brey, et Joop W. P. Coolen. 2023. « Decommissioning of offshore wind farms and its impact on benthic ecology ». *Journal of Environmental Management* 347 (décembre): 119022. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119022>.
- Taormina, Bastien. 2019. « Potential Impacts of Submarine Power Cables from Marine Renewable Energy Projects on Benthic Communities ». Phdthesis, Université de Bretagne occidentale - Brest. Archimer. <https://theses.hal.science/tel-03078936>.
- Werner, Karl M., Holger Haslob, Anna F. Reichel, Antje Gimpel, et Vanessa Stelzenmüller. 2024. « Offshore wind farm foundations as artificial reefs: The devil is in the detail ». *Fisheries Research* 272 (avril): 106937. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2024.106937>.
- Zupan, Mirta, Joop Coolen, Ninon Mavraki, et al. 2024. « Life on every stone: Characterizing benthic communities from scour protection layers of offshore wind farms in the southern North Sea ». *Journal of Sea Research* 201 (octobre): 102522. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2024.102522>.

6. ANNEXES

ANNEXE 1 : METHODOLOGIE COMPLETE DE LA CARTE SYSTEMATIQUE

A1. 1 STRATEGIE DE RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

A1. 1. 1 Questionnement scientifique et protocole PICO

La construction de cette recherche bibliographique structurée repose sur trois étapes essentielles visant à garantir la pertinence et l'exhaustivité du corpus retenu :

1. Co-construire et définir la question de recherche à laquelle la carte systématique doit répondre.
2. Traduire cette question en différents éléments (cf. Tableau 2: le cadre PICO) qui permettront de structurer logiquement l'équation de recherche (Livoreil *et al.* 2017).
3. Adapter l'équation aux spécificités (ex. syntaxe, opérateurs booléens, champs de recherche disponibles...) de chaque base de données bibliographiques ou moteur de recherche sollicités.

La question posée à l'origine de cette revue est la suivante : « Quelle est l'efficacité des Nature-inclusive Design (NiD) pour atténuer les impacts des parcs éoliens offshore sur la biodiversité marine ? ». Afin d'assurer une formulation claire et systématique, cette question a été structurée selon le cadre PICO (*Population – Intervention – Comparator – Outcome*), couramment utilisé pour les revues et les cartes systématiques (Tableau 2). Le contexte de la recherche a été délimité aux parcs éoliens en mer (*offshore*), afin de concentrer l'analyse sur les dispositifs ou conceptions destinés à favoriser la biodiversité marine ou à réduire les impacts négatifs des infrastructures éoliennes.

Tableau 2 : Catégories définies par le protocole PICO à partir de la question pour structurer l'équation de recherche

Catégorie du protocole PICO	Élément concerné	Précisions
Population	Biodiversité marine	Espèce, habitat ou écosystème
Intervention	Mesure de type Nature-inclusive Design (NiD)	Toute mesure, intégrée dans la construction d'infrastructures, visant à améliorer la biodiversité
Comparateur	Comparateur ou témoin spatial et/ou temporel	Comparaison de mesures de NiD entre elles (comparateur spatial), comparaison avant-après installation (comparateur temporel) ou les deux simultanément (comparateur spatio-temporel)
Résultat (<i>Outcome</i>)	Effet de l'intervention sur la population	Toute métrique permettant de mesurer l'effet d'un NiD sur la biodiversité (ex. abondance, richesse spécifique, densité ...)

A1. 1. 2 Ressources bibliographiques ciblées

L'objectif de cette cartographie étant d'identifier l'ensemble de la littérature existantes, nous avons choisi de collecter la littérature évaluée par les pairs (articles de journaux, livres...), ainsi que la littérature grise (thèses, rapports techniques non commerciaux...), et ce, en diversifiant la nature des ressources bibliographiques sollicitées.

Parmi les bases de données, nous avons choisi *Web of Science Core Collection (WOSCC)* et *Scopus*.

Puis, parmi les moteurs de recherche en ligne, nous avons ciblé *Google Scholar* et *Bielefeld Academic Search Engine* (BASE).

Enfin, nous avons également souhaité rechercher de la littérature sur des sites web spécialisés. Trois sites ont été identifiés comme pouvant héberger des rapports techniques contenant des mobilisables pour répondre à notre question :

- La base de données *Tethys* qui rassemble et diffuse du contenu lié aux effets environnementaux des systèmes de production d'énergie marine renouvelable : <https://tethys.pnnl.gov/>
- L'archive institutionnelle de l'Ifremer (ARCHIMER) : <https://archimer.ifremer.fr/>
- L'Agence de la Transition Ecologique (ADEME) <https://bibrairie.ademe.fr/2889-energies-renouvelables-reseaux-et-stockage>

A1. 2 CONSTRUCTION DES EQUATIONS DE RECHERCHE

Les équations de recherche ont été composées sur la base des éléments clés de la question représentant la population, l'intervention, le comparateur et les résultats (*Outcomes*), conformément aux éléments du protocole PICO (Tableau 2).

