



**MINISTÈRE
CHARGÉ
DES TRANSPORTS**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Juin 2024

Ecoconception des infrastructures portuaires

**GUIDE DE BONNES
PRATIQUES**

Informations relatives au document

INFORMATIONS GÉNÉRALES

Auteur(s)	Martin Perrot, Lenaig Mellaza, Matthieu Lapinski Didier Grosdemange	 
Version	V3	
Référence	2023 – 298	
Numéro CRM	SEA0063	

HISTORIQUE DES MODIFICATIONS

Version	Date	Vérfié par	Fonction
Vfinale	26 mars 2024	Martin Perrot & Didier Grosdemange	Experts

DESTINATAIRES

Nom	Entité
Serguianne Vitello	Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires – DGITM
Olivier de Gasquet	Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires – DGITM
Marie-Laure Bailly-Maitre	Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires – DGITM
Stéphanie Cubier	Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires – DGITM

COMITE DE RELECTURE

La Sous-direction des ports (DTFFP) remercie les membres du comité de relecture pour leur implication dans le suivi de l'élaboration de ce guide :

Direction Générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature - Direction de l'Habitat, de l'Urbanisme et des Paysages – Sous-direction de l'aménagement durable – Bureau de l'aménagement opérationnel

Direction Générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature – Direction de l'Eau et de la Biodiversité – Sous-direction de la protection et de la restauration des écosystèmes littoraux et marins

Grand Port Maritime de La Rochelle – Direction Stratégie et Transition Ecologique

Illustration de couverture : Image par SEABOOST

Editorial

La stratégie nationale portuaire adoptée en janvier 2021 fait de l'accélération de la transition écologique et énergétique l'un de ses quatre axes majeurs. Les ports, en particulier les ports de commerce, sont des actifs stratégiques au service de la décarbonation de l'économie et des transports et contribuent donc directement à l'atténuation du changement climatique par la réduction de leur empreinte carbone.

Situés en zones littorales ou estuariennes, ce sont également de hauts lieux de la biodiversité. Dans le cadre de la stratégie nationale pour la biodiversité lancée en décembre 2023 et qui vise notamment à promouvoir toutes les bonnes pratiques favorisant la reconquête de la biodiversité, la DGITM a ainsi souhaité développer une action spécifique pour favoriser l'écoconception des infrastructures portuaires. L'écoconception est l'une des solutions pour réduire les impacts des infrastructures sur le milieu marin, voire générer des bénéfices écologiques. S'agissant d'un domaine encore relativement nouveau, il est donc apparu utile et pragmatique de dresser un état de l'art autour d'exemples concrets en France et à l'international pour développer ce type d'approche. C'est toute l'ambition de ce guide.

Destiné à un large public de professionnels, il explore les principales modalités de mise en œuvre de démarches d'écoconception performante, les écueils à éviter et les valorisations possibles. Il s'agit de donner aux acteurs des clefs et des pistes pour intégrer cette démarche dans la conception de leurs ouvrages.

Si ce document s'adresse principalement aux opérateurs portuaires et aux maîtres d'ouvrage, il peut également intéresser toute personne curieuse d'en apprendre davantage sur les solutions d'écoconception existantes pouvant être mobilisées dans le milieu portuaire.

Très bonne lecture.

Nicolas TRIFT

Sous-directeur des ports



SOMMAIRE

A PROPOS DE CE GUIDE	9
Pourquoi ce guide ?	9
Quelles sont les infrastructures concernées ?	9
Quelles sont les composantes de l'environnement considérées ?	10
Ce que ne contient pas ce guide	10
Comment ce guide est-il organisé ?	11
A qui ce guide est-il destiné ?	12
1 - INTRODUCTION	14
1.1 - Les ports acteurs de la transition écologique	14
1.1.1 - La stratégie nationale portuaire.....	14
1.1.2 - La décarbonation du transport maritime et le développement des énergies marines renouvelables.....	15
1.2 - Notion d'écoconception : concept, définitions et application au domaine des infrastructures portuaires	16
1.2.1 - Définition générale : une approche produit et analyse du cycle de vie (ACV).....	16
1.2.2 - Ecoconception des infrastructures portuaires : un concept à cadrer et à articuler avec les démarches de gestion et d'évaluation environnementale en place dans les ports.....	16
1.2.3 - Articulation avec le cycle de vie des infrastructures portuaires.....	18
1.2.4 - Démarches associées et articulation : cas particulier de la séquence ERC.....	19
2 - ENJEUX D'ECOCONCEPTION DES INFRASTRUCTURES POUR LA TRANSITION ECOLOGIQUE DES PORTS	20
2.1 - Pressions et impacts des infrastructures portuaires sur l'environnement	20
2.2 - Ecoconception et séquence ERC	23
2.3 - L'écoconception comme levier particulier d'amélioration de la performance environnementale des ports	24
2.3.1 - Emissions de GES.....	24
2.3.2 - Prise en compte des effets du changement climatique dans le dimensionnement des infrastructures.....	26
2.3.3 - Matériaux et ressources.....	27
2.3.4 - Biodiversité subaquatique.....	29
2.3.4.1 - Ecologie portuaire et biodiversité.....	29
2.3.4.2 - Limites et potentiel d'habitat des infrastructures portuaires pour la vie marine.....	30
2.3.4.3 - Contribution de l'écoconception au développement de la biodiversité portuaire.....	31
2.3.5 - Biodiversité terrestre.....	31
3 - METHODOLOGIE D'APPLICATION DE L'ECOCONCEPTION	33
3.1 - Entreprendre et cadrer la démarche d'écoconception	33
3.1.1 - Créer une motivation et une adhésion au concept.....	33
3.1.2 - Désigner une équipe en charge et la former.....	33
3.1.3 - Définir l'ambition.....	34

3.1.4 - Cerner et anticiper les opportunités d'écoconception	36
3.1.5 - Se faire accompagner	37
3.2 - L'écoconception en phase conception	37
3.2.1 - Diagnostic du système, définition des orientations et planification	37
3.2.1.1 - Evaluation et optimisation des émissions de GES liés au trafic au stade de la planification des ouvrages..	37
3.2.1.2 - Evaluation et optimisation des émissions de GES liées à l'infrastructure lors des études préliminaires	38
3.2.1.3 - Diagnostics de biodiversité et plan d'action pour le rétablissement des fonctionnalités écologiques portuaires.....	43
3.2.2 - Conception détaillée des mesures	45
3.2.2.1 - Optimisation des émissions de GES et de l'utilisation des ressources au travers du choix des matériaux ..	46
3.2.2.2 - Choix des solutions de développement de la biodiversité et dimensionnement.....	48
3.3 - L'écoconception en phase travaux	51
3.3.1 - Consultation des entreprises	51
3.3.2 - Suivi de la performance du chantier	52
3.4 - L'écoconception en phases d'exploitation et de maintenance	52
3.5 - L'écoconception en fin de vie et/ou requalification de l'ouvrage	53
3.6 - Les documents et sources méthodologiques de référence	55
3.6.1 - L'écoconception pour limiter l'empreinte carbone des ports	55
3.6.2 - L'écoconception par les matériaux	56
3.6.3 - L'écoconception en faveur de la biodiversité	57
3.6.4 - Les documents relatifs à l'évaluation environnementale	58
4 - SOLUTIONS ET RETOURS D'EXPERIENCE	59
4.1 - Matériaux et économie circulaire	59
4.1.1 - Aciers recyclés	59
4.1.2 - Bétons spéciaux	60
4.1.2.1 - Béton bas-carbone	60
4.1.2.2 - Béton à granulats recyclés, à matériau alternatif et béton coquiller.....	61
4.1.2.3 - Bétons favorables à la colonisation par les espèces marines fixées	62
4.1.3 - Autres matériaux employés pour la maintenance des ouvrages	63
4.1.3.1 - Produits d'autocicatrisation des bétons.....	63
4.1.3.2 - Résines spéciales	64
4.1.3.3 - Bétons naturels.....	64
4.1.4 - Matériaux locaux, matériaux recyclés et matériaux de dragage	65
4.1.5 - Polymères biosourcés	66
4.2 - Émissions de GES	67
4.2.1 - Limiter l'artificialisation pour conserver les puits de carbone	67
4.2.2 - Intégrer l'intelligence artificielle et la numérisation pour limiter les travaux	67
4.2.2.1 - BIM, jumeaux numériques et planification.....	67
4.2.2.2 - Anticiper la maintenance préventive	68
4.2.3 - Mise en place de dispositifs permettant de décarboner les escales de navires	68
4.2.3.1 - Shore connect.....	68
4.2.4 - Intégration de production d'énergie renouvelable sur le domaine portuaire	69

4.2.4.1 - Système houlomoteur implanté sur les quais ou ouvrages de protection.....	70
4.2.4.2 - Thalassothermie (ou SWAC – Sea Water Air Conditioning).....	70
4.2.5 - Adopter une logistique de chantier vertueuse	71
4.3 - Biodiversité subaquatique	72
4.3.1 - Synthèse des objectifs d'écoconception	72
4.3.1.1 - Améliorer le potentiel de colonisation des ouvrages pour la faune et la flore fixées	72
4.3.1.2 - Développer les microhabitats pour les stades juvéniles de la macrofaune mobile.....	72
4.3.1.3 - Développer des cavités et abris pour la faune mobile hors stade juvénile	73
4.3.2 - Solutions d'habillage des infrastructures.....	74
4.3.3 - Solutions d'intégration dans la masse des infrastructures.....	78
4.3.4 - Bétons favorables à la colonisation	79
4.4 - Biodiversité terrestre.....	80
5 - LABELS ET CERTIFICATIONS EN FAVEUR DU DEVELOPPEMENT DE L'ECOCONCEPTION	82
5.1 - Ecoports / certification PERS.....	82
5.2 - Norme ISO 14001	83
5.3 - Certification HQE Infrastructure Durable (HQE-ID).....	83
5.4 - Certifications bas carbone	83
5.5 - Ports propres & Ports actifs pour la biodiversité.....	83
ANNEXE 1 – CLARIFICATION DE L'ARTICULATION DE L'ECOCONCEPTION AVEC D'AUTRES APPROCHES DE CONCEPTION A VISEE ENVIRONNEMENTALE	86
Ecoconception, ingénierie écologique et génie écologique	86
Ecoconception et solutions fondées sur la nature (SFN)	86
Building/working with nature	87
Biomimétisme.....	88
ANNEXE 2 – ETUDE DE PARANGONNAGE PAR FICHES PROJETS.....	90
ORGANISMES CONSULTES.....	130
BIBLIOGRAPHIE	131

REFERENCES

Figure 1 : Commerce maritime international (milliards de tonnes chargées) par type de cargaison, années sélectionnées, 1980-2021 (Source : CNUCED)	14
Figure 2 : transposition de la roue stratégie de l'écoconception aux infrastructures portuaires	19
Figure 3 : sources et puits de carbone pour une infrastructure portuaire (adapté de PIANC WG 188)	26
Figure 4 : scenario de rehausse du niveau MOYEN de la mer - giec.....	27
Figure 5 : Extraction de matières minérales du sous-sol, en France, en 2018 (source : Insee, UniceM, MTES).....	28
Figure 6 : Schéma des 4 niveaux d'écoconception (Source : centre national pour l'écoconception).....	35
Figure 7 : Représentation de l'habilité à influencer l'impact carbone des projets selon les étapes de conception (Source: Terao 2023)	36
Figure 8 : DECOUPAGE DES DIFFERENTS POSTES D'EMISSION ANALYSES DANS LE CADRE D'UNE ACV	39
Figure 9 : SYNTHÈSE DES DIFFERENTES RUBRIQUES CONCERNÉES PAR CHAQUE SCOPE 1, 2 ET 3 DANS LE CADRE D'UN BILAN CARBONE (SOURCE: CARBO ACADEMY)	41
Figure 10 : Solutions d'habillage d'infrastructures ciblant l'amélioration du potentiel de colonisation des ouvrages pour la faune et la flore fixées	75
Figure 11 : Solutions d'habillage d'infrastructures ciblant l'apport de microhabitats pour les stades juvéniles de la macrofaune mobile.....	76
Figure 12 : Solutions d'habillage d'infrastructures ciblant le développement de cavités et abris pour la faune mobile hors stade juvénile.....	77
Figure 13 : Solutions de nouvelles générations d'infrastructures portuaires intégrant dans leur masse des caractéristiques de structure et de composition de substrat favorables à la colonisation.....	79
Figure 14 : Concept avant la mise en œuvre qui permet la création d'un corridor de 8 000 m2	80
Figure 15 : Au centre un exemple de pierriers proche du merlon de séparation.....	81
Figure 16 : Nid de mouette tridactyle sur l'écluse Loubet à Boulogne sur mer, France (GAUCHE), Balbuzard sur infrastructure de port moore, Australie (DROITE) (source Web)	81
Figure 17 : Les Solutions fondées sur la Nature, un concept englobant diverses approches fondées sur les écosystèmes (source UICN)	86
Figure 18 : Représentation schématique de la gamme d'approches de solutions fondées sur la nature (Source « Biodiversa » projet ERA-NET)	87
Figure 19 : Approche méthodologique de l'approche « Building with nature » (source PIANC).....	88
Figure 20 : Normes sur le Biomimétisme.....	89

LISTE DES ABREVIATIONS

ACV : Analyse du cycle de vie

ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

CEEBIOS : Centre Européen d'Excellence en Biomimétisme de Senlis

CGDD : Commissariat général au développement durable

CIMER : Comité interministériel de la mer

CO2 : Dioxide de carbone

DGITM : Direction générale des infrastructures, des transports et des mobilités

DCSMM : Directive Cadre Stratégie Milieu Marin

DSB : Documents Stratégiques de Bassin

DSF : Documents Stratégiques de Façade

EMR : Energies Marines Renouvelables

ERC : Eviter réduire compenser

GES : Gaz à effet de serre

GNL : Gaz naturel liquéfié

HAROPÄ : Havre Rouen Paris

INIES : base de données nationale de référence sur les données environnementales et sanitaires des produits et équipements de la construction

ISO : International organization for standardization (Organisation internationale de normalisation)

SNP : Stratégie Nationale Portuaire

MTECT : Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires

OMC : Organisation mondiale du commerce

OMI : Organisation maritime internationale

OS : Objectif stratégique

PNEC : Plan National Énergie-Climat

LTECV : Loi sur la Transition Énergétique pour la Croissance Verte

SFN : Solutions fondées sur la nature

TRACC : Trajectoire de Réchauffement de référence pour l'Adaptation au Changement Climatique

UE : Union Européenne

A PROPOS DE CE GUIDE

Pourquoi ce guide ?

⇒ Pour multiplier les initiatives pragmatiques d'écoconception d'infrastructures portuaires

L'une des ambitions de la stratégie nationale portuaire (SNP) adoptée en 2021 est de positionner les ports en tant qu'acteurs clés de l'accélération de la transition écologique. Cela inclut notamment l'aménagement d'infrastructures prenant en compte les différentes dimensions du développement durable et favorisant la préservation de la biodiversité. La SNP vise également un renforcement des mesures d'atténuation et d'adaptation au changement climatique des ports impliquant notamment une trajectoire de neutralité carbone, adaptée aux potentialités et spécificités locales.

Dans ce contexte, la Direction générale des infrastructures, des transports et des mobilités (DGITM) du Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires (MTECT), a souhaité élaborer un document qui soutienne la multiplication à court terme, d'initiatives réalistes et pragmatiques d'écoconception des infrastructures portuaires. Ce guide vise ainsi à accompagner les opérateurs portuaires dans la réalisation d'aménagements mieux intégrés à leur environnement, tout en étant fonctionnellement efficaces.

Ce document constitue un état des lieux de solutions méthodologiques et pratiques pour la réalisation d'ouvrages portuaires ayant une plus grande performance environnementale tout au long de leur cycle de vie. Il ne couvre pas l'exhaustivité des mesures d'amélioration environnementales des ports et se focalise sur certaines infrastructures et certaines composantes de l'environnement, en complément d'autres documents méthodologiques existants et cités en référence.

Quelles sont les infrastructures concernées ?

⇒ Les installations et équipements marins tels que les bassins, quais, digues, pontons...

Les infrastructures portuaires considérées ici sont les infrastructures et installations destinées à la fourniture de services portuaires liés au transport, par exemple les quais d'amarrage des bateaux, les murs de quai, les jetées, les rampes et pontons flottants dans les zones de marée, les bassins intérieurs, les remblais et assèchements de terres, les infrastructures pour carburants de substitution et les infrastructures pour la collecte des déchets, d'exploitation des navires et des résidus de cargaison (Article 1er du Règlement (UE) 2017/1084 de la Commission du 14 juin 2017).

Ce document se focalise donc sur les infrastructures en contact avec les milieux aquatiques et les mesures d'écoconception qui peuvent leur être appliquées.

Ce guide n'a pas vocation à traiter de l'écoconception d'un système portuaire dans son ensemble. Les bâtiments ainsi que les aménagements terrestres pour la production et la logistique ne sont ainsi pas couverts par ce document.

Ce guide s'applique tant aux infrastructures présentes au niveau des grands ports industriels et de commerce, qu'à celles présentes au niveau des ports de taille plus modeste soutenant par exemple une activité de pêche et/ou de plaisance.

Quelles sont les composantes de l'environnement considérées ?

⇒ Les émissions de gaz à effet de serre, les ressources pour la construction, la biodiversité dans les ports

Si les interactions entre les ports et l'environnement sont nombreuses et touchent un vaste ensemble de composantes (qualité des eaux et de l'air, bruit, paysages, biodiversité...), l'évaluation de ces interactions et la définition de mesures visant à en maîtriser les effets, font d'ores et déjà l'objet de plusieurs publications méthodologiques (cf. chapitre 3.6).

Ce guide a pour objectif de constituer un appui plus particulier aux initiatives concrètes ciblant trois enjeux majeurs de la transition écologique : la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES), la réduction de l'utilisation de ressources non renouvelables et la réduction de l'érosion de la biodiversité.

Ce document se focalise ainsi sur trois types de mesures encore peu développées pour l'amélioration environnementale des infrastructures portuaires :

- les mesures consistant à réduire les émissions de GES sur l'ensemble des étapes de cycle de vie des infrastructures ;
- les mesures conduisant à réduire l'impact environnemental des matériaux employés pour la construction ou la réhabilitation des infrastructures ;
- les mesures consistant à promouvoir le développement de la biodiversité sur les infrastructures en phase d'exploitation voire en fin de vie.

Ce guide dresse un état des lieux des solutions et innovations existantes en matière d'ingénierie, de génie civil et de génie écologique, applicables dans une approche d'écoconception portuaire pour ces trois catégories de mesures. Les contextes d'application de ces solutions sont illustrés au travers d'exemples et de retours d'expériences.

Si l'écoconception d'infrastructures portuaires repose sur la disponibilité de solutions techniques, elle résulte aussi et avant tout de la mise en place d'une démarche volontaire et sur-mesure adaptée aux contextes particuliers de chaque port et chaque environnement. Ce guide propose ainsi des éléments de méthode, permettant d'initier, de structurer et d'animer une démarche d'écoconception efficace et performante à l'ensemble des étapes du cycle de vie des projets et considérant les atouts et contraintes propres à chaque système portuaire.

Ce que ne contient pas ce guide

⇒ Un recueil exhaustif de mesures de réduction de l'impact environnemental des ports

Ce guide ne constitue pas un recueil de méthodes et de solutions d'amélioration environnementale de l'ensemble du système portuaire et pour toutes les composantes de l'environnement avec lesquels les ports sont susceptibles de rentrer en interaction. En revanche, d'autres référentiels et documents d'intérêt existent, l'ensemble de ces ressources permettant d'appuyer les opérateurs portuaires dans la mise en œuvre d'une démarche de transition écologique globale.

Comment ce guide est-il organisé ?

⇒ **Cinq chapitres pour cadrer les méthodes et illustrer par des exemples**

Ce guide se décline en 4 chapitres principaux :

- **Chapitre 1 : introduction**

Ce premier chapitre présente la définition de l'écoconception, son application aux domaines particuliers des infrastructures portuaires et de leur cycle de vie, ainsi que son articulation avec d'autres notions et démarches d'amélioration de la performance environnementale de ces infrastructures.

- **Chapitre 2 : enjeux d'écoconception des infrastructures portuaires**

Par le rappel des principaux mécanismes d'impact des infrastructures portuaires sur l'environnement, ce chapitre présente les mécanismes selon lesquels l'écoconception peut améliorer leur performance environnementale. Les enjeux sont synthétisés selon les trois composantes environnementales sur lesquelles se focalise ce guide : les gaz à effet de serre, les ressources et matériaux, la biodiversité dans les ports.

- **Chapitre 3 : méthodologie d'application de l'écoconception**

La mise en œuvre d'une démarche d'écoconception cohérente et performante repose sur un ensemble d'éléments de méthode, applicables aux différentes étapes du cycle de vie de l'infrastructure. Ce chapitre explicite et illustre plusieurs méthodes et outils existants (e.g. ACV, bilans carbone, diagnostics de fonctionnement écologique, dimensionnement d'actions ...) pour intégrer l'écoconception aux pratiques de gestion portuaire.

- **Chapitre 4 : solutions d'écoconception des infrastructures portuaires**

Ce chapitre est une synthèse du parangonnage réalisé pour l'établissement de ce guide. Il présente les différentes solutions d'écoconception appliquées sur des projets portuaires en France et dans le monde, identifiées dans la littérature grise et scientifique, ou communiquées directement par les porteurs de projet. Ce chapitre est en lien direct avec l'annexe 2 du guide, qui détaille, sous forme de fiches, des actions développées dans le cadre de projets spécifiques et portant une valeur d'exemple particulière. Sont distinguées les solutions qualifiables d'opérationnelles de celles relevant d'avantage d'une démarche plus expérimentale.

- **Chapitre 5 : leviers de développement et outils de valorisation**

Cet ultime chapitre présente les différents leviers par lesquels l'engagement d'une démarche d'écoconception peut être valorisé dans le cadre de l'opération d'une activité portuaire. Labélisation, certification, reconnaissance dans la démarche éviter, réduire, compenser (ERC)..., la place de l'écoconception vis-à-vis de ces différents outils est évaluée pour apporter plus de clarté aux porteurs de projet.

- **Annexe 1**

L'annexe 1 développe l'articulation de l'écoconception avec d'autres approches de conception à visée environnementale (génie écologique, solutions fondées sur la nature, etc.)

- **Annexe 2**

L'annexe 2 regroupe des fiches projets qui détaillent des retours d'expérience d'application de l'écoconception à des infrastructures portuaires en France et dans le monde.

A qui ce guide est-il destiné ?

⇒ Aux maîtres d'ouvrage et opérateurs, ainsi qu'à l'ensemble des parties prenantes impliquées dans la gestion environnementale des infrastructures portuaires

Ce guide est à destination de toutes les parties prenantes impliquées dans les projets de construction, de réhabilitation d'infrastructures portuaires ainsi que celles impliquées dans la gestion de ces infrastructures tout au long de leur cycle de vie. Un échantillon représentatif de ces parties prenantes a été consulté dans le cadre de l'élaboration de ce guide afin d'y retranscrire un état des lieux aussi fidèle que possible des pratiques et connaissances actuelles en matière d'écoconception portuaire.

▪ **Les maîtres d'ouvrage et opérateurs portuaires**

Ils constituent le premier maillon de la chaîne d'engagement de démarches d'écoconception sur des ouvrages dont ils ont la propriété, ou une délégation de gestion leur confèrent des prérogatives d'actions environnementales.

Ils sont les premiers destinataires de ce guide dans lequel ils trouveront les éléments de méthode utiles à la structuration d'une démarche d'écoconception cohérente et une inspiration au travers d'exemples de solutions opérationnelles ou expérimentales.

▪ **Les maîtres d'œuvre et bureaux d'études**

Ils accompagnent les maîtres d'ouvrage dans le diagnostic de la performance environnementale de leurs infrastructures et dans la définition d'initiatives d'écoconception adaptées, tant aux enjeux environnementaux du port concerné, qu'aux moyens que les maîtres d'ouvrages peuvent accorder à ces initiatives. Au contact d'entreprises, de fournisseurs et d'autres maîtres d'ouvrages engagés dans des démarches similaires, ils se font force de proposition de mesures d'écoconception concrètes, compatibles avec les fonctionnalités techniques des infrastructures. Ils transforment l'ambition environnementale en projet technique et assurent le plus souvent la conception et le dimensionnement des actions, au travers d'une maîtrise d'outils spécifiques (ACV, bilan carbone, analyse des fonctionnalités écologiques portuaires...).

La compétence de maîtrise d'œuvre peut dans certains cas être détenue directement par le maître d'ouvrage. Elle peut aussi être scindée entre une mission d'encadrement et de conseil type Assistance à Maîtrise d'Ouvrage mobilisée pour l'analyse d'opportunité, le cadrage et la planification et une mission de Maîtrise d'œuvre pure, mobilisée sur la conception.

Les maîtres d'œuvre et bureaux d'études sont également impliqués aux stades travaux et exploitation, pour le suivi et l'évaluation de la performance technique et environnementale des projets.

Ils pourront trouver dans l'étude de parangonnage de ce guide de nouvelles pistes de solutions à évaluer et intégrer le cas échéant à leurs propositions d'actions auprès des maîtres d'ouvrage. Les éléments de méthode pour le dimensionnement ou l'évaluation peuvent enfin constituer des outils pour compléter voire renforcer leurs pratiques.

▪ **Les entreprises et fournisseurs**

Les entreprises et fournisseurs assurent à la fois le développement puis la mise en œuvre sur le terrain de solutions matérielles et organisationnelles d'écoconception : développement de nouveaux matériaux constructifs, mise en œuvre d'organisations de chantier moins émissives, fourniture d'habitats artificiels pour l'accroissement des fonctionnalités écologiques des ports... Ces entreprises sont au premier rang de l'innovation et des investissements de développement technologique pour des infrastructures portuaires plus durables.

Les entreprises et fournisseurs pourront trouver dans ce guide d'éventuels compléments au parangonnage technologique qu'elles effectuent par ailleurs, ainsi que des éléments de réflexion pour leurs propres orientations stratégiques en écoconception.

- **Les autorités compétentes en matière d'environnement**

Les autorités compétentes en matière d'environnement peuvent être impliquées à plusieurs titres dans le processus accompagnant la mise en œuvre d'actions d'écoconception dans un port. Lorsque ces actions font partie intégrante d'un projet nécessitant une évaluation environnementale, elles peuvent être intégrées dans la démarche d'évitement, de réduction, de compensation ou d'accompagnement environnemental du projet. A ce titre, les autorités compétentes en matière d'environnement sont amenées à prendre parti sur la pertinence et le juste dimensionnement des mesures engagées au regard des effets du projet sur l'environnement. Dans le cas d'initiatives d'écoconception volontaires, menées hors procédure réglementaire d'évaluation environnementale, certaines autorités compétentes en matière d'environnement peuvent aussi être impliquées dans le processus de définition et de mise en œuvre des actions, par exemple dans le cas de demandes de subventions publiques.

Les autorités compétentes en matière d'environnement trouveront dans ce guide un parangonnage relativement complet des solutions d'écoconception actuellement disponibles. Elles y trouveront aussi des éléments d'appui à l'évaluation de la pertinence des actions pour lesquelles elles sont amenées à formuler un avis (nature des mesures, dimensionnement, modalités de mise en œuvre...).

- **Les financeurs**

La transition écologique des ports est aujourd'hui accompagnée financièrement par les pouvoirs publics au travers de diverses sources de subventions et de soutien aux investissements. A ce titre, les organismes financeurs sont régulièrement amenés à analyser et formuler des avis sur la pertinence d'actions relativement novatrices et pour lesquelles, par définition, peu de retours d'expérience existent pour développer une analyse d'opportunité.

Ce guide contient par son parangonnage et ses réflexions méthodologiques, un outil complémentaire pour appuyer les financeurs dans leur évaluation des demandes d'accompagnement.

- **Les instituts scientifiques et techniques**

Les instituts scientifiques et techniques sont directement impliqués dans le développement de solutions d'écoconception portuaire aux côtés des gestionnaires, des entreprises et des ingénieries. Partenaires privilégiés de programmes de recherche et d'expérimentation, ils mettent leur expertise au service de développements technologiques et méthodologiques et/ou de l'évaluation de la performance technique et environnementale des solutions développées.

Ces instituts pourront trouver dans ce guide l'expression de problématiques opérationnelles concrètes formulées par les porteurs de projet et les entreprises et à la résolution desquelles elles pourront contribuer à l'avenir par leurs orientations de recherche.

1 - INTRODUCTION

1.1 - Les ports acteurs de la transition écologique

1.1.1 - La stratégie nationale portuaire

Le système portuaire français se compose de 66 ports de commerce, dont 10 grands ports maritimes, qui sont des établissements publics de l'Etat. Ces grands ports que sont Dunkerque, HAROPA Port (Le Havre, Rouen, Paris), Nantes Saint-Nazaire, La Rochelle, Bordeaux et Marseille en métropole, Guyane, Martinique, Guadeloupe et la Réunion dans les autres mers, gèrent à eux seuls plus de 80% du trafic maritime de marchandises à l'échelle nationale.

L'augmentation du fret maritime due notamment à la conteneurisation est un facteur clé d'une mondialisation synonyme de flux massifs de marchandises depuis la fin de la seconde guerre mondiale.

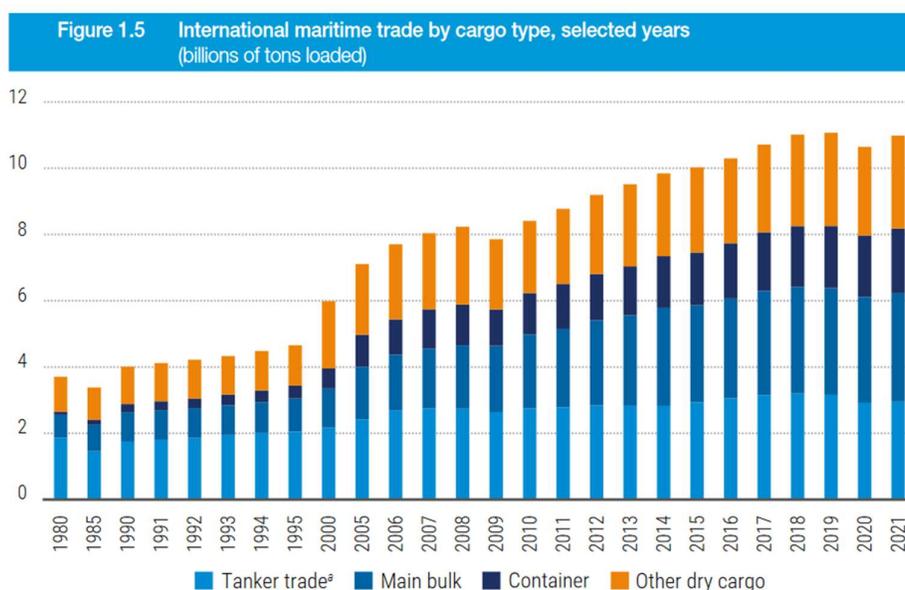


FIGURE 1 : COMMERCE MARITIME INTERNATIONAL (MILLIARDS DE TONNES CHARGEES) PAR TYPE DE CARGAISON, ANNEES SELECTIONNEES, 1980-2021.

Source : Conférence des Nations unies sur le commerce et le développement (CNUCED)

Le système portuaire français génère ainsi en moyenne plus de 350 millions de tonnes de trafic de marchandises et permet le passage de 30 millions de passagers. Il représente près de 300 000 emplois directs et les ports de HAROPA, Marseille et Dunkerque produisent à eux trois, une valeur ajoutée de 13 milliards d'euros.

Au contact direct des écosystèmes marins et situés sur les littoraux, les activités portuaires ont des impacts sur l'environnement local et global (e.g. biodiversité, qualité de l'air, de l'eau et des sols, pollution sonore, émissions de gaz à effet de serre, consommation de ressources et d'espaces...). Par ailleurs, si le transport maritime est généralement moins émetteur de GES par tonne de marchandise transportée que la plupart des autres modes de transport, il doit prendre sa part dans la lutte contre le réchauffement climatique suivant les objectifs de neutralité carbone fixés par les accords de Paris.

La stratégie nationale portuaire (SNP), adoptée par le Comité interministériel de la mer (CIMER) le 22 janvier 2021, place ainsi les ports au cœur de la transition écologique. L'enjeu est d'assurer leur contribution à l'ambition de la décarbonation de l'économie et des transports à l'horizon 2050, au travers de plusieurs objectifs stratégiques, la SNP, en particulier :

- **OS8** : Assurer une production et fourniture multi-énergies propres pour offrir un approvisionnement en carburants alternatifs pour les navires dans le cadre d'un schéma national ;
- **OS9** : Valoriser les chaînes logistiques vertueuses transitant par les ports français ;
- **OS10** : Attirer les entreprises innovantes dans le domaine de la transition écologique sur la zone industrialo portuaire pour développer l'économie circulaire et l'approche d'écologie industrielle au sein des places portuaires.

Situés aux interfaces nature/ville ou encore terre/mer, les zones portuaires sont également identifiées par la SNP comme des zones à fort enjeu pour la conservation de la biodiversité et pour l'adaptation au changement climatique. A l'aune du changement climatique et de l'érosion massive de la biodiversité, ces objectifs stratégiques liés à la transition énergétique sont complétés par des objectifs assurant une meilleure intégration du port dans son milieu pour limiter au maximum son empreinte environnementale :

- **OS11** : Assurer une meilleure protection de la biodiversité ;
- **OS12** : Renforcer les mesures d'atténuation et d'adaptation au changement climatique des ports.

1.1.2 - La décarbonation du transport maritime et le développement des énergies marines renouvelables

En parallèle à la SNP, l'Organisation Maritime Internationale (OMI) a fixé des objectifs de réduction de GES ambitieux pour le transport maritime mondial par rapport à 2008 :

- 40% de réduction des GES à horizon 2030,
- 70% à horizon 2050.

Pour ce faire, les armateurs mondiaux ont engagé des réflexions sur les adaptations à prévoir sur leurs flottes et lignes. Celles-ci étant liées à des modifications d'avitaillement, les impacts et interfaces à prévoir avec les adaptations des infrastructures portuaires sont fortes :

- branchement électrique en bord à quai,
- mise en place d'avitaillements alternatifs (hydrogène, gaz naturel liquéfié (GNL), biogaz, etc.),
- réorganisation / modification des différents terminaux portuaires pour s'adapter aux nouveaux trafics et aux nouvelles activités clés de l'écosystème portuaire (arrêt progressif de la manutention des énergies fossiles, massification des terminaux conteneurs, etc.).

Le développement des énergies marines renouvelables fait enfin naître de nouvelles activités au sein des ports et nécessitent des infrastructures portuaires spécifiques (quais, accès, terre-pleins...).

Cette modification structurante et profonde du transport maritime et des activités portuaires en contribution à une réduction nationale des émissions de GES induit de facto des adaptations d'envergure à prévoir dans les années à venir sur les infrastructures portuaires.

Maillons clés de notre économie, les ports sont à la croisée d'enjeux de décarbonation et de préservation de la biodiversité. La SNP intègre ces enjeux dans plusieurs de ses objectifs stratégiques afin que les ports soient au front de la transition énergétique et écologique. Ainsi la gestion des espaces portuaires et les projets d'aménagement d'infrastructures doivent plus que jamais intégrer une ambition forte de performance environnementale. L'écoconception des infrastructures est une des démarches à disposition des opérateurs portuaires pour réaliser cette ambition.

1.2 - Notion d'écoconception : concept, définitions et application au domaine des infrastructures portuaires

1.2.1 - Définition générale : une approche produit et analyse du cycle de vie (ACV)

L'écoconception est une démarche préventive et innovante qui permet de réduire les impacts négatifs de produits sur l'environnement sur l'ensemble de leur cycle de vie, tout en conservant leurs qualités d'usage et en intégrant les contraintes inhérentes à leur mise sur le marché. En considérant les enjeux environnementaux au même titre que les critères techniques, financiers, organisationnels ou commerciaux, l'objectif est de trouver le juste compromis en matière de performance. A noter que le centre national sur l'écoconception et la performance par le cycle de vie précise que l'écoconception constitue aussi un moyen d'améliorer les impacts environnementaux positifs d'un produit.

Bien que la notion d'écoconception puisse être aujourd'hui appliquée à d'autres thématiques telles que les infrastructures par exemple, les définitions et formalisations qui en sont faites conservent encore aujourd'hui une orientation « produit ». La norme ISO14006 : 2020 définit ainsi l'écoconception comme étant *une approche méthodique, qui prend en considération les aspects environnementaux du processus de conception et développement dans le but de réduire les impacts environnementaux négatifs tout au long du cycle de vie d'un produit.*

L'intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement de produit suit la norme ISO 14062, qui encourage les organismes à considérer les impacts environnementaux potentiels de leurs produits dès les premières étapes de la conception et tout au long du cycle de vie du produit.

L'écoconception se base en priorité sur des outils d'évaluation environnementale souvent développée à une échelle globale et traitant des flux d'énergie, de polluants, de ressources... L'analyse du cycle de vie (ACV) constitue ainsi l'un des principaux outils d'évaluation environnementale sur lequel se basent les démarches d'écoconception.

La notion d'écoconception a été développée pour la réduction d'impacts environnementaux de produits et reste aujourd'hui largement tournée vers cette finalité. Elle peut néanmoins être adaptée pour des services, des systèmes, voire des infrastructures. Se pose alors la question des enjeux environnementaux associés à leur écoconception et donc au cadre de l'évaluation environnementale sous-jacente.

1.2.2 - Ecoconception des infrastructures portuaires: un concept à cadrer et à articuler avec les démarches de gestion et d'évaluation environnementale en place dans les ports

Il n'existe pas aujourd'hui de définition formelle de l'écoconception appliquée aux infrastructures.

Bien que cette notion soit aujourd'hui mise en avant dans divers projets d'aménagements, il semble qu'un cadrage plus précis du concept reste à construire. Il permettrait notamment de mieux appréhender les particularités d'application de l'écoconception au domaine des infrastructures. Il permettrait également de clarifier son articulation avec les autres démarches environnementales susceptibles d'être mises en œuvre au cours de leur cycle de vie (e.g. plan de gestion environnemental, séquence ERC associée à des projets de travaux...). En effet, la planification, la conception, la construction, l'exploitation et la fin de vie des infrastructures font aujourd'hui déjà l'objet de mesures visant à maîtriser leurs impacts sur l'environnement. Dès lors, la question se pose de savoir lesquelles de ces mesures relèvent ou non de l'écoconception et en quoi l'écoconception peut constituer un levier additionnel pour améliorer la performance environnementale des infrastructures.

En l'absence d'une définition formelle, les éléments suivants ont été considérés pour cadrer le contenu de ce guide, spécifique aux infrastructures portuaires :

- Les ports ont dans la grande majorité des cas engagé des démarches visant à maîtriser leur impact sur leur environnement (e.g. plans de gestion environnementaux). Ces démarches portent généralement sur l'environnement immédiat des ports mais traitent également d'impacts à portée plus globale (e.g. gestion des déchets, maîtrise de la consommation énergétique, prévention des risques de pollution...). Les impacts visés par ces démarches sont majoritairement ceux liés à l'exploitation. Elles peuvent inclure des mesures de performance environnementale liées aux fonctionnalités des infrastructures, qui portent davantage sur le déploiement d'équipements spécifiques (e.g. collecte de déchets, traitement des eaux...) que sur la conception même de ces infrastructures.
- Les projets de travaux portuaires (constructions neuves ou réhabilitation, extension, adaptation de constructions existantes) font l'objet pour les opérations à enjeu, d'une évaluation environnementale spécifique (e.g. étude d'impact). Si ce processus d'évaluation doit théoriquement intégrer toutes les incidences du projet, à toutes les échelles pertinentes au regard des enjeux environnementaux considérés, il se déroule en pratique dans la grande majorité des cas, sur un périmètre spatial qui est l'environnement géographique du site de projet. L'intégration du projet dans son environnement local est maîtrisée et optimisée au travers de l'application de la séquence ERC (éviter, réduire, compenser). Certaines mesures de la séquence ERC peuvent avoir une influence directe sur la manière dont les infrastructures portuaires sont conçues, construites ou exploitées. En revanche les enjeux liés aux flux d'énergie et à l'utilisation de ressources qui s'opèrent à une échelle plus globale ne sont encore partiellement pris en compte et évalués dans le cadre de ce processus d'évaluation.
- Les démarches environnementales mises en œuvre dans les ports se focalisent aujourd'hui quasi-exclusivement sur la maîtrise des impacts environnementaux négatifs de ces espaces et de leur activité. L'optimisation des bénéfices écologiques que les infrastructures sont susceptibles de générer en phase d'exploitation reste peu considérée, notamment du point de vue des enjeux de renaturation de ces espaces artificialisés.

Considérant que :

- **Plusieurs documents méthodologiques existent pour le cadrage de l'évaluation environnementale des projets d'aménagements portuaires et de leur exploitation (voir références au chapitre 4.6) ;**
- **Ce guide a pour objectif de proposer des méthodes et outils complémentaires aux ressources existantes, permettant notamment d'améliorer la performance environnementale des infrastructures portuaires sur des aspects encore peu pris en compte, y compris hors du cadre habituel des processus d'évaluation environnementale appliqués aux projets ;**
- **Ce guide a pour objectif d'appuyer l'engagement des maîtres d'ouvrages et opérateurs portuaires dans des initiatives volontaristes, dépassant leurs obligations réglementaires.**

Il a été retenu de se focaliser dans ce guide sur les mesures d'écoconception servant les objectifs suivants :

- **La réduction des émissions de GES liés aux travaux des infrastructures (neufs ou sur existant) ;**
- **L'utilisation de matériaux à moindre impact environnemental et le recours à l'économie circulaire pour la construction, la réhabilitation ou la maintenance des infrastructures ;**
- **Les mesures consistant à développer les fonctionnalités écologiques des infrastructures et reconquérir la biodiversité au sein des ports.**

1.2.3 - Articulation avec le cycle de vie des infrastructures portuaires

Le cycle de vie des infrastructures portuaires à considérer dans une approche d'écoconception peut être décrit par les étapes suivantes. La marge de manœuvre dont dispose un maître d'ouvrage pour éco-concevoir une infrastructure dépend évidemment en premier lieu du fait que l'infrastructure soit déjà en place ou non.

1. Conception des infrastructures

Il s'agit de l'ensemble du processus allant de l'expression des besoins des gestionnaires et utilisateurs en matière d'infrastructure, à la réalisation des études nécessaires à leur mise en œuvre. Cette étape constitue la phase clé de projection, d'étude et de définition des solutions d'écoconception applicables aux étapes suivantes. C'est donc à cette étape que s'opère l'évaluation des effets prévisionnels des projets sur l'environnement et que des études comparatives d'impact permettent de concevoir et de dimensionner des infrastructures à moindre impact environnemental sur l'ensemble de leur cycle de vie. L'exercice d'écoconception à cette étape est donc directement corrélé à l'exercice d'évaluation environnementale, ces deux processus étant amenés à s'alimenter l'un l'autre par itération.

On rappelle ici que l'évitement des impacts environnementaux doit rester l'objectif premier des porteurs de projet. La question de la nécessité et du juste dimensionnement de l'infrastructure doit donc guider les premières réflexions sur l'écoconception.

2. Construction des infrastructures

Cette étape inclut la fourniture des ressources nécessaires à la construction (matière, énergie, travail humain), l'emploi et la mise en œuvre de ces ressources sur chantier (choix des engins, itinéraires et modes d'approvisionnement, méthodes constructives), la gestion des déchets... Les mesures d'écoconception mises en œuvre à cette étape découlent directement des orientations prises à l'étape précédente. Les acteurs techniques et scientifiques de la construction (e.g. entreprises de travaux, fournisseurs d'équipements, organismes de recherche et de formation) sont par ailleurs clé dans le développement de méthodes constructives innovantes effectivement applicables sur chantier et compatibles avec les objectifs de performance technique et économique des projets.

3. Exploitation des infrastructures

Si ce guide n'a pas vocation à traiter du sujet de l'écoconception des activités qui s'opèrent sur les infrastructures en phase d'exploitation, il couvre néanmoins les aspects de la conception et de la construction des infrastructures nécessaires à la mise en œuvre de systèmes d'exploitation plus vertueux (e.g. intégration de système de production d'énergie renouvelable sur site). Par ailleurs, c'est lors de cette phase d'exploitation que les mesures d'écoconception relatives à la reconquête de la biodiversité dans les ports sont opérées et/ou qu'elles produisent leur effet.

4. Maintenance des infrastructures

Les opérations de maintenance peuvent être considérées comme des étapes à part entière dans le cycle de vie des ouvrages, dès lors qu'elles sont susceptibles de mobiliser des opérations et des moyens d'intervention exceptionnels. Les choix faits en matière de conception des infrastructures peuvent avoir une influence significative sur les modalités de maintenance et les impacts environnementaux qui leurs sont associés. La projection des implications de maintenance est donc essentielle dans la démarche d'écoconception des infrastructures portuaires. Elle permet notamment d'intégrer les notions de durabilité et de réparabilité des infrastructures afin de pouvoir privilégier l'entretien et la rénovation plutôt que le remplacement.

5. Fin de vie / Requalification des infrastructures

Cette ultime étape implique à nouveau d'importants enjeux environnementaux, liés soit à la déconstruction des infrastructures, soit à leur reconfiguration en vue d'une exploitation pour de nouveaux usages. Bien qu'il soit complexe de se projeter finement dans des scénarios de fin de vie des infrastructures lors de leur conception initiale, en raison notamment du délai pluri-décennal qui sépare potentiellement ces deux étapes extrêmes du cycle de vie, il reste néanmoins possible d'anticiper et d'optimiser certains impacts et évolutions d'usage à long terme. L'adaptation des infrastructures au changement climatique et à la montée du niveau des mers constituent notamment aujourd'hui un enjeu fort d'écoconception.

La roue stratégie d'écoconception, ou roue de Brezet, est souvent utilisée pour illustrer les différents axes possibles d'écoconception d'un produit ou système. Une transposition de cette roue (en vert dans le schéma ci-dessous) au contexte spécifique de l'écoconception des infrastructures portuaires (en bleu dans le schéma ci-dessous) est proposée ci-après afin d'illustrer les exemples de mesures pouvant être appliquées aux différentes phases du cycle de vie de ces infrastructures. Ces exemples de mesures sont explicités dans les chapitres 3 et 4 du guide.

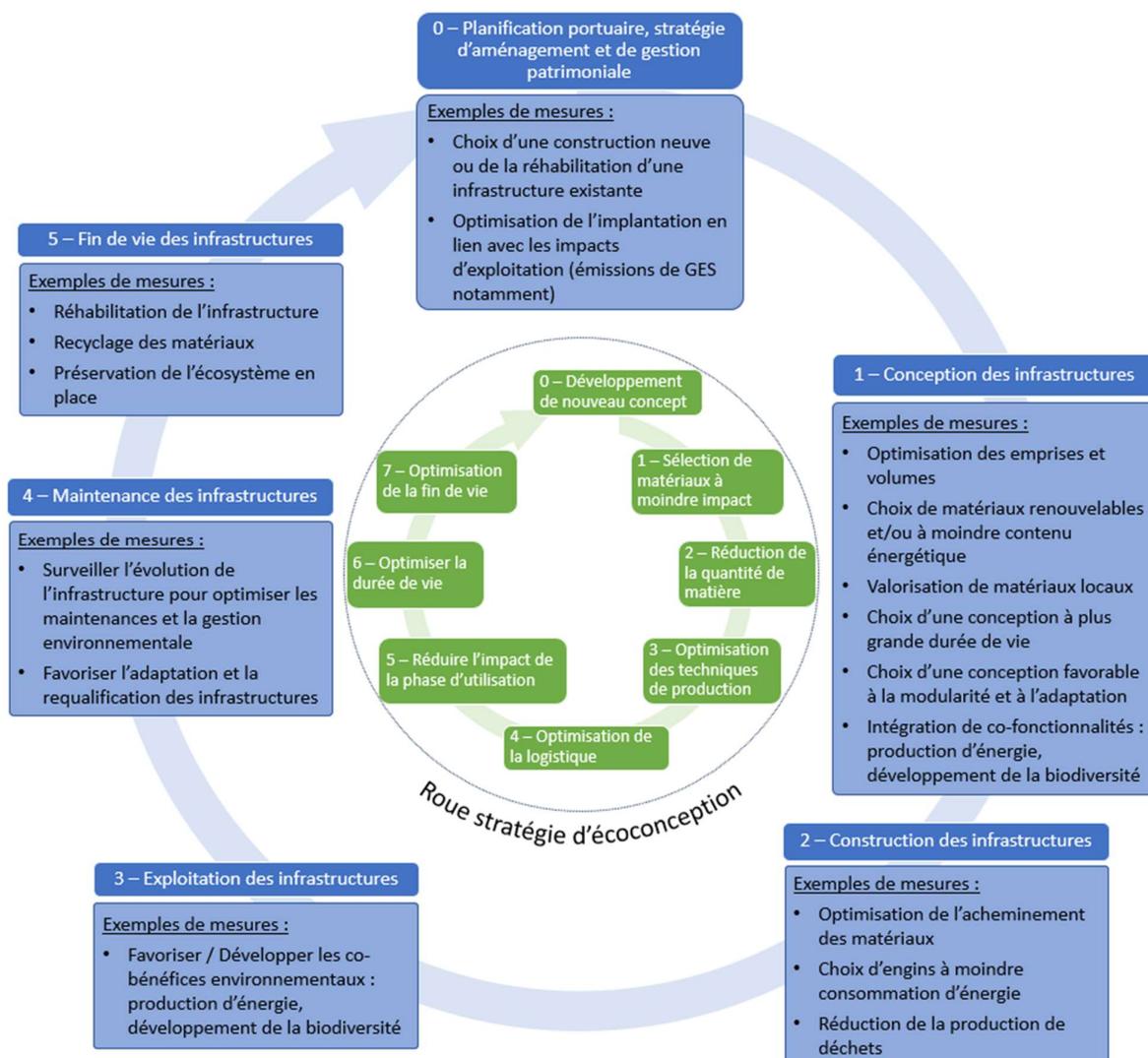


FIGURE 2 : TRANSPPOSITION DE LA ROUE STRATEGIE DE L'ECOCONCEPTION AUX INFRASTRUCTURES PORTUAIRES

1.2.4 - Démarches associées et articulation : cas particulier de la séquence ERC

Ingénierie écologique, écoconception, aménagements écologiques, solutions fondées sur la Nature et biomimétisme... Ces termes se développent depuis une vingtaine d'années, dans tous les projets d'ouvrages et d'infrastructure, y compris portuaire. L'enjeu commun à cette polysémie « éco-centrée » est d'aller vers des projets d'aménagement plus sobres du point de vue de leur consommation de ressources et mieux intégrés à leur environnement. La multiplication de ces termes et le recoupement ou non de leurs champs d'application peut néanmoins créer une confusion lors de l'implémentation, de la communication et de la valorisation des démarches et méthodes associées. L'annexe 1 propose de clarifier l'articulation entre ces différentes notions et celle de l'écoconception.

2 - ENJEUX D'ECOCONCEPTION DES INFRASTRUCTURES POUR LA TRANSITION ECOLOGIQUE DES PORTS

2.1 - Pressions et impacts des infrastructures portuaires sur l'environnement

L'intégration des aspects environnementaux dans le cycle de vie d'une infrastructure portuaire nécessite au préalable d'identifier ces aspects au travers d'outils d'évaluation environnementale adaptés.

Les notions d'impacts environnementaux des projets d'infrastructures ont largement évolué ces dernières années avec l'élaboration de nombreux guides par le MTECT, permettant d'appuyer l'exercice d'évaluation environnementale des projets sur des bases méthodologiques solides. Plusieurs guides ont trait plus particulièrement aux projets marins. Ces guides peuvent être utilisés comme base méthodologique pour l'évaluation environnementale nécessaire à l'application d'une démarche d'écoconception. Les références de ces ressources sont fournies au chapitre 3.6. La démarche d'écoconception balayant cependant un spectre souvent plus large de sujets environnementaux que ceux pour lesquels ces guides ont été établis, certaines thématiques nécessitent des compléments méthodologiques dont le présent document fait l'objet.

Ce chapitre présente ainsi les pressions génériques que peuvent exercer les infrastructures portuaires sur leur environnement et telles que décrites au travers de ces documents méthodologiques existants. Il souligne les thématiques environnementales pour lesquelles l'écoconception peut constituer une démarche de progrès complémentaire.

Le dernier guide en date publié est celui relatif à l'application de l'autorisation environnementale pour les projets EMR (Énergies marines Renouvelables) à « caractéristiques variables » (publié en avril 2022). Ce guide reprend les définitions importantes sur les études d'impacts et notamment la définition de la pression.

« Une pression correspond à la perturbation des caractéristiques biotiques (vivantes) d'un habitat ou d'une espèce et/ou des caractéristiques abiotiques (non vivantes) d'un habitat. Les pressions peuvent être d'origine anthropique (pollutions aux hydrocarbures, introduction d'espèces non-indigènes, etc.) ou naturelle (tempêtes, submersions marines, etc.). »

Une pression anthropique **est donc le mécanisme à travers lequel une activité humaine peut avoir un effet sur un habitat ou une espèce**. Cette pression peut être d'ordre physique, chimique ou biologique et génère une modification des caractéristiques biotiques ou abiotiques sur un habitat ou une espèce (impact ou effet).

La typologie des pressions est le résultat des travaux effectués dans le cadre de l'application de la Directive Cadre Stratégie Milieu Marin (DCSMM) (Tableau 2 de l'annexe 3 de la DCSMM, modifié par la Directive 2017/845 du 17 mai 2017) qui ont été ensuite amendés par l'UMS Patrinat en intégrant les résultats de projets comme CARPE DIEM.

Les pressions ont été regroupées en 3 grands thèmes, qui se découpent en 17 catégories et en 40 pressions :

- **Pressions physiques (P)** (perte physique, perturbations physiques, modifications des conditions hydrologiques)
- **Substances déchets et énergie (CO)** (apports de sons anthropiques, apports d'autres formes d'énergie, apports de substances dangereuses, apports de nutriments, apports de matières organiques, apports d'eau, apports de déchets)
- **Biologique (B)** (introduction d'OGM, introduction ou propagation d'espèces non indigènes, introduction d'agents pathogènes microbiens, disparition ou altération des communautés biologiques naturelles dues à l'élevage d'espèces animales ou végétales, prélèvements d'espèces sauvages, perturbations des espèces dues à la présence humaine).

Dans différents documents, notamment liés aux Documents Stratégiques de Façade (DSF) et Documents Stratégiques de Bassin (DSB), il a été défini les pressions qui pouvaient être mises en jeu dans des activités portuaires (en phase travaux et d'exploitation).

Les tableaux ci-dessous regroupent ces pressions par typologie d'activité :

Pressions	Construction de digues, terre-plein gagné sur la mer	Dragage, immersion, clapage
M1 : Perte d'habitat	x	x
M2 : Changement d'habitat	x	x
M3 : Extraction de substrat	x	x
M4 : Tassement	x	x
M5 : Abrasion superficielle		
M6 : Abrasion de sub-surface	x	x
M7 : Remaniement	x	x
M8 : Dépôt faible de matériel (<2cm)	x	x
M9 : Dépôt important de matériel (>2cm)	x	x
M10 : Modification des conditions hydrodynamiques	x	x
M11 : Modification de la charge en part.	x	x
P1 : Obstacle au mouvement	x	x
P2 : Mort ou blessure par collision/interactions	x	x
P3 : Dérangement d'espèces	x	x
P4 : Déchets solides	x	x
P5 : Modification de la température		
P6 : Modification de la salinité	Non-concernée	NC
P7 : Modification du pH	NC	NC
P8 : Émissions sonores [et vibrations]	x	x
P9 : Changements électromagnétiques	NC	NC
P10 : Introduction de lumière artificielle	x	x
P11 : Diminution de la lumière naturelle	x	x
C01 : Contamination par ETM	x	x
C02 : Contamination par HAP	x	x
C03 : Contamination par composants synthétiques	x	x
C04 : Contamination par radionucléides	NC	NC
C05 : Introduction de subst. à caract. visqueux	NC	NC
C06 : Modification des apports en nutriments		x
C07 : Modification des apports en MO		x
C08 : Désoxygénation		x
B1 : Transfert d'individus génétiquement différents d'espèces indigènes		
B2 : Introduction ou propagation d'esp. non- indigènes		
B3 : Introduction de pathogènes		
B4 : Prélèvement d'espèces cibles		x
B5 : Prélèvement d'espèces non- cibles		
B6 : Appauvrissement génétique de populations naturelles		

TABLEAU 1 : PRESSIONS RETENUES EN PHASE DE TRAVAUX PORTUAIRES

Pressions	Transport de passagers et de marchandises	Stationnement de navires dans une zone portuaire	Logistique de navires dans une zone portuaire
M1 : Perte d'habitat			
M2 : Changement d'habitat		x	
M3 : Extraction de substrat			
M4 : Tassement		x	
M5 : Abrasion superficielle			
M6 : Abrasion de sub-surface		x	x
M7 : Remaniement		x	x
M8 : Dépôt faible de matériel (<2cm)			x
M9 : Dépôt important de matériel (>2cm)			
M10 : Modification des conditions hydrodynamiques			
M11 : Modification de la charge en particules			
P1 : Obstacle au mouvement			
P2 : Mort ou blessure par collision/interactions	x		
P3 : Dérangement d'espèces	x	x	x
P4 : Déchets solides	x	x	x
P5 : Modification de la température	NC		
P6 : Modification de la salinité	NC	NC	NC
P7 : Modification du pH		NC	NC
P8 : Émissions sonores [et vibrations]	x	x	x
P9 : Changements électromagnétiques		NC	NC
P10 : Introduction de lumière artificielle	x	x	x
P11 : Diminution de la lumière naturelle			
C01 : Contamination par ETM	x	x	x
C02 : Contamination par HAP	x	x	
C03 : Contamination par composants synthétiques	x	x	x
C04 : Contamination par radionucléides		NC	NC
C05 : Introduction de substances à caractère visqueux	x	NC	NC
C06 : Modification des apports en nutriments	x	x	x
C07 : Modification des apports en matière organique	x	x	x
C08 : Désoxygénation	x	x	x
B1 : Transfert d'individus génétiquement différents d'espèces indigènes	x	x	
B2 : Introduction ou propagation d'espèces non indigènes	x	x	
B3 : Introduction de pathogènes	x	x	
B4 : Prélèvement d'espèces cibles			
B5 : Prélèvement d'espèces non- cibles	x		x
B6 : Appauvrissement génétique de populations naturelles			

TABLEAU 2 : PRESSIONS RETENUES EN PHASE D'EXPLOITATION DES PORTS

Si ce choix des pressions pour les infrastructures portuaires est évidemment générique (elles peuvent différer en fonction des particularités de chaque projet), il permet néanmoins d'apprécier l'étendue des pressions potentielles générées par les installations portuaires sur leur environnement et sur lesquelles l'écoconception peut permettre d'agir.

On notera que cette classification illustre la manière dont l'évaluation environnementale des projets réalisée dans le cadre de procédures administratives d'autorisation se focalise en pratique sur les pressions exercées localement. **A ces pressions doivent être rajoutées les pressions plus globales opérant en dehors ou au-delà du territoire d'influence de l'infrastructure et notamment les pressions relatives aux émissions de gaz à effet de serre et celles relatives à l'emploi et la gestion des matériaux et ressources.**

Concernant par ailleurs le sujet de la biodiversité, de nombreuses démarches d'écoconception portuaire menées aujourd'hui en France et dans le monde reposent sur une approche dépassant les notions de pressions et d'impacts de projets. Les ports sont considérés comme des aménagements historiques, souvent irréversibles du littoral, ayant conduit à une transformation profonde et durable des habitats côtiers. L'écoconception consiste alors à reconquérir la biodiversité en considérant ces espaces et leurs infrastructures comme des écosystèmes à part entière, en interrelation avec les écosystèmes naturels environnants.

2.2 - Ecoconception et séquence ERC

Une fois ces pressions définies, l'évaluation environnementale permet d'évaluer leur niveau d'intensité puis de les croiser avec la sensibilité des compartiments du milieu physique, biologique et humain. Il s'agit de définir les niveaux d'impact et de les hiérarchiser. Les mesures les plus appropriées peuvent alors être définies pour maîtriser au mieux l'impact des infrastructures sur l'environnement. A ce stade, l'écoconception et la séquence ERC constituent deux démarches étroitement liées.

Introduite en droit français en 1976, la séquence ERC vise depuis 2016 (loi pour la reconquête de la biodiversité), une absence de perte nette de biodiversité dans la conception puis la réalisation de plans, de programmes ou de projets d'aménagement du territoire. La séquence ERC s'applique à tous types de plans, programmes et projets soumis à évaluation environnementale ainsi qu'aux projets soumis à diverses procédures administratives d'autorisation au titre du code de l'environnement (autorisation environnementale, dérogation à la protection des espèces, évaluation des incidences Natura 2000, etc.).

Elle a pour objectif d'éviter les atteintes à l'environnement, de réduire celles qui n'ont pu être suffisamment évitées et, si possible, de compenser les effets notables qui n'ont pu être ni évités, ni suffisamment réduits. L'ordre de cette séquence traduit une hiérarchie : l'évitement est à favoriser comme étant la seule opportunité qui garantisse l'absence d'atteinte à l'environnement. La compensation ne doit intervenir qu'en dernier recours, quand les impacts n'ont pu être ni évités, ni réduits suffisamment. Elle dépasse la seule prise en compte de la biodiversité, pour englober l'ensemble des thématiques de l'environnement (air, bruit, eau, sol, santé des populations...).

Dès lors que la démarche d'écoconception d'infrastructures portuaires contribue à éviter ou réduire certains impacts sur l'environnement, les mesures associées doivent pouvoir être valorisées par les porteurs de projet dans le cadre de leur démarche d'autorisation en tant que mesures ERC. La séquence ERC devant être mise en œuvre sur la base d'enjeux environnementaux hiérarchisés, on notera cependant que certaines mesures d'écoconception d'infrastructures ne répondent pas nécessairement aux priorités d'action découlant de l'évaluation des impacts des projets sur l'environnement. Dans le cadre des projets soumis à évaluation environnementale et/ou à autorisation, les maîtres d'ouvrage peuvent ainsi être enclins voire contraints à diriger leurs efforts vers d'autres mesures, dès lors que l'écoconception ne permet pas de répondre aux principaux enjeux environnementaux de leur projet.

La séquence ERC s'appliquant dans un processus réglementaire, on rappelle que l'écoconception est une démarche volontaire qui doit permettre de placer les enjeux environnementaux au cœur des préoccupations des maîtres d'ouvrage et opérateurs portuaires, notamment pour les aspects de leur activité non soumis au titre de la réglementation à évaluation environnementale ou à procédure administrative d'autorisation. En cela, l'écoconception est complémentaire à la séquence ERC pour la bonne prise en compte de l'environnement sur

l'ensemble du cycle de vie des infrastructures. On notera enfin que la démarche ERC semble progressivement devenir une démarche de progrès à laquelle les maîtres d'ouvrages et gestionnaires d'aménagement sont encouragés à souscrire également en dehors de son application réglementaire. Dès lors, cette démarche se recoupe en très grande partie avec celle de l'écoconception.

Le guide méthodologique « Définition des mesures « éviter, réduire, compenser » relatives au milieu marin » édité par le Commissariat général au développement durable (CGDD) en Février 2023, constitue un recueil de mesures applicables aux projets maritimes et donc aux projets d'infrastructures portuaires. Plusieurs de ces mesures peuvent être qualifiées de mesures d'écoconception (cf. définitions données aux chapitres précédents). Cet ouvrage couvre de manière relativement exhaustive les pressions et impacts pouvant être générés par un projet portuaire et constitue de ce fait une ressource d'intérêt pour développer des mesures d'écoconception permettant de maîtriser les impacts de projets portuaires sur leur environnement proche. A l'image des guides sur l'évaluation environnementale cités ci-avant, ce guide sur les mesures ERC applicables aux projets marins liste cependant peu de mesures qui participent à la réduction des émissions de GES et à la lutte contre le changement climatique, ainsi qu'à l'optimisation de l'emploi des ressources et de leur empreinte environnementale. En revanche, le guide présente plusieurs mesures ERC traitant de la reconquête de la biodiversité au sein des ports en agissant sur les fonctions d'habitat des infrastructures. Ces mesures et leurs enjeux n'y sont pour autant pas développés et illustrés de manière concrète.

Ce guide vient en complément des ressources méthodologiques disponibles par ailleurs, notamment sur l'application de la séquence ERC aux projets marins. Il vise à décrire des méthodes et mesures concrètes et à fort enjeu pour soutenir l'engagement des maîtres d'ouvrage dans la transition écologique des ports sur les aspects fondamentaux du changement climatique, de l'emploi des ressources naturelles et de l'érosion de la biodiversité.

2.3 - L'écoconception comme levier particulier d'amélioration de la performance environnementale des ports

2.3.1 - Emissions de GES

Les GES ont un impact significatif sur le climat en piégeant une partie de la chaleur du soleil dans l'atmosphère de la terre. Le principal gaz à effet de serre est le dioxyde de carbone (CO₂), mais d'autres gaz, tels que le méthane, l'oxyde nitreux et les halocarbures, participent également à l'effet de serre. Par ses activités, l'Homme accroît de manière significative depuis le début de l'ère industrielle, dite anthropocène, la concentration de ces gaz dans l'atmosphère, entraînant une modification globale et à long terme du climat et un réchauffement généralisé de la température à la surface du globe. Ce réchauffement perturbe et menace le monde du vivant auquel nous appartenons, nécessitant l'engagement à court terme d'actions drastiques pour réduire les émissions de GES liées à nos activités.

D'après une étude menée par l'*International Journal of Environmental Research and Public Health*¹ sur un port espagnol, l'exploitation représenterait autour de 85% des émissions de GES et la construction de l'infrastructure environ 15% des émissions. Cela s'explique par les quantités importantes d'énergie utilisées pour le fonctionnement des ports maritimes, liées en partie à une machinerie lourde et à une exploitation continue 24h/24h (manutention, éclairage, etc.). Aux Pays-Bas, le port de Rotterdam est ainsi responsable à lui seul de 13,5% des émissions nationales. En toute rigueur, pour avoir une vision exhaustive des émissions de gaz à effet de serre liées à l'activité portuaire, il convient de s'intéresser à la fois au volet exploitation et au volet infrastructure.

Les mesures et actions présentées dans ce guide ont pour objectif d'identifier prioritairement les leviers à mettre en œuvre pour réduire l'impact GES lié à la construction et à l'entretien de l'infrastructure portuaire et non aux leviers permettant d'améliorer l'empreinte carbone de son exploitation. En outre, on notera que la

¹ Carbon Footprint of a Port Infrastructure from a Life Cycle Approach, Rodrigo Saravia de los Reyes et al., 2020

conception de l'infrastructure peut être l'occasion d'évaluer en phase amont les possibilités d'utiliser des sources d'énergie propres et renouvelables pour alimenter les opérations portuaires. Cela peut inclure l'installation de panneaux solaires, de systèmes éoliens ou d'autres technologies de production d'énergie verte. Opter pour des équipements électriques ou hybrides, tels que des grues, des chariots élévateurs et des véhicules de transport terrestre, peut aussi réduire les émissions directes provenant des moteurs à combustion interne même si la faisabilité de ceux-ci reste très dépendante du mix énergétique du territoire considéré.

Pendant la construction, les émissions de gaz à effet de serre (GES) sont principalement liées à :

- la production de matériaux de construction (béton, acier, notamment),
- la logistique d'approvisionnement de ces matériaux sur le chantier (distance des carrières, usines, mode d'approvisionnement),
- l'énergie nécessaire pour les travaux (engins de construction, avitaillement, énergie des bâtiments des bases vie, etc.).

En France, les secteurs du bâtiment et de la construction représentent le 3^e poste d'émissions de gaz à effet de serre, ce qui correspondait en 2021 à 43,8 millions de tonnes éq. CO₂ (Source : INSEE, 2022). C'est donc l'un des principaux leviers sur lesquels nous pouvons collectivement agir pour nos émissions de gaz à effet de serre. Dans le secteur du bâtiment, des normes et réglementations ont été développées depuis plusieurs années pour réduire l'empreinte carbone des constructions neuves et des rénovations (décret tertiaire, label BBC Effinergie Renovation, norme RE2020 qui imposera une empreinte carbone maximale de 415 kgCO₂e/m² pour les constructions individuelles neuves dès 2031, etc.). Les innovations et mesures développées pour répondre à ces obligations réglementaires peuvent être adaptées à d'autres secteurs de la construction, notamment pour les constructions des bâtiments portuaires (administration et exploitation).

En France, plusieurs réglementations sont en place pour réguler les émissions de gaz à effet de serre (GES) et favoriser la transition vers une économie bas-carbone dans les ports. Les principales obligations sont les suivantes :

- le Plan National Énergie-Climat (PNEC) fixe les objectifs de réduction des émissions de GES pour l'ensemble du pays ;
- la Loi sur la Transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTECV) établit un cadre juridique pour la transition énergétique et la lutte contre le changement climatique ;
- les plus grands ports doivent soumettre des rapports réguliers sur leurs émissions de GES, conformément à la réglementation nationale en vigueur pour les entreprises de plus de 500 personnes.

La construction d'infrastructures maritimes peut par ailleurs générer des émissions de GES indirectement via leur impact sur les écosystèmes en place et notamment ceux disposant d'une capacité particulière à stocker du carbone. Ainsi, le changement de nature et l'artificialisation des sols réduit considérablement l'absorption des GES et donc augmente l'empreinte carbone des projets. Cette donnée est très bien documentée lorsqu'il s'agit de sols terrestres, mais les études concernant l'artificialisation des fonds marins restent peu nombreuses à ce jour. Selon certaines estimations, les impacts en matière d'émission de GES liés à l'altération des habitats marins pour ces projets pourraient être équivalente à celle de l'artificialisation de prairies (voire supérieures dans le cas d'affectation d'habitats spécifiques à fort potentiel de séquestration tels que les mangroves ou les herbiers). A noter que ce type d'impact peut s'étendre au-delà du périmètre des infrastructures elles-mêmes, certains milieux attenants pouvant régresser sous l'influence des perturbations hydro-sédimentaires, ou du fait d'une évolution de la qualité physico-chimique des eaux et des sédiments.

Les sources et puits de carbone principaux pouvant être rencontrés sur des projets d'infrastructures portuaires sont synthétisés dans le tableau suivant.

Sources de carbone	Puits de carbone
Matériaux et équipements de construction Changement d'utilisation des terres et fonds marins / Artificialisation GES indirects provenant de la consommation d'électricité Gaz naturel (production de méthane, perte de GNL par évaporation) Sources mobiles (carburants de transport) Groupes électrogènes de secours Traitement / gestion des déchets Utilisation de l'eau et émissions associées Équipement d'exploitation et de maintenance	Matériau de dragage utilisé pour créer ou restaurer des habitats côtiers végétalisés Création et/ou maintien de zones d'habitat à fort potentiel de captage / séquestration (e.g. vasières, herbiers, mangroves...) Plantation/ensemencement pour la création ou la réhabilitation de zones humides

FIGURE 3 : SOURCES ET PUIXS DE CARBONE POUR UNE INFRASTRUCTURE PORTUAIRE (ADAPTE DE PIANC WG 188)

Les leviers principaux identifiés pour réduire l'empreinte carbone des infrastructures portuaires et pouvant relever d'une démarche d'écoconception sont les suivants :

- l'optimisation et la limitation des emprises de travaux et volumes des matériaux utilisés sur les projets d'infrastructure pour limiter au maximum leur consommation et donc leur impact ;
- l'utilisation de matériaux avec une empreinte carbone plus faible ;
- l'optimisation des itinéraires de transport ;
- la réduction des volumes de déchets générés par le chantier ;
- la mise en œuvre de pratiques de gestion de l'énergie et l'utilisation de sources d'énergie renouvelable.

Il est essentiel d'intégrer ces leviers dès la phase de conception pour permettre leur application effective au projet. On rappelle enfin l'importance de la préservation des habitats naturels, du fait notamment de leur capacité de séquestration de carbone, via une application rigoureuse de la séquence ERC.

2.3.2 - Prise en compte des effets du changement climatique dans le dimensionnement des infrastructures

Le changement climatique génère des risques considérables sur les infrastructures portuaires, soumises à des conditions météo-océaniques plus puissantes et qui obligent les maîtres d'ouvrages à repenser leurs infrastructures pour adapter les sites à l'interface terre-mer. L'analyse des risques climatiques actuels et futurs est essentielle pour comprendre les impacts potentiels du changement climatique sur les ports et les infrastructures maritimes. La vulnérabilité de ces infrastructures est à déterminer afin de comprendre les secteurs critiques et de prioriser les actions nécessaires. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) estime dans son rapport sur les Océans publié le 25 septembre 2019 que le niveau marin pourrait augmenter jusqu'à 82 cm d'ici 2100 selon le scénario le plus pessimiste (RCP 8.5) et les constats *in-situ* tendent à confirmer que le scénario le plus pessimiste devient probable au vu de l'augmentation des émissions de GES au niveau mondial.