A1. 2. 1 Elaboration de l'équation initiale

Tout d'abord, un exercice de "pre-scoping" (c.à.d. une exploration rapide) a été mené dans la base de données *WOSCC*, afin d'explorer la sensibilité et la spécificité des mots-clés choisis. Conformément à nos objectifs, nous avons combiné tous les termes de recherche relatifs à la faune et à la flore marine, aux solutions de type Nature-inclusive Design, aux résultats et à leur efficacité. L'association de l'ensemble de ces termes est permise grâce à l'emploi d'opérateurs booléens « OR » dans chaque bloc et « AND » entre les blocs, de sorte qu'une publication soit retrouvée si elle étudie les impacts des NiDs au sein des infrastructures éoliennes offshore sur la biodiversité marine ou les habitats marins.

L'équation de recherche a donc été testée et construite pour la base de données bibliographiques *WOSCC*, afin d'obtenir la plus grande efficacité et la meilleure exhaustivité (Tableau 3). Le titre, le résumé et les mots-clés des publications référencées dans *WOSCC* ont été analysés à l'aide de la balise de recherche « TS ». L'équation de recherche a été utilisée en mode « recherche exacte ».

A1. 2. 2 Adaptation de l'équation initiale aux autres ressources bibliographiques

Le titre, le résumé et les mots-clés des publications référencées dans la base de données Scopus ont été analysés à l'aide de la balise de recherche « TITLE-ABS-KEY » et l'équation de recherche (Tableau 3) a également été utilisée en mode « recherche exacte ».

Pour la sollicitation de *Google Scholar*, le logiciel *Publish and Perish*, (Harzing 2007) a été utilisée pour extraire de la littérature pertinente. L'utilisation des caractères booléens sur *Google Scholar* diffère de celle de *WOSCC* et de Scopus et est limitée en termes de nombre de caractères, et donc de termes de recherche (Tableau 3). Par conséquent, nous avons adapté l'équation de recherche pour qu'elle corresponde à ce que l'équipe de la revue a considéré comme les mots-clés les plus importants et nous avons utilisé le champ « mots-clés » pour rechercher dans les titres, les résumés et les corps de texte (Tableau 3). Les 300 premiers résultats de recherche issus de *Google scholar* ont été exportés, conformément aux recommandations de Haddaway *et al.* (2015).

Le moteur de recherche *BASE* a aussi été sollicité, afin d'avoir un corpus initial le plus exhaustif possible. L'équation utilisée était largement simplifiée par rapport aux équations de bases de données, dû à aussi à la limitation du nombre de caractères possible dans les requêtes de sollicitation. L'équation utilisée est également présentée dans le (Tableau 3).

Pour chaque site web, l'utilisation de mots-clés spécifiques par recherche manuelle a été appliquée tel que présenté dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Nombre de références bibliographiques identifiées en fonction de la source sollicitée et de l'équation de recherche utilisée. L'astérisque (*) à la fin de la racine d'un mot ou d'un mot de recherche est utilisé pour accepter n'importe quelle variante d'un terme de base (ex. dispers* trouve dispersed, dispersion, dispersing). Le signe dollar (\$) est utilisé pour accepter des caractères simples ou aucun caractère ajouté et permet de récupérer les formes plurielles et singulières. Des guillemets ont été utilisés pour rechercher l'ordre exact des mots.