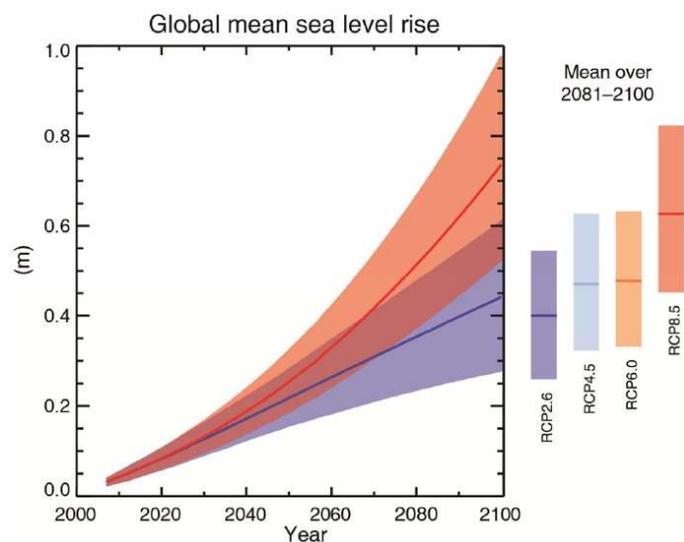


FIGURE 4 : SCENARIO DE REHAUSSE DU NIVEAU MOYEN DE LA MER - GIEC

Dans ce cadre, le gouvernement français a lancé en mai 2023, la Trajectoire de Réchauffement de référence pour l'Adaptation au Changement Climatique (TRACC) pour étudier les politiques d'adaptation au changement climatique en se basant à la fois sur les scénarios optimistes et pessimistes. L'objectif est de définir une trajectoire de réchauffement climatique et d'harmoniser les dispositifs d'adaptation à mettre en place pour y faire face. La trajectoire retenue sera publiée en 2024 et devra servir de scénario de référence pour planifier cette adaptation.

Une planification stratégique implique l'identification des actions à entreprendre pour renforcer la résilience des ports et des infrastructures maritimes face à ces enjeux, ce qui implique en parallèle une conception résiliente qui garantisse leur durabilité.

Ecoconcevoir un projet portuaire, c'est donc aussi intégrer parfaitement ces risques et repenser les infrastructures pour qu'elles puissent s'adapter à ces événements extrêmes :

- intégrer dès à présent les projections du GIEC dans le dimensionnement des quais et ouvrages de protection (période de retour des événements extrêmes et rehausse climatique) ;
- repenser les ouvrages pour accepter des taux de dommages mineurs et anticiper leur structure pour pouvoir remplacer/réparer des éléments plus facilement après des événements extrêmes (sections disjointes avec joints pour les passerelles par exemple) ;
- anticiper les futures élévations du niveau marin en réfléchissant dès la conception à une rehausse future des ouvrages.

2.3.3 - Matériaux et ressources

Les ressources naturelles sont des sources de matière et d'énergie accessibles économiquement dans l'environnement naturel sous forme primaire avant leur transformation par l'activité humaine. Une ressource naturelle peut être renouvelable à l'échelle humaine (biomasse animale ou végétale, eau) ou non renouvelable (ressources métallique, minéraux, ressources énergétique fossile) (définition Insee).

La consommation globale de ressources à l'échelle planétaire dépasse depuis plus de 50 ans, la capacité de la Terre à les renouveler. Afin de limiter la raréfaction des ressources naturelles dont nos sociétés dépendent pour se maintenir et se développer, leur préservation est un enjeu majeur de notre siècle, au même titre que la réduction des émissions de gaz à effet de serre et que la réduction de l'érosion de la biodiversité.

Un autre enjeu fort de préserver des ressources naturelles est également de limiter les impacts environnementaux liés à leur extraction et leur transformation.

Le secteur des Travaux publics est un gros consommateur de matières premières non renouvelables et notamment les travaux maritimes, du fait de nombreuses spécificités inhérentes à la construction d'infrastructures en contact avec le milieu marin (e.g. dimension des ouvrages, objectifs de durabilité et normes constructives associées, outils et méthodes d'acheminement et de mise en œuvre...).

Le CGDD publiait en 2021 qu'en France, en 2018, l'extraction totale de matières minérales du sous-sol s'élevait à 381 millions de tonnes (Mt), couvrant 80 % des besoins de l'économie française. Les matières minérales extraites en France sont essentiellement non métalliques et sont composées pour les neuf dixièmes de sables et de graviers, dont l'extraction domestique couvre 97 % des besoins.

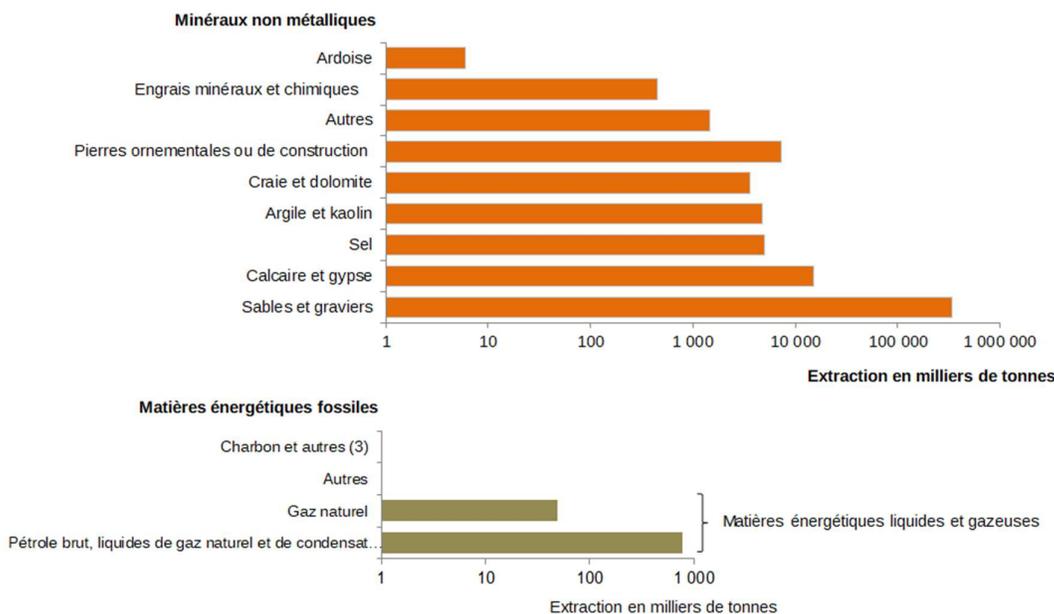


FIGURE 5 : EXTRACTION DE MATIÈRES MINÉRALES DU SOUS-SOL, EN FRANCE, EN 2018 (SOURCE : INSEE, UNICEM, MTES)

Dans le secteur du BTP, le sable est la deuxième ressource la plus utilisée mondialement, derrière l'eau et bien loin devant le pétrole : il est estimé que 50 milliards de tonnes sont extraites par an, soit 1818 kg par personne et par jour. Quatre cinquièmes de cette ressource sont utilisés pour le secteur de la construction, notamment pour la fabrication du béton.

L'extraction de granulats pour le secteur des infrastructures en France se matérialise donc par des impacts environnementaux significatifs sur le territoire national au niveau des sites d'extraction. Les minerais de fer et les hydrocarbures, autres postes de consommation majeure de ressources non renouvelables des travaux d'infrastructures, proviennent pour la grande majorité d'importations. Si les impacts sont moins visibles, car occasionnés hors territoire national, ils n'en sont pas moins significatifs et cruciaux à prendre en compte.

Intégrer ce caractère « non renouvelable » des matériaux et favoriser l'écoconception des projets d'infrastructure portuaire est ainsi primordial pour :

- optimiser au maximum les quantités de matériaux bruts « extraits » ;
- privilégier le réemploi des matériaux et ressources déjà présents sur site ou à proximité lorsque cela est possible ;
- privilégier l'utilisation de matériaux recyclés lorsque le réemploi n'est pas possible.

2.3.4 - Biodiversité subaquatique

2.3.4.1 - Ecologie portuaire et biodiversité

Les pressions décrites au 2.1 - pouvant localement affecter la biodiversité subaquatique peuvent être regroupées en trois catégories :

- **Altération d'habitats et perte de fonctionnalités écologiques** : la création des ports entraîne des changements dans la morpho-topo-bathymétrie de la côte (e.g. verticalisation), la courantologie (e.g. création de zones calmes), la nature des substrats (e.g. apports de substrats durs, accrétion/érosion sédimentaires) ... Il en résulte une altération voire une perte irréversible des habitats naturels originels. Les fonctions écologiques associées telles que les nourriceries, les zones d'alimentation, de reproduction, de croissance peuvent alors ne plus opérer localement et limiter ainsi le développement de différentes espèces animales et végétales tant mobiles que fixées, à l'échelle du port mais aussi des zones avoisinantes. Si ces changements sont souvent rédhibitoires pour le maintien de la diversité des communautés d'espèces initiales, certaines peuvent s'adapter et peuvent y trouver des avantages dans l'accomplissement de leur cycle de vie.
- **Pollution** : l'activité portuaire associée à l'enclavement de certains bassins entraînent une dégradation de la qualité du milieu soit ponctuelle (ruissellements d'eaux pluviales, pollution accidentelle), soit de façon plus rémanente (contamination des sédiments, augmentation de la turbidité, taux de sédimentation). Les espèces les plus sensibles disparaissent pour laisser la place à des communautés simplifiées plus résistantes aux pollutions chroniques et aiguës. Certains secteurs de concentration de la contamination peuvent devenir totalement inhabitables (e.g. vases polluées).
- **Introduction d'espèces non indigènes** : du fait du transit de navires provenant de zones géographiques très variées, les ports sont des lieux potentiels d'introduction d'espèces non indigènes le long du littoral. Leurs caractéristiques environnementales particulières et contraintes sont à même de favoriser le développement de certaines d'entre elles au détriment d'espèces indigènes moins adaptées à ces conditions contraintes. Ponctuellement, les plus compétitives peuvent alors avoir un caractère envahissant et dominer les communautés.

Si ces pressions et impacts sont avérés, la multiplication des observations de la biodiversité dans les ports au cours des quinze dernières années montre néanmoins que les espaces portuaires peuvent héberger une certaine richesse et une certaine diversité biologique. De nombreuses espèces marines trouvent ainsi dans ces espaces particuliers, des conditions propices à l'accomplissement de tout ou partie de leur cycle de vie. Longtemps déconsidérés du point de vue de leur intérêt écologique, les ports commencent donc à être perçus comme des écosystèmes à part entière, certes anthropiques, mais dont le fonctionnement mérite une meilleure compréhension et une gestion adaptée, notamment dans une optique de restauration écologique des milieux littoraux.

En effet, au même titre que le concept d'écologie urbaine s'est développé pour « remettre la nature en ville », notamment en guise de soutien à la biodiversité, un concept parallèle que l'on pourrait qualifier d'écologie portuaire se développe progressivement pour intégrer la particularité de ces espaces côtiers et développer des solutions permettant d'y initier des trajectoires écologiques plus vertueuses. La perte cumulée de petits fonds côtiers au profit du développement portuaire et de l'urbanisation littorale atteignant par endroit en France plusieurs dizaines de pourcents du linéaire côtier, une meilleure maîtrise des relations entre ces espaces artificiels et naturels est nécessaire pour maintenir le bon état des écosystèmes littoraux dans leur ensemble.

Dans ce contexte, l'écoconception des infrastructures portuaires constitue un levier pour réduire l'impact de nouveaux développements sur les milieux naturels, mais également pour rendre les espaces portuaires plus fonctionnels pour la vie marine.

Cet objectif n'est pas sans soulever des interrogations récurrentes sur les risques associés pour l'exploitation des ports ou pour la vie marine (contamination, espèces invasives...). L'annexe 2 propose ainsi d'approfondir la réflexion sur ces enjeux spécifiques. On précise ici que l'opportunité d'engager une telle démarche doit être évaluée au cas par cas, suivant les bonnes pratiques méthodologiques décrites dans ce guide et dans les autres ouvrages de référence cités.

2.3.4.2 - Limites et potentiel d'habitat des infrastructures portuaires pour la vie marine

Chaque typologie d'ouvrage possède des particularités physiques et structurelles qui influencent les processus de colonisation et de développement des communautés d'espèces marines. Ces habitats artificiels n'ont souvent pas d'équivalent en milieu naturel et la coexistence de caractéristiques singulières et anthropiques (e.g. substrats artificiels, structures verticales ou flottantes, exposition à des pressions environnementales diffuses spécifiques aux activités portuaires...) mène souvent au développement de peuplements peu diversifiés, dominés par des espèces opportunistes voire non indigènes.

Les murs de quais verticalisent par exemple les fonds côtiers sur plusieurs mètres voire dizaines de mètres de hauteur, réduisant ainsi significativement l'étendue des habitats d'estran et de petits fonds et « comprimant » l'étagement des communautés associées sur de très faibles surfaces en comparaison au linéaire côtier aménagé. Outre la perturbation structurelle évidente de l'habitat, cette verticalisation affecte de nombreux critères environnementaux tels que l'exposition à la lumière ou encore la capacité de rétention d'eau, réduisant l'aptitude de nombreuses espèces à s'établir et perturbant ainsi significativement les fonctions écologiques associées à ces espaces.

Les structures flottantes telles que les pontons, catways ou coffres d'amarrage constituent des habitats uniques du fait notamment de leur caractère flottant, fixe et côtier. En milieu naturel, les débris de bois et macroalgues sont ponctuels, temporaires et plutôt présents au large. Situés en subsurface et accompagnant les cycles de marée, ces objets présentent pour autant des stimuli positifs à l'installation pour de nombreuses espèces fixées ou mobiles et peuvent être le lieu de développement de chaînes trophiques complexes. Dans certains ports de plaisance, ces habitats artificiels peuvent cumuler plusieurs kilomètres de linéaire et constituent une certaine alternative aux petits fonds côtiers. La multiplication des observations de la biodiversité dans les ports semble par ailleurs indiquer une prévalence de développement des espèces non indigènes sous ces ouvrages flottants et ombragés, en comparaison aux autres types d'ouvrages en présence (digues, quais, etc.).

Généralement constitués d'empilement de roches et/ou d'éléments préfabriqués, les digues et brises lames offrent un habitat complexe constitué de milliers de cavités dont les dimensions varient avec la taille des blocs constitutifs (le plus souvent d'ordre décimétrique à métrique). Si ces ouvrages sont généralement les habitats les plus riches et productifs des systèmes portuaires, ils présentent néanmoins des limites dont par exemple :

- l'instabilité des unités de la couche externe en zone exposée qui, en bougeant régulièrement, empêche la mise en place de communautés complexes à vitesse de développement faible (e.g. : coraux, lithophyllum, coralligène) ;
- la porosité de l'ouvrage qui limite fortement la capacité de rétention d'eau à marée basse ;
- la forte pente de l'ouvrage qui comprime les différents étages de zonation du vivant d'un écosystème rocheux et augmente les mécanismes de compétition intra et interspécifiques,
- l'homogénéité de dimension des cavités et le manque de microhabitats associé.

Les études de biodiversité réalisées sur ces ouvrages en différentes localisations de la planète montrent ainsi que les communautés d'espèces y sont généralement moins diversifiées et abondantes qu'en milieu naturel. Ces études soulignent régulièrement la présence d'espèces non indigènes, voire invasives sur ces substrats.

Enfin, les espaces portuaires et péri-portuaires sont souvent aménagés de structures plus ponctuelles permettant l'ancrage de navires ou d'infrastructures flottantes. Ces structures sont généralement des blocs ou des chaînes présentant très peu de complexité structurelle et une capacité de colonisation réduite. Leur nombre peut néanmoins être significatif dans le cas de zones de mouillage organisé par exemple, ou leur dimension très importante dans le cadre de structures servant l'ancrage de navires ou d'ouvrages de grande taille. En contact direct avec les fonds marins, leur rôle dans la fonctionnalité de l'espace portuaire ne doit ainsi pas être négligé.

Face à ce constat d'altération de l'habitat et des communautés d'espèces associées, plusieurs études montrent également que des adaptations comportementales et épigénétiques sont néanmoins possibles chez les espèces indigènes. Les poissons s'adaptent à la verticalisation du substrat, les coraux et herbiers à la hausse de turbidité, des champs de grandes nacres peuvent être observés dans la vase en l'absence de phanérogames, la lumière des quais est utilisée par certains prédateurs comme les calmars ou les loups pour mieux chasser, les

pontons flottants peuvent servir de reposoirs pour certains pinnipèdes, poissons chirurgiens se nourrissant des parasites d'autres poissons se concentrant sur les zones de rejets de pêche sous les quais... Ces mécanismes de plasticité phénotypiques en milieu marin urbanisé, impliquant chez les animaux et végétaux des modifications comportementales mais aussi physiologiques voire morphologiques, restent encore mal décrits.

Lorsque des actions d'amélioration de la qualité physico-chimique des eaux et des sédiments portuaires sont engagées et suivies d'effets, il peut alors devenir pertinent de mettre en œuvre des actions ciblées sur les problématiques d'altération d'habitats et de perte de fonctionnalités écologiques. Ce sont les mesures de promotion de la biodiversité sur tout ou partie des infrastructures portuaires qui rentrent usuellement dans le cadre de l'écoconception des sections subaquatiques des infrastructures portuaires. Ces mesures permettent d'amorcer des trajectoires écologiques plus ambitieuses au sein des écosystèmes portuaires et péri-portuaires, tout en intégrant l'impossibilité d'un retour à un état de référence avant aménagement.

2.3.4.3 - Contribution de l'écoconception au développement de la biodiversité portuaire

Considérant les limites physiques et structurelles décrites ci-avant, les fonctionnalités écologiques des ouvrages portuaires peuvent être améliorées par l'écoconception, dont les mesures actuelles principales peuvent être regroupées selon trois objectifs :

- améliorer le potentiel de colonisation pour les espèces fixées ;
- développer des microhabitats pour les stades juvéniles de la macrofaune mobile ;
- créer des cavités et abris pour la faune mobile hors stade juvénile.

Ces principes d'aménagements écologiques se veulent complémentaires et chacun d'entre eux participe à son échelle (voire dans l'idéal, en synergie) à la réhabilitation de certaines fonctionnalités écologiques altérées par le développement d'un port sur une bande côtière donnée :

- **Support de vie** : la fonction support de vie est plus spécifique aux espèces fixées animales ou végétales. A leur installation, elles nécessitent différents stimuli pour s'installer (voire se métamorphoser) puis ensuite grandir. La nature du substrat est alors importante tout comme l'exposition de ce dernier à la lumière, aux courants ou encore la rétention d'eau en zone intertidale.
- **Nourricerie** : la fonction de nourricerie s'apparente à un habitat adapté aux stades de vie juvénile d'une ou plusieurs espèces données au sein duquel les individus peuvent se protéger (généralement au sein de microhabitats), s'alimenter et grandir avant de rejoindre les populations adultes.
- **Refuge** : la fonction de refuge est associée à la capacité de l'habitat à accueillir des animaux subadultes et adultes qui, malgré leur taille, s'abritent de la prédation, du courant, du déferlement des vagues. Il peut également s'agir d'habitats quasi exclusifs pour certaines espèces cryptiques ou nocturnes fuyant la lumière du jour.
- **Alimentation** : la fonction d'alimentation est remplie par le milieu aquatique (colonne d'eau) et les substrats nécessaires aux animaux pour survivre et croître.
- **Reproduction** : la fonction de reproduction est remplie par le milieu aquatique (colonne d'eau) et le substrat. Ici le substrat peut être un support de ponte (avec soins parentaux ou non) ou encore une cavité au sein de laquelle une espèce peut soit se reproduire, soit se protéger et garder ses œufs.
- **Connectivité** (avec les habitats naturels avoisinants) : la connectivité est ici définie comme les échanges d'individus et de gènes entre l'intérieur et l'extérieur du port, principalement avec les habitats naturels. Il s'agit ici de repositionner l'ouvrage portuaire et la démarche d'écoconception associée à une échelle plus globale dans une vision écosystémique.

Ainsi, il existe une diversité de solutions applicables aux différentes typologies d'ouvrages et contextes environnementaux. Ces dernières et les stratégies d'implémentation associées sont résumées au chapitre 4 du présent document et illustrées en Annexe 2.

2.3.5 - Biodiversité terrestre

De la même manière qu'une infrastructure représente un habitat artificiel pour la faune et la flore marine, elle peut aussi constituer pour sa partie émergée, un habitat pour la faune et la flore terrestre. Il est donc possible

d'envisager d'améliorer les conditions de développement pour certaines espèces ciblées, en incluant dans l'ouvrage des caractéristiques structurelles et de matériaux favorables au développement de ces espèces.

Pour les infrastructures objets de ce guide, les initiatives existantes à ce jour en matière d'écoconception pour favoriser la biodiversité terrestre se limitent principalement à des actions en faveur de l'accueil temporaire ou permanent de certaines espèces d'oiseaux. Les actions visent à ce titre à favoriser la fonctionnalité de refuge des infrastructures pour la nidification ou le repos, voire dans certains cas la fonctionnalité d'alimentation. Des exemples de mesures et retours d'expérience sont fournis au chapitre 4.

Des interrogations similaires à celles posées pour le milieu subaquatique, peuvent être formulées sur l'opportunité de développement de la vie terrestre au sein des infrastructures. Ainsi le caractère isolé et peu accessible de certaines infrastructures peut constituer un avantage pour les espèces sensibles au dérangement, tandis que l'activité portuaire peut aussi constituer un risque vis-à-vis d'autres mécanismes d'impact (contamination, collision...).

Ici encore, la pertinence des approches d'écoconception doit être évaluée au cas par cas selon la configuration des sites et les enjeux locaux de préservation de la biodiversité.

3 - METHODOLOGIE D'APPLICATION DE L'ECOCONCEPTION

3.1 - Entreprendre et cadrer la démarche d'écoconception

3.1.1 - Créer une motivation et une adhésion au concept

L'écoconception des infrastructures portuaires constitue encore selon plusieurs aspects, une démarche innovante pour les maîtres d'ouvrage et peut à ce titre susciter de la méfiance quant à son caractère opérationnel. Le caractère novateur des solutions, l'absence potentielle de normalisation, ou encore le manque de recul sur la performance environnementale réelle de leur application, constituent quelques exemples de possibles freins à l'engagement d'une telle démarche par les porteurs de projet.

Dans ce contexte, le préliminaire à tout engagement repose sur l'évolution de l'organisme gestionnaire et autres éventuels décideurs vers une meilleure appréhension des enjeux environnementaux sous-jacents. Il s'agit aussi de développer une meilleure connaissance des possibilités d'application de l'écoconception dans le contexte spécifique de leurs installations portuaires.

La première étape consiste ainsi à faire vivre le concept au sein de l'organisation et à diffuser des informations convaincantes auprès des différents décideurs, de sorte à susciter une motivation partagée à s'engager dans la démarche.

Cette action peut être entreprise par les collaborateurs sensibilisés au concept et soucieux de faire évoluer les pratiques vers une meilleure intégration de l'environnement dans les futurs projets. Ils s'adressent en priorité à leurs collaborateurs décisionnaires sur les orientations stratégiques de l'organisation.

Cette première étape doit être engagée le plus en amont possible des projets. La transition écologique de nos sociétés est une urgence critique et les efforts doivent être engagés au plus vite pour assurer l'engagement de projets de transition ambitieux à court et moyen terme. Cette étape de sensibilisation et de recherche d'adhésion peut durer longtemps et requiert des communications régulières.

La sensibilisation et la mobilisation des parties prenantes passe par le partage d'informations issues de réalisations concrètes et performantes réalisées dans d'autres ports, l'étude préliminaire de la contribution possible de l'écoconception aux objectifs de développement durable du port concerné, la recherche de renseignements sur des solutions spécifiques, la diffusion de documents méthodologiques tels ce guide, l'organisation de rencontres avec d'autres gestionnaires engagés, des ingénieries ou des fournisseurs de solutions, la participation à des conférences dédiées...

3.1.2 - Désigner une équipe en charge et la former

Afin que la démarche d'écoconception soit entreprise avec efficacité et dans une perspective de performance, il est nécessaire de dédier des moyens adéquats à sa mise en œuvre. Pour les gestionnaires de port, cela passe notamment par la désignation d'une personne ou d'une équipe ressource en charge de piloter l'application de la démarche et qui veillera notamment à sa bonne intégration aux étapes clés de développement des projets d'infrastructures neuves, de réhabilitation d'infrastructures ou encore de la gestion courante des infrastructures (plus particulièrement pour les aspects biodiversité).

La thématique se trouvant à cheval entre des thématiques constructives et environnementales, cette responsabilité peut être portée par l'équipe ingénierie, l'équipe environnement / HSE, ou idéalement par une équipe pluridisciplinaire permettant d'asseoir le pilotage de la démarche sur des perspectives complémentaires et d'assurer une itération régulière entre les différentes expertises techniques requises pour la conception et la conduite des projets. *In fine*, l'objectif est de se doter d'une organisation efficace qui garantisse que l'objectif d'écoconception s'applique aux bonnes étapes, auprès de tous les services et décideurs effectivement concernés.

L'optimisation environnementale des projets dans une approche d'analyse du cycle de vie complet constitue une évolution notable dans la manière de concevoir et d'évaluer les projets. Ce changement d'approche

nécessite une formation adéquate à la démarche et ce afin que les orientations de conception soient faites en cohérence avec la réalité des enjeux environnementaux des projets.

Or si on observe un intérêt croissant pour la thématique de l'écoconception, notamment chez les porteurs de projet, ils sont nombreux à faire remonter leur manque d'expertise pour piloter suffisamment finement la prise de décision sur la nature des actions à mettre en œuvre.

La formation des agents portuaires à l'écoconception leur permet ensuite de donner des orientations claires, basées sur leur propre compréhension des enjeux environnementaux des projets, de sorte à éviter de se faire proposer ou prescrire des pratiques inadaptées à leur contexte particulier.

Exemple de formation d'équipe au Grand Port Maritime de La Rochelle

Afin d'introduire l'écoconception dans ses pratiques sur des bases techniques solides, le Grand Port Maritime de La Rochelle (GPMLR) a formé une sélection d'agents du port issus de différents services (ingénierie, maintenance, bâtiments, achats...). Le recours à un cabinet spécialisé a permis au GPMLR de dispenser une formation de sensibilisation personnalisée et en ligne avec ses activités.

Les agents ayant participé à cette formation ont ensuite choisi une dizaine de projets dans leur domaine d'activité particulier, afin d'expérimenter l'application sur des cas d'étude concrets pour le port. Les retours d'expériences sont ensuite partagés afin d'appuyer la montée en compétence et la formalisation d'une stratégie portuaire établie selon ses propres référentiels.

3.1.3 - Définir l'ambition

L'écoconception est accessible à tout type de port et le degré d'engagement dans la démarche peut être modulé selon ses capacités (techniques, humaines, financières...), son ambition d'intégration environnementale, ou encore l'opportunité d'engagement à un instant donné ou dans un territoire donné (un projet de création/réhabilitation d'infrastructures est-il prévu à court/moyen terme ? Les caractéristiques environnementales du port se prêtent-elles à y promouvoir le développement de la biodiversité ?).

De manière générale, on peut considérer quatre niveaux d'écoconception suivant l'aboutissement concret de la démarche à un produit², représentés dans la figure suivante selon leur contribution à réduire son impact environnemental, à iso-fonction du produit considéré.

Une transposition de cette échelle à la thématique des infrastructures portuaires peut être proposée, matérialisant ainsi les différents niveaux d'effort pour l'application d'une démarche d'écoconception dans un port.

Le premier niveau est celui de **l'amélioration de l'infrastructure**, reposant sur une optimisation que le gestionnaire peut réaliser soit dans le cadre d'un projet de travaux (ouvrage neuf ou réhabilitation), soit en phase d'exploitation. Dans le cadre d'un projet de travaux, l'amélioration regroupe l'ensemble des choix de conception accessibles sans nécessiter une conception alternative majeure de l'infrastructure. Il peut s'agir par exemple du matériau retenu pour le platelage d'un ponton, le choix d'une méthode d'acheminement de matériaux moins émissive, le choix d'un ciment bas carbone dans la composition des bétons, etc.

² Centre national pour l'écoconception

Le deuxième niveau est celui de **la reconception de l'infrastructure** de sorte à améliorer sensiblement certains de ces critères environnementaux. Il peut par exemple s'agir du choix d'un matériaux constructif plutôt qu'un autre, conduisant à une conception technique alternative (e.g. utilisation de blocs de carapaces de digue préfabriqués plutôt que d'enrochements permettant de réduire le volume de matériaux nécessaires à la réalisation de l'ouvrage), d'une planification alternative des aménagements et usages d'un terreplein permettant une réduction de sa dimension, ou encore du choix d'un projet de réhabilitation ou de requalification d'un espace existant plutôt que de la construction d'un espace neuf.

Le troisième niveau est celui **de l'accroissement des fonctions de l'infrastructure**, qui inclut soit une anticipation des évolutions possibles des usages de l'infrastructure sur le long terme (on conçoit par exemple l'infrastructure pour faciliter la requalification des activités à l'avenir tout en minimisant les travaux de requalification nécessaires), soit l'introduction de nouvelles fonctionnalités bénéfiques pour l'intégration environnementale de l'infrastructure (on conçoit par exemple l'infrastructure de sorte à ce qu'elle constitue un habitat plus propice à certaines espèces marines, ou on intègre à l'ouvrage un dispositif de production d'électricité renouvelable).

Le quatrième niveau repose sur la refonte du système portuaire dans son ensemble en vue d'améliorer sa performance environnementale. Cette transformation touche d'avantage le modèle d'exploitation au service duquel sont conçues les infrastructures, les infrastructures bâties, ainsi que la connectivité du port avec les systèmes d'infrastructures adjacents (eg. transport terrestre, ville, etc.). Ce guide n'ayant pas pour objet de traiter l'exploitation ainsi que ces autres types d'infrastructures, ce quatrième niveau ne sera pas développé ici.

S'il n'y a pas d'intérêt particulier à définir dans laquelle de ces classes se positionne une action d'écoconception donnée, l'objectif de cette présentation est avant tout d'illustrer la multitude des différents degrés d'engagement qui s'offre à un maître d'ouvrage.

L'écoconception peut ne pas se limiter à une démarche d'optimisation de l'existant et être poussée jusqu'à repenser l'organisation et les fonctions du système portuaire et de ses infrastructures.

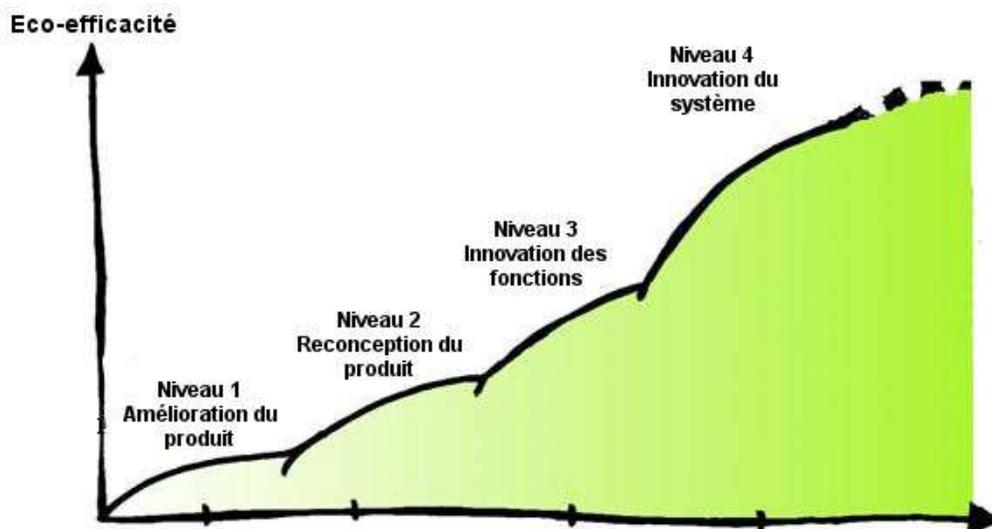


FIGURE 6 : SCHEMA DES 4 NIVEAUX D'ECOCONCEPTION (SOURCE : CENTRE NATIONAL POUR L'ECOCONCEPTION)

3.1.4 - Cerner et anticiper les opportunités d'écoconception

Il est usuellement communiqué que 70 à 80% des impacts environnementaux et sociétaux d'un produit sont déterminés lors de sa conception et qu'il est donc essentiel d'appliquer dès cette phase les mesures d'écoconception les plus pertinentes.

Cette analyse peut être appliquée également aux projets d'infrastructures. Plus spécifiquement pour les émissions de GES, on estime qu'il est possible d'agir plus facilement sur les émissions de GES globales d'un projet aux premiers stades du cycle de vie, bien que le niveau de détail selon lequel une ACV puisse être menée à ces premiers stades soit encore limité. C'est donc dès cette étape du projet, en anticipant au mieux les étapes suivantes, qu'il est possible d'imposer des lignes directrices en termes de réduction des émissions de GES et plus largement d'amélioration de la performance environnementale globale d'un projet.

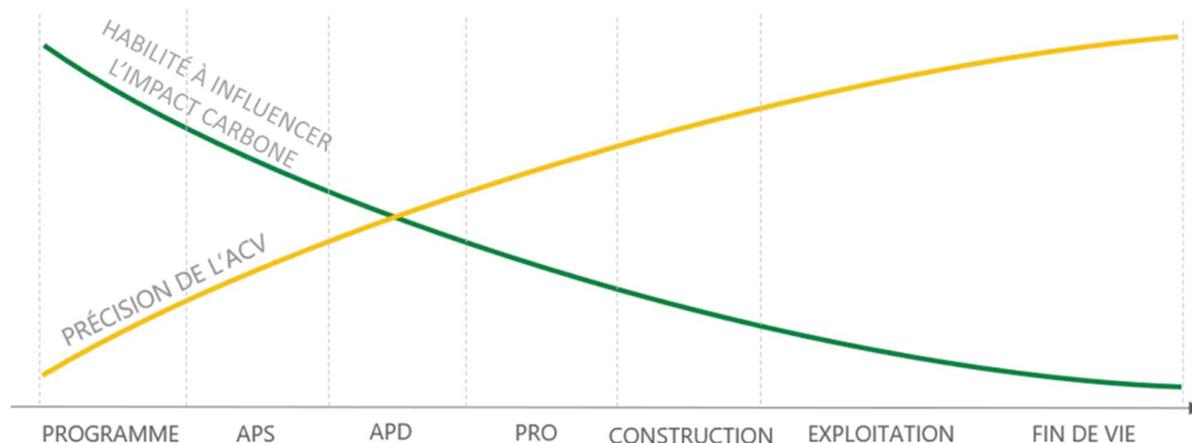


FIGURE 7 : REPRESENTATION DE L'HABILITE A INFLUENCER L'IMPACT CARBONE DES PROJETS SELON LES ETAPES DE CONCEPTION (SOURCE: TERA0 2023)

On retiendra donc que plus on engage le processus d'écoconception tôt dans le cycle de vie d'une infrastructure, plus sa performance environnementale sera améliorée.

Ceci étant dit, dans la quasi-totalité des cas de figure, un maître d'ouvrage gère avant tout un patrimoine de fait déjà construit et peut être amené de manière plus exceptionnelle à développer des projets de construction d'infrastructures neuves ou de requalification d'infrastructures. S'il dispose ainsi d'une marge de manœuvre relativement réduite d'écoconception de ses infrastructures dans le cadre de son activité courante d'exploitation, cela ne signifie pas qu'aucune mesure ne puisse être engagée. La suite du guide présente notamment certaines mesures qui peuvent être prises sur les infrastructures après leur construction et d'autres qui permettent de préparer et donc d'anticiper au mieux le développement de l'écoconception sur des projets neufs prévus à l'avenir.

La majorité des impacts environnementaux et sociétaux d'une infrastructure est déterminée par sa conception. L'engagement d'une démarche d'écoconception est d'autant plus bénéfique qu'elle est anticipée et engagée dès l'initiation des projets. Des marges de progrès environnemental restent cependant accessibles pour des infrastructures existantes et pour lesquelles la conception ne peut être revue de manière significative.

3.1.5 - Se faire accompagner

Si l'initiation d'une démarche d'écoconception peut se faire avec les ressources et expertises internes du maître d'ouvrage, nous verrons que les étapes ultérieures de diagnostic puis de définition plus concrète des actions font appel à des expertises bien particulières. Ces expertises sont rarement disponibles au sein de la maîtrise d'ouvrage, à l'exception parfois de grandes organisations disposant d'une compétence de maîtrise d'œuvre intégrée. Il est ainsi conseillé de se faire accompagner aux étapes ultérieures de mise en œuvre. Le choix de la stratégie d'accompagnement dépendra du contexte dans lequel la démarche est initiée : est-elle engagée en appui du lancement d'un projet de travaux ? est-elle initiée en marge de la refonte de la stratégie environnementale du port ? est-elle engagée sur une thématique bien précise en phase d'exploitation ?