Type de source	Source bibliographique	Équation de recherche	Nombre de références
Bases de données	Scopus	(TITLE-ABS-KEY((((biodiversity OR fish* OR vertebrate\$ OR invertebrate\$ OR bivalve\$ OR mollusc\$ OR crustacean\$ OR echinoderm\$ OR decapod\$ OR cephalopod\$ reptile\$ OR algae OR seaweed\$ OR species) AND TITLE-ABS-KEY(marine OR coast* OR estuar* OR ocean OR sea)) AND TITLE-ABS-KEY("nature based solution\$" OR "nature positive solution\$" OR "nature positive design\$" OR "nature inclusive design\$" OR "nature based design" OR "nature derived solution\$" OR "nature based feature\$" OR "nature inspired solution\$" OR "nature inspired design\$" OR "nature derived design\$" OR "ecosystem based adaptation" OR "ecosystem based mitigation" OR "nature based strateg*" OR "nature based protection" OR "nature based coastal" OR "nature based shoreline\$" OR "nature based mitigation" OR "nature based infrastructure\$" OR "human made" OR "man made" OR "human intervention" OR "biogenic structure\$" OR "biogenic material\$" OR boulder\$ OR rubble OR "tubular pile\$" OR "artificial surface\$" OR "artificial substrate\$" OR cobble OR rock* OR "artificial reef\$" OR concrete\$ OR biohut\$ OR "fish hotel\$" OR "ballast bag\$" OR "cable protection" OR "stand alone unit\$" OR frond\$ OR "scour protection" OR "gravel protection" OR "boulder protection" OR "reef ball\$" OR "hybrid infrastructure" OR "hybrid technique\$" OR "natural infrastructure" OR "eco* engineer*" OR "eco* friendly engineering" OR bioengineer* OR "blue engineering" OR "engineering with nature" OR "blue infrastructure" OR "eco* conception\$" OR "marine infrastructur*" OR "green grey infrastructure" OR "green infrastructure" OR "multi use") AND TITLE-ABS-KEY(impact\$ OR effect\$ OR behavior OR disturbance OR mortalit* OR fatalit* OR "population size" OR "population density" OR abundance OR occurrence OR diversity OR richness OR cover* OR communit* OR recruit* OR complexit* OR "surface area" OR dispers* OR bioaccumul* OR predat* OR invasiv* OR distribut* OR composit* OR symbio* OR microb* OR "micro organism\$" OR physiol* OR respir* OR metabol* OR diamet* OR stabili?* OR survival) AND TITLE-ABS-KEY(offshore AND wind OR power OR farm OR construction))))	232
	Web of science Core collection (WOSCC)	TS=((((biodiversity OR fish* OR vertebrate\$ OR invertebrate\$ OR bivalve\$ OR mollusc\$ OR crustacean\$ OR echinoderm\$ OR decapod\$ OR cephalopod\$ reptile\$ OR algae OR seaweed\$ OR species) AND (marine OR coast* OR estuar* OR ocean OR sea)) AND ("nature based solution\$" OR "nature positive solution\$" OR "nature positive design\$" OR "nature inclusive design\$" OR "nature based design" OR "nature derived solution\$" OR "nature based feature\$" OR "nature inspired solution\$" OR "nature inspired design\$" OR "nature derived design\$" OR "ecosystem based adaptation" OR "ecosystem based mitigation" OR "nature based strateg*" OR "nature based protection" OR "nature based coastal" OR "nature based shoreline\$" OR "nature based mitigation" OR "nature based infrastructure\$" OR "human made" OR "man made" OR "human intervention" OR "biogenic structure\$" OR "biogenic material\$" OR boulder\$ OR rubble OR "tubular pile\$" OR "artificial surface\$" OR "artificial substrate\$" OR cobble OR rock* OR "artificial reef\$" OR concrete\$ OR biohut\$ OR "fish hotel\$" OR "ballast bag\$" OR "cable protection" OR "stand alone unit\$" OR frond\$ OR "scour protection" OR "gravel protection" OR "boulder protection" OR "reef ball\$" OR "hybrid infrastructure" OR "hybrid technique\$" OR "natural infrastructure" OR "eco* engineer*" OR "eco* friendly engineering" OR bioengineer* OR "blue engineering" OR "engineering with nature" OR "blue infrastructure" OR "eco* conception\$" OR "marine	1279