Cet accompagnement peut ainsi se faire par une assistance à maîtrise d'ouvrage spécialisée pour l'aide à la définition des objectifs et orientations. Cette compétence particulière peut également être recherchée au sein de la maîtrise d'œuvre retenue pour la conception d'un nouveau projet. Pour les projets spécifiques à visée pour la biodiversité réalisée en phase d'exploitation, un accompagnement peut être recherché auprès d'instituts scientifiques locaux ayant développé une activité de recherche spécifique à ces thématiques, auprès de bureaux d'études spécialisés ou directement auprès de développeurs de solutions.

3.2 - L'écoconception en phase conception

La notion de conception suppose implicitement que l'on se situe dans une démarche de développement de projet et qu'on ait ainsi la main sur les premières étapes du cycle de vie de l'infrastructure. A ce titre, l'essentiel des informations contenues dans ce sous-chapitre s'attachent à ce contexte d'application de l'écoconception, à savoir un projet d'infrastructure neuve ou de requalification d'une infrastructure. Pour autant, certains outils de diagnostics et d'étude préliminaire présentés ici et notamment ceux relatifs à la biodiversité, peuvent également être appliqués pour des démarches en phase d'exploitation hors projets de développement ou de réhabilitation particuliers.

3.2.1 - Diagnostic du système, définition des orientations et planification

Le choix des orientations d'écoconception d'une infrastructure portuaire dépend à la fois de l'ambition portée par le maître d'ouvrage (cf. ci-avant), mais également des opportunités offertes par l'infrastructure en elle-même ou plus largement par le système portuaire dans lequel elle s'insère (par exemple privilégier la réhabilitation d'une infrastructure existante plutôt que la construction d'une infrastructure si la configuration du port le permet). L'identification et la compréhension de ces opportunités passe le plus souvent par des diagnostics et études préliminaires spécifiques à la thématique environnementale considérée pour l'écoconception. On développe ici les approches relatives aux émissions de GES et à la biodiversité.

3.2.1.1 - Evaluation et optimisation des émissions de GES liés au trafic au stade de la planification des ouvrages

On considère ici pour les émissions de GES, le cas de figure d'un projet de création ou de requalification d'infrastructures, la capacité d'amélioration de cette composante hors travaux relevant davantage de l'organisation des activités que des infrastructures en elles-mêmes. Ceci étant dit, on rappellera ici que l'essentiel des émissions de GES associées à une infrastructure portuaire découle de son exploitation et non de sa construction. A ce titre, c'est en diagnostiquant l'impact carbone d'un projet dès la programmation que les émissions peuvent être maîtrisées au mieux et que les leviers permettant de les réduire de manière significative peuvent être actionnés.

On peut par ailleurs considérer deux cas de figure pour l'amélioration des émissions de GES au stade de la planification :

- **Cas n°1** : l'infrastructure à créer est dite « greenfield », c'est-à-dire qu'elle correspond à la création d'un nouvel ouvrage / d'une nouvelle infrastructure sur une zone naturelle non anthropisée. Elle répond en général à un nouveau besoin/trafic. Dans ce cas, aucune évaluation des émissions de GES liée à l'exploitation ou à la maintenance de l'infrastructure ne sont accessibles. Des comparaisons avec des infrastructures existantes de même fonctionnalité peuvent être réalisées.

- **Cas n°2** : le projet concerne la réhabilitation/requalification d'une infrastructure existante. Dans ce cas, la collecte/l'estimation des émissions de GES liées à l'exploitation et à la maintenance de l'ouvrage sont les premières étapes à prévoir pour réaliser un diagnostic de l'infrastructure portuaire à réhabiliter et pour permettre ainsi d'améliorer son empreinte carbone.

Au stade de la définition du projet et même de sa programmation (positionnement des infrastructures, réponse à un besoin économique, etc.), les gains en matière d'émissions de GES reposent essentiellement sur l'optimisation du trafic d'exploitation et donc sur l'implantation des infrastructures et leur connexion avec l'hinterland. C'est donc selon le positionnement de l'infrastructure portuaire à créer par rapport aux infrastructures existantes que les émissions de GES induites et évitées par le projet peuvent être optimisées.

Il est essentiel de proposer dès la programmation, des estimations d'émissions de GES issues de la construction des infrastructures (par exemple sur la base de ratios macroscopiques au mètre linéaire) et de l'exploitation attendue (sur la base de données de trafic), pour aboutir à des ordres de grandeur permettant de vérifier l'équilibre carbone du projet.

Exemple du port de Taïwan

Dans le cadre du positionnement du nouveau port de Taipei, l'autorité portuaire a étudié quatre itinéraires de transbordement alternatifs depuis les autres ports de l'île (Kaohsiung, Taichung et Keelung) pour arbitrer l'organisation des trafics et réduire la congestion sur les principaux axes de l'île. Les quatre scénarii proposés se basaient sur les hypothèses suivantes : report de 30, 50, 80 ou 100% des volumes de conteneur des ports Kaohsiung, Taichung et Keelung sur le nouveau port de Taipei.

L'étude a ainsi comparé les émissions de GES associées au transport terrestre depuis les ports existants avec les émissions liées à l'utilisation du nouveau port. Les résultats ont montré que la modification des itinéraires de transbordement permettait d'obtenir des réductions d'émission comprises entre 37% et 88%.

3.2.1.2 - Evaluation et optimisation des émissions de GES liées à l'infrastructure lors des études préliminaires

Estimer les émissions de GES de façon simplifiée au service d'une approche comparative

Lors de cette phase de conception, le projet d'aménagement est rarement figé et plusieurs scénarii d'aménagement / d'exploitation sont généralement développés par le concepteur pour aider l'autorité portuaire dans le choix final du scénario à mettre en œuvre. En analysant dès cette phase les émissions potentielles induites sur la durée de vie de l'infrastructure des différents scénarii (d'aménagement et/ou d'exploitation), le critère carbone peut faire partie intégrante des choix d'orientation de conception de l'infrastructure. Dès lors, il est important d'intégrer ce critère aux analyses multicritères des différentes options de développement des projets pour que les choix des décideurs puissent être guidés sur la base de critères environnementaux quantifiés.

Les données permettant une quantification précise de l'impact carbone du projet sont à ce stade impossibles à obtenir puisque les dispositions constructives, la chaîne logistique et même parfois les matériaux composant l'ouvrage ne sont pas clairement définis. En se basant sur des estimations de GES effectuées pour des projets similaires, il est néanmoins possible d'estimer des ordres de grandeur modulés par la taille du projet, par sa localisation et par le plan prévisionnel de travaux.

L'objectif de l'exercice n'est pas, à ce stade, d'avoir des estimations précises, mais bien de pouvoir comparer des différences d'ordre de grandeur découlant de plusieurs alternatives de travaux. Lors de cette phase d'étude préliminaire, les émissions de GES liées à la construction et à l'exploitation de l'infrastructure peuvent ainsi être estimées en se basant sur :

- **des ratios d'émissions de GES liés aux travaux de construction** (accessibles via le retour d'expérience de l'autorité portuaire sur des projets similaires ou via des facteurs d'émissions issus de sources fiables (Base Carbone, fiches INIES ou WPCI par exemple));
- **des estimations des émissions induites pendant la phase exploitation de l'infrastructure** (en se basant sur les hypothèses de trafic par exemple ou sur le retour d'expérience de l'autorité portuaire pour une exploitation similaire).

Estimer les émissions de GES sur l'ensemble du cycle de vie

Pour avoir une vision plus complète des émissions de GES liées à une infrastructure, l'analyse de l'empreinte carbone doit considérer, dans la mesure du possible, l'ensemble des étapes de son cycle de vie. Cette approche permet d'identifier celles qui sont les plus génératrices de GES et de prendre des décisions éclairées pour réduire les émissions de GES de manière optimale.

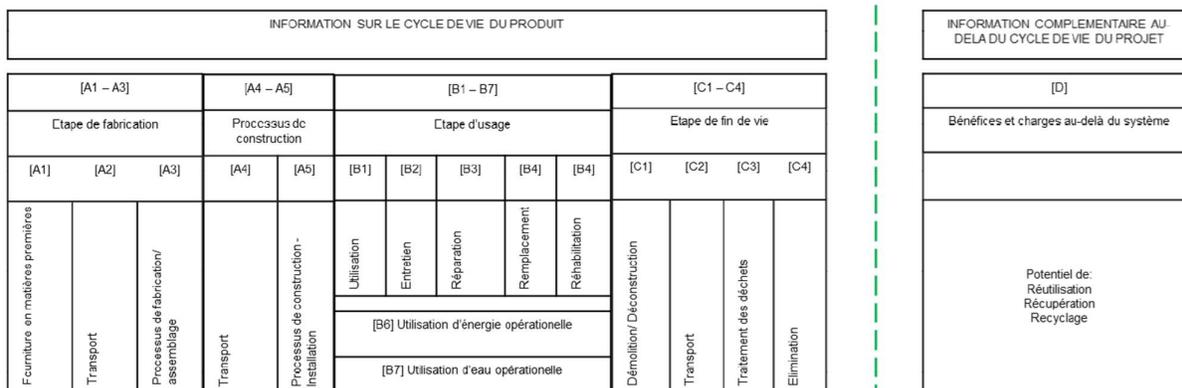


FIGURE 8 : DECOUPAGE DES DIFFERENTS POSTES D'EMISSION ANALYSES DANS LE CADRE D'UNE ACV

Quelques particularités méritent d'être soulignées pour l'évaluation des émissions selon les étapes du cycle de vie considérées :

- **La conception** d'une infrastructure portuaire est une étape clé pour optimiser significativement les émissions de GES dans son ensemble, notamment au travers des approches suivantes :
 - adapter l'emprise du projet pour réduire la consommation énergétique des travaux (e.g. positionnement des chenaux pour minimiser les volumes à draguer) et limiter l'artificialisation des sols et par conséquent l'altération de leur capacité à stocker du carbone (e.g. conservation au maximum des espaces engazonnés sur le terre-plein lorsque les exploitations ne nécessitent pas leur enlèvement);
 - valoriser le réemploi ou le recyclage des matériaux disponibles *in-situ* ;
 - concevoir l'infrastructure pour s'adapter aux modes de manutention / avitaillement les plus vertueux pendant l'exploitation (onshore power supply, dimensionnement du réseau électrique pour s'adapter aux contraintes induites par les équipements de manutention électrique, etc.);
 - étudier le potentiel pour la production ENR du site, notamment pour favoriser l'autoconsommation. Par exemple, l'installation de générateurs à énergie marémotrice peut contribuer à la production d'énergie renouvelable et à la réduction des émissions de GES.
- **L'extraction, la transformation et le transport de matériaux** sont à considérer du point de vue de la chaîne logistique lié au fret amont. La localisation géographique du projet dans un port ou sur une voie navigable constituent une opportunité pour étudier un approvisionnement par barge ou voie maritime si les conditions le permettent.

- **La construction** de l'infrastructure portuaire intègre les émissions de gaz à effet de serre liés aux travaux (consommations de carburant des engins de chantier, des dragues, émissions liées aux matériaux, aux déplacements des personnes et à la base vie, etc.). Les voies d'optimisation des émissions de cette phase sont développées dans la suite du guide.
- **La phase d'exploitation et de maintenance** de l'infrastructure intègre les émissions de GES généralement les plus significatives. Dans la même logique que l'application des scope 1, 2 et 3 pour le Bilan Carbone® d'une entreprise ou d'un EPIC (cf. ci-après), pour avoir une vision exhaustive de l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre liées à un projet de construction ou de réhabilitation d'infrastructure maritime, il est conseillé d'intégrer les émissions indirectes de l'exploitation à l'évaluation de l'empreinte carbone globale du projet. Elles peuvent intégrer l'amortissement de l'équipement portuaire nécessaire au fonctionnement de l'infrastructure, inclure les remplacements des pièces d'usure sur la durée de vie de l'ouvrage, ou encore intégrer l'empreinte carbone liée à la mobilisation de personnel pour faire fonctionner l'infrastructure portuaire.

Afin d'avoir une vision complète des émissions induites par la création d'une infrastructure portuaire, la question peut par ailleurs se poser d'intégrer les émissions de la chaîne de valeur aval du fonctionnement de l'infrastructure, à savoir les émissions du client utilisateur (e.g. émissions du navire à quai, des phases d'accostage, du remorquage dédié au quai, de la grue en fonctionnement...).

- **La fin de vie et le démantèlement** prend en compte le processus de déclassement de l'infrastructure de navigation, son élimination ou sa réutilisation finale et tout changement d'utilisation des terres et/ou la restauration d'une utilisation non industrielle des terres. Actuellement, les phases de démolitions sont les plus complexes à évaluer.

L'Analyse de Cycle de Vie en phase exploitation : parallèle avec le Bilan Carbone

Lors de l'élaboration d'un plan de réduction de l'empreinte carbone des infrastructures portuaires, il est important de définir précisément le périmètre sur lequel sera étudiée l'empreinte carbone de l'infrastructure et les limites de l'analyse de cycle de vie (ACV) effectuée. Le périmètre a un rôle clef pour déterminer par la suite quels processus et activités seront inclus dans l'analyse et lesquels seront exclus. Lors de la réalisation d'un Bilan Carbone® réglementaire (auquel tous les établissements publics de plus de 250 agents sont soumis, soit les GPM notamment), les émissions de GES sont segmentées en 3 scopes :

- Le **scope 1** concerne toutes les **émissions directes de GES** émises par l'entreprise : le chauffage dans les locaux, les émissions des véhicules détenus par l'entreprise, (sources fixes et mobiles), la climatisation et les émissions directes fugitives et les émissions issues de la biomasse.
- Le **scope 2** concerne toutes les **émissions indirectes et liées à l'énergie** : ce sont les émissions créées lors du processus de production d'un produit: les émissions liées à l'achat d'électricité, de vapeur, chaleur et de froid.
- Le **scope 3** concerne toutes les émissions indirectes de l'entreprise, dans lequel on retrouve en général la majorité des émissions produites par l'entreprise : achat de marchandise, matériaux, services, déchets, déplacement du personnel, fret amont et aval, etc. Ces émissions sont les plus complexes à définir puisque l'entreprise ou l'établissement public ne les maîtrise pas complètement et sont généralement aussi les plus significatives.

Par conséquent, le choix du périmètre d'évaluation a un impact significatif sur les résultats des analyses d'émissions de gaz à effet de serre et sur les mesures pouvant être mises en place pour réduire les émissions associées.

Ce découpage de périmètre n'est pas strictement applicable à l'analyse de cycle de vie de l'infrastructure portuaire mais il peut donner des clés quant aux émissions à prendre en compte pour sa phase d'exploitation.

Il faut noter qu'il n'existe aujourd'hui pas de cadre normatif clair pour l'analyse de cycle de vie des infrastructures portuaires comme cela a pu être développé pour d'autres secteurs (transport par exemple) et les différentes certifications internationales ont des règles de calcul qui peuvent présenter des variations.

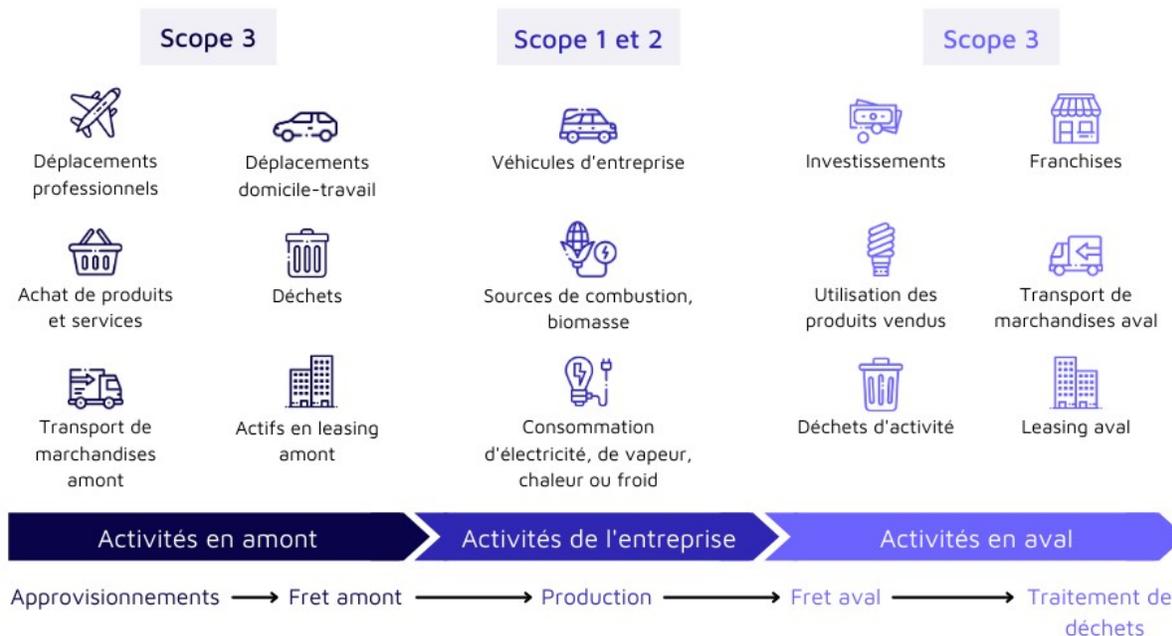


FIGURE 9 : SYNTHÈSE DES DIFFÉRENTES RUBRIQUES CONCERNÉES PAR CHAQUE SCOPE 1, 2 ET 3 DANS LE CADRE D'UN BILAN CARBONE (SOURCE: CARBO ACADEMY)

En résumé, pour la prise en compte des émissions liées à l'exploitation dans le calcul de l'empreinte carbone d'un projet d'infrastructure portuaire, les maîtres d'ouvrage doivent établir un cadre estimatif prenant en compte les considérations suivantes :

- **Périmètre organisationnel** : correspond à la zone dont le propriétaire du port ou de l'infrastructure de navigation est directement responsable, par exemple l'infrastructure d'emploi, la réglementation et la zone de navigation et les exploitants portuaires concernés.
- **Limite opérationnelle** : là où les impacts créés par les activités, les navires, les trains, les camions, la consommation de ressources, etc. et/ou ont créé des puits de carbone potentiels (par exemple, à partir de la réutilisation bénéfique des matériaux de dragage pour construire de nouvelles zones humides).
- **Chaîne de valeur** : lien de l'avant-pays avec l'arrière-pays via les ports/infrastructures de navigation à travers la chaîne d'approvisionnement où le port ou l'infrastructure de navigation peut influencer.

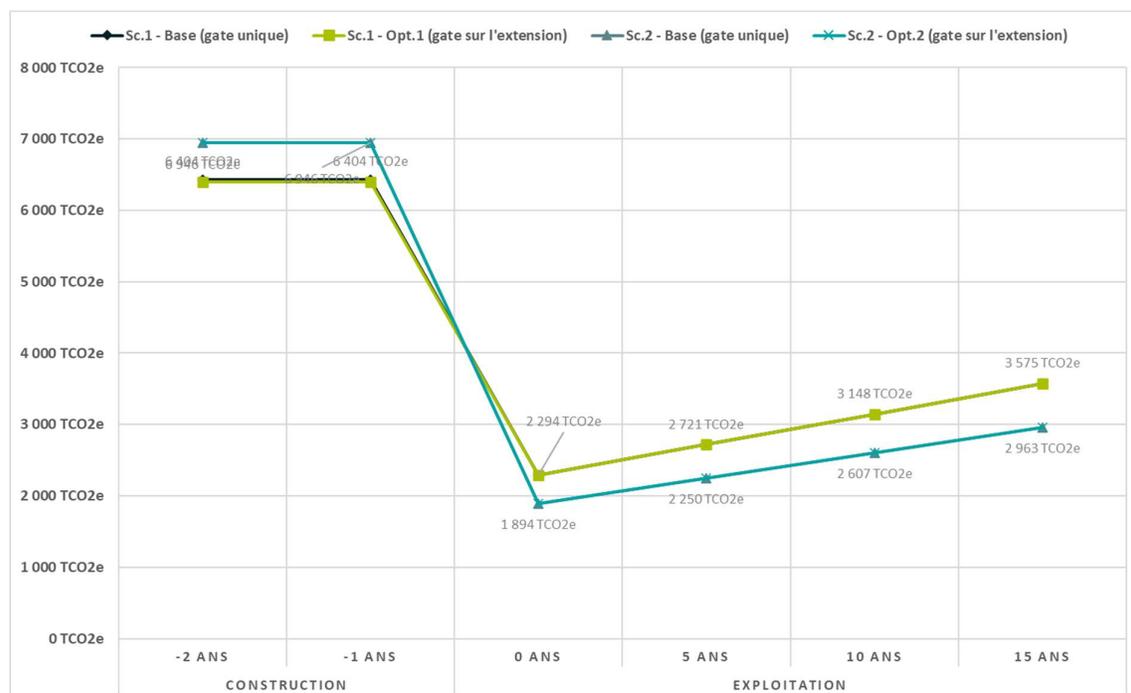
Une analyse du cycle de vie complète permet d'estimer les émissions de gaz à effet de serre sur toute la durée de vie du projet et de l'opération des infrastructures. Au stade étude préliminaire, il est donc particulièrement important d'intégrer à l'analyse l'ensemble des phases de projet, de la conception à l'exploitation et la maintenance. A l'heure actuelle, les phases de démolitions sont toutefois complexes à évaluer.

En ce sens, l'analyse en parallèle des phases construction et exploitation peuvent permettre d'avoir une vision éclairant les investissements à planifier: la construction d'une infrastructure portuaire peut être plus impactante en termes d'empreinte carbone mais permettre une exploitation à moindre émission de GES.

Exemple d'impact carbone de travaux d'extension d'un terminal conteneur fluvial

Pour illustrer l'importance de cette étape, on peut reprendre l'analyse des émissions de GES faite sur un projet d'extension de terminal conteneur fluvial (extension des terre-pleins exclusivement). L'étude avait pour objectif de comparer les variantes associées à chacun des scénarii d'aménagement proposés, à la fois pendant la phase de construction mais aussi pendant la phase exploitation de deux modes de manutention différents :

- scénario 1 : manutention au Reachstacker (motorisation diesel) nécessitant des travaux d'infrastructure réduits
- scénario 2 : manutention au RMG (électrique), nécessitant des travaux d'infrastructure plus conséquents.



ANALYSE DES EMISSIONS DE GES EN PHASE CONSTRUCTION ET EXPLOITATION DES DEUX SCÉNARIOS

L'analyse des émissions de GES sur l'ensemble des phases du projet a permis de conclure que malgré un surplus d'émissions GES en phase construction pour le scénario 2, celui-ci présente des émissions de GES inférieures en phase exploitation. L'analyse sur la durée de vie globale du projet a donc permis de conclure que le scénario RMG était moins émissif que le scénario d'aménagement RTG, sur une durée d'exploitation de 15 ans.

Le cahier des charges des études préliminaires peut d'ores et déjà imposer des exigences en matière de conception, de gestion des déchets, d'efficacité énergétique et de transport. Ces exigences peuvent encourager le maître d'œuvre à orienter le projet de sorte que les constructeurs adoptent des pratiques plus durables et utilisent des matériaux et des technologies plus respectueux de l'environnement.

3.2.1.3 - Diagnostics de biodiversité et plan d'action pour le rétablissement des fonctionnalités écologiques portuaires

Décrire le fonctionnement de l'écosystème portuaire

On rappelle que du point de vue de la biodiversité, ce guide se focalise sur les démarches d'écoconception entreprises dans les ports en vue d'améliorer les fonctionnalités écologiques des infrastructures. Au préalable, un diagnostic du fonctionnement écologique de l'écosystème portuaire est nécessaire. Cette démarche s'applique tant dans le cas de projets de création de nouvelles infrastructures au sein de systèmes portuaires existants, que dans le cadre de démarches d'écoconception entreprises en phase d'exploitation, hors projets de nouvelles infrastructures.

Le diagnostic débute avec la synthèse des données environnementales et écologiques disponibles pour le site considéré (bathymétrie, hydrodynamisme, géotechnique, qualité du milieu et état écologique, inventaires faune/flore, volet environnemental des études réglementaires préalablement réalisées le cas échéant...). Il peut ressortir de cette synthèse un manque de connaissances plus ou moins important pour procéder à un diagnostic pertinent des fonctionnalités écologiques à rétablir ou renforcer (e.g. mauvaise couverture spatio-temporelle des données, manque de données sur certaines catégories d'espèces permettant de caractériser des fonctionnalités écologiques spécifiques, mauvaises identifications des pressions toujours en place...). Il conviendra dans ce cas d'évaluer l'opportunité de procéder à des campagnes d'acquisition complémentaires.

La mise en commun de ces données permet de synthétiser les enjeux écologiques majeurs et notamment d'évaluer le potentiel de la zone pour le développement de la biodiversité. L'objectif est en effet de pouvoir décrire au mieux le fonctionnement de l'écosystème portuaire en l'état, de sorte à évaluer ensuite, les facteurs de fonctionnement qui pourraient être améliorés au travers d'une conception particulière d'une ou plusieurs des infrastructures du port.

Le choix des orientations d'amélioration du fonctionnement du système est lui-même régi par une bonne compréhension des bénéfices écologiques qui pourraient en résulter et la manière dont ces bénéfices répondent effectivement aux enjeux locaux de gestion et de conservation de la nature (e.g. diversification des espèces et renforcement des peuplements, accroissement de fonctions écologiques clés pour l'accomplissement du cycle de vie d'espèces ou de groupes d'espèces cibles, amélioration de la connectivité avec les habitats naturels environnants...).

L'objectif de ce diagnostic est enfin de mieux cibler les zones particulières où il serait le plus pertinent d'agir, compte-tenu de la typologie des ouvrages en place d'une part, mais également de l'existence de sources de pressions spécifiques (e.g. rejets, dragage fréquent, etc.), ou encore du degré de connectivité avec le milieu naturel. Il pourrait par exemple s'avérer que la zone d'implantation d'un nouvel ouvrage au sein d'un port, opération candidate à une possible action d'écoconception, ne soit cependant pas optimale du point de vue de certains critères environnementaux et qu'il s'avère plus pertinent d'agir prioritairement sur un secteur plus propice au développement de la vie aquatique. L'action peut également être associée à une réduction de pression ou à l'engagement de préserver certains actifs naturels patrimoniaux qui ont pu se développer à l'intérieur du port au fil du temps (ex: champ de nacres, herbiers, zone de repos d'hippocampes).

Identifier et hiérarchiser les actions utiles à l'amélioration du fonctionnement écologique du port

A l'issue du diagnostic, il convient d'identifier les actions pouvant être mises en œuvre pour l'amélioration du fonctionnement écologique du port. Certaines de ces actions relèvent d'une gestion environnementale traditionnelle du port (e.g. amélioration de la gestion et de la qualité des eaux de ruissellement), tandis que d'autres peuvent davantage relever de mesures d'écoconception à proprement parler (e.g. complexification structurelle de l'habitat). Ce sont ces dernières actions que ce guide s'attache à décrire et le chapitre 4 propose une présentation relativement complète de celles appliquées dans le monde à ce jour, opérationnelles ou plus expérimentales.

On rappelle ici que la reconquête de la biodiversité dans les ports doit être assujettie à une bonne qualité physico-chimique du milieu.

A ce stade de la démarche où de nombreuses actions peuvent potentiellement répondre aux enjeux environnementaux du port, une analyse multicritère permet d'évaluer la faisabilité de leur mise en œuvre et de les hiérarchiser au regard de critères écologiques, technico-économiques, réglementaires, fonctionnels (planning, accessibilité, risques de pollution à proximité d'une infrastructure...), etc.

A l'issue de cette analyse multicritère, la formalisation d'un plan d'actions permet de détailler les scénarios d'actions à prioriser à court, moyen ou long terme. Ces scénarios peuvent inclure la mise en place de mesures d'écoconception, mais également des actions de gestion environnementale plus classiques (e.g. récolte de données complémentaires, sensibilisation (usagers, personnel, grand public), formations, gestion de la qualité des eaux, ...).

La mise en place d'actions doit ensuite faire l'objet de suivis spécifiques dont l'efficacité peut être appréciée au fil du temps (et des concessionnaires) au travers de matrices d'indicateurs multicritères visant à offrir un outil de pilotage adapté aux gestionnaires.

Exemple d'application sur le port de Sète

En 2019, l'établissement public régional Port Sud de France a réalisé dans le port de Sète avec l'appui de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, de l'Ifremer et de Seaboost une étude de caractérisation du milieu marin et des fonctionnalités écologiques de ses différents bassins portuaires (port de commerce, port de plaisance, port de pêche, canaux urbains). Cette étude s'est articulée en trois phases dont l'objectif final visait à proposer un plan d'actions sur-mesure.

Une première phase d'études bibliographiques a permis la réalisation d'une synthèse spatialisée des données environnementales existantes (dossiers réglementaires, dossiers CNPN, REPOM, schéma directeur d'assainissement des eaux pluviales, réseau RESPIRE, suivi DCE, RSL etc.).

Deux campagnes de terrain ont ensuite été menées à l'été et à l'automne 2019 afin de caractériser les différents secteurs portuaires, la typologie des ouvrages, leur potentiel écologique et de recenser les pressions. Chaque campagne a permis l'étude en plongée de plus de 10 km d'ouvrages portuaires.

L'état initial et les campagnes de suivis complémentaires ont permis de dresser une liste de 250 taxons dans le port de Sète et ses canaux. Différentes espèces à fort intérêt halieutique (daurade, loup, langouste, cigale, seiche, poulpe...) voire patrimoniale (grande nacre, anguille, hippocampe, zostère) ou déterminantes au sens de l'établissement de ZNIEFF (sars, oursin violet...) ont été décrites comme transitant (corridor écologique) ou se fixant le long des ouvrages (fonctions de support et abris). 23 espèces de poissons ont été identifiées dans le port au stade de juvénile de l'année, parfois en abondance, attestant du potentiel rôle de nurserie des bassins portuaires avec des degrés variables selon les secteurs et ouvrages.

A l'hiver 2019, des échantillonneurs passifs (SBSE, DGT) ont été positionnés par l'Ifremer pendant 3 semaines dans les canaux de Sète fortement influencés par le rythme des marées afin d'améliorer les connaissances sur la qualité physico-chimique de l'eau de certains secteurs portuaires au potentiel écologique identifié comme fort.

Des cartographies ont ensuite été réalisées pour chacun des secteurs à enjeux en y identifiant les pressions, les points chauds de biodiversité, la présence de cohortes de juvéniles de l'année ou encore la présence d'espèces protégées.

Un critère de notation par ouvrage portuaire a été proposé de façon à mieux identifier les secteurs à enjeux et les secteurs sous pression.

Pour chaque secteur portuaire, un plan d'actions a été proposé au gestionnaire en décrivant et distinguant les actions de préservation, de réduction des pressions et d'écoconception portuaire.

Place du diagnostic dans la démarche de gestion environnementale du port

Nous avons décrit ici une démarche de diagnostic menée idéalement dans le cadre de la gestion environnementale courante d'un port, selon un calendrier non contraint par la réalisation de travaux particuliers. Cette anticipation permet de disposer d'une vision claire des enjeux en amont de projets de travaux structurants, ceux-ci pouvant ensuite constituer autant d'opportunités pour l'engagement d'actions d'écoconception sur les infrastructures concernées, intégrées dans une stratégie globale cohérente et prédéfinie à l'échelle du port. Dans cette approche, des actions peuvent également être planifiées et engagées en dehors de tout projet de travaux, dans le cadre de l'exploitation habituelle du port.

Cela étant, l'engagement d'une telle démarche de planification par anticipation n'est pas toujours réaliste ou réalisable et il n'est pas rare que ce soit à l'occasion de projets de travaux exceptionnels qu'une démarche d'écoconception portuaire en faveur de la biodiversité soit initiée. Dans ce cas, on s'efforcera de veiller à ce que les orientations prises soient cohérentes avec le fonctionnement global du port et non uniquement de la zone ou de l'infrastructure concernée par le projet de travaux. Le diagnostic peut alors être intégré aux études environnementales devant être menées préalablement à la réalisation de ce type de travaux.

Le plan d'actions donne au gestionnaire une vision éclairée des priorités en matière de gestion de la biodiversité dans son port. Il peut sur cette base, programmer ces actions selon ses capacités, son plan de gestion global et son programme de travaux. Il peut par ailleurs anticiper le surcoût de ces actions en recherchant des aides au financement, en sollicitant suffisamment en amont des guichets de subvention spécifiques à cette thématique.

Il s'agit de concilier le maintien, voire le développement de la biodiversité avec le maintien de la capacité à aménager le port dans une vision intégrée. Cette stratégie peut dès lors être retranscrite dans les marchés de maîtrise d'œuvre (MOE) passés dans le cadre de projets d'infrastructures afin que ces objectifs soient eux aussi intégrés le plus en amont possible de la conception des projets.

3.2.2 - Conception détaillée des mesures

Une fois les orientations d'écoconception prises, il convient d'en définir le contenu avec un niveau de précision adapté au stade de conception du projet global. Dans le cadre d'un déroulement normé des études de conception, cette étape est comprise dans les études d'avant-projet (AVP) et de projet (PRO).

Pour rappel, les études d'avant-projet ont pour objectif de préciser le projet afin d'en valider sa réalisation. On passe du concept (étape des études préliminaires) à une définition plus concrète avec des notions d'échelle (volumes, emprise) et des dispositions techniques (caractéristiques de l'infrastructure, implantation) permettant d'affiner le coût et le planning prévisionnel des travaux. Le stade projet doit détailler le projet d'infrastructures de manière suffisante pour émettre un marché de travaux auprès des entreprises qui réaliseront la construction. Il inclut donc les plans détaillés des infrastructures, incluant les solutions d'écoconception retenues et leur implantation, l'estimation des coûts affinés et le planning de réalisation.

A l'issue de cette phase, le maître d'œuvre pourra assister si nécessaire le maître d'ouvrage pour l'émission du marché de travaux, l'évaluation des offres remises par les entreprises de travaux, la clarification de certains points, la sélection des entreprises retenues et la contractualisation du marché. L'intégration de l'écoconception au stade de l'accompagnement à la contractualisation est traitée dans le sous-chapitre suivant relatif aux travaux.

3.2.2.1 - Optimisation des émissions de GES et de l'utilisation des ressources au travers du choix des matériaux

A partir du stade avant-projet, la solution technique à retenir pour le projet de construction est définie plus précisément et la géométrie de l'ouvrage est figée. Lors de cette phase, pour limiter l'empreinte carbone du projet, des choix constructifs peuvent être faits pour optimiser et limiter les émissions de GES liées à la construction et réduire l'utilisation de ressources non renouvelables.

Estimer l'empreinte de la construction en se basant sur le « détail quantitatif estimatif » (DQE) et les facteurs d'émission

Le détail quantitatif estimatif est un document essentiel pour l'estimation de l'empreinte carbone car il permet d'avoir une idée plus ou moins précise des quantités de matériaux utilisées, des équipements nécessaires à leur mise en œuvre ainsi que des estimations sur les durées de chantiers. Ces données peuvent être précisées avec une quantité en unité d'objet, mètre linéaire, tonne, m²... ce qui permet de les relier à un facteur d'émission physique, modulo un ratio de conversion quand l'unité n'est pas la même. Dans le cas où elles sont données avec un prix forfaitaire, il est possible la plupart du temps de les relier à un facteur d'émission monétaire moins précis.

Cette valeur est à considérer avec les incertitudes qui y sont liées, tant sur la donnée d'entrée que sur le facteur d'émission en lui-même : pour les facteurs physiques, ils se basent sur la moyenne d'estimations effectuées sur des projets antérieurs et peut ne pas correspondre exactement aux éléments physiques. Pour les facteurs monétaires, ils peuvent ne pas correspondre au marché à l'instant t et sont donc très dépendants du contexte économique, autant pour les projets français que ceux à l'étranger.

Les principales sources de données de ces facteurs d'émissions sont la base carbone de l'ADEME, qui fournit un nombre important de facteurs d'émissions en accès libre. Il y a aussi la base carbone INIES qui est la base de données environnementales et sanitaires de référence pour le bâtiment et la RE 2020.

Le résultat de cette évaluation d'empreinte carbone permet de déterminer les lots/postes constructifs prioritaires sur lesquels mener des actions pour réduire l'impact.

Optimiser les matériaux

Une étude du port de Göteborg effectuée en 2014 sur l'analyse de 22 projets de construction/réhabilitation a permis d'identifier que pour les projets, l'acier (6%) et le béton (82%) représentaient 88% des matériaux utilisés pendant la construction et représentaient respectivement 10% et 19% du budget carbone global des différentes opérations de travaux (les consommations des engins sur le chantier (diesel et essence) contribuant à 67% du budget carbone).