		infrastructur* OR "green grey infrastructure" OR "green infrastructure" OR "multi use") AND (impact\$ OR effect\$ OR behavior\$ OR disturbance OR mortalit* OR fatalit* OR "population size" OR "population density" OR abundance OR occurrence OR diversity OR richness OR cover* OR communit* OR recruit* OR complexit* OR "surface area" OR dispers* OR bioaccumul* OR predat* OR invasiv* OR distribut* OR composit* OR symbio* OR microb* OR "micro organism\$" OR physiol* OR respir* OR metabol* OR diamet* OR stabili?* OR survival) AND (offshore AND wind OR power OR farm OR construction)))	
Moteur de recherche web	Google scholar	"offshore wind" AND biodiversity AND "nature-inclusive" OR "biogenic habitat" OR "artificial substrate" OR "nature positive" OR "blue infrastructure" OR "marine construction" OR "nature-based solution" OR "scour protection" OR "cable protection"	50
		"offshore wind" AND vertebrates OR fish AND "nature-inclusive" OR "biogenic habitat" OR "artificial substrate" OR "nature positive" OR "blue infrastructure" OR "marine construction" OR "nature-based solution" OR "scour protection" OR "cable protection"	50
		"offshore wind" AND crustacean AND "nature-inclusive" OR "biogenic habitat" OR "artificial substrate" OR "nature positive" OR "blue infrastructure" OR "marine construction" OR "nature-based solution" OR "scour protection" OR "cable protection"	50
		"offshore wind" AND mollusc AND "nature-inclusive" OR "biogenic habitat" OR "artificial substrate" OR "nature positive" OR "blue infrastructure" OR "marine construction" OR "nature-based solution" OR "scour protection" OR "cable protection"	50
		"offshore wind" AND algae OR seaweed AND "nature-inclusive" OR "biogenic habitat" OR "artificial substrate" OR "nature positive" OR "blue infrastructure" OR "marine construction" OR "nature-based solution" OR "scour protection" OR "cable protection"	50
		"offshore wind" AND invertebrates AND "nature-inclusive" OR "biogenic habitat" OR "artificial substrate" OR "nature positive" OR "blue infrastructure" OR "marine construction" OR "nature-based solution" OR "scour protection" OR "cable protection"	50
	BASE	("biodiversity" "fish" "vertebrate" "invertebrate" "mollusc" "crustacean" "algae" "species") AND (marine OR coast* OR estuar* OR ocean OR sea) AND ("nature-based solution" "ecosystem-based adaptation" "biogenic structure" "artificial reef" "eco-engineering" "green infrastructure" "blue infrastructure" "hybrid infrastructure" "engineering with nature" "marine infrastructure") AND ("impact" "effect" "behavior" "abundance" "diversity" "population density" "community" "recruitment" "predation" "invasive species" "stability" "survival") AND ("offshore wind" "wind farm" "offshore construction")	138

A1. 3 SOLLICITATION ET ACCES AUX RESSOURCES BIBLIOGRAPHIQUES

Les recherches ont été effectuées en utilisant uniquement des termes anglais. Toute la littérature internationale pertinente publiée en anglais a été incluse dans cette carte systématique.

Les bases de données de publications, les moteurs de recherche en ligne et les sites web des organisations ont été consultés sans limitation de la période de publication, ni de la situation géographique des études présentées dans les publications. Par conséquent, les études réalisées dans le monde étaient éligibles.

Toutes les recherches ont été effectuées entre mars et avril 2025.

L'accès à *WOSCC* a été fournis par l'IRD, membre fondateur de la FRB et la base Scopus a été sollicitée avec le code d'identification étudiant CNRS.

A1. 4 SELECTION DE LA LITTERATURE

A1. 4.1 Assemblage et gestion des résultats de recherche

Une fois l'extraction des enregistrements de chaque base de données et sites web terminée, nous avons réassemblé tous les enregistrements de toutes les différentes sources dans la plateforme de collaboration de recherche intelligente *Rayyan* (<https://www.rayyan.ai/>) dédié à la réalisation de revues systématiques. Nous avons supprimé les doublons clairs et partiels basés sur des DOI et des titres similaires, à l'aide de l'outil dédié à cette tâche qui est disponible sur cette plateforme.

A1. 4.2 Processus de tri

Un processus de tri en trois étapes a été entrepris conformément aux critères de sélection et d'admissibilité des études prédéfinis. Les titres ont d'abord été passés au crible, suivis des résumés (abstracts), puis des textes intégraux.

Les textes intégraux de toutes les publications conservées ont été recherchés à l'aide des abonnements aux revues d'Agroparistech et IRD. Si les articles n'étaient pas récupérables, les demandes de texte intégral étaient faites via *ResearchGate* (www.researchgate.net) ou les auteurs étaient directement contactés par e-mail. Les textes complets qui n'ont pas pu être récupérés n'ont pas été examinés et les articles ont été considérés comme « non récupérés ».

Une approche conservatrice a été appliquée : les titres ou les résumés qui ne correspondaient pas clairement aux critères d'inclusion, ni aux critères d'exclusion (détails ci-dessous dans la section A1. 5. 3) ont été conservés pour l'étape suivante de décision d'éligibilité. Aucun article conservé n'a été rédigé ou co-écrit par les examinateurs.

Pour tester la cohérence du processus de sélection, le coefficient kappa de Fleiss¹⁰ a été calculé sur une liste d'articles identique examinés indépendamment par trois examinateurs (MG, JL, JE-M). Avant que les tests statistiques ne soient effectués, une phrase d'entraînement a été entreprise. Les trois examinateurs ont discuté et adapté les critères d'éligibilité sur une liste test de 100 titres, puis sur les résumés des références dont les titres ont été acceptés. L'objectif de cette phase préliminaire était de vérifier la compréhension et la cohérence dans l'utilisation des critères d'admissibilité ou d'exclusion.

Les tests de kappa ont ensuite été effectués sur 142 titres des 1523 références initiales (soit 10 %). Le coefficient kappa de Fleiss pour l'étape de tri sur titre était de 0,73. Lors de la sélection des résumés, nous avons testé 34 des 337 titres sélectionnés (10 %) et le coefficient kappa de Fleiss était de 0,72. Enfin, sur

¹⁰ Le coefficient Kappa de Fleiss est une mesure statistique permettant de définir la concordance dans l'attribution à des objets, de valeur qualitative (ici "exclu" ou "conservé"), par plus de deux observateurs. Il n'existe pas de seuil communément admis, mais l'on peut considérer un coefficient supérieur à 0,75 comme un excellent accord au-delà du hasard

17 des 159 textes intégraux récupérés (10 %), le coefficient kappa de Fleiss était de 0,78. À chaque étape de la sélection, les examinateurs se sont réunis pour discuter des désaccords si existants.

A1. 4.3 Critères d'éligibilité

La sélection des documents dépendait des critères d'inclusion et d'exclusion prédéfinis, présentés dans le Tableau 4. Les décisions d'inclusion ou d'exclusion ont été enregistrées à chaque étape du tri. Conformément aux recommandations de la ligne directrice de la CEE, les raisons d'exclusion lors du tri sur texte intégral ont également été rapportées en mentionnant la catégorie PICO ou la caractéristique de la publication concernée par la non-conformité.

Tableau 4 : Critères d'éligibilité pour sélectionner les articles à inclure dans la carte systématique.

Élément Pico	Critères d'inclusion	Critères d'exclusion
<i>Population</i>	Tous les titres seront retenus si des termes correspondant aux groupes d'espèces ciblés (marins)	Tous groupes taxonomiques terrestres, oiseaux (marins et terrestres), bats... <i>etc.</i>
<i>Intervention</i>	Tout titre et résumé contenant des termes compatibles relatifs aux NIDS (protection contre l'affouillement, protection des câbles, <i>etc.</i> ...).	Absence de notion de type Nids c.à.d. toutes activités/interventions humaines qui ne sont pas en rapport avec les "nature-inclusive designs" en vue de réduire les impacts des parcs éoliens en mer. Contexte de type "Co-location" (algoculture, aquaculture, AMP, zone d'interdiction de pêche)
<i>Comparateur</i>	CI (control vs intervention : spatial) et BA (before vs after : temporel), BACI (before-after-control-intervention) et intrer-protocoles/études dans le cas d'une revue	Absence de comparateur Concernant les études sur la protection contre l'affouillement, le comparateur de type <i>absence de CPA</i> (c.à.d. CPA vs Habitat naturel) est inéligible
<i>Outcome (Résultat)</i>	Tous les impacts (positifs, négatifs, neutres) des solutions de type NID c.a.d. seuls les impacts liés aux interventions en vue de réduire les impacts de l'infrastructure submergée (i.e. câbles, fondation, <i>etc.</i>).	Tous impacts liés aux pales (aériennes)
<i>Context</i>	Toute étude réalisée dans un parc éolien offshore ou mention de l'applicabilité à un parc éolien offshore envisagée par les auteurs, en phase de construction, exploitation ou démantèlement	Toute étude menée <i>ex situ</i> (sur le domaine terrestre ou laboratoire/bassins clos) Toute étude menée sur une autre technologie de production d'énergie marine (houlomotrice, marémotrice, <i>etc.</i> ...), sans mention de son applicabilité à une structure de parc éolien offshore

En ce qui concerne le tri sur titre, seuls les articles mentionnant clairement les « écosystèmes marins » et contenant des termes en lien direct ou indirect avec « les Natures-inclusives Design » ont été acceptés.

Dans le processus de sélection des résumés, en plus des critères précédents, nous avons pris en compte le résultat (*Outcome*) et le contexte. Si un article répondait aux critères d'inclusion fondés sur la population, l'intervention, le résultat, mais pas sur le comparateur (c.-à-d. un article portant sur les écosystèmes marins et les NiDs, mais sans preuve de différences spatiales ou temporelles), l'article été conservé jusqu'à étude sur texte entier.

Le tri sur texte entier répondait aux critères précédents et examinait donc également le type de comparateur utilisé pour l'étude. Les études portant sur les Nature-inclusives Design au sein des parcs éoliens en mer n'étaient pas conservées, si l'étude n'avait pas de comparateur, spatial ou temporel.