Au stade de l'AVP et du PRO, l'équipe de conception a prioritairement la main sur le choix des matériaux et plusieurs approches peuvent permettre d'optimiser les besoins en matériaux les plus émissifs tels que l'acier et le béton. Les émissions de GES d'un matériau tout au long du cycle de vie incluent les émissions liées à son extraction, sa transformation, son transport et sa mise en décharge le cas échéant. En optant pour des matériaux bas carbonés, on peut réduire ces émissions de GES en réduisant la quantité d'énergie nécessaire pour produire, transformer et transporter ces matériaux. Le processus de conception peut ainsi explorer à ce stade les alternatives suivantes :

- **Privilégier des matériaux résistants** à la corrosion et à la dégradation dans les infrastructures maritimes peut prolonger leur durée de vie et réduire ainsi les émissions associées à leur remplacement fréquent.
- **Utiliser des matériaux de substitution** en substituant des matériaux de construction à plus forte teneur en carbone incorporés à des matériaux à faible teneur en carbone lorsque cela est faisable et pertinent. Le choix des matériaux de construction peut également être influencé par des considérations

d'approvisionnement responsable. L'utilisation de bois certifié provenant de sources durables peut contribuer à la préservation des forêts et à la réduction des émissions de GES associées à la déforestation.

- **Réutiliser et recycler des matériaux disponibles sur site** : l'opportunité doit être étudiée de réutiliser ou recycler toute infrastructure existante ou tout matériau de construction présent sur le site ou dans les environs. S'il s'agit là d'un fort levier de réduction des émissions de GES, cette approche peut être complexe à appliquer du fait de spécifications (taille, type) et d'exigences de qualité particulières. Le recyclage des matériaux de démolition (par exemple les briques concassées et le béton) peut éviter d'avoir à importer des granulats vierges pour l'aménagement paysager et le remblai. Du fait de leur durée de vie importante, certains éléments en acier peuvent parfois être réutilisés. C'est par exemple le cas de certaines palplanches qui peuvent servir pour plusieurs projets, évitant la fabrication de nouvelles palplanches à chaque réutilisation.
- **Privilégier l'utilisation des matériaux alternatifs** : lorsque le contexte normatif et réglementaire le permet, il est possible de recourir à des matériaux à haute teneur en matières recyclées, qui ont tendance à contenir moins de carbone incorporé. Pour l'acier par exemple, l'utilisation d'acier recyclé peut diminuer de plus de moitié l'impact carbone associé à l'utilisation de ce matériaux (2211kgCO₂e/tonne pour acier neuf contre 938kgCO₂e/tonne pour acier recyclé). Pour le béton, il existe également des alternatives plus écologiques, telles que le béton à faible teneur en carbone, qui utilise des ciments à base de déchets industriels, de la cendre volante ou des laitiers de hauts-fourneaux pour remplacer une partie du ciment Portland, responsable de 90% des émissions des bétons. Certains fournisseurs ont ainsi développé des alternatives pouvant diminuer l'empreinte carbone du ciment, principale source de carbone dans la production de béton, de près de 50%.
- **Recourir à des produits de construction préfabriqués** – le recours à des éléments en béton préfabriqués, plutôt que coulés sur place, permet dans certains contextes de réduire les émissions de GES grâce à des processus de fabrication plus efficaces et à faible taux de déchets et du fait d'une plus grande facilité à adopter des spécifications alternatives (par exemple, utilisation de ciments particuliers).

Pour chacune de ces approches, il est important de s'assurer que les propriétés du matériau restent conformes aux normes et règlements applicables pour le dimensionnement du projet. Le concepteur devra vérifier qu'il n'y a pas d'impact sur la durabilité de l'infrastructure ou d'autres critères de qualité. Une conception légère et à faible émission de carbone peut être préférable, mais pas si elle est moins durable et doit être remplacée plus fréquemment. Le chapitre 4 détaille certains éléments techniques et retours d'expérience relatifs à l'utilisation de matériaux alternatifs ou à plus forte performance environnementale.

Optimiser la logistique sur le chantier et favoriser les véhicules efficaces

L'optimisation de la logistique de chantier peut également amener à une réduction importante des émissions de GES en réduisant les déplacements inutiles des véhicules, engins et travailleurs sur le site. Cela permet de minimiser la consommation de carburant et donc les émissions de GES associées. Une bonne organisation logistique permet de prévoir les quantités de matériaux nécessaires à chaque étape du chantier, évitant ainsi les sur-approvisionnements et les déchets. Le recours à des véhicules plus efficaces permet enfin de réduire significativement les émissions sur ces postes.

Optimiser la logistique en phase d'exploitation

Il est important de concevoir le port de manière à optimiser les déplacements internes des navires, des camions et des trains. Réduire les distances parcourues et minimiser les trajets à vide en organisant efficacement les aires de chargement et de déchargement. Dans la conception d'infrastructures nouvelles ou la réhabilitation de terre-pleins existants, l'accent doit donc être porté sur le développement du report modal (combinaison de différents modes de transport, tels que la mer, le rail et la route) pour minimiser l'empreinte carbone du transport de marchandises.

Exemple d'optimisation de la logistique appliquée à Haropa Port

Haropa Port est un grand port fluvio-maritime français comprenant les sites du Havre, de Rouen et de Paris. Ce port a mis en place diverses mesures pour optimiser leur logistique de transport en investissant notamment dans l'amélioration des infrastructures intermodales pour faciliter le transfert des marchandises entre différents modes de transport (maritime, ferroviaire, fluvial et routier). Ces actions ont permis d'optimiser les flux logistiques et de réduire les temps de transit.

En complément, Haropa Port utilise des systèmes de gestion des stocks avancés pour suivre et contrôler les mouvements des marchandises à travers le port. La société a adopté des systèmes de gestion des conteneurs basés sur les technologies de l'Internet des objets (IoT) et de la RFID (Radio Frequency Identification). Cela permet de suivre et de gérer efficacement les mouvements des conteneurs dans le port, réduisant ainsi les temps d'attente et les erreurs de localisation. Cela permet une meilleure planification et une réduction des délais d'attente, améliorant ainsi l'efficacité globale de la chaîne d'approvisionnement.

De plus, Haropa et SNCF réseau ont engagé une initiative commune, la démarche PERL (Performance Régularité Lignes) visant à améliorer la qualité de service et à favoriser le transport ferroviaire de marchandises sur l'axe Seine. Les principaux acteurs impliqués dans cette démarche sont Le Havre Terminal Exploitation (LHTE) et les opérateurs ferroviaires tels que RégioRail, Captrain, Naviland, Fret SNCF et Normandie Rail Services (NRS).

L'objectif à l'horizon 2025 est de doubler la part modale du transport ferroviaire sur l'axe Seine, ce qui contribuerait à réduire les coûts de transport, à améliorer la compétitivité du port et à réduire les émissions de gaz à effet de serre.

En tant que premier port de fret ferroviaire en France, le port du Havre souhaite tripler les volumes de conteneurs transportés d'ici 2025. Pour atteindre cet objectif, il a investi 15 millions d'euros dans le projet "ambition ferroviaire 2025". Ce projet vise à développer un réseau ferré portuaire efficace, facilitant l'interface entre le port du Havre et l'arrière-pays et bénéficiant ainsi à l'ensemble des acteurs industriels et logisticiens de la zone portuaire havraise.

3.2.2.2 - Choix des solutions de développement de la biodiversité et dimensionnement

L'étape précédente de diagnostic a permis de définir les orientations d'écoconception applicables aux infrastructures existantes ou futures et pertinentes au regard des enjeux environnementaux de la zone biogéographique dans laquelle se trouve le port. Typiquement, ce diagnostic a permis de préciser le type de fonctionnalités écologiques à renforcer dans le port et les localisations prioritaires d'intervention.

L'étape d'étude détaillée consiste ensuite à préciser la nature des solutions à mettre en œuvre et à dimensionner l'action.

Le chapitre 4 appuyé d'études de cas approfondis en Annexe 2, présente les typologies de solution développées à ce jour dans le monde par type d'infrastructure et par fonctionnalité cible. Ces chapitres et annexes peuvent être consultés pour inspiration pour cette étape de sélection des solutions.

Le présent sous-chapitre s'attachera ainsi plus particulièrement à la notion de dimensionnement ainsi qu'à la notion de niveau de détail avec lequel les solutions et concepts peuvent ou doivent être développés à cette étape préalable à l'émission d'appels d'offre pour la réalisation.

Promouvoir la biodiversité sur les infrastructures : quel dimensionnement pour quels objectifs de résultat ?

Confrontés à des ressources financières limitées, les gestionnaires de milieux doivent faire des choix stratégiques pour atteindre leurs objectifs environnementaux, dont la conservation de la biodiversité. S'il est possible aujourd'hui, d'un point de vue théorique, d'envisager des projets d'écoconception en milieu portuaire pour contribuer au maintien de la biodiversité, la question du dimensionnement des projets demeure. En effet, au niveau mondial, la plupart des projets d'écoconception ont été menés à l'échelle de pilotes et le niveau auquel leurs effets se répercutent reste aujourd'hui à évaluer.

Lors du dimensionnement se pose ainsi la question sous-jacente de l'objectif d'effet. Cherche-t-on à rétablir une fonctionnalité écologique à l'échelle de la section éco-conçue de l'infrastructure ? de l'infrastructure dans sa totalité ? du port ? d'une zone plus large incluant le port et les écosystèmes marins naturels adjacents ? La réponse à cette question dépend généralement du contexte dans lequel s'inscrit la démarche. Si elle constitue par exemple une mesure de compensation ou d'accompagnement des impacts d'un projet sur l'environnement, la question du dimensionnement est centrale. On cherche effectivement dans ce contexte à développer une approche quantifiée des impacts afin d'atteindre un objectif de zéro perte nette de biodiversité. Si au contraire, l'écoconception s'inscrit dans une démarche purement volontariste, menée en période d'exploitation dans une perspective d'amélioration qualitative et non forcément quantitative, la question du dimensionnement peut être traitée avec plus de souplesse.

Dans une démarche de restauration écologique, la définition d'objectifs réalistes et quantifiés doit être un préalable. Le dimensionnement des mesures d'écoconception devrait ainsi idéalement être fait au regard de ces objectifs. Or, comme l'efficacité des projets d'écoconception des infrastructures marines n'a pas été quantifiée à grande échelle, le dimensionnement est aujourd'hui dans la quasi-totalité des cas, fait selon des considérations budgétaires et/ou techniques et non pas selon des objectifs quantifiés d'effets écologiques. Il en résulte ainsi des projets non optimisés du point de vue de la biodiversité et le plus souvent sous-dimensionnés par rapports aux objectifs affichés. Cette façon de dimensionner les projets rend également caduque toute tentative d'évaluation du succès des opérations d'écoconception. Cette notion de succès sous-entend effectivement qu'on puisse évaluer l'atteinte d'un objectif.

Une des pistes actuellement explorée pour évaluer l'efficacité des opérations d'écoconception et dimensionner les projets repose sur l'utilisation de modèles de dynamique de populations. Ces modèles ont rencontré un large succès grâce à leur pouvoir prédictif et à leur intérêt théorique pour représenter des processus biologiques et écologiques. Ils permettent également d'explorer l'évolution d'une ou plusieurs populations sous certaines conditions, en fixant des hypothèses de travail sur l'environnement, l'écologie des espèces, les pressions de pêche ou encore les mesures de gestion. Malheureusement, de très nombreuses incertitudes existent sur les paramètres d'entrée de ces modèles et ils ne peuvent être effectivement développés que pour un nombre limité d'espèces. Actuellement, l'Ifremer travaille au développement d'un tel modèle pour évaluer l'efficacité et le dimensionnement des actions de mise en place de nurseries artificielles pour juvéniles de poissons dans les ports sur les populations de sars communs. Cette première approche, basée sur une espèce modèle et un type de projet spécifique, devrait permettre d'ouvrir le sujet à la communauté scientifique pour, à terme, être capable de concevoir des outils permettant de répondre de manière normalisée aux questionnements liés au dimensionnement des opérations d'écoconception.

Dans l'attente du développement d'outils plus fins tels que ceux-ci, une approche couramment appliquée pour le dimensionnement de l'écoconception en tant que mesure ERC, repose sur la notion d'équivalence de surface ou de volume d'habitat. On considère d'une part la surface et/ou le volume d'un habitat naturel prévu d'être dégradé ou détruit par le projet. On considère par ailleurs une solution d'écoconception capable de générer sur les infrastructures du port, une ou plusieurs fonctionnalités équivalentes à celle(s) générée(s) par l'habitat naturel en question (e.g. déploiement de piscines intertidales sur une digue pour compenser la perte d'un estran rocheux naturel). La démarche de dimensionnement par équivalence repose alors sur le redéveloppement d'une surface et/ou d'un volume équivalent de cette solution d'écoconception sur les infrastructures. A noter que cette équivalence peut ne pas être de 1 pour 1. En effet, il est admis que celle-ci doit être corrigée d'un « facteur d'équivalence » permettant de tenir compte du fait que la solution

d'écoconception n'ait pas une efficacité fonctionnelle égale à surface et/ou volume constant, avec celle d'un habitat naturel (e.g. une nurserie à poisson artificielle conçue et fabriquée par l'Homme n'est pas aussi fonctionnelle qu'un habitat de nurserie naturel). On rappelle qu'il existe une doctrine nationale concernant les exigences en termes de dimensionnement des mesures de compensation, transcrite dans le guide de l'approche standardisée du dimensionnement de la compensation écologique (CGDD, 2021).

Exemple d'application – Projet du quai Dezoums au port de Port-Vendres

Dans le cadre de la requalification du quai Dezoums au port de Port-Vendres, les travaux impliquaient l'impact de matie morte de posidonie au sein du port, restant considérée sous cet état comme une espèce protégée. L'arrêté préfectoral délivré en 2017 et portant autorisation de ce projet a imposé la réalisation de mesures de compensation et d'accompagnement dont la mise en œuvre de micro-habitats pour les juvéniles de poissons. La mesure prescrit le déploiement de surfaces et volumes cibles de micro-habitats, calculés sur la base du volume estimé de perte d'habitat de matie morte de posidonie.

On notera qu'une limite importante de cette approche du dimensionnement réside dans la méthode de calcul des surfaces et volumes des solutions d'écoconception considérées. En effet, il n'existe à ce jour pas d'approche de calcul standardisée de ces métriques. De fait, ce calcul soulève des questions écologiques complexes pour certaines fonctionnalités. Le volume fonctionnel d'un habitat de nurserie à poisson est-il par exemple strictement défini par les volumes d'abris proposés aux juvéniles ? Inclut-il un volume d'eau libre environnant qualifié d'utile ? Peut-on répondre de la même manière à ces questions selon qu'on soit en train de décrire la fonctionnalité d'un habitat naturel ou artificiel ? Si la multiplication des travaux de recherche en génie écologique marin doit permettre à l'avenir d'affiner ces notions de calcul sur la base de connaissances scientifiques solides, force est de constater qu'aujourd'hui, des méthodes de calcul très disparates sont appliquées sur les projets. Des approches conservatives ne considèrent ainsi que la surface et/ou le volume physique de la solution retenue. D'autres approches considèrent des surfaces et volumes d'influence s'étendant au-delà des surfaces et volumes physiques des solutions mises en œuvre.

Promouvoir la biodiversité sur les infrastructures : quelles solutions pour quels objectifs ?

Le choix des solutions à mettre en œuvre doit être en accord avec les impacts prévisionnels du projet (dans le cadre d'un projet de construction ou de réhabilitation) et/ou en phase avec les enjeux de préservation et de restauration écologique des écosystèmes portuaires et environnants. On rappellera qu'une étape préalable de diagnostic de la biodiversité portuaire et de ses enjeux doit permettre au porteur de projet de définir des objectifs clairs et cohérents pour l'écoconception de ses infrastructures.

Au stade projet, il convient généralement d'aller au-delà de la définition des objectifs et de préciser la nature et les volumes de solutions à déployer. S'il peut être tentant de s'orienter vers des solutions et équipements existants, déjà mis en œuvre par ailleurs et qui ont le mérite d'illustrer de manière concrète les possibilités d'application pour un objectif donné, on encouragera néanmoins les porteurs de projet à retenir en première intention, l'intérêt d'une conception de solutions sur mesure.

Par opposition à des solutions dites « catalogues », une conception sur-mesure porte comme objectif premier, de garantir une performance de moyens et de résultats compte-tenu des spécificités d'un projet. Chaque écosystème et chaque infrastructure étant uniques, il est intuitif de penser que la solution la plus performante pour cet écosystème et cette infrastructure est, elle aussi, unique. Ceci ne signifie pas que les solutions déployées et éprouvées par ailleurs n'ont pas d'intérêt d'application dans d'autres configurations et dans certains cas, le recours à ces solutions sera pertinent et efficace. Cependant, dans un domaine d'innovation rapide et dans un contexte de développement continu des connaissances scientifiques, il convient de ne pas restreindre son choix à des solutions nécessairement déjà mises en œuvre par ailleurs.

Le choix des mesures d'écoconception en faveur de la biodiversité et leur dimensionnement doit être guidé par l'objectif de générer des effets bénéfiques significatifs sur le fonctionnement de l'écosystème portuaire, voire péri-portuaire. Au stade de la conception, le porteur de projet doit ainsi veiller à identifier les mesures les plus adaptées à son contexte particulier (e.g. caractéristiques des infrastructures, enjeux écologiques issus du diagnostic fonctionnel de l'écosystème portuaire, enjeux locaux de préservation et de restauration de la biodiversité marine, notamment au regard des impacts historiques du développement du port...). Le dimensionnement des mesures doit être réalisé de manière méthodique et cohérente avec l'ambition du porteur de projet et les objectifs d'application de la séquence ERC le cas échéant.

3.3 - L'écoconception en phase travaux

L'application de l'écoconception en phase travaux consiste à mettre en œuvre les mesures définies aux étapes préalables de conception ainsi que les mesures complémentaires pouvant être proposées par les entreprises sur la base d'objectifs laissés ouverts dans le cadre du processus de consultation.

Les solutions étant présentées au chapitre 4, ce sous-chapitre méthodologique se focalise surtout sur la manière d'assurer et de suivre que ces mesures d'écoconception sont efficacement appliquées à cette étape du cycle de vie de l'infrastructure.

3.3.1 - Consultation des entreprises

Pendant la phase de consultation et de passation des contrats, des critères de sélection peuvent être prévus pour inciter les entreprises de travaux à optimiser l'empreinte environnementale du projet. L'idée de base est d'insérer des critères spécifiques de sélection ou d'attribution dans la phase d'appel d'offres qui vont conduire le prestataire à inclure dans ses solutions diverses mesures de durabilité. L'optimisation des émissions de GES, l'utilisation de matériaux à faible empreinte environnementale ou encore l'intégration de solutions favorables à la biodiversité peuvent faire partie de ces critères. Il sera possible d'affiner les critères selon le degré de précision avec lequel ces mesures auront été définies au stade préalable de conception, en lien avec le maître d'œuvre.

Cette approche peut être déclinée à plusieurs étapes du processus d'appel d'offre : lors de phase de candidature avec la pré-sélection du candidat, lors de la phase d'offre et pendant l'exécution des travaux.

Phase candidature

Au stade de la candidature, l'intégration de critères d'écoconception permet de s'assurer que le candidat intègre bien un certain nombre de compétences, de retour d'expériences et de partenaires spécialisés au sein de son groupement, lui permettant de mener à bien les objectifs que s'est fixé le maître d'ouvrage. On peut aussi vouloir prendre connaissance de solutions spécifiques qu'il aurait développé et qui constituerait une voie d'optimisation complémentaire à ce qui a été défini au stade de la conception.

Pour l'optimisation de l'empreinte carbone, on peut par exemple souhaiter s'assurer que le candidat intègre les bonnes compétences en estimations/comparaison de GES, ou qu'il a développé un savoir-faire en développement et mise en œuvre de bétons bas carbone. Pour l'intégration de solutions favorables à la biodiversité, on peut vouloir vérifier que le candidat dispose de l'appui d'entreprises possédant un retour d'expérience avéré en développement de solutions adaptées aux enjeux spécifiques du projet.

Cette approche peut également être utilisée pour établir une liste de fournisseurs acceptés qui peuvent être sélectionnés par une entreprise de construction dans une phase ultérieure.

Phase offre

Les mesures d'écoconception retenues au stade de la conception font partie du programme de travaux et l'offre du candidat doit logiquement intégrer ces mesures. On s'assurera que le cahier des charges conduise le

candidat à décrire avec précision la manière dont il compte les mettre en œuvre, en accordant notamment une pondération suffisamment incitative sur sa méthodologie environnementale.

L'objectif d'optimisation des émissions de GES se prête par ailleurs bien à l'introduction de critères de performance environnementale comme critère d'attribution, signifiant que le soumissionnaire puisse être évalué sur ses émissions de carbone de la même manière que sur son devis, son processus qualité etc. On s'assurera que le cahier des charges de l'appel d'offre incite le candidat à détailler ses modalités de calcul.

Dans le cas particulier d'appels d'offre visant exclusivement la mise en œuvre de solutions favorables à la biodiversité (opérations réalisées en phase d'exploitation de l'infrastructure, hors projet de travaux par exemple), on accordera une attention particulière à formuler le dimensionnement de l'opération selon des critères permettant une comparaison objective des offres. Ainsi pour des solutions d'habillage par exemple, il conviendra de raisonner davantage sur des mètres linéaires, des surfaces ou des volumes d'habitat créés par les équipements déployés plutôt que sur le nombre d'équipements, une grande disparité de solutions existant aujourd'hui. Des objectifs de performance en matière d'émissions de GES et d'empreinte environnementale des matériaux pourront bien entendu être formulés pour ces appels d'offre spécifique.

Phase construction

Le cahier des charges doit s'assurer que les entreprises communiqueront pendant les travaux les informations les plus exhaustives possibles pour permettre un suivi adéquat de la performance d'application des mesures d'écoconception.

3.3.2 - Suivi de la performance du chantier

Des critères de suivi des émissions de GES sur le chantier peuvent être prévus dans le cadre du suivi environnemental global du chantier. Dans ce cadre, la mise en place d'un registre comptabilisant :

- les quantités de matériaux consommés sur le chantier et leur source d'approvisionnement,
- les consommations énergétiques des engins de chantier et de la base vie,
- les volumes de déchets évacués et leur modalités de traitement,
- le déplacement des personnels affectés au projet,

permettra au maître d'ouvrage de tracer les comptabilisations de gaz à effet de serre liés à chaque type de travaux. Pendant le chantier, l'empreinte carbone du chantier peut ainsi être mise à jour de manière mensuelle.

Ces critères pourront être élargis pour suivre la bonne application de matériaux à empreinte environnementale réduite et notamment la valorisation de matériaux locaux dans une logique d'économie circulaire.

C'est essentiellement par la mise en œuvre de cette phase de suivi et de contrôle que les entreprises seront réellement incitées à optimiser leur logistique de chantier.

3.4 - L'écoconception en phases d'exploitation et de maintenance

En phase d'exploitation, l'enjeu principal d'écoconception des infrastructures est d'assurer leur suivi, afin d'évaluer et de maintenir leur performance dans la durée. Il s'agit aussi de pouvoir anticiper des mesures préventives de maintenance, qui, si elles n'étaient pas engagées, conduirait à des besoins en travaux de réfection plus lourds et plus impactant.

Ces suivis doivent être développés de manière spécifique pour chaque composante considérée.

Pour les émissions de GES et la consommation de ressources, le suivi portera principalement sur l'intégrité de l'ouvrage de sorte à décerner au plus tôt les actions de maintenance nécessaires.

Le suivi portera également sur la performance des mesures d'écoconception elles-mêmes et ce afin d'évaluer la pertinence et l'efficacité des mesures appliquées. La consommation d'énergie de l'infrastructure et des opérations de maintenance pourra par exemple être suivie. En cas d'application de matériaux innovants, l'établissement d'un suivi spécifique de ses performances et de sa durabilité est évidemment crucial pour qualifier la performance réelle du matériau et alimenter les retours d'expérience nécessaires au passage à l'échelle et à l'application sur d'autres projets.

Pour les mesures réalisées en faveur de la biodiversité dans le port, le suivi permet d'évaluer les bénéfices écologiques sur la base d'un constat *in situ* des espèces en présence et de l'évolution des peuplements dans le temps. La fréquence et la durée de ces suivis doivent être adaptées à la saisonnalité des espèces ciblées et à la variabilité interannuelle attendue. Différentes méthodologies sont décrites dans la littérature. On notera l'importance de suivre des sites de référence, dans le port et dans des zones naturelles adjacentes, permettant d'une part de caractériser les gains apportés par l'écoconception par rapport à des infrastructures traditionnelles et d'autre part l'atteinte de niveaux de fonctionnalités écologiques à l'intérieur du port en comparaison à des zones naturelles adjacentes.

On notera également l'importance d'assurer des suivis sur le temps long, permettant de caractériser l'évolution de l'écosystème et les différentes successions écologiques qui s'y opèrent. Ce suivi doit enfin permettre d'évaluer l'intégrité structurelle des équipements écologiques dans le temps et d'engager des opérations de maintenance ou de remplacement si nécessaire, afin de s'assurer que les fonctionnalités écologiques de l'infrastructure restent opérantes pendant toute sa durée de vie. Ces suivis permettent d'évaluer la stratégie de gestion de la biodiversité portuaire et de la faire évoluer le cas échéant.

3.5 - L'écoconception en fin de vie et/ou requalification de l'ouvrage

L'écoconception en fin de vie d'une infrastructure portuaire peut prendre plusieurs formes :

- mettre en œuvre une logistique de chantier vertueuse : en tant que projet de travaux, plusieurs des pratiques présentées aux étapes précédentes du cycle de vie de l'infrastructure sont applicables et notamment celles visant à réduire les émissions de GES associées aux travaux.
- valoriser ou recycler les matériaux de déconstruction,
- valoriser l'infrastructure en requalifiant la vocation de l'espace portuaire,
- revaloriser l'infrastructure en assurant des travaux de réhabilitation et d'adaptation permettant un nouvel usage,
- prendre en compte la biodiversité qui a pu se développer sur les ouvrages afin d'intégrer leur fonctionnalité écologique comme donnée d'entrée dans l'établissement de scénarios de déconstruction.

Exemple d'une déconstruction partielle visant à préserver la biodiversité sur le port de Basse-Terre en Guadeloupe

Le port de Basse-Terre exploité par le Grand Port Maritime de Guadeloupe (GPMG) est un port en rade ouverte de fret et de passagers. Aménagée à partir des années 1962/63 avec la création du quai n°1, la zone Sud du port de Basse-Terre est aujourd'hui en partie inutilisée en raison des conditions climatiques. Les gabions métalliques qui constituaient le quai n°1 se sont effondrés à la suite de cyclones et l'appontement vedette, créé en 1993, n'est aujourd'hui plus utilisé à cause de la forte houle qui règne dans cette zone.

Souhaitant réaménager l'espace visuel, le GPMG a envisagé de détruire les ouvrages devenus obsolètes. A la suite de plongées de reconnaissance, des espèces remarquables de vie sous-marine ont été observées sur les ouvrages en place et notamment d'importantes colonies coralliennes le long des piliers de l'ouvrage.

Porté par la volonté de conserver et de valoriser la biodiversité proche des infrastructures portuaires à travers son programme « Cáyoli » initié en juin 2016, le GPMG a souhaité réhabiliter les anciens ouvrages non utilisés et créer une interface ville-port pour sensibiliser le grand public.

Le projet retenu par le port consiste à mettre en œuvre des solutions de valorisation de l'interface ville-port de la place portuaire sud du Port de Basse-Terre en termes de biodiversité et de patrimoine. La solution d'une destruction partielle des structures maritimes a été retenue avec la mise en place de supports pour l'avifaune et la faune sous-marine, ainsi que la réalisation d'un promontoire d'observation.

3.6 - Les documents et sources méthodologiques de référence

3.6.1 - L'écoconception pour limiter l'empreinte carbone des ports

PIANC EnviCom WG 188 – 2019 – Carbon Management for Port and Navigation Infrastructure

Ce guide a pour objectif de préciser aux ports maritimes les principales clés pour mettre en place un suivi complet de leurs émissions de gaz à effet de serre, à la fois pendant la phase construction et la phase exploitation et de proposer des leviers pour diminuer leur empreinte carbone. La structure et les items couverts par le guide sont les suivants :

- Définition du périmètre de gestion du carbone
- Initiatives existantes pour mesurer quantitativement les émissions de gaz à effet de serre
- Bonnes pratiques liées à la réduction des émissions de gaz à effet de serre
- Aspects financiers liés aux actions de réduction de l'empreinte carbone

Le guide est complet et est destiné à tout type d'infrastructure maritime ou portuaire. Des cas d'études et exemples d'initiatives mises en œuvre sur plusieurs ports internationaux sont, de plus, présentés en annexe du guide et permettent de valoriser les bonnes pratiques.

PIANC EnviCom WG 178 – 2020 – Climate Change Adaptation Planning for Ports and Inland Waterways

Ce guide a pour objectif de sensibiliser les gestionnaires de port à la prise en compte du changement climatique dans le dimensionnement de leurs infrastructures, avec l'objectif de diminuer leur vulnérabilité. Le guide est structuré autour des 4 étapes à suivre pour correctement prendre en compte ces risques dans la gestion du port :

- Etape 1: Contexte et objectifs
- Etape 2: Connaissance du contexte climatique et de son évolution prévisionnelle sur la durée de vie de l'infrastructure
- Etape 3: Etude des vulnérabilités et des risques induits sur l'infrastructure portuaire
- Etape 4: Définition des stratégies d'adaptation possibles

Le guide est complet et est destiné à tout type d'infrastructure maritime ou portuaire. Des cas d'études et exemples d'initiatives mises en œuvre sur plusieurs ports internationaux sont, de plus, présentés en annexe du guide et permettent de valoriser les bonnes pratiques.

PIANC EnviCom WG 150 – 2014 – Sustainable Ports – A guide for port authorities

Ce guide, plus ancien, date de 2014 et a pour objectif de sensibiliser les gestionnaires de port à la prise en compte des enjeux environnementaux sur leurs ports et sur la gouvernance associée. Pour chaque enjeu sont présentés les défis, problématiques, perspectives et options de réponses possibles. Les sujets traités dans le guide couvrent notamment l'artificialisation des sols, la connectivité et le report modal, la qualité de l'air, la qualité des eaux de surface et des sédiments, la qualité du sol et des eaux souterraines, les impacts liés au dragage, les impacts liés au bruit, les problématiques liées à l'énergie et au changement climatique, l'adaptation au changement climatique, la prise en compte de la biodiversité, les paysages et la qualité de vie, les déchets générés par l'exploitation des navires, la gestion durable des ressources. Un chapitre permet aussi de définir la gouvernance à mettre en place et le rôle de chaque acteur dans la prise en compte de ces enjeux.

Port Emissions Toolkit:

- **Guide n°01 - Assessment of port emissions - 2018**
- **Guide n°02 – Development of port emissions reduction strategies - 2018**

Ces deux guides rédigés en collaboration entre le GloMEEP, l'IMO et l'IAPH ont pour objectif de présenter les principales sources d'émission liées aux activités portuaires et les leviers permettant de les réduire. Les principaux postes couverts par ce guide concernent essentiellement une meilleure maîtrise de l'énergie et des équipements portuaires.

A practical guide to decarbonising ports – Catalogue of innovative solutions

Ce guide, rédigé par EIT InnoEnergy a pour objectif de présenter différentes initiatives pour réduire l'empreinte carbone des ports, à travers des exemples et bonnes pratiques concrètes mises en place sur les ports européens. Le guide est structuré autour de plusieurs thématiques:

- Décarboner l'industrie maritime
- Décarboner la logistique portuaire
- Décarboner l'industrie dans les ports
- Décarboner la production d'énergie dans les ports
- Décarboner la maintenance dans les ports
- Le développement d'énergie propre pour les bâtiments portuaires
- Contrôler, mesurer et publier les émissions et les autres impacts.

3.6.2 - L'écoconception par les matériaux

Ressources de l'UMR MCD : Matériaux pour une Construction Durable

Les travaux scientifiques de l'UMR MCD issu du partenariat entre le CEREMA et l'Université Gustave Eiffel visent à mieux appréhender le comportement des matériaux de construction intégrant des produits alternatifs (en particulier ceux à base de déchets de construction et de coproduits industriels) sur trois plans : (i) la durabilité de l'ouvrage en lien avec les propriétés des matériaux mis en œuvre et l'environnement d'exposition, (ii) l'optimisation des mélanges garantissant des performances mécaniques adéquates (iii) la prise en compte du cycle de vie et des impacts environnementaux dans le cadre d'une économie circulaire.

[UMR MCD : Matériaux pour une Construction Durable | Cerema](#)

de Larrard F. et Colina H. (Dir.), Le béton recyclé. Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2018. Ouvrages Scientifiques, OSI4, 792 pages, ISBN 978-2-85782-747-4.

Ce guide décrit les types de bétons recyclés, leur composition, leur formulation et leur utilisation sur certains chantiers expérimentaux. Les quatre raisons évoquées pour le recyclage du béton sont les suivantes: limitation de l'utilisation de ressources naturelles non renouvelables, limitation de la mise en décharge de déchets de construction et de démolition, limitation de l'impact lié à la logistique de chantier, développement du recyclage.

Guide d'utilisation du béton en site maritime – CETMEF, Notice PM-08-01 – 2008

Il s'agit d'un guide sur l'utilisation du béton dans les ouvrages maritimes venant compléter les normes et règlements existants. Il rappelle les exigences et spécifications liées à l'utilisation de ce type de matériau en milieu maritime.

3.6.3 - L'écocoception en faveur de la biodiversité

New South Wales Government, 2009, Environmentally friendly seawalls -A guide to improving the environmental value of seawalls and seawall-lined foreshores in estuaries

Guide technique ciblé sur l'amélioration du potentiel de colonisation des ouvrages verticaux pour la faune et la flore fixées. Se focalise principalement sur les sujets matériaux, rétention d'eau et réduction de la pente des ouvrages. L'approche de l'écocoception par le développement de cavités et abris pour la faune mobile hors stade juvénile est également abordée tant dans la masse de l'ouvrage qu'en son pied (e.g. récifs artificiels). La végétalisation des berges (e.g. plantation de mangroves) est brièvement abordée ainsi que l'illustration de concepts d'ouvrages écoconçus.

Ne concerne que l'Australie. Peu à pas d'études de cas concrètes en dehors des illustrations de concepts proposés.

Van Eekelen & Bouw, 2020 Building with Nature, Creating, implementing and upscaling Nature-based Solutions

Livre spécifique aux Solutions Fondées sur la Nature réalisé par le réseau hollandais Ecoshape. S'attache à décrire l'état des connaissances et différents cas d'études ciblés sur plusieurs grandes catégories de chantiers (côtes sableuses, marais, rivières...) dont la catégorie Port. Seules des approches à grande échelle sont présentées. Elles ciblent principalement le rétablissement de conditions hydro-sédimentaires adaptées.

Réalisé par un consortium d'entreprises hollandaises, les retours d'expérience restent peu précis notamment sur les résultats techniques/biologiques obtenus sur le long terme en ce qui concerne les solutions d'écologie urbaine et portuaire proposés.

Gudfin A., Lenfant P., Fonbonne S., Boissery P. 2022. Guide technique - Evaluation des pilotes expérimentaux et des travaux de restauration écologique, cas des nurseries portuaires. ICO Solutions / DRIVER / Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, 54p.

Guide technique récent ciblé sur l'apport de microhabitats pour les stades juvéniles de la macrofaune mobile. Il se focalise plus spécifiquement sur le rétablissement pour les poissons de la fonctionnalité de nourricerie en milieu portuaire de type substrat dur. S'appuie sur les résultats des principaux travaux réalisés depuis 10 ans sur cette thématique en France (Econaut, GIREL, Sublimo, Respire, MEDHAB). Propose une approche de dimensionnement minimal des ouvrages à écoconcevoir dans cet objectif. Développe une proposition de dimensionnement de suivi minimal ou optimal, selon le budget, l'avancement des technologies testées ou encore la taille des ports.

Se limite à la Méditerranée française et à l'approche nourricerie à poissons par apports de microhabitats de type substrats durs entre 0 et 10 m.

Pioch, S., & Souche, J. C. (2021). L'écocoception des infrastructures maritimes: Vers un aménagement intégré à l'environnement. ISTE Group.

Livre récent proposant une définition, un cadre et un historique aux principes de l'écocoception maritime appliqués notamment aux ouvrages portuaires. Distingue les approches d'écocoception à l'échelle du matériau et de la complexification tridimensionnelle de l'habitat. Présente différents cas d'études en France et dans le monde sur des thématiques variées (pipeline, mouillage, nourricerie).

Retours d'expérience néanmoins centrés sur l'expérience et les projets qui impliquent directement les auteurs.

Sutton-Grier, A. E., Wowk, K., & Bamford, H. (2015). Future of our coasts: The potential for natural and hybrid infrastructure to enhance the resilience of our coastal communities, economies and ecosystems. Environmental Science & Policy, 51, 137-148.