Les publications relatives à la « co-location » des éoliennes avec d'autres activités en mer (algoculture, aquaculture, pêche, etc.), à la mise en place de NiDs sur d'autres énergie renouvelables (houlomotrice, marémotrice, etc.) mais ne mentionnant pas l'applicabilité sur des éoliennes en mer, ou encore, les articles relatifs aux mesures d'évitement ou de réduction (mises en place pendant la période de construction pour éviter ou réduire les impacts sur les écosystèmes marins), n'ont pas été retenus.

Enfin, les données issues des synthèses des connaissances n'ont pas été extraites afin de comptabiliser uniquement les données issues des preuves empiriques dans les études primaires. En revanche, un "repérage de citations" (En : backward citation chasing) a été réalisé à partir des trois synthèses de connaissances retenues à l'issue de la phase de tri principale, afin d'identifier d'éventuelles références complémentaires non repérées lors de la requête initiale dans les bases de données et moteurs de recherches.

A1. 5 EXTRACTION ET REPRESENTATION DES DONNEES ISSUES DES PUBLICATIONS RETENUES

Au sein des 9 publications primaires retenues, toutes les études comparatives présentant l'analyse de l'effet d'une mesure de type NiD sur la biodiversité, par rapport à un comparateur bien identifié, ont été recensées. Ainsi, plusieurs études comparatives peuvent donc être issues d'une même publication primaire. Un identifiant unique leur est attribué et les données relatives aux variables pertinentes sont extraites pour chacune d'entre elles, aboutissant ainsi à la production d'une carte systématique dite « longue ».

Les données extraites de l'ensemble des études comparatives et incluses dans la synthèse narrative sont alors décrites selon la distribution des fréquences des études comparatives en fonction des variables pertinentes décrivant les divers aspects PICO. Enfin, la base de données est également représentée de manière cartographique, en illustrant spatialement la distribution des articles et des études comparatives par pays ou par régions marines.

ANNEXE 2 : LISTE DES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES COMPOSANT LE CORPUS FINAL DE LA CARTE LONGUE

- Berges, B. J. P., I. van der Knaap, O. A. van Keeken, J. Reubens, et H. V. Winter. 2024. « Strong site fidelity, residency and local behaviour of Atlantic cod (*Gadus morhua*) at two types of artificial reefs in an offshore wind farm ». *Royal Society Open Science* 11 (7): 240339. <https://doi.org/10.1098/rsos.240339>.
- Hickling, Samuel, James Murphy, Caitlin Cox, Sebastian Mynott, Tom Birbeck, et Steve Wright. 2023. « Benthic invertebrate biodiversity enhancement with reef cubes®, evidenced by environmental DNA analysis of sediment samples ». *Ecological Engineering* 195 (octobre): 107064. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.107064>.
- Hofstede, Remment ter, Sterre Witte, Pauline Kamermans, Mark van Koningsveld, et Linda Tonk. 2024. « Settlement success of European flat oyster (*Ostrea edulis*) on different types of hard substrate to support reef development in offshore wind farms ». *Ecological Engineering* 200 (mars): 107189. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2024.107189>.
- Kamermans, Pauline, Fleur Anteau, Karin Didderen, et al. 2025. « Novel settlement substrates for European flat oyster (*Ostrea edulis*) restoration ». *Ecological Engineering* 212 (février): 107532. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2025.107532>.
- Kingma, Enzo M., Remment ter Hofstede, Edwin Kardinaal, et al. 2024. « Guardians of the seabed: Nature-inclusive design of scour protection in offshore wind farms enhances benthic diversity ». *Journal of Sea Research* 199 (juin): 102502. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2024.102502>.
- Spielmann, Vanessa, Jennifer Dannheim, Thomas Brey, et Joop W. P. Coolen. 2023. « Decommissioning of offshore wind farms and its impact on benthic ecology ». *Journal of Environmental Management* 347 (décembre): 119022. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119022>.
- Taormina, Bastien. 2019. « Potential Impacts of Submarine Power Cables from Marine Renewable Energy Projects on Benthic Communities ». Phdthesis, Université de Bretagne occidentale - Brest. Archimer. <https://theses.hal.science/tel-03078936>.
- Werner, Karl M., Holger Haslob, Anna F. Reichel, Antje Gimpel, et Vanessa Stelzenmüller. 2024. « Offshore wind farm foundations as artificial reefs: The devil is in the detail ». *Fisheries Research* 272 (avril): 106937. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2024.106937>.
- Zupan, Mirta, Joop Coolen, Ninon Mavraki, et al. 2024. « Life on every stone: Characterizing benthic communities from scour protection layers of offshore wind farms in the southern North Sea ». *Journal of Sea Research* 201 (octobre): 102522. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2024.102522>.