Près de 600 citations, publication de référence au sujet des infrastructures « hybrides » aux Etats-Unis. Synthétise le concept d'ouvrages portuaires et de protection hybrides (grey and green infrastructures). S'intéresse aux fonctionnalités écologiques et services écosystémiques apportés par différents écosystèmes clé de voûte comme les marais salants, les récifs d'huitres, les mangroves, les coraux ou encore les dunes qui peuvent être en tout ou partie intégrés à certaines typologies d'ouvrages. La notion de bioprotection, ou comment les constructions biogéniques et écosystèmes peuvent augmenter la durabilité des ouvrages techniques est également abordée. Les exemples décrits s'intéressent néanmoins principalement à l'adaptation aux événements extrêmes et sont centrés sur les Etats-Unis.

Schaefer, N., Bishop, M. J., Foster-Thorpe, C., Hoey, A. S., Mayer-Pinto, M., Sherman, C. D. H., ... & Dafforn, K. A. (2023). Ecological engineering of marine infrastructure for biosecurity-Phase 3. Report prepared for the Department of Agriculture, Fisheries and Forestry. 237pp, 3.

Récente publication issue d'une démarche gouvernementale en Australie visant à limiter l'expansion d'espèces non-indigènes (biosécurité) notamment au travers des actions d'écoconception et ingénierie écologique (Phase 3). Le travail réalisé vise à identifier la conception écologiquement durable des aménagements portuaires de l'estran marin afin de réduire le risque de colonisation d'espèces non indigènes. Ils offrent des exemples conceptuels et pratiques de conceptions potentielles, mais chaque cas doit être entièrement évalué et modifié pour s'adapter aux contraintes des développements individuels. Le rapport ne s'intéresse qu'aux espèces fixées et ciblent des secteurs extrêmement urbanisés en Australie.

3.6.4 - Les documents relatifs à l'évaluation environnementale

- **Gurvan ALLIGAND, CGDD, Charlotte BIGARD, Léa CREPIN, Dounia KHALLOUKI, Tiphaine LEGENDRE et Alexis TRESSOL (2023). Guide méthodologique Définition des mesures « éviter, réduire, compenser » relatives au milieu marin. CGDD. 80 pages**
- **Alexia Andreadakis Charlotte Bigard Naomi Delille Françoise Sarrazin Thomas Schwab (2021). OFB, CEREMA, CGDD, AgroParisTech. Guide de mise en œuvre Approche standardisée du dimensionnement de la compensation écologique. 149 pages**
- **DREAL PACA et DREAL Occitanie, 2018. Guide cadre Eval_Impact. Impacts des projets d'activités et d'aménagements en milieu marin méditerranéen. Recommandations des services instructeurs. Fascicule 2 - Etapes clés de l'évaluation environnementale et analyse des impacts sur les espèces et habitats marins. Ed. CO2 communication.**
- **RETHORE Olivier, ADEME, Guillaume AUDARD, Philippe OSSET, Solinnen, Magali PALLUAU, Charlotte HUGREL, Bleu Safran, 2021. Empreinte Projet : Evaluer l'empreinte environnementale d'un projet. 133 pages.**
- **ADEME, O. RETHORE, C. HUGREL et M. PALLUAU, Bleu Safran, G. AUDARD et P. OSSET, Solinnen. 2020. Guide d'aide à la sélection des méthodes d'évaluation environnementale. 53 pages.**

4 - SOLUTIONS ET RETOURS D'EXPERIENCE

Comme présenté dans les chapitres d'introduction, l'écoconception des ouvrages maritimes est abordée dans ce document principalement autour de trois catégories d'action :

- l'optimisation de l'emploi des matériaux (durabilité, substitution, réemploi...);
- la réduction des émissions de gaz à effet de serre ;
- le développement de la biodiversité sur les ouvrages.

Ce chapitre du guide vise à synthétiser les solutions propres à ces trois catégories d'action. Il aborde à la fois les solutions qualifiables de matures et d'ores et déjà applicables de manière opérationnelle sur les projets, ainsi que les solutions plus innovantes, relevant d'avantage d'une démarche de recherche et développement mais présentant un potentiel intéressant pour l'avenir de l'écoconception des ouvrages portuaires. Ce chapitre est appuyé de l'annexe 2 qui détaille des cas d'application particulier de ces solutions au travers de retours d'expérience d'application sur projets.

4.1 - Matériaux et économie circulaire

L'une des lignes directrices de l'écoconception est la valorisation et la gestion durable des ressources. Afin de minimiser l'extraction de matières premières non renouvelables pour le secteur de la construction, il est important de savoir comment recycler ou valoriser des matériaux. Cette partie présente une synthèse de différentes solutions spécifiques au domaine maritime qui permettent de limiter ces consommations. Il aborde aussi la thématique des matériaux de substitution et des matériaux innovants à moindre impact environnemental.

4.1.1 - Aciers recyclés

L'acier est un matériau que l'on retrouve en grandes quantités dans le domaine de la construction : charpente métallique, armatures pour le béton, fondations. C'est par ailleurs un matériau particulièrement énergivore à produire et son mode de production est très émissif en GES. D'après la base carbone de l'ADEME, le facteur d'émission de l'acier « neuf » est de 870 Kg éq. CO₂/tonne pour l'acier de première fonte (réalisé entièrement à partir de minerais de fer et de hauts fourneaux) et de 300 Kg éq. CO₂/tonne pour de l'acier totalement recyclé. Il est donc particulièrement intéressant de se pencher sur le recyclage de ce matériau, tant d'un point de vue économique qu'environnemental.

Les palplanches en acier sont très utilisées dans le domaine maritime pour les structures de soutènement. Elles peuvent être réutilisées plusieurs fois dans des applications temporaires successives, ce qui réduit l'impact environnemental lié à leur emploi. En fin de vie, quand elles ne peuvent plus être réemployées, elles sont par ailleurs 100% recyclables.

Exemple de solution : réutilisation de palplanches – retour d'expérience d'Arcelor Mittal et cas d'application sur la digue de Gorinchem-Waardenburg

Les palplanches d'ArcelorMittal, produites dans l'usine de Belval au Luxembourg, utilisent des modes de transport à faible émission tels que les chemins de fer et les voies navigables. L'acier est produit par le procédé du four à arc électrique (EAF), qui produit moins de résidus que la production en haut fourneau primaire - avec jusqu'à cinq fois moins d'émissions de CO₂.

Arcelor Mittal a développé un programme mondial d'innovation sidérurgique appelé XCarb® dont l'un des produits est une nouvelle gamme de palplanches en acier EcoSheetPile™ faite d'acier recyclé et de matériaux renouvelables utilisant uniquement de l'électricité provenant de sources solaires ou éoliennes renouvelables. Cela permet d'obtenir des palplanches d'une empreinte carbone de 30 % inférieure à celle obtenue avec le mix énergétique habituel. Elles sont certifiées par une déclaration environnementale de produit (DEP) et le facteur d'émission est estimé à 370 kg éq. CO₂/tonne de palplanche produite.

Elles sont également une « garantie d'origine » pour les sources renouvelables d'électricité. Aux Pays-Bas où les deux tiers du territoire sont vulnérables aux inondations et aux submersions marines, la maîtrise des eaux a toujours été un enjeu majeur dans l'aménagement du territoire. Suite aux inondations dramatiques de 1953, le plan « Delta » a été mis en place pour améliorer la sécurité des terres en réduisant le risque inondation. Pour cela, 3 750 km de digues ont été construites et servent aujourd'hui de défense primaire. A Gorinchem-Waardenburg, ArcelorMittal a fourni des palplanches en acier sur 66 km de digue pour renforcer la structure contre les défaillances en protégeant la digue de risques de ruptures. La volonté du client était de réduire le plus possible l'impact environnemental du projet tout en adoptant les principes de l'économie circulaire : réduire, réutiliser et recycler. Le choix a donc été fait d'utiliser en partie des palplanches de réemploi. Le reste de l'acier produit utilise des fours à arc électrique (FAE) uniquement alimentés par de la ferraille issue de filières du recyclage, ce qui diminue l'empreinte écologique de l'infrastructure. Par ailleurs, les planches produites depuis le Luxembourg ont été acheminées sur site par des modes de transport peu émissifs : voies ferroviaires et navigables.

4.1.2 - Bétons spéciaux

Le béton en lui-même n'est pas considéré comme un matériau particulièrement polluant dans la mesure où il est relativement inerte, mais sa production a un impact environnemental significatif, que ce soit au niveau des émissions de GES associées à la production de certains de ces constituants et notamment le ciment, ou au niveau de l'extraction des sables et granulats qui le composent. Une forte dynamique d'innovation s'est ainsi créée autour de ce matériau de sorte à diminuer son empreinte environnementale tout en conservant voire améliorant ses performances techniques. Quelques-unes des principales solutions d'amélioration sont présentées ici.

4.1.2.1 - Béton bas-carbone

L'impact carbone de la production d'un béton utilisant du ciment traditionnel est principalement dû à l'utilisation de ce ciment. Les émissions proviennent à 40% de la cuisson du clinker à 1450°C (variable selon les sources d'énergie utilisées pour la cuisson) et à 60% de la décarbonatation du calcaire lors de sa cuisson. L'association mondiale du ciment et du béton (GCCA) estime ainsi que l'industrie du ciment est responsable d'environ 8% des émissions mondiales de GES, soit trois fois plus que le transport aérien.

Si le terme de béton bas carbone ne possède pas encore de définition officielle ou de cadre normatif, on considère aujourd'hui que cette dénomination désigne des types de béton qui, pour des propriétés, des performances, des qualités d'usage et une durabilité équivalentes à celles d'un béton traditionnel, génère des émissions de GES inférieures. Ces réductions d'émissions s'obtiennent principalement de trois manières : (i) par une meilleure efficacité énergétique des usines de production, (ii) en substituant une partie du calcaire par des matériaux moins émissifs tels que les cendres volantes ou les laitiers de haut fourneau, (iii) l'utilisation de nouveaux ciments partiellement élaborés à partir de matériaux tels que l'argile, le plâtre et le sodium.

Le recours à des bétons à empreinte carbone améliorée est possible et courant en milieu maritime et les entreprises de travaux publics ont pour la plupart acquis une expertise sur cette problématique voire établi des partenariats stratégiques avec des développeurs de matériaux nouveaux. Ainsi, en mars 2021, la société Soletanche Bachy, en partenariat avec Ecocem, a produit pour le Port du Havre un béton qualifié « ultra bas carbone », conçu à base de laitier de haut fourneau activé au carbonate de sodium.

A noter que l'appellation « bas carbone » et la classification associée doivent néanmoins être considérées avec précaution par les maîtres d'ouvrage dans la mesure où les imprécisions normatives et les vides juridiques existants permettent un abaissement du bilan carbone des bétons de manière artificielle. Par exemple l'absence de contrôle de la chaîne logistique permet à des industriels d'importer des clinkers produit de manière carbonée hors Union Européenne pour échapper aux contraintes du marché européen du CO₂ (Turquie ou Maroc par exemple) et de minimiser les émissions liées à la logistique d'approvisionnement et à la production

dans des pays où les émissions ne sont pas quantifiées. Par ailleurs, les laitiers de haut-fourneau n'ont jusqu'à récemment pas été alloués d'impact en émissions de GES pour leur production. Leur empreinte était décotée de l'activité des sidérurgistes et considérée comme nulle en entrée de cycle de vie par les cimentiers. Elle n'était donc comptabilisée nulle part. Suite à la prise de connaissance de ce problème d'allocation, il a été prévu une normalisation des méthodes de calcul de sorte à assurer une transparence sur l'impact carbone réel de ces bétons et éviter les dérives de communication associées à leur utilisation. En 2022, le programme INIES a validé la recommandation de la Direction de l'Habitat, de l'Urbanisme et des Paysages (DHUP) d'affecter aux laitiers de haut-fourneau, une partie des émissions de carbone liée à la production de l'acier (83 kg éq CO₂/t).

On précisera enfin que si le ciment est une des principales sources d'émissions de GES du béton, d'autres composantes restent à considérer dans l'optique d'améliorer l'empreinte d'une infrastructure. Ainsi les armatures métalliques contenues dans les bétons armés peuvent selon leur densité, représenter une part significative des émissions de GES d'un béton mis en œuvre. Le transport des composants puis du béton en lui-même génèrent également des émissions.

Afin de promouvoir l'utilisation de bétons bas carbone pour un impact réel et significatif, il est donc recommandé de demander une analyse exhaustive des émissions associées aux entreprises.

Pour aller plus loin dans la compréhension des concepts et enjeux associés aux bétons bas carbone, un document a été publié par l'Agence de la Qualité de la Construction avec le soutien du Ministère de la transition écologique : [Béton bas carbone – Perspectives et recommandations. AQC. Septembre 2021.](#)

Exemple de démarche : promotion de l'utilisation de bétons bas carbone sur ses infrastructures par l'autorité portuaire de New-York New Jersey

En 2020, l'autorité portuaire de New-York New Jersey a engagé un programme ambitieux visant à réduire ses émissions de carbone notamment au travers de mesures spécifiques de conception et de construction de ses infrastructures. L'une de ces mesures consiste à réduire la quantité de ciment de plus de 25% dans certains ouvrages en béton et à implémenter des projets pilotes en appui au développement de bétons bas carbone. Le programme inclut également un important objectif de valorisation de bétons recyclés issus de la déconstruction de ses infrastructures.

En appui de ces objectifs, l'autorité portuaire a établi des partenariats académiques qui ont conduit à développer des formulations de béton spécifiques à ses besoins, testées sur des infrastructures permettant de maîtriser les risques, puis validées pour une application élargie à d'autres infrastructures du port. En 2023, ces partenariats avaient permis de mettre au point 18 formulations permettant un gain d'émissions allant jusqu'à 37%.

Ces résultats sont promus au travers de spécifications établies à destination des entreprises pour la réalisation de futurs ouvrages.

4.1.2.2 - Béton à granulats recyclés, à matériau alternatif et béton coquiller

Pour réduire la demande en granulats de carrière, il est parfois utilisé des matériaux de substitution qui portent les mêmes caractéristiques ou des caractéristiques approchantes. Les substitutions peuvent porter sur :

- des matériaux recyclés, comme des granulats issus de concassage de béton de déconstruction .
- des matériaux alternatifs, comme par exemple une incorporation de déblais de dragage pour en faire une valorisation .
- des matériaux avec des déchets, comme des bétons intégrant des broyats de coquilles d'huîtres.

Aujourd'hui, du fait des contraintes liées au milieu maritime, l'utilisation de ces bétons est à privilégier sur les bâtiments et les voiries portuaires. Les initiatives proposant de les utiliser dans des ouvrages structurels maritimes ne sont pas encore très développées. On notera par exemple que les bétons faits à base de granulats

issus de béton de déconstruction présentent généralement une porosité difficilement compatible avec les objectifs de limitation de la pénétration de l'eau de mer et de la protection des armatures contre la corrosion.

Ces innovations étant recherchées dans le secteur global de la construction, elles doivent néanmoins être suivies avec attention. L'enjeu d'amélioration de la performance environnementale des bétons et l'effet de levier important lié à l'utilisation de matériaux de réemploi sont susceptibles de soutenir une évolution rapide des innovations dans ce domaine. Plusieurs projets de recherche et initiatives sont en place à l'échelle nationale pour promouvoir l'utilisation des granulats recyclés dans le béton.

Des recherches sont par ailleurs en cours pour développer des bétons utilisant des matériaux biosourcés, tels que des fibres végétales, des déchets agricoles ou des déchets industriels. Ces matériaux naturels peuvent remplacer partiellement les granulats traditionnels et réduire ainsi l'empreinte carbone du béton.

Exemple d'un béton valorisant les ressources marines : le béton coquillier

Depuis près de 10 ans, plusieurs projets de recherche et développement se sont succédé en France pour développer des bétons intégrant des granulats issus du concassage de coquillages. Principalement projeté sur des projets de communes de bord de mer, cette innovation permet de mettre en place un circuit court, local, tout en mettant en valeur une matière première jusqu'à présent ignorée : les déchets de conchyliculture. La production française de coquillage est très importante et les quantités importantes de coquilles ne sont généralement pas valorisées. Les initiatives de développement de bétons dits coquilliers visent à intégrer du broyat de coquille en substitution de sables et/ou granulats.

Les pavés VECOP issus du programme de recherche de Builders Ecole d'Ingénieur, anciennement ESITC Caen et de TECAM par exemple, contiennent entre 30% et 70% de broyat de coquille en remplacement des matériaux de granulométrie 2/4, 4/10 ou encore 4/16. Ce pavé drainant valorise les co-produits issus des pétoncles, des Saint-Jacques et des crépidules. Ces pavés sont principalement destinés à des aménagements urbains à faibles trafic comme les trottoirs, les bordures, les rues piétonnes... présentant des propriétés de perméabilité intéressantes du point de vue des objectifs de désimperméabilisation des sols. Cela pourrait être adapté pour l'utilisation de revêtements dans certaines zones de ports (parking, zones administratives etc.), ou alors pour les ports dits « urbains », intégrés à l'urbanisme de la zone.

A noter que de récents projets de recherche se sont également intéressés à l'emploi de ce type de matériaux coulés en place. C'est le cas du projet européen CIRCLE ayant pris fin début 2023.

4.1.2.3 - Bétons favorables à la colonisation par les espèces marines fixées

Du fait de leur formulation, les bétons marins standards présentent une forte alcalinité de surface ($\text{pH} > 10$) qui peut perdurer jusqu'à plusieurs années après leur immersion, ainsi qu'une structure très fermée et lisse visant à limiter la pénétration des ions chlorures dans l'objectif de préserver la durabilité du matériau et de maîtriser le risque de corrosion des armatures métalliques présentes dans le cas d'ouvrages en béton armé. Les communautés benthiques capables de coloniser de telles substrats sont généralement moins diversifiées que celles observées sur les substrats durs naturels et se limitent souvent à certaines espèces opportunistes (parfois exogènes, voire invasives).

Une littérature scientifique abondante existe sur l'optimisation du potentiel de colonisation des bétons, dans l'objectif d'augmenter la diversité des espèces qui s'y fixent, voire de cibler certaines espèces cibles, que ce soit via une amélioration des caractéristiques intrinsèques du matériau ou par une complexification ciblée de sa topographie de surface.

Les paramètres usuels sur lesquels les bétons sont modifiés pour favoriser la fixation de la vie sont :

- micro-complexité et porosité des surfaces ;
- macro-texture de surface (rugosité) ;
- pH proche de 8 (eau de mer) par le choix du ciment, l'utilisation de granulats « acides », traitement surfacique des bétons... ;
- physico-chimie de surface par introduction d'éléments favorables à la fixation des espèces (matériaux coquillers, adjuvants spécifiques...) ou élimination d'éléments toxiques.

L'écoconception peut ainsi prendre une forme relativement simple en travaillant mécaniquement l'état de surface des bétons (par matriçage, rainurage, désactivation...) de sorte à améliorer la microstructure de surface des ouvrages. Elle peut aussi prendre une forme plus complexe par l'utilisation de bétons à formulation particulière, permettant de travailler sur des paramètres complémentaires et de gagner ainsi en performance.

La difficulté majeure est de pouvoir conserver les performances du béton initial. Par exemple, en ayant un béton trop poreux, il n'est plus possible d'utiliser des armatures métalliques qui vont être rapidement corrodées. La deuxième difficulté est de conserver un prix raisonnable de fourniture et de mise en œuvre en comparaison à un béton standard, de sorte à permettre l'application de cette mesure d'écoconception à grande-échelle sur l'infrastructure. Du fait de ces contraintes, l'application de bétons à potentiel de colonisation améliorée se fait majoritairement par plaquage de dalles, dissociées de la structure de base de l'infrastructure.

Exemple de solution : le béton bicouche

Afin de palier à la problématique de perte de résistance structurelle des bétons liée à l'accroissement de leur porosité à des fins d'écoconception, le groupe Holcim et la société Seaboost ont développé un béton bicouche. Sa particularité réside dans sa mise en œuvre en un seul coulage et offrant une résistance adaptée à la réalisation d'éléments préfabriqués, grâce à une couche dense structurelle et une autre, poreuse et moins structurelle mais plus favorable à la colonisation. Les classes granulométriques employées pour sa mise en œuvre permettent par ailleurs de cibler des gammes de porosité répondant aux préférences de fixation de spores et larves d'espèces cibles (coraux, macro-algues, huitres...).

Ce matériau a pu être expérimenté sous plusieurs formes dans le cadre de projets d'écoconception portuaire (récifs de pieds d'ouvrage, plaquage...) et de nouveaux développements visent à permettre l'application de ce matériau directement pour la fabrication d'éléments préfabriqués constitutifs d'infrastructures.

A noter que l'amélioration de la colonisation biologique de certains ouvrages soumis à la marée peut améliorer leur durabilité (bioprotection) en limitant les variations environnementales subies par les matériaux (ex : expositions aux UV, variations de température et d'hygrométrie...).

4.1.3 - Autres matériaux employés pour la maintenance des ouvrages

4.1.3.1 - Produits d'autocicatrisation des bétons

Plusieurs instituts de recherche et start-up travaillent depuis plusieurs années sur les propriétés autocicatrisantes du béton pour obtenir un matériau plus durable s'autorégénérant, minimisant, de fait l'empreinte environnementale associée à la maintenance des ouvrages.

Des chercheurs ont ainsi développé des bétons contenant des bactéries spéciales, telles que des bactéries lactiques, qui sont activées lorsqu'une fissure se forme dans le béton. Ces bactéries produisent du carbonate de calcium qui se dépose dans la fissure, comblant ainsi les espaces vides et améliorant la résistance structurelle du béton. Cette bio-minéralisation est développée par la société Amonit qui l'exploite sous forme de patch et a été utilisée pour restaurer la chambre de commerce de Toulon.

Basilisk est une société néerlandaise qui développe et commercialise des produits pour béton auto-cicatrisant basés sur des technologies de bactéries et de capsules d'autoréparation. Lorsque des fissures (<0.8mm) se

produisent, ces capsules se rompent et libèrent les matériaux de cicatrisation qui se répandent dans la fissure pour la refermer. Pour les nouvelles infrastructures, l'incorporation de ce produit à la formulation du béton permet de prévenir les fissures jusqu'à 1 mm de large lors de la préparation du béton. Ce procédé a notamment été utilisé pour le projet de construction d'un bassin de récupération des eaux pluviales sur le port de Rotterdam.

Si ces quelques avancées récentes sont prometteuses pour l'optimisation des besoins de maintenance des ouvrages, il est important de noter que la plupart de ces technologies sont encore en phase de recherche et développement et ne sont pas encore largement utilisées dans l'industrie de la construction. Il existe par ailleurs peu de retours d'expérience à grande échelle sur le déploiement de béton autocicatrisant dans les projets d'infrastructures. En effet, le coût de mise en œuvre de cette technique reste conséquent et le retour d'expérience sur le procédé n'est pas encore complètement fiabilisé.

4.1.3.2 - Résines spéciales

Certaines sociétés ont développé des techniques de réparation / confortement des ouvrages qui permettent de limiter leur emprise et de limiter l'utilisation de matériaux.

C'est par exemple le cas de résines qui, par injection au cœur de la maçonnerie permettent de conforter les ouvrages. Présentées comme inertes, elles permettent de réduire l'empreinte carbone de chantiers de maintenance ou de réparation en s'affranchissant de la mobilisation de moyens lourds et en réduisant ainsi la consommation d'énergie pour la mise en œuvre.

Exemple d'application sur le port de Rouen

Cette technique a notamment été utilisée pour conforter un quai du port de Rouen. Du fait d'un lessivage important des sols dû au marnage de la Seine et d'interfaces entre la dalle support de quai et le talus sous-fluvial, un fontis s'est créé en arrière du quai. Uretek a réalisé la consolidation de sol dans la zone de fontis en utilisant un procédé de deep injection améliorant la cohésion des sols. Des sondages et un suivi inclinométrique et laser ont permis de contrôler les résultats de l'opération.

Cette technique peut aussi être utilisée pour le traitement des murs de maçonnerie (wall restoration) par injection de résine. Elle a été utilisée sur plusieurs quais poids maritimes et notamment sur le quai Jules Sandeau au Pouliguen ainsi que sur le môle de l'Adon à Saint-Gilles Croix de vie.

4.1.3.3 - Bétons naturels

Le terme de béton naturel est employé pour désigner des matériaux d'aspect constitutif similaire au béton mais ne contenant pas de ciment et formés par un agrégat de différents matériaux, dit naturels. Il peut être constitué d'argile, parfois de chaux et de pouzzolane auxquels on peut ajouter des fibres végétales (comme le chanvre pour le structurer). Ces matériaux ne peuvent pas être utilisés seuls dans une construction et sont essentiellement valorisés dans le secteur du bâtiment aujourd'hui. Leur application en site portuaire est à réserver à des usages précis de requalification / constructions des bâtiments.

Des recherches et initiatives se développent néanmoins pour développer transposer ces applications au milieu maritime.

Exemple de solution : procédé Géocorail™ et cas d'application à La Rochelle

La société Seacure en France travaille autour de l'électrolyse d'eau de mer pour la fabrication de béton naturel, le procédé Géocorail™. Provoquée par un courant très basse tension, la réaction permet de précipiter le calcium et le magnésium présents de manière dissoute dans l'eau de mer pour créer un liant à base d'aragonite et de brucite, qui sont deux types de roches que l'on apparente généralement à la matière produite par les coraux. Réalisée au contact de fonds meubles, cette réaction agglomère les sédiments environnants formant un « béton » naturel selon un délai variable de plusieurs semaines à plusieurs mois voire années.

Après la tempête Xynthia de 2010, le Programme d'Actions de Prévention des Inondations de la Rochelle a défini comme objectif la protection des quartiers littoraux contre les submersions marines. Dans ce cadre, la rénovation de la promenade du littoral a été planifiée. Après un chantier pilote expérimental sur la plage de Châtelailon en Charentes, les résultats ont encouragé la Communauté d'Agglomération de La Rochelle à utiliser le Géocorail™ pour le confortement des enrochements des digues du Port-Neuf.

Le musoir de l'épi du Port Neuf a été renforcé en utilisant des gabions recouverts d'une couche de Geocorail™. Cette méthode a permis de remplacer les enrochements pesant de 1 à 3 tonnes par des pierres pesant de 10 à 60 kilos, réduisant ainsi l'emprise au sol et le risque d'affouillement de la structure. Ce projet a été dimensionné par le Cerema, supervisé par SCE CREOCEAN et réalisé en collaboration avec Eiffage. Cette initiative expérimentale a permis d'éviter l'approvisionnement sur site d'enrochements (300 km de transport routier) et de réduire l'empreinte carbone du projet de 78 tCO₂e.

4.1.4 - Matériaux locaux, matériaux recyclés et matériaux de dragage

La valorisation des matériaux locaux dans une démarche d'économie circulaire constitue un levier majeur d'amélioration de l'empreinte d'un projet.

Ainsi les matériaux issus du secteur de la déconstruction et les matériaux de dragage peuvent constituer des ressources d'intérêt pour la construction de certains types d'infrastructures, en tant que matériau de remblai ou remplissage de terre-plein par exemple. Ces matériaux sont notamment une source précieuse d'économie et d'impact pour les territoires isolés vers lesquels l'acheminement est complexe, coûteux et énergivore (ex. territoires insulaires ultra marins).

La réutilisation de ces matériaux de dragage peut être prévue en suivant les recommandations et les lignes directrices établies par les différents guides à ce sujet. Pour ce faire, il est essentiel de caractériser ces matériaux pour déterminer leur composition, leurs propriétés (physiques, chimiques et géotechniques) et leur potentielle revalorisation.

Une vigilance particulière doit être apportée lors de l'utilisation de ces matériaux, afin de maîtriser les risques d'impacts environnementaux. Des méthodes de confinement appropriées peuvent par exemple être nécessaires, en mettant en œuvre des mesures de contrôle des sédiments et en assurant une surveillance régulière de la qualité de l'eau.

Le bois peut également être reconsidéré pour la réalisation de certains types d'infrastructure, en veillant à utiliser des essences répondant à des classes de résistance adaptées. Pour certains territoires ultramarins, la proximité de gisements d'essences tropicales peut constituer une opportunité.

Exemple de solution : ouvrages de génie civil en bois en Guyane

La société Jemassey SAS en Guyane regroupe plusieurs sociétés guyanaises complémentaires, dédiées aux travaux de rénovation de bâtiment, de second œuvre et de génie civil bois. Ces activités présentent le double avantage, d'utiliser des ressources locales et renouvelables, y compris sur des projets de génie civil fluvio-maritimes. Leurs réalisations incluent notamment des ponts, des cales, des pieux battus, des murs de soutènement ainsi que des quais de déchargement.

En métropole, des alternatives à l'utilisation de bois exotiques sont recherchées. On peut par exemple citer une expérimentation réalisée au Cap d'Agde en Méditerranée visant à utiliser une essence locale de bois (robinier) pour le platelage de pontons.

4.1.5 - Polymères biosourcés

Des alternatives aux plastiques conventionnels se développent progressivement, poussées par une réglementation elle aussi en développement concernant l'usage du plastique dans différentes catégories de produits du quotidien. Leur usage dans différents secteurs industriels progresse également, mais les applications marines et maritimes semblent encore limitées. De nombreux termes apparaissent pour désigner les propriétés de ces matériaux. Afin de bien comprendre les enjeux associés à l'emploi de polymères biosourcés en milieu marin, il convient de clarifier ces termes.

Plastiques conventionnels et biosourcés

Les plastiques conventionnels désignent des matériaux composés de polymères d'origine fossile non renouvelable. Les plastiques biosourcés désignent des matériaux composés au moins partiellement de polymères d'origine végétale, totalement ou partiellement renouvelables.

Plastiques biodégradables

Un plastique est dit biodégradable ou biocompostable lorsqu'il peut être décomposé par des organismes biologiques dans certaines conditions (température, humidité). Les plastiques conventionnels et les plastiques biosourcés peuvent être ou non biodégradables. Il faut distinguer la biodégradabilité en environnement favorable / contrôlé (ex. centre de compostage) et la biodégradabilité en milieu naturel (ici environnement marin). Les plastiques biodégradables en environnement contrôlé ne sont pas nécessairement biodégradables en milieu marin. La biodégradation des plastiques en mer reste largement méconnue et il n'existe pas de norme de spécification de cette biodégradabilité. Il en est de même pour les termes biocompatible et bio-assimilable.

Points de vigilance concernant la désignation et les propriétés réelles des plastiques

Le caractère conventionnel ou biosourcé d'un plastique ne préjuge pas de sa performance environnementale sur l'ensemble de son cycle de vie (ressources, toxicité, cinétique de dégradation, bilan carbone, recyclabilité, biodégradabilité). Les plastiques dit biosourcés contiennent généralement des polymères d'origine fossile (sauf 100% biosourcés) et des adjuvants. Le terme de bioplastique qui peut signifier un plastique biodégradable ou un plastique biosourcé, doit être évité, les deux caractéristiques n'allant pas nécessairement de pair.

Quel choix entre plastique conventionnel et plastique biosourcé ?

Le choix de plastiques biosourcés se justifie avant tout par une volonté de recourir à des ressources renouvelables. En considérant l'empreinte environnementale globale, le recours à ces matériaux ne garantit pas nécessairement :

- une meilleure maîtrise de la dispersion de la matière dans l'environnement : la plus faible durabilité de la plupart de ces matériaux s'accompagne de risques accrus de fragmentation précoce et de relargage pendant la durée d'utilisation ;
- une meilleure maîtrise ou une moindre toxicité : pour atteindre les performances techniques souhaitées, des additifs sont généralement nécessaires, comme pour les plastiques conventionnels ;

- une meilleure empreinte environnementale (l'empreinte du Polyamide 11 est deux fois supérieure au polypropylène) [12]. Par ex : PP= 2,9 kgCO₂/kg ; PP recyclé= 1,0 kgCO₂/kg ; PLA = 2,85 kgCO₂/kg ; PA11 = 4,0 kgCO₂/kg. Les différences d'impact environnemental augmentent encore si on les rapporte à l'année de service selon les matériaux utilisés, en défaveur des matériaux biosourcés, la plupart étant moins durables en milieu marin que des plastiques conventionnels.

Lors de la recherche d'amélioration de l'empreinte environnementale d'équipements portuaires constitués de plastiques conventionnels, on veillera ainsi à bien appréhender les risques environnementaux associés aux plastiques biosourcés et à privilégier *in fine* l'utilisation de matériaux dont la stabilité en milieu marin a été démontrée.

4.2 - Émissions de GES

Comme précisé ci-dessus, toutes les actions ayant vocation à limiter l'utilisation de ressources brutes et jouant sur l'empreinte carbone des matériaux ont un impact favorable sur les émissions de GES d'un projet d'infrastructure. Les actions présentées ci-après viennent compléter ces mesures et peuvent être intégrées à la conception pour limiter l'empreinte carbone du projet en jouant sur d'autres leviers.

4.2.1 - Limiter l'artificialisation pour conserver les puits de carbone

Le premier levier pour limiter l'empreinte carbone d'un projet portuaire est le maintien des puits de carbone naturels. Les écosystèmes côtiers tels que les mangroves, les marais salants et les herbiers marins jouent un rôle crucial en tant que puits de carbone naturels. Ils absorbent et stockent le CO₂ atmosphérique, contribuant ainsi à atténuer les émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique. Dans le cadre des projets portuaires, il est essentiel de prendre en compte la préservation de ces écosystèmes côtiers et de minimiser leur destruction ou leur perturbation, qui conduit non seulement au relâchement dans l'atmosphère de tout ou partie du stock de carbone associé mais également à la perte de capacité de stockage futur.

Lorsqu'il est impossible d'éviter complètement la perturbation des puits de carbone, des mesures de restauration de milieu doivent être considérées pour viser la compensation de cette fonctionnalité.

4.2.2 - Intégrer l'intelligence artificielle et la numérisation pour limiter les travaux

4.2.2.1 - BIM, jumeaux numériques et planification

Le développement de l'intelligence artificielle et du BIM dans le domaine de la construction et des opérations portuaires permet de développer une meilleure connaissance et un meilleur suivi des ouvrages et des opérations. Cela permet d'avoir une meilleure vision du potentiel des installations portuaires résiduelles et de limiter les travaux à prévoir et donc l'impact carbone associé.

Exemple d'application – Jumeau numérique sur le Port d'Esbjerg au Danemark

La mise en œuvre d'un jumeau numérique sur le port d'Esbjerg au Danemark lui a permis d'optimiser les travaux d'augmentation de sa capacité d'export d'éoliennes (1.5 GW à 4.5 GW/an). Le jumeau numérique du port est un programme informatique agrégeant une quantité importante de données (big data), lui permettant d'analyser tous les processus portuaires liés à l'expédition d'installations éoliennes offshore, à l'aide d'une simulation 1:1 du port. Toutes les informations ont été agrégées et analysées (emplacements de stockage disponibles, besoins en espace, impact des conditions météo-océaniques, etc.) et ont permis d'optimiser la gestion des espaces et des flux pour augmenter la capacité du port sans l'agrandir.

Le port d'Esbjerg a déjà utilisé ce procédé dans le passé pour améliorer ses opérations RoRo sur leurs terminaux conteneurs, permettant ainsi une croissance de leur activité sans générer de travaux portuaires.

L'impression 3D est par ailleurs référencée par le PIANC comme un des apports potentiels de la numérisation de la construction à l'amélioration de l'empreinte environnementale des projets. Le projet européen BEEYONDERS investigate actuellement ce champ d'innovation particulier.

4.2.2.2 - Anticiper la maintenance préventive

Un mauvais entretien des ouvrages ou une mauvaise anticipation des opérations de maintenance préventive peuvent conduire à des désordres importants sur les infrastructures portuaires nécessitant des travaux de confortement conséquents, dont l'empreinte carbone peut être significative (mobilisation de moyens lourds, consommation importante de matériaux, etc.).

Dans le cadre des travaux et ou des opérations sur les infrastructures portuaires, il est donc essentiel d'intégrer dès la conception la planification de ces opérations de maintenance et de les suivre à la suite dans le cadre de l'exploitation pour minimiser au maximum les travaux à prévoir pendant la durée de vie de l'ouvrage.

Les mécanismes à prévoir pour anticiper cette maintenance sont variés :

- intégration dès la conception d'instrumentation et de dispositifs de suivi au sein de l'ouvrage ;
- publication de notices de suivi et d'entretien des ouvrages livrés dans le cadre des Dossier des Ouvrage Exécutés des travaux effectués ;
- mise en place d'un plan de gestion patrimoniale par l'autorité portuaire sur ses ouvrages ;
- diagnostic et inspection régulière des ouvrages pour identifier au plus tôt les sources de désordres et prendre les mesures idoines pour les traiter.

Exemple d'application : l'instrumentation des quais du port de la Turballe

Les quais multicateurs sont des infrastructures portuaires équipées de capteurs et de systèmes de surveillance avancés pour collecter et analyser des données en temps réel sur leur état. Ces capteurs sont généralement installés sur les quais eux-mêmes et informent sur l'état de corrosion, de détérioration, d'usure et permettent ainsi un entretien adapté et un rallongement de la durée de vie de l'infrastructure.