ANNEXE 3 : COMPARAISON DE NOTRE CARTE SYSTEMATIQUE AVEC D'AUTRES TRAVAUX DE SYNTHÈSE

<i>Citation</i>	<i>Portée de la synthèse</i>	<i>Éléments de PICO</i>	<i>Bases de données consultées</i>	<i>Sources consultées</i>	<i>Total sources</i>	<i>Nombre de publications incluses</i>	<i>Période couverte par les publications retenues</i>
<i>Gaboriau et al. 2025</i>	Efficacité des NIDs pouvant être intégrés ou ajoutés à la construction d'un parc ou turbine en mer dans le but d'améliorer le fonctionnement écologique. (Pas de co-location, ni effet récif artificiel)	P : Toute biodiversité marine submergée I : NiD C : Présence de comparateurs strictes. (e.g. pas de comparaison avec absence de NiD) O : Tous résultats	Web of science core collection, Scopus	Google scholar, BASE, Tethys, Ifremer, ADEME, 'Un appel aux documents' (auprès des parties prenantes)	8	9 (105 études comparatives)	2020 - 2025
<i>Pardo et al. 2023</i>	Cf. Q3 : axé sur les approches adoptées dans le cadre des OWF complétée par les connaissances issues d'autres activités et infrastructures liées au milieu aquatique : les zones estuariennes, côtières et marines.	P : Non défini I : NiD C : Pas de critère d'éligibilité O : Non défini	Web of Science core collection	Google Scholar, ProQuest, Tethys	4	14 (pas tous les protocoles expérimentaux)	2009-2020
<i>Hermans et al. 2020</i>	Options de NiD contribuant au fonctionnement écologique des espèces indigènes de la Mer du Nord	P : Toutes espèces "commerciales" et "politiquement pertinentes" I : NiD C : Non défini O : Non défini	Consultation d'experts	NA	NA	NA	NA

ANNEXE 4 : DONNEES POUR L'INTERPRETATION DE LA FIGURE 12 « NATURE DES EFFETS ENNONCES DES NIDS »

L'Annexe 4 présente les résultats issus de l'ensemble des 105 études comparatives sur le nombre et la nature (ou sens) de l'effet (positif, négatif, non significatif ou inconnu) du type NiD étudié sur la métrique de mesure de biodiversité retenue. Le résultat d'une étude comparative se traduisant donc comme un seul et unique effet, les chiffres présentés dans la colonne numéro 4 "Nombre d'effets" sont donc équivalant à un nombre d'études comparatives considérées. Démantèlement maximal = CPA et fondations retirées intégralement ; Démantèlement de type 2 = CPA conservée et fondations coupées à 1 mètre en-dessous du fond ; Démantèlement de type 3 = CPA conservée et fondations coupées à 5 mètres au-dessus du fond.

Type d'étude	Type de NIDs spécifique	Comparateur	Sens de l'effet	Nombre d'effets	Total effets	Proportion
In Situ (Parc)	CPA en blocs de marbre	Béton	NS/Inconnu	15	15	1.000
		Granite	NS/Inconnu	15	15	1.000
	CPA en blocs de roches	Sacs de sable	Positif (sig.)	1	1	1.000
	Démantèlement de type 2	Démantèlement maximal	Positif (sig.)	1	1	1.000
	Démantèlement de type 3	Démantèlement de type 2	NS/Inconnu	1	1	1.000
		Démantèlement maximal	Positif (sig.)	1	1	1.000
	UAA à proximité d'une CPA	Absence de CPA	NS/Inconnu	2	2	1.000
In Situ (Hors Parc)	CPA en blocs de grès	Granite	NS/Inconnu	1	3	0.333
		Granite	Négatif (sig.)	2	3	0.667
	CPA en blocs de silex	Granite	NS/Inconnu	1	3	0.333
		Granite	Négatif (sig.)	2	3	0.667
	CPA en calcaire	Eclogite	NS/Inconnu	1	1	1.000
		Granite	NS/Inconnu	1	1	1.000
	CPA en marbre	Eclogite	NS/Inconnu	1	1	1.000
		Granite	NS/Inconnu	1	1	1.000
	Granulométrie de la CPA - T2 (60 % grosses pierres + 10 % petites pierres)	T1 - 60% grosse pierre	NS/Inconnu	5	5	1.000
	Granulométrie de la CPA - T3 (60 % grosses pierres + 20 % petites pierres)	T1 - 60% grosse pierre	NS/Inconnu	5	5	1.000
		T1 - 60% grosse pierre	NS/Inconnu	4	5	0.800