Dans le cadre du projet d'aménagement du port de la Turballe, des systèmes multicateurs ont été développés par l'entreprise Capacités SAS avec l'objectif d'assurer un suivi de marqueurs de pathologie des ouvrages portuaires (évolution de la corrosion, teneur en chlorure, humidité, O₂, pH et température).

Par le suivi dans le temps de ces marqueurs, la pénétration des ions chlorure pourra être appréhendée, permettant d'intervenir de manière préventive sur les ouvrages au bon moment si nécessaire.

4.2.3 - Mise en place de dispositifs permettant de décarboner les escales de navires

4.2.3.1 - Shore connect

Traditionnellement, lorsque les navires sont à quai, ils utilisent leurs propres générateurs diesel pour alimenter les systèmes à bord, tels que l'éclairage, les systèmes de climatisation, les équipements de manutention des marchandises et autres appareils électriques. Cela entraîne des émissions polluantes, y compris des émissions de CO₂ et de particules fines, ainsi qu'une consommation de carburant supplémentaire.

Le "shore connect" (ou "cold ironing" en anglais) est un terme utilisé pour décrire un système permettant aux navires de se connecter à une source d'énergie terrestre lorsqu'ils sont à quai, au lieu de faire fonctionner leurs

générateurs internes pour alimenter leurs besoins en électricité, permettant ainsi d'économiser les émissions associées. Cela peut être réalisé en utilisant des câbles électriques spécialement conçus qui relient le navire à l'infrastructure électrique du port.

L'intégration de ce système dans les ports nécessite des travaux spécifiques sur les infrastructures ou une conception spécifique dans le cas d'infrastructures neuves. On la considère ici comme une mesure d'écoconception.

Il est important de noter cependant que la pertinence de l'utilisation de l'électricité à quai pour réduire l'empreinte carbone de l'activité portuaire dépend en grande partie du mix énergétique du territoire considéré.

Ainsi, si le mix énergétique d'un pays repose principalement sur des sources d'énergie renouvelables, telles que l'énergie hydraulique, l'éolien, le solaire ou la géothermie, l'utilisation de l'électricité pour réduire l'empreinte carbone peut s'avérer très bénéfique. En revanche, si le mix énergétique d'un territoire dépend principalement des combustibles fossiles, tels que le charbon, le pétrole ou le gaz naturel, l'utilisation de l'électricité peut avoir un impact moins favorable sur son empreinte carbone.

En France, le mix énergétique est constitué d'une combinaison de différentes sources d'énergie, telles que le nucléaire, les énergies renouvelables (éolienne, solaire, hydroélectrique) et les combustibles fossiles (gaz naturel, charbon) et diffère selon les territoires considérés, notamment entre la métropole et les territoires ultra-marins. Electricity Map (<https://app.electricitymaps.com/zone/UY>) est une plateforme où il est possible d'observer en temps réel le facteur d'émission énergétique d'un pays. Les principaux facteurs d'émission à retenir pour la France sont les suivants :

- Métropole : 50 gCO₂e/kWh produit
- Corse : 590 gCO₂e/kWh produit
- Réunion : 720 gCO₂e/kWh produit
- Martinique : 840 gCO₂e/kWh produit
- Guadeloupe : 702 gCO₂/kWh produit
- Guyane : 2 560 gCO₂/kWh produit
- Mayotte : 780 gCO₂/kWh produit

En conclusion, la mise en place de manutention ou d'avitaillement vertueux doit être réfléchi en fonction du périmètre géographique pour proposer une solution adaptée au contexte local. Privilégier une manutention électrique par rapport à une manutention hybride, GNL ou biogaz doit se faire dans un contexte où le mix énergétique du territoire est favorable. L'électrification des infrastructures peut alors constituer une mesure d'écoconception pertinente.

4.2.4 - Intégration de production d'énergie renouvelable sur le domaine portuaire

En lien avec l'exploitation du port et dans l'objectif de limiter le poids carbone du mix énergétique, lors de la planification de l'infrastructure portuaire et des projets d'aménagement, le concepteur doit pouvoir étudier la possibilité d'intégrer des énergies renouvelables sur le domaine portuaire. Cela permet notamment de favoriser l'autoconsommation et une meilleure maîtrise des consommations énergétiques.

Les énergies renouvelables telles que l'énergie solaire, éolienne, hydroélectrique ou géothermique sont des sources d'énergie propre qui ne produisent pas ou peu d'émissions de gaz à effet de serre lorsqu'elles sont utilisées pour générer de l'électricité. En intégrant ces sources d'énergie sur le domaine portuaire et en les autoconsommant, il est possible de réduire les émissions de CO₂ et d'autres polluants associés aux activités portuaires. Selon la localisation du port, les conditions météo-océanique et l'emprise du domaine portuaire, ces possibilités sont vastes.

La production souvent considérée en priorité est la production photovoltaïque à partir des surfaces de toiture ou de parking, ainsi que l'implantation d'éoliennes.

Quelques exemples de développement d'énergie renouvelable directement intégrées aux infrastructures objets de ce guide sont présentés ci-après.

4.2.4.1 - Système houlomoteur implanté sur les quais ou ouvrages de protection

Un système houlomoteur à bord de quai est un dispositif qui exploite l'énergie des vagues pour générer de l'électricité ou d'autres formes d'énergie. Il est généralement installé sur une structure fixe, telle qu'un quai, jetée ou ouvrage de protection et utilise les mouvements des vagues pour entraîner un mécanisme qui convertit cette énergie cinétique en énergie utile.

Le système houlomoteur comprend généralement les composants suivants :

- un flotteur est ancré au quai ou à la structure fixe et est conçu pour se déplacer avec les mouvements des vagues (le flotteur peut prendre différentes formes, telles qu'un flotteur flottant ou un système oscillant) ;
- un dispositif de conversion de l'énergie : le mouvement du flotteur est converti en énergie utilisable à l'aide d'un mécanisme de conversion ;
- un système de transmission : pour alimenter les appareils ou les infrastructures du quai.

L'objectif principal d'un système houlomoteur à bord de quai est de capturer l'énergie des vagues et de la convertir en une forme d'énergie utilisable localement. C'est donc une forme d'énergie renouvelable, car ces dispositifs utilisent une source d'énergie naturelle et inépuisable : les vagues. Ils peuvent contribuer à la réduction de la dépendance aux combustibles fossiles et à la réduction des émissions de GES, en fournissant une alternative plus durable et respectueuse de l'environnement pour la production d'énergie dans les ports.

Exemple d'application : projet Dikwe à Esquibien (Finistère)

Le groupe Legendre, en partenariat avec l'Ifremer et la société Geps techno a développé un projet d'ouvrage de protection littorale nommée Dikwe. Il a comme particularité d'intégrer dans sa conception un système d'énergie renouvelable, par un système houlomoteur à volets oscillants. Projet ambitieux, les premiers tests se sont montrés concluants et le projet a obtenu le soutien de l'ADEME, des régions Bretagne et Pays de la Loire. Ce projet a pour ambition de créer de l'énergie à partir des enceintes portuaires, destinée à être utilisée directement sur place. Le premier ouvrage à taille réelle sera réalisé en 2024 à Esquibien (Audiernne).

4.2.4.2 - Thalassothermie (ou SWAC – Sea Water Air Conditioning)

La thalassothermie est un système de production d'énergie renouvelable qui utilise la différence de température entre les eaux de surface et les eaux profondes des océans pour générer de l'électricité. Le processus de thalassothermie se déroule en deux étapes. En premier lieu, de l'eau froide est pompée depuis les profondeurs de l'océan puis elle est utilisée pour condenser un fluide de travail à basse température, (généralement de l'ammoniac). Lorsque le fluide se condense, il libère de la chaleur, qui est ensuite utilisée pour produire de la vapeur et générer de l'électricité à l'aide d'une turbine. Une fois que la chaleur a été extraite du fluide de travail, l'eau refroidie est renvoyée à l'océan, ou valorisée pour des usages connexes pouvant tirer profit de la qualité physico-chimique particulière de ces eaux profondes. La thalassothermie présente certains avantages en tant que source d'énergie renouvelable. Elle utilise une ressource abondante et constante et a un impact environnemental évalué comme relativement faible par rapport à d'autres formes d'énergie, car elle n'émet pas de GES (en phase de production) ni de pollution atmosphérique significative.

Cette technologie est de plus en plus utilisée en soutien à la production de chaleur ou de froid pour des bâtiments portuaires et des bâtiments urbains de villes côtières. Lorsqu'elles sont déployées en milieu portuaire, ces installations peuvent nécessiter une adaptation des infrastructures existantes ou une conception spécifique dans le cadre d'infrastructures neuves.

4.2.5 - Adopter une logistique de chantier vertueuse

Des mesures peuvent être menées au niveau de l'organisation même du chantier pour réduire l'empreinte carbone d'un projet d'infrastructure :

- **L'utilisation d'équipements et de véhicules efficaces** : les machines et les véhicules utilisés sur le chantier peuvent avoir un impact considérable sur l'empreinte carbone du projet. Il est donc recommandé d'utiliser des équipements et des véhicules efficaces pour minimiser l'utilisation de combustibles fossiles et réduire les émissions de gaz à effet de serre. On peut ainsi privilégier certains types d'énergie (gazole routier, GNV, électrique, biogaz, etc.) et certaines classes de véhicules (légers).
- **L'utilisation efficace et sobre des machines** : limitation de vitesse du transport, pratique de machines spécialisées conduisant à une diminution de consommation de carburant, utilisation de véhicules légers...
- **Le recours à des moyens d'acheminement des matériaux et la mobilisation d'équipements par voie fluviale et maritime** : le positionnement des travaux maritimes avec une interface tournée vers la mer permet, (si la source d'approvisionnement le permet), la mise en œuvre d'une logistique de chantier vertueuse en privilégiant les approvisionnements par voie maritime plutôt que par un mode routier terrestre. Ce mode d'acheminement est plus performant du point de vue des émissions de GES mais également d'autres critères.
- **La gestion efficace des déchets sur site** : le tri, le recyclage, la réutilisation de matériaux, permettent d'agir sur le bilan de GES d'un projet.

Exemple d'application : Green Port Hull – transport par voie maritime des matériaux de revêtement de quais

Pour la création des parcs éoliens offshore de Hornsea au Royaume-Uni, Siemens Gamesa a fait le choix d'installer une usine de production de pales d'éoliennes et d'assemblage sur le port de Kingston upon Hull dans le Yorkshire (Alexandra Dock). Dans le cadre du projet Green Port Hull, Associated British Port & Siemens, ont fait le choix de transporter le granit utilisé pour le revêtement des quais par bateau, directement de la carrière source jusqu'au site. Si les approvisionnements avaient été effectués par camion, plus de 900 trajets auraient été nécessaires, correspondant à une empreinte carbone de 1 147 tCO₂e. En comparaison, l'approvisionnement par voie maritime a représenté une empreinte de 207 tCO₂e (sans prise en compte des opérations de manutention associées) soit une réduction de l'impact lié à la logistique de 940 tCO₂e au total.

4.3 - Biodiversité subaquatique

Pour promouvoir la biodiversité subaquatique, la démarche d'écoconception d'une infrastructure portuaire se décline dans ce guide en trois objectifs :

- amélioration du potentiel de colonisation des ouvrages pour la faune et la flore fixées (corail, macroalgues, récifs d'huitres...);
- apport de microhabitats pour les stades juvéniles de la macrofaune mobile (poissons, crustacés, céphalopodes);
- développement de cavités et abris pour la faune mobile hors stade juvénile.

Ces objectifs sont applicables à toute typologie d'ouvrage (quais verticaux, digues et brise-lames, pontons flottants, lests et cavaliers, corps-morts et mouillages) de façon à améliorer leurs fonctionnalités écologiques subaquatiques. Ces améliorations de structure et de composition des infrastructures peuvent être faites de deux façons, non exclusives l'une de l'autre :

- par « habillage » des infrastructures ;
- par modification des infrastructures « dans la masse » (pour infrastructures neuves uniquement).

4.3.1 - Synthèse des objectifs d'écoconception

4.3.1.1 - Améliorer le potentiel de colonisation des ouvrages pour la faune et la flore fixées

L'amélioration du potentiel de colonisation des ouvrages pour la faune et la flore fixées se recherche principalement par le développement de la complexité de surface et de l'attractivité des matériaux constitutifs des infrastructures (principalement des bétons et enrochements). L'amélioration de la disponibilité en lumière sous les ouvrages et de la capacité de rétention de l'eau sur les sections soumises au marnage constituent également des voies d'action efficaces.

L'objectif est de faciliter l'installation rapide et pérenne de communautés d'espèces sessiles de substrats durs plus riches et plus diversifiées qu'un ouvrage traditionnel, comparables à des zones naturelles rocheuses avoisinantes. Il s'agit également de limiter autant que possible la dominance d'espèces non indigènes par une augmentation des processus de compétition interspécifiques et une augmentation de la typologie de niches écologiques disponibles.

Outre l'enrichissement des communautés benthiques fixées et l'intégration paysagère de l'ouvrage, l'amélioration du potentiel de colonisation œuvre en partie au rétablissement de différentes fonctions écologiques majeures. En effet, les divers taxons susceptibles de se fixer sur un matériau amélioré (algues, tuniciers, bivalves, annélides) constituent la base du réseau trophique local nécessaire à la production globale de l'écosystème. Ils seront une source d'alimentation pour différents stades de développement notamment d'espèces de poissons et crustacés de niveau trophique intermédiaire. Cette stratégie permet par ailleurs de soutenir le développement de microhabitats biogéniques (coraux, macroalgues) susceptibles de protéger par eux-mêmes les stades larvaires et juvéniles contre la prédation. L'optimisation de la colonisation de l'ouvrage participe ainsi en partie à la fonctionnalité globale de nourricerie de l'ouvrage (ressource alimentaire, microhabitats biogénique). A noter enfin que le développement de microhabitats naturels peut aussi être initié par la transplantation de végétaux (macroalgues) ou d'animaux (corail, huitres...) directement sur les ouvrages afin d'orienter et/ou d'accélérer leur colonisation.

4.3.1.2 - Développer les microhabitats pour les stades juvéniles de la macrofaune mobile

Pour une majorité des espèces benthodémersales, un habitat de nourricerie est caractérisé par une zone côtière relativement abritée, peu profonde, associée à une pente douce et une forte micro-complexité tridimensionnelle (enrochements, macroalgues, herbiers, mis à part les espèces de substrat meuble). Ces zones de nourricerie sont activement recherchées par les stades de vie précoces lors de leur première installation benthique. La majorité des espèces de poissons benthodémersales s'installent par exemple entre la surface et

– 10 m de profondeur. C'est donc cette zone qui est généralement priorisée bien que différentes espèces côtières de crustacés, de céphalopodes ou encore de poissons (soles, labres, rougets...) s'installent au stade post-larvaire sur des profondeurs supérieures. Ils passent alors les premières semaines voire les premiers mois de leur développement au sein de zones de micro-habitats naturels (e.g. coraux, mangroves, herbiers, petits fonds rocheux et macroalgues associées) avant de rejoindre progressivement les habitats essentiels fréquentés par les adultes généralement sur des profondeurs supérieures. Avant ce stade, les mortalités de poissons sont maximales et estimées jusqu'à plus de 90%.

Du fait de leur présence dans les petits fonds côtiers relativement abrités, on estime que le développement des infrastructures portuaires a affecté cette fonctionnalité de nurserie de manière significative. Les solutions d'écoconception peuvent donc chercher à palier spécifiquement la perte de cette fonctionnalité écologique.

Les ouvrages portuaires côtiers présentent a priori des caractéristiques bien différentes des zones de nurserie naturelles décrites dans la littérature. Si peu d'intérêt a été porté par le passé pour l'étude des fonctions écologiques potentiellement remplies par ces ouvrages, de récents programmes scientifiques menés notamment en Méditerranée française (Econaut, GIREL, Sublimo) ont mis en évidence le potentiel écologique des infrastructures maritimes telles que les digues ou les quais verticaux à accueillir des stades juvéniles de poissons. En parallèle, différentes études ont souligné l'intérêt de complexifier les ouvrages par l'apport de divers micro-habitats artificiels dans les petits fonds pour développer la richesse des communautés observées, favoriser la survie et l'alimentation et créer des nurseries artificielles pour les poissons intraportuaires. Ce principe d'action vise à se rapprocher autant que faire se peut des caractéristiques architecturales des habitats naturels préexistants aux profondeurs les plus adaptées.

Ainsi, en complément de l'amélioration du potentiel de colonisation biogénique des ouvrages portuaires en eux-mêmes, ou lorsque cela n'est pas possible pour des raisons techniques ou d'exploitation, une stratégie d'écoconception consiste ainsi à introduire des microhabitats artificiels (herbiers, gabions, solutions filiformes, microamas chaotiques...) le long des ouvrages portuaires. Ceux-ci apportent une microcomplexité d'habitats complémentaire à celle apportée par les espèces sessiles colonisant les ouvrages, ou s'y substitue en raison de l'impossibilité pour certaines espèces sessiles structurantes de s'y développer du fait des conditions environnementales particulières du port (e.g. turbidité). Ces solutions légères sont généralement installées dans les premiers mètres de la colonne d'eau, là où les stades juvéniles se concentrent.

Des microhabitats recréant des abris type herbier, petites roches, sable peuvent ainsi être recréés le long des ouvrages sans en impacter l'exploitation. Si ce type d'habitats est généralement plus fragile et demande plus d'entretien sur le long terme, le déploiement sous forme de structures complémentaires se justifie par le fait qu'il est plus difficile d'obtenir une microcomplexité structurelle d'ordre centimétrique à décimétrique dans la masse même de l'ouvrage du fait des matériaux de construction, des méthodologies de mise en œuvre usuelles et des objectifs de durabilité structurelle associés.

4.3.1.3 - Développer des cavités et abris pour la faune mobile hors stade juvénile

Les stades de vie subadulte et adulte nécessitent des habitats de moindre finesse (ordre décimétrique à métriques) tout en gardant des spécificités importantes en fonction de l'écologie comportementale des espèces considérées (territoriales, cryptiques, contact avec le substrat étroit, grandes cavités acceptées, etc.).

Abris et zones de repos transitoires pour certaines espèces comme les sars ou les mérus, les substrats durs et leurs anfractuosités sont un lieu de vie quasi-exclusif notamment pendant la journée pour d'autres, telles que les corbs, mostelles, gorettes, congres, murènes, langoustes.

Certaines espèces de céphalopodes (seiches, calmars, poulpes) ou de crustacés (tourteaux, homards, langoustes) sont par ailleurs connues pour déposer leurs œufs et/ou les protéger à l'intérieur de cavités spécifiques. Enfin, les macrocavités peuvent bénéficier à un panel d'espèces fixées (algues encroustées, spongiaires, gorgonaires et toutes sortes d'invertébrés sciaphiles) qui apprécient les zones de surplombs, failles et cavités abritées de la lumière pour se développer. A marée descendante, les anfractuosités favorisent également la rétention d'eau et limitent ainsi la dessiccation du substrat au profit du développement d'espèces plus nombreuses (fuciales, kelps, littorines, patelles et autres invertébrés herbivores).

En recréant sur les ouvrages portuaires une variété de typologies d'anfractuosités et de caches à différentes profondeurs, il est possible de maximiser la diversité des espèces amenées à coloniser les ports. La forte productivité primaire observée dans les eaux de surface des ports (associée à la disponibilité de la lumière et à un substrat adapté à la colonisation) peut permettre la mise en place d'un réseau trophique complexe depuis les maillons les plus bas (ex : algues, bivalves, crustacés) jusqu'aux espèces de haut niveau trophique (ex : loup, mérou, barracuda) dans la mesure où l'habitat adapté est recréé. Ainsi, un grand nombre d'espèces côtières de poissons, de crustacés ou de céphalopodes peuvent eux aussi bénéficier d'habitats spécifiques qu'ils n'auraient pas si seuls les deux premiers principes d'écoconception évoqués étaient appliqués. La complexité structurelle associée à la présence de cavités au sein d'un ouvrage portuaire peut alors être à l'origine de nombreuses fonctionnalités écologiques selon les espèces.

Contrairement aux nourriceries, il est plus simple d'intégrer ce type de reliefs directement dans la masse des ouvrages (à condition que cet objectif ait été intégré dès l'amont de la conception). Il est également possible de disposer des macrohabitats fixés ou en suspension le long des ouvrages ainsi qu'en pieds d'ouvrages.

4.3.2 - Solutions d'habillage des infrastructures

On désigne ici par le terme d'habillage des infrastructures, le procédé consistant à venir déployer sur celles-ci, à l'interface avec la colonne d'eau, des équipements spécifiques visant à complexifier leur structure et / ou leur substrat.

Il s'agit aujourd'hui de la principale stratégie adoptée en France et dans le monde, ce qui peut s'expliquer par différentes raisons :

- c'est la seule manière d'agir sur des infrastructures existantes, hors projet de réhabilitation massive de celles-ci ;
- pour les infrastructures neuves, il n'est pas rare que les objectifs écologiques de ces mesures soient précisés tardivement dans le processus de conception. Il n'est alors pas réaliste de reprendre l'intégralité de la conception de l'ouvrage pour intégrer ces objectifs ;
- il existe des freins (normes, habitudes de conception, appréhension des risques...) à innover sur la structure des ouvrages. L'habillage est alors perçu comme une solution de moindre risque quand bien même il ne s'agit souvent pas de l'approche la plus efficace sur le plan technico-économique lorsqu'on compare les coûts d'investissement et d'opération d'une approche par habillage et d'une approche d'intégration dans la masse, rapportée au volume d'habitat créé.

En fonction des objectifs écologiques principaux, différents équipements peuvent être appliqués. Ils sont également sélectionnés selon des critères de performance technique (compatibilité avec le fonctionnement de l'ouvrage) et économiques (CAPEX et OPEX).

L'amélioration du potentiel de colonisation des ouvrages pour la faune et la flore fixées est généralement obtenue par la fixation en façade de panneaux ou de cuvettes en béton aux caractéristiques jugées optimisées en comparaison à l'ouvrage en place (pH, rugosité, rétention d'eau...). Ils sont préfabriqués soit par coffrage classique soit par des techniques de moulage permettant la création de formes plus complexes (ex : moules élastomères). L'impression 3D est également utilisée de manière croissante pour la fabrication de ces éléments permettant une complexification additionnelle des formes.

Les solutions sont alors fixées de façon durable généralement au moyen de systèmes de fixation par des douilles intégrées à l'ouvrage ou par scellement chimique. Les solutions peuvent être mises en place hors-eau (A) ou après l'immersion de l'ouvrage (B). Certaines solutions peuvent également être directement positionnées sur le béton frais lors des opérations de coulage ou par la création d'une assise spécifique (C).

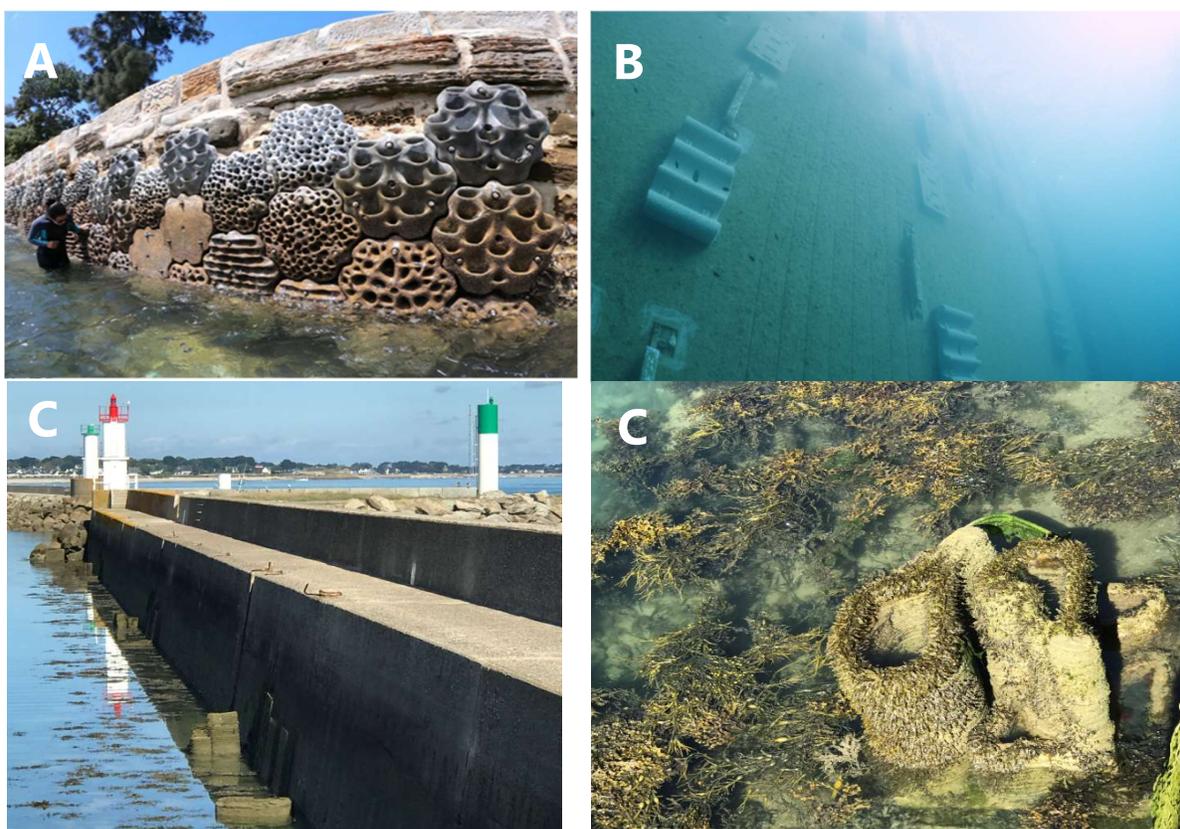


FIGURE 10 : SOLUTIONS D'HABILLAGE D'INFRASTRUCTURES CIBLANT L'AMELIORATION DU POTENTIEL DE COLONISATION DES OUVRAGES POUR LA FAUNE ET LA FLORE FIXEES A-EQUIPEMENT D'UN QUAI MAÇONNE DE PLAQUES COMPLEXES DE PETITES DIMENSIONS ET MANUPORTABLES (SOLUTION BETON, MOULAGE ELASTOMERE, FIXATION PAR SCELLEMENT CHIMIQUE- AUSTRALIE), B – EQUIPEMENT D'UNE FAÇADE DE CAISSON JARLAN PAR PANNEAUX PREFABRIQUES DE DIMENSION METRIQUE A PLURIMETRIQUE (BETON PREFABRIQUE, FIXATION PAR SCELLEMENT CHIMIQUE - MONACO), C- EQUIPEMENT D'UNE RISBERME EN BETON PAR POSE DE CUVETTES INTERTIDALES (SOLUTION BETON IMPRIMEE EN 3D FIXEE SUR DALLE PAR PRISE DANS BETON FRAIS – PORT-HALIGUEN)

L'amélioration du potentiel de nurserie de l'infrastructure portuaire est généralement recherchée par l'apport de microhabitats artificiels dans les parties supérieures de l'ouvrages (0-5m de profondeur), susceptibles d'accueillir un plus grand nombre de juvéniles de mollusques (D) ou de poissons (E, F, G, H). Les matériaux utilisés sont diversifiés et sélectionnés pour durer et résister dans le temps à l'activité portuaire à laquelle ils seront exposés. Acier galvanisé, inox, polymères stables (polypropylène, Rilsan) sont généralement privilégiés pour réaliser ces solutions. Des matériaux d'origine végétale ou biosourcés (végétaux, bambous, polymères) sont disponibles mais sont généralement exclus des projets à grande échelle car ils présentent des durées de vie réduites et des frais d'entretien et de remplacement importants à court terme. Certaines solutions sont constituées d'amas de matériaux d'origine animale (ex. débris coquilliers, coraux morts...) ou minérale (granulats) (E). Généralement légères et manportables, ces solutions d'habillage sont installées en suspension par des liens type bouts gainés en polymère (E) ou mis en tension entre deux points (F). Ils peuvent également être spittés unitairement directement dans l'ouvrage (D, G) ou mis en flottaison par des bouées de reprises (H).

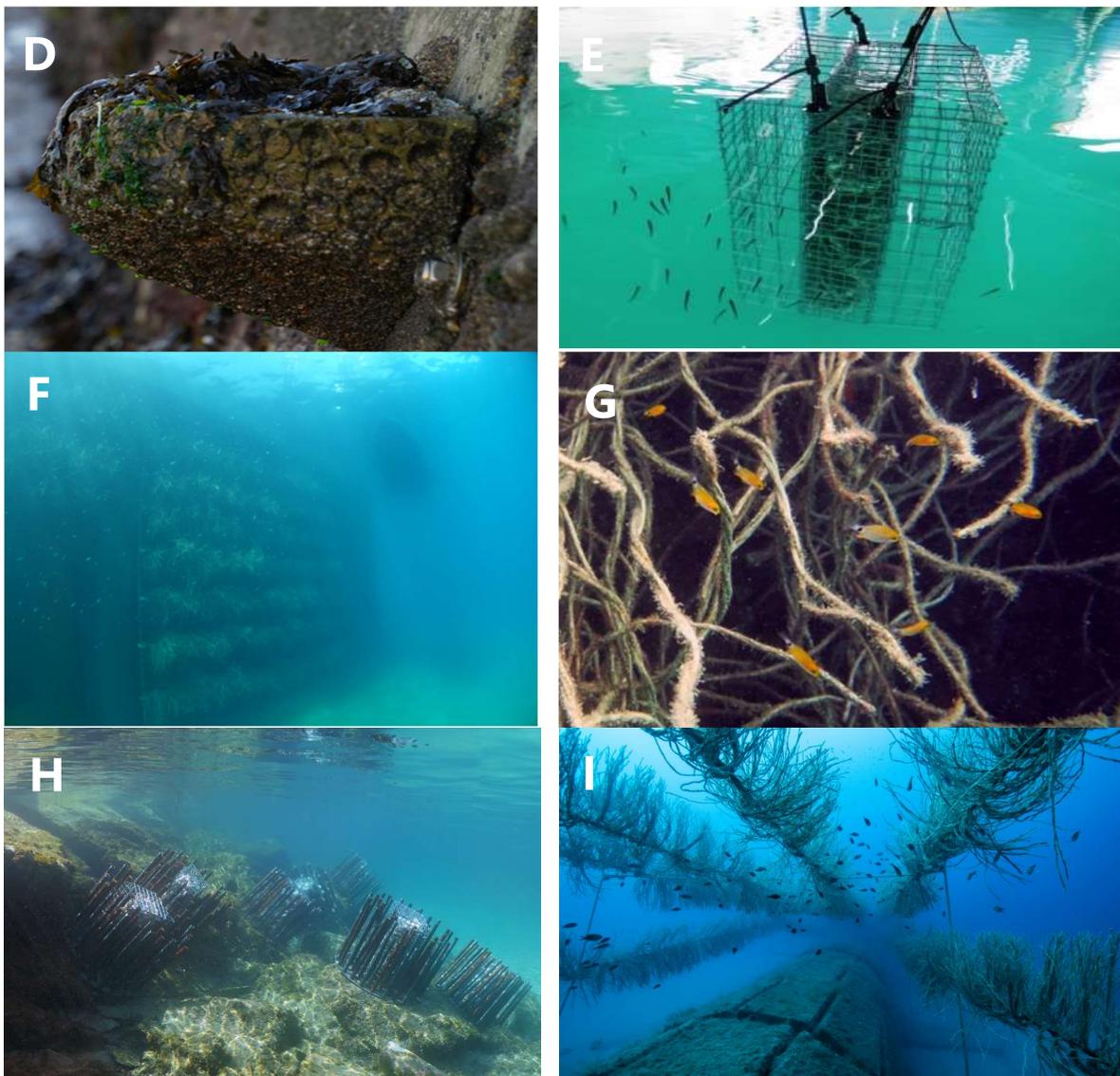


FIGURE 11 : SOLUTIONS D'HABILLAGE D'INFRASTRUCTURES CIBLANT L'APPORT DE MICROHABITATS POUR LES STADES JUVENILES DE LA MACROFAUNE MOBILE (POISSONS, CRUSTACES, CEPHALOPODES)S D-HABILLAGE DE QUAI MAÇONNE PAR DES MICROCUVETTES (SOLUTION BETON, FABRICATION ARTISANALE, FIXATION PAR SCELLEMENT CHIMIQUE- IRLANDE), E – HABILLAGE DE PONTON FLOTTANT PAR INSTALLATION DE GABIONS PREREMPLIS DE COQUILLES D'HUITRES SUSPENDUS EN SOUS FACE DES FLOTTEURS (SOLUTION EN COQUILLE D'HUITRES ET ACIER GALVANISE, FIXATION PAR CORDAGES POLYMERES – FRANCE (CARNON)), F/G- HABILLAGE DE QUAI EN PALPLANCHES PAR INSTALLATION DE LANIERES D'HERBIERS ARTIFICIELS (SOLUTION POLYPROPYLENE/PLA, FIXATION PAR QUINCAILLERIE INOX ET MISE EN TENSION ENTRE DEUX POINTS FIXE TYPE IPN – FRANCE (LA CIOTAT, MARSEILLE) H- HABILLAGE DE DIGUES EN ENROCHEMENTS PAR INSTALLATION DE GABIONS PREREMPLIS DE COQUILLES D'HUITRES ENTOURES DE PROFILS BOIS (SOLUTION EN COQUILLE D'HUITRE, ACIER GALVANISE, BOIS, FIXATION PAR SCELLEMENT CHIMIQUE – FRANCE (LES ISSAMBRES)) I- HABILLAGE D'UNE CONDUITE D'EAU SOUS-MARINE PAR INSTALLATION DE LANIERES D'HERBIERS ARTIFICIELS (SOLUTION POLYPROPYLENE/PLA, FIXATION PAR QUINCAILLERIE INOX ET MISE EN TENSION ENTRE DEUX POINTS, INSTALLATION DE FLOTTEURS DE REPRISES D'EFFORTS - MONACO).

Le développement de cavités et d'abris pour la faune mobile (hors stade juvénile) est aujourd'hui une démarche qui semble moins appliquée en matière d'habillage subaquatique d'ouvrage traditionnel. La démarche se matérialise par l'apport de structures tridimensionnelles lourdes étudiées d'un point de vue comportemental pour les espèces ciblées en s'inspirant de la nature. Principalement en béton, leur empilement horizontal ou vertical permet d'atteindre l'objectif initial. Les solutions sont alors fixées par scellement chimique ou prise dans le béton frais avant l'immersion (J, K, L, M). Une seconde stratégie consiste à complexifier les habitats disponibles en pied d'ouvrages par la pose à la grue ou par flottaison d'unités (gabions acier galvanisé ou inox, béton) autostables solidaires ou non de l'ouvrage (N, O).