Type d'étude	Type de NIDs spécifique	Comparateur	Sens de l'effet	Nombre d'effets	Total effets	Proportion
	Granulométrie de la CPA - T4 (60 % grosses pierres + 30 % petites pierres)	T1 - 60% grosse pierre	Positif (sig.)	1	5	0.200
	Matelas béton dans la CPC	Demi-coque en fonte	NS/Inconnu	2	4	0.500
		Demi-coque en fonte	Positif (sig.)	2	4	0.500
	Reef cubes®	Hors Reef Cube-éloigné	NS/Inconnu	7	16	0.438
		Hors Reef Cube-éloigné	Positif (sig.)	9	16	0.563
	UAF en Acier galvanisé	Béton	NS/Inconnu	1	3	0.333
		Béton	Négatif (sig.)	2	3	0.667
	UAF en Bloc récifaux (BESE)	Béton	NS/Inconnu	1	3	0.333
		Béton	Négatif (sig.)	2	3	0.667
	UAF en Econcrete	Béton	NS/Inconnu	2	3	0.667
		Béton	Négatif (sig.)	1	3	0.333
	UAF en GEOWALL® lisse	Béton-brut	NS/Inconnu	1	1	1.000
		Béton-lisse	NS/Inconnu	1	1	1.000
		Grès imprimé en 3D	NS/Inconnu	1	1	1.000
	UAF en GEOWALL® rugueux	Béton-brut	NS/Inconnu	1	1	1.000
		Béton-lisse	NS/Inconnu	1	1	1.000
		Grès imprimé en 3D	NS/Inconnu	1	1	1.000
	UAF en Pâte de récif (BESE)	Béton-brut	NS/Inconnu	1	1	1.000
		Béton-lisse	NS/Inconnu	1	1	1.000
		Grès imprimé en 3D	NS/Inconnu	1	1	1.000
	UAF en SeaCrete	Béton-brut	NS/Inconnu	1	1	1.000
		Béton-lisse	NS/Inconnu	1	1	1.000
		Grès imprimé en 3D	NS/Inconnu	1	1	1.000
	UAF en coquilles de moules	Tuile argile	NS/Inconnu	3	3	1.000

ANNEXE 5 : GLOSSAIRE DES PRINCIPALES METRIQUE RECENSEES DANS LES PUBLICATIONS

Abondance (et abondance relative)

Paramètre quantitatif caractérisant une partie de la biocénose en estimant le nombre d'individus par unité de surface ou de volume (Thésaurus INRAE). L'abondance relative représente donc le nombre d'individus par unité d'espace pour une espèce donnée par rapport au nombre total d'individus toutes espèces confondues.

Densité

Abondance d'une population exprimée en nombre d'individus par unité de surface, par exemple, m² ou hectare (Triplet, 2025).

Biomasse (et biomasse relative)

Quantité de matière organique vivante, animale ou végétale, présente à un moment donné par unité de surface (m²) ou de volume (m³) (Triplet, 2025). La biomasse relative représente donc la masse des individus par unité d'espace pour une espèce donnée par rapport à la masse totale des individus toutes espèces confondues.

Taux de survie

Nombre d'individus ayant survécu à un processus (ou à événement) ou après un intervalle de temps donné, divisé par le nombre initial (Triplet, 2025 ; Aquaportail).

Richesse taxonomique

La richesse taxonomique correspond au nombre de taxons ou taxa recensées dans le système étudié (Encyclopédie de l'environnement).

Richesse spécifique

Nombre d'espèces différentes recensées dans un même échantillon, permettant de mesurer la biodiversité d'un milieu (Glossaire eau et biodiversité).

Aire de distribution

Zone géographique délimitant la répartition d'un individu, d'une population ou d'une espèce (adaptation de Triplet, 2025).

Fidélité

Intensité avec laquelle une espèce est inféodée à une biocénose (Triplet, 2025). La fidélité peut être déterminée pour une surface donnée, par exemple partie ou intégralité d'un site d'étude.

Taux de capture

Le taux de capture ou capture par unité d'effort (CPUE) est la quantité de poissons capturés (nombre ou poids) avec une unité d'effort de pêche standard (par exemple nombre de poissons capturés par 1000 hameçons, par jour, ou poids des poissons, en tonnes, capturés par heure de chalutage). La CPUE est souvent considérée comme un indice de la biomasse de poisson (ou abondance) (Glossaire FAO).