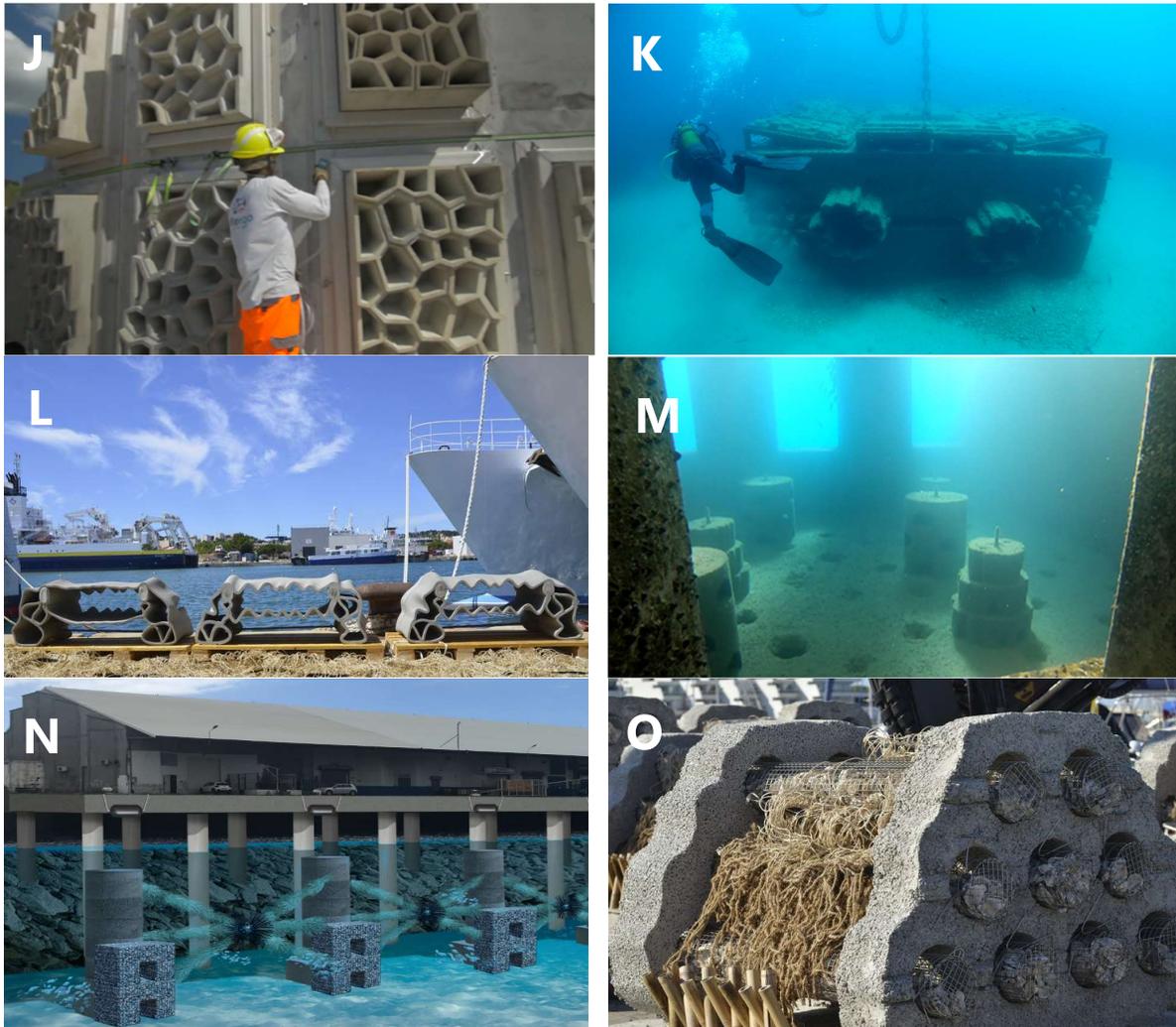


FIGURE 12 : SOLUTIONS D'HABILLAGE D'INFRASTRUCTURES CIBLANT LE DEVELOPPEMENT DE CAVITES ET ABRIS POUR LA FAUNE MOBILE HORS STADE JUVENILE
J-HABILLAGE DE PILES DE PONT PAR PANNEAUX ALVEOLES PREFABRIQUES (SOLUTION BETON, MOULAGE PAR MOULE COMPOSITE, FIXATION PAR SCELLEMENT CHIMIQUE – FRANCE (LA REUNION)), K- HABILLAGE DE CORPS-MORT POUR UN COFFRE D'AMARRAGE DE GRANDE PLAISANCE (SOLUTIONS BETON PREFABRIQUE ET IMPRESSION 3D, FIXATION PAR SCELLEMENT, FRANCE (SANARY-SUR-MER)), L-HABILLAGE D'UN QUAÏ PALPLANCHE PAR DES MODULES DE CAVITES (SOLUTION IMPRESSION 3D BETON, FIXATION PAR PLATINES SOUDEES – FRANCE (LA SEYNE-SUR-MER)), M-HABILLAGE INTERNE DE CHAMBRES DE CAISSON JARLAN PAR HABITATS ARTIFICIELS DE SUBSTRAT DUR (SOLUTION BETON PREFABRIQUE, FIXATION PAR BOULONNAGE SUR TIGES PRESCELLEES – MONACO). N – HABILLAGE DE QUAÏS SUR PIEUX PAR POSE EN PIED D'OUVRAGE DE GABIONS PREREMPLIS DE GRANULATS (SOLUTION GRANULAT ET ACIER GALVANISE, STABILITE SOUS POIDS PROPRE – LA REUNION), O- HABILLAGE DE PIED DE DIGUE PAR HABITATS ARTIFICIELS DE SUBSTRATS MIXTES (SOLUTION BETON, BAMBOU, INOX, FIBRES DE COCO, STABILITE SOUS POIDS PROPRE – FRANCE (PORT-CAMARGUE))

4.3.3 - Solutions d'intégration dans la masse des infrastructures

De nouveaux projets commencent à émerger en France et dans le monde au sein desquels les infrastructures portuaires sont éco-conçues dans la masse, donnant lieu à des designs entièrement repensés pour leur multifonctionnalité. Ces innovations sont rendues possibles par une collaboration interdisciplinaire étroite entre ingénieurs en génie civil et maritime, ingénieurs écologues et scientifiques au travers de projets pilotes préalables.

Ces projets semblent prendre naissance dans le cas d'application de mesures réglementaires extrêmement fortes, imposant des objectifs de moyens (investissements) et/ou de résultats (tendre vers la compensation écologique). En comparaison aux projets d'habillage présentés précédemment qui s'appliquent généralement sur quelques dizaines de mètres de linéaire d'ouvrages, les innovations ici présentées en matière d'écoconception d'ouvrages portuaires sont appliquées à plus grande échelle, parfois même sur l'ensemble du linéaire de l'infrastructure. Les bénéfices écologiques et écosystémiques attendus sont donc supérieurs.

Les retours d'expérience de telles réalisations restent rares à l'échelle mondiale et les résultats techniques et scientifiques sont très souvent encore à l'étude. Il n'en demeure pas moins que dans un contexte d'érosion globale de la biodiversité (notamment aquatique), de telles innovations poussées à grande échelle doivent être privilégiées de façon à repenser l'ingénierie. Il s'agit de repositionner le vivant au centre des préoccupations lors de la réalisation et de la réhabilitation des infrastructures portuaires et ce, dès les phases les plus amont des projets. Les objectifs de compensation restent particulièrement difficiles à atteindre en milieu aquatique. L'augmentation de l'ambition et de l'échelle des futures mesures d'ingénierie écologique appliquées aux infrastructures portuaires peut donc permettre de contribuer à atteindre les objectifs des politiques nationales de zéro perte nette de biodiversité comme en témoigne les innovations se développant sur le sujet en divers endroits du globe et illustrées ci-après ainsi qu'en annexe 2.



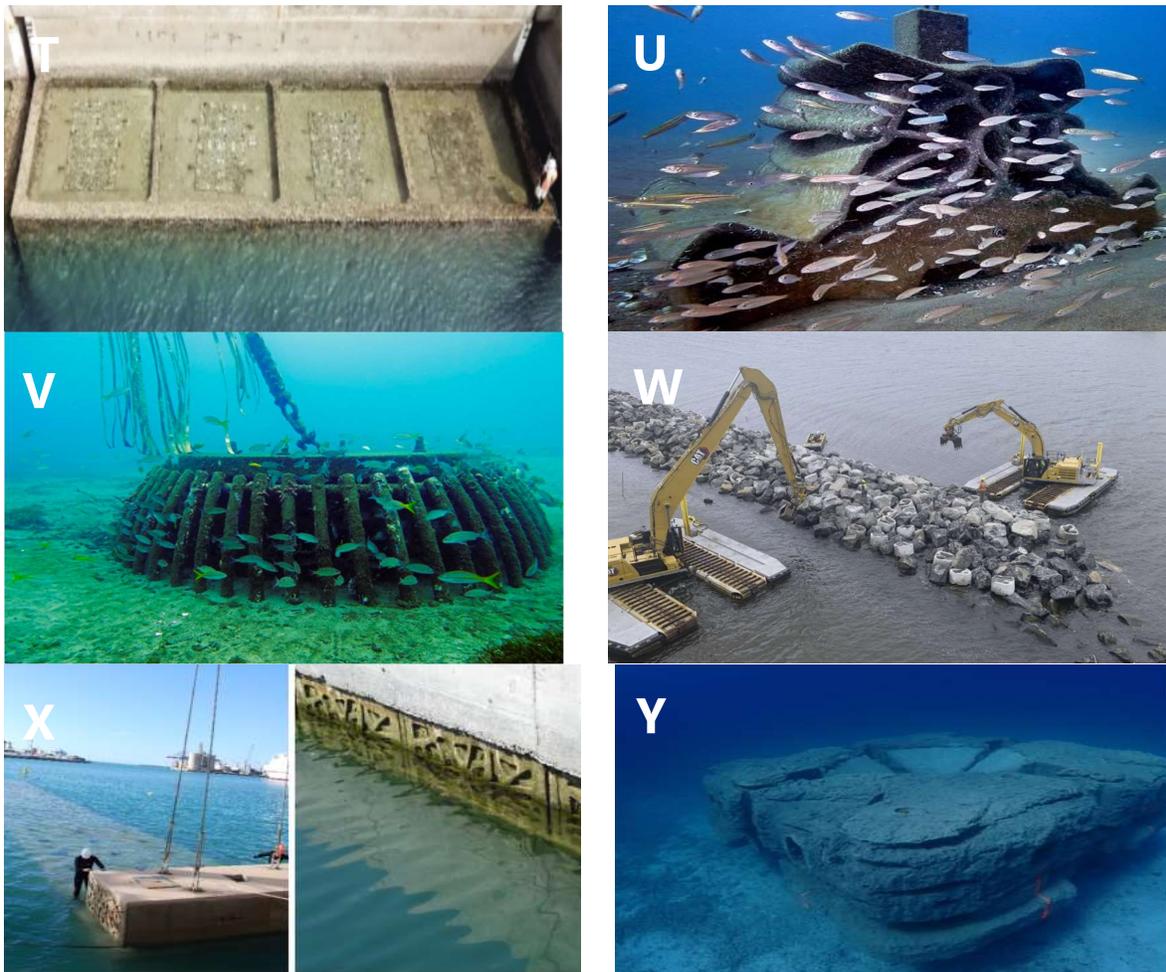


FIGURE 13 : SOLUTIONS DE NOUVELLES GENERATIONS D'INFRASTRUCTURES PORTUAIRES INTEGRANT DANS LEUR MASSE DES CARACTERISTIQUES DE STRUCTURE ET DE COMPOSITION DE SUBSTRAT FAVORABLES A LA COLONISATION P,Q - MURS EN BETON RECREANT DES PETITS FONDS D'ESTRAN HORIZONTALS DE SUBSTRAT DUR (CANADA, ETATS-UNIS), R- DIGUE RECREANT DES PETITS FONDS D'ESTRAN DE SUBSTRAT DUR ET DES ZONES DE RETENTION D'EAU A MAREE BASSE (IRLANDE), S- CAVALIERS DE LESTAGE DE CANALISATION CREANT DES MACROCAVITES HORIZONTALES (FRANCE (CORSE)), T – LINEAIRE INTERIEUR DE CAISSON JARLAN CIBLANT LA RECREATION DE FONDS HORIZONTALS CORALLIENS (JAPON), U- CORPS-MORT DE BALISAGE DES BOUEES DE CHENAUx MARITIMES CREANT DES CAVITES ET MICROCAVITES DE DIMENSIONS ET FORMES VARIABLES (FRANCE (CAP D'AGDE, VALRAS-PLAGE), V- CORPS-MORT DE MOUILLAGE POUR LA PETITE PLAISANCE CREANT DES MICROCAVITES (FRANCE (GUADELOUPE), W- OUVRAGE LINEAIRE DE PROTECTION COTIERE INTEGRANT DANS LA MASSE DES CUVETTES INTERTIDALES CIBLANT LA RETENTION D'EAU A MAREE BASSE (ETATS-UNIS), X- CAISSONS EN BETON A FORMULATION OPTIMISEE ET MATRICES EN SUBSURFACE (ESPAGNE), Y- CORPS-MORT DE GRANDE PLAISANCE BIOMIMETIQUE DE DALLES ROCHEUSES (FRANCE (CORSE)).

4.3.4 - Bétons favorables à la colonisation

Du fait de leur formulation, les bétons marins standards présentent une forte alcalinité de surface ($\text{pH} > 10$) qui peut perdurer jusqu'à plusieurs années après l'immersion, ainsi qu'une structure très fermée et lisse visant à limiter la pénétration des ions chlorures afin de préserver la durabilité du matériau et maîtriser le risque de corrosion des armatures métalliques présentes dans le cas d'ouvrages en béton armé. Par conséquent, les communautés benthiques capables de coloniser la surface des infrastructures marines en béton répondant à ces normes sont moins diversifiées que celles observées sur les habitats naturels de substrat dur et se limitent souvent à certaines espèces opportunistes (parfois exogènes, voire invasives).

Dans ce contexte, différentes études et programmes de recherche se sont penchés sur l'optimisation du potentiel de colonisation des bétons dans l'objectif d'augmenter la diversité des espèces qui s'y fixent, que ce

soit via une amélioration des caractéristiques intrinsèques du matériau ou par un développement de la complexité de surface des ouvrages réalisés.

Il a ainsi été démontré que des formulations spécifiques et/ou des procédés de mise en œuvre particuliers peuvent conduire à des gains significatifs de richesse spécifique des espèces fixées, ou favoriser l'établissement d'espèces cibles.

Ces formulations ou procédés de mise en œuvre ne sont pas toujours compatibles avec les normes constructives limitant aujourd'hui le plus souvent l'application de ces innovations à des modules d'habillage des ouvrages. Néanmoins, les travaux de développement se poursuivent au niveau national et international pour permettre une application à l'échelle des ouvrages.

4.4 - Biodiversité terrestre

La promotion de la biodiversité terrestre par l'écoconception des infrastructures portuaires se pratique aujourd'hui surtout pour des espèces cibles d'oiseau. Les actions consistent à adapter les substrats pour favoriser la nidification, le refuge voire l'alimentation.

Exemple d'application sur le Grand Port Maritime de La Rochelle

Dans le cadre de l'extension du GPMLR, l'arrière de la digue a fait l'objet de la mise en place de pierriers pour permettre la nidification du Traquet motteux (oiseau protégé) au travers d'une mesure compensatoire (C1.1a Création d'habitats favorables aux espèces cibles et à leur guildes). Les pierriers ont été installés à partir de 2020 au niveau de la grande digue d'enclôture de la Repentie, entre la piste de service qui longe la digue et les parcelles qui sont exploitées pour l'installation des entreprises sur le terre-plein. Il a été ainsi défini un corridor biologique qui doit permettre l'installation de cortèges d'oiseaux, mais aussi de reptiles, comme le lézard des murailles. La piste est utilisée à peine une fois par mois et laisse donc une zone de tranquillisation pour les animaux.

Les suivis ont permis de montrer la réappropriation du site par les différentes espèces ciblées.

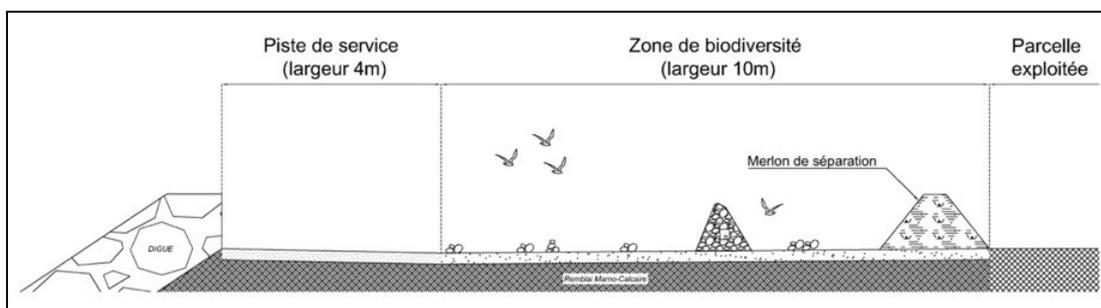


FIGURE 14 : CONCEPT AVANT LA MISE EN ŒUVRE QUI PERMET LA CREATION D'UN CORRIDOR DE 8 000 M2



FIGURE 15 : AU CENTRE UN EXEMPLE DE PIERRIERS PROCHE DU MERLON DE SEPARATION

Les infrastructures portuaires elles-mêmes peuvent être ainsi colonisées par des oiseaux protégés dans leur phase de nidification. L'écluse Loubet à Boulogne sur mer est un bon exemple d'utilisation du plus petit espace pour la nidification de la mouette tridactyle. Plusieurs ports en Australie ont procédé à l'installation de plateformes de nidification sur les infrastructures à l'écart des zones de plus forte activité pour appuyer les politiques locales de conservation du balbuzard.



FIGURE 16 : NID DE MOUETTE TRIDACTYLE SUR L'ÉCLUSE LOUBET A BOULOGNE SUR MER, FRANCE (GAUCHE), BALBUZARD SUR INFRASTRUCTURE DE PORT MOORE, AUSTRALIE (DROITE) (SOURCE WEB)

Il est donc parfaitement envisageable de créer des espaces favorables à l'avifaune dans les digues et quais, mais aussi pour une biodiversité plus ordinaire.

5 - LABELS ET CERTIFICATIONS EN FAVEUR DU DEVELOPPEMENT DE L'ECOCONCEPTION

Plusieurs labels et certifications existent pour encourager les ports à adopter des mesures plus respectueuses de l'environnement. Dans ce cadre, l'intégration de dispositifs d'écoconception sur les infrastructures portuaires est valorisée et l'échange de bonnes pratiques au sein de la communauté portuaire permet de capitaliser sur les différents retours d'expérience des acteurs portuaires de même typologie. Les labels et certifications présentées ci-après ne sont pas *stricto-sensu* liés à l'écoconception

5.1 - Ecoports / certification PERS

Ecoports est la principale initiative européenne entièrement pensée pour les ports. Née en 1997 d'une initiative conjointe de plusieurs ports souhaitant améliorer la prise en compte des enjeux de développement durable sur leur activité, elle a intégré l'European Sea Port Organisation en 2011. Les principaux adhérents à ce réseau sont des grands ports maritimes, des ports intérieurs et des « ports secs ».

Plusieurs niveaux d'engagements sont possibles dans ce réseau, permettant l'échange de bonnes pratiques environnementales entre les différents adhérents. L'étape finale consistant en l'obtention d'une certification environnementale spécifique au milieu portuaire :

1. Auto-diagnostiquer l'infrastructure existante pour identifier les 10 priorités environnementales (*outil SDM*) → 1^{ère} étape nécessaire pour adhérer au réseau EcoPorts ;
2. Développer et échanger savoir et savoir-faire pour améliorer l'environnement portuaire ;
3. Suivre les progrès de la qualité environnementale du port sur la base d'un parangonnage et d'une comparaison avec d'autres ports européens ;
4. Obtenir la certification PERS → certification environnementale spécifique aux ports.

Deux outils ont été mis en place par l'organisation pour aider les ports à mettre en place leur système de management environnemental :

- **SDM (Self Diagnosis Method)**: évaluation des risques environnementaux du port et définition des priorités environnementales sur la base d'une checklist.
- **PERS (Port Environmental Review System)**: certification de management environnemental unique et spécifique au ports.

La démarche étant volontaire, la certification est surtout axée sur la mise en place d'un système de management environnemental portuaire qui intègre transversalement l'environnement dans l'ensemble des opérations de conception et de gestion du port. Il s'agit d'une approche de type Haute Qualité Environnementale (HQE) pouvant porter sur plusieurs thématiques selon le contexte particulier du port :

- Intégration ou restauration de la biodiversité via des trames bleue et vertes ;
- Gestion plus rationnelle et sobre de l'énergie ;
- Définition d'une chaîne logistique plus durable ;
- Limitation des pollutions (gestion sédiments de dragage, etc.) ;
- ...

Dans ce cadre, l'établissement d'un diagnostic environnemental du port et l'établissement d'un plan d'action quantifié et phasé pour y améliorer l'empreinte environnementale sont les préalables minimaux en vue d'une certification.

5.2 - Norme ISO 14001

Comme l'ensemble des autres normes ISO, la norme ISO 14001 définit une série d'exigences que doit satisfaire le système de management environnemental d'une organisation pour que celle-ci puisse être certifiée — par un organisme extérieur et pour une durée limitée — comme répondant à la norme.

La norme ISO 14001 V2015 impose pour l'organisation certifiée dans son chapitre 8.1 que : « l'organisme doit : établir des moyens de maîtrise, de façon appropriée, pour s'assurer que son ou ses exigences environnementales sont prises en compte dans le processus de conception et de développement du produit ou service, en prenant en considération chaque phase de son cycle de vie... ».

Ainsi une certification ISO 14001 induit la mise en œuvre d'une démarche d'écoconception par l'organisme certifié.

5.3 - Certification HQE Infrastructure Durable (HQE-ID)

La certification infrastructure durable a été créée dans l'objectif de proposer aux maîtres d'ouvrages, collectivités et aménageurs une démarche les aidant à construire leur projet de construction ou de rénovation d'infrastructure dans un objectif de prise en compte des enjeux du développement durable.

L'Alliance HQE-GBC a défini un cadre de référence, constitué de 17 Objectifs répartis en 4 engagements, reprenant les 3 piliers de Développement Durable ainsi que le management responsable des projets.

Les projets écoconçus s'intègrent ainsi complètement dans la démarche de la certification HQE-ID et seront valorisés.

5.4 - Certifications bas carbone

Les certifications bas carbone ont été développées depuis plusieurs années dans le secteur du bâtiment. Certaines de ces certifications bas carbone se déclinent aujourd'hui sur les infrastructures et, les projets d'infrastructure portuaire pourraient s'intégrer à ces dispositifs. Ces certifications sont nombreuses et répondent chacune à des règles de calcul différentes. Sont listés ci-après les certifications principales et les plus reconnues à l'international :

- Level(s) ;
- Breeam ;
- RE 2020 ;
- LEED certificate.

5.5 - Ports propres & Ports actifs pour la biodiversité

Unique en Europe, la certification européenne « Ports propres » est depuis 2011 le signe d'excellence environnementale en matière de gestion environnementale des ports de plaisance. Elle traduit une volonté forte de la part des gestionnaires de port de plaisance de prendre des engagements concrets pour lutter en faveur de la préservation des milieux aquatiques et du développement durable des activités littorales et marines (source : www.ports-propres.org).

Les actions « Ports Propres » sont orientées autour de plusieurs volets, rappelés ci-après :

- La gestion des déchets ;
- La maîtrise de l'énergie ;
- La gestion de l'eau ;
- La prévention des pollutions ;
- L'amélioration de la signalétique ;
- La sensibilisation des usagers.

Les actions pouvant être mises en place dans le cadre des travaux d'infrastructures portuaires permettant notamment de limiter les consommations d'énergie, d'eau et une meilleure gestion des déchets faciliteront l'obtention de la certification « Ports Propres » dans le futur. Intégrées au plus tôt à la conception du port, elles permettent de faciliter l'obtention ultérieure de la certification.

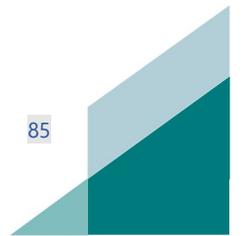
La certification Ports propres et actifs en biodiversité (PPAB) complète depuis 2018 le dispositif « Ports propres » à l'initiative de la Région Sud et de l'Union des Ports de Plaisance Provence-Alpes-Côte d'Azur et Monaco, pilotée par l'AFNOR.

Cette certification reconnaît les ports engagés dans des actions concrètes envers la protection et la restauration de la faune et la flore du littoral. Pour obtenir cette dernière certification, il faut donc déjà être certifié « Ports propres ».

Elle s'articule autour de différents critères définis dans la norme AC J81-032 créée et contrôlée par l'AFNOR. Sa délivrance, par les auditeurs d'AFNOR Certification, formés à cet effet, est conditionnée au respect du référentiel : connaissance de la biodiversité du port et de ses environs, formation du personnel sensibilisation des usagers à la biodiversité, plan d'actions adapté avec installation d'équipements (ex. nurseries artificielles) et mise en œuvre de bonnes pratiques (ex. arrachage des plantes invasives, non-emploi de pesticides).

La démarche Ports Propres actifs en biodiversité comporte 4 étapes :

- Prise en compte de l'environnement du port et de son aire d'influence ;
- Choix des solutions en faveur de la biodiversité marine ;
- Formation, communication et pilotage de la démarche en interne ;
- Communication externe sur les actions du port en faveur de la biodiversité.



ANNEXE 1 – CLARIFICATION DE L'ARTICULATION DE L'ECOCONCEPTION AVEC D'AUTRES APPROCHES DE CONCEPTION A VISEE ENVIRONNEMENTALE

Ecoconception, ingénierie écologique et génie écologique

L'ingénierie écologique regroupe l'ensemble des connaissances scientifiques et des pratiques fondées sur les mécanismes écologiques et utilisables pour la gestion adaptative des ressources, la conception, la réalisation et le suivi d'aménagements ou d'équipements et qui est propre à assurer la protection de l'environnement (Source : centre de ressources du génie écologique).

Le génie écologique peut être défini comme la conduite de projets qui, dans sa mise en œuvre et son suivi, applique les principes de l'ingénierie écologique et favorise la résilience des écosystèmes. Il permet notamment la reconstitution de milieux naturels, la restauration de milieux dégradés et l'optimisation de fonctions assurées par les écosystèmes (Source : centre de ressources du génie écologique).

L'ingénierie écologique et le génie écologique peuvent s'appliquer à l'entretien, la restauration, la réhabilitation, la réaffectation de l'écosystème et à sa prise en compte dans l'aménagement du territoire.

Ils peuvent ainsi constituer des moyens d'application de l'écoconception, pour les actions contribuant directement ou indirectement à préserver et développer la biodiversité, notamment par des actions de renaturation (restauration de milieux naturels dégradés). Il peut aussi contribuer à optimiser les services écosystémiques (services rendus ou effets bénéfiques de la nature), voire les recréer ou les intégrer dans un environnement bâti.

Ecoconception et solutions fondées sur la nature (SFN)

Les solutions fondées sur la nature (*nature based solutions*), sont vulgarisées par l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature sont définis (UICN, Cohen-Shacham *et al.* 2016) : « Les solutions fondées sur la nature sont les actions qui s'appuient sur les écosystèmes afin de relever les défis globaux comme la lutte contre les changements climatiques ou la gestion des risques naturels ». La réhabilitation du cordon dunaire de la Pointe de l'Espiguette sur la commune du Grau du Roi en Méditerranée, pour prévenir du risque de submersion marine constitue par exemple une SFN.



FIGURE 17 : LES SOLUTIONS FONDEES SUR LA NATURE, UN CONCEPT ENGLOBANT DIVERSES APPROCHES FONDEES SUR LES ECOSYSTEMES (SOURCE UICN)

Au niveau marin, les SFN ont été catégorisées en différents degrés, intégrant plus ou moins la dimension naturelle ou artificielle de la solution considérée (Figure suivante).

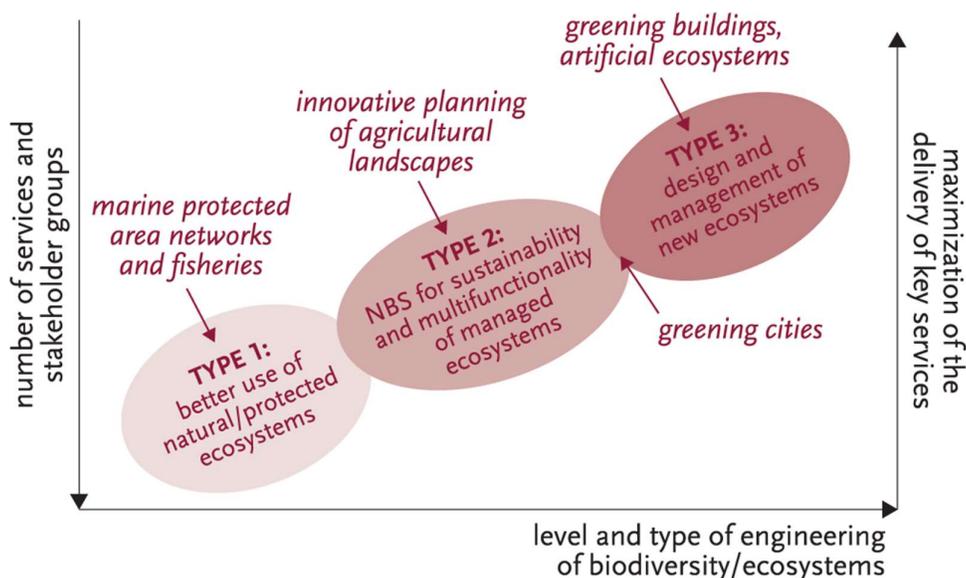


FIGURE 18 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE LA GAMME D'APPROCHES DE SOLUTIONS FONDEES SUR LA NATURE (SOURCE « BIODIVERSA » PROJET ERA-NET)

Dans cette figure, trois types principaux de SFN sont définis, qui diffèrent entre eux par le niveau d'ingénierie ou de gestion appliquée à la biodiversité et aux écosystèmes (axe des abscisses) et par le nombre de services à fournir, le nombre de groupes de parties prenantes ciblées et le niveau probable de maximisation de la prestation de services ciblées (axe des y). Quelques exemples de SFN se trouvent dans cette représentation schématique. On notera que les axes y peuvent être décalés et que le type 3 ne peut pas être considéré comme « meilleur » que le type 1, les trois types étant complémentaires.

Les SFN incluent l'écoconception des infrastructures dans leur définition, c'est le type 3 de la figure précédente.

Building/working with nature

Les termes anglais *building with nature* ou *working with nature* entrent en interaction directe avec l'écoconception.

L'association internationale pour les Infrastructures Maritimes et Fluviales (AIPCN ou PIANC en anglais) met l'accent sur la nécessité de concevoir des ouvrages selon le concept de développement durable et édite des recommandations professionnelles dans ce sens (PIANC 2011) par ces termes.

« Building with nature est un processus intégré qui implique de travailler afin d'identifier et d'exploiter des solutions gagnant-gagnant qui respectent la nature et qui soient acceptables tant pour les partisans du projet que pour les parties intéressées sur le plan environnemental. Il s'agit d'une philosophie qui nécessite d'être appliquée très tôt dans un projet, quand la flexibilité est encore possible. » (Korbee et al. 2014)

Un guide est ainsi paru en 2018, « **Guide for Applying Working with Nature to Navigation Infrastructure Projects** », qui présente l'approche méthodologique pour construire un projet en accord avec la Nature (<https://www.pianc.org/working-with-nature>).

Les objectifs et principes de cette démarche et de celle de l'écoconception peuvent donc être étroitement liés.

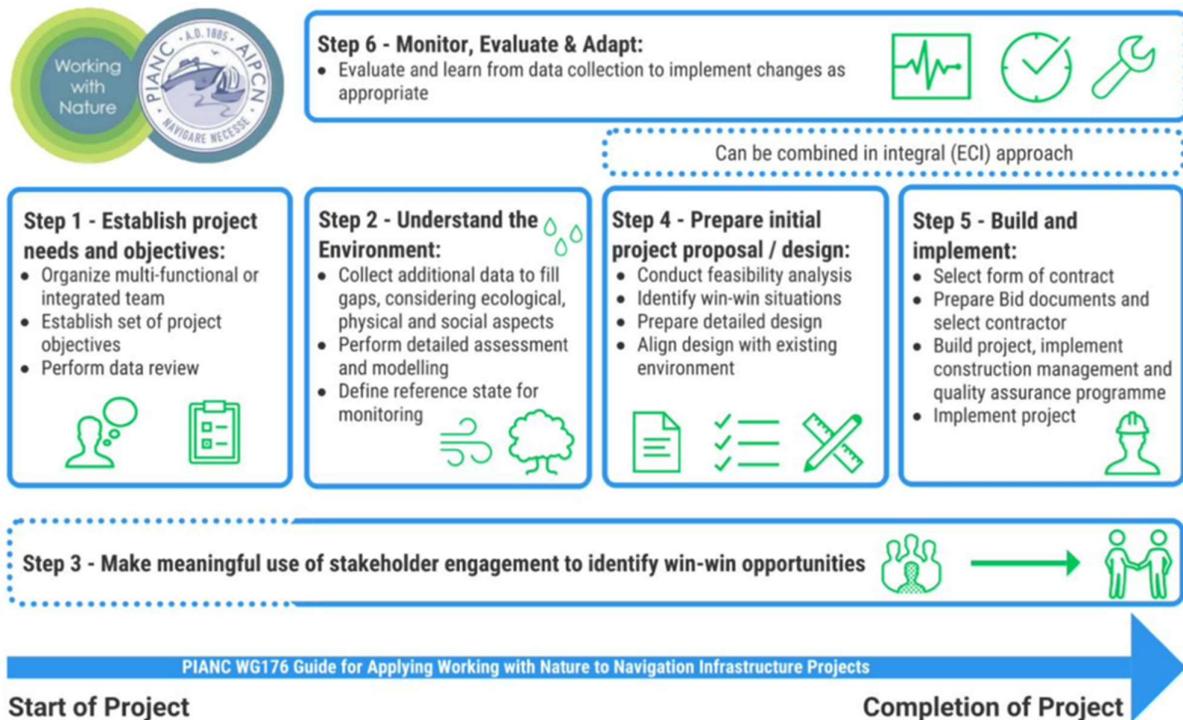


FIGURE 19 : APPROCHE METHODOLOGIQUE DE L'APPROCHE « BUILDING WITH NATURE » (SOURCE PIANC)

Biomimétisme

L'application de l'écoconception des infrastructures portuaires dans une optique de lutte contre l'érosion de la biodiversité peut activer la notion de biomimétisme.

Le Ceebios (Association 1901 qui est le centre d'études & d'expertises dédiées au déploiement du biomimétisme en France) définit le biomimétisme comme suit : « *Le biomimétisme est un processus de conception, d'innovation et d'ingénierie qui peut s'appliquer à tous les secteurs d'activité et concerner une multitude de produits voire de modèles d'organisations, de la molécule jusqu'à l'écosystème. Il s'appuie sur les solutions soutenables produites par la nature pour développer de nouveaux produits ou services.* »

Le biomimétisme, du grec *bio*, « vie » et *mimesis*, « imitation », est une démarche qui « *s'appuie sur plus de 3,8 milliards d'années d'évolution du vivant, et est à la fois une philosophie, une approche scientifique et une méthodologie qui consiste à s'inspirer des modèles biologiques pour concevoir des technologies innovantes et soutenables (ISO NF 18458).* » (in CEEBIOS, 2019).

Les mots « bio-inspiration », « biomimétique », « biomimétisme », « bionique », « biotechnologie », « bioingénierie » prêtent à confusion et on pourrait ajouter à cette liste le mot écomimétisme. Pour faciliter l'emploi et la bonne compréhension des notions, entre 2011 et 2017, des travaux ont abouti à 3 normes ISO (ISO TC 266) et une norme expérimentale AFNOR (X42-502).

Date: 2015-01-26
 ISO 18458:2015(F)
 ISO/TC 266/SC /GT 1
 Secrétariat: DIN
**Biomimétique — Terminologie,
 concepts et méthodologie**

Fournit un cadre pour la terminologie concernant la biomimétique à des fins scientifiques, industrielles et éducatives.

Elle classe et définit le domaine de la biomimétique, décrit de nombreux termes ainsi que le processus d'application des méthodes biomimétiques au produit biomimétique à partir d'idées nouvelles. Les limites et le potentiel de la biomimétique en tant qu'approche pour l'innovation ou en tant que stratégie de développement durable sont également illustrés.

Date: 2016-06-03
 ISO/FDIS 18457
 Secrétariat: DIN
**Biomimétisme — Matériaux,
 structures et composants
 biomimétiques**

Fournit un cadre de techniques biomimétiques pour le développement des matériaux, des structures, des surfaces, des composants et des technologies de fabrication.

Spécifie les principes des systèmes biologiques, et en particulier la performance des matériaux biologiques, des structures, des surfaces, des composants et des technologies de fabrication.

Date: 2014-12-18
 ISO 18459:2014(F)
 ISO/TC 266/GT 3
 Secrétariat: DIN
**Biomimétisme — Optimisation
 biomimétique**

Spécifie les fonctions et domaines d'application d'outils informatiques, fondés sur des méthodes d'optimisation biomimétique, pour des problèmes structuraux.

Ces méthodes ont pour objectif une application optimale dans le domaine des matériaux pour une réduction du poids ou une amélioration de la capacité et de la durée de vie des composants.

Ainsi qu'une norme expérimentale AFNOR

XP X42-502
 Date: 2017-03-08
**Biomimétisme - Intégration de la
 biomimétique dans les
 démarches d'éco-conception**

Fournit des lignes directrices pour tout type d'entreprise, quelle que soit sa taille, et en particulier les TPE et les PME qui souhaitent initier une démarche d'éco-conception par la biomimétique.

La biomimétique ne conduisant pas de manière systématique à des solutions durables, une innovation bio-inspirée visant la durabilité doit intégrer toutes les dimensions d'une biomimétique éco-responsable: conception, production, utilisation et fin de vie des produits employant de l'énergie et des ressources matérielles renouvelables, sans produits toxiques persistants, dans un réseau de relations équilibrées avec d'autres systèmes (cycle de vie). On parlera alors de biomimétisme (réf NF ISO 18458).

Une bonne compréhension des principes de conception biologiques dans leur globalité est la base de l'éco-conception par la biomimétique.

FIGURE 20 : NORMES SUR LE BIOMIMÉTISME

On retrouve par ailleurs trois grandes définitions retenues par l'écosystème (ISO NF 18458) :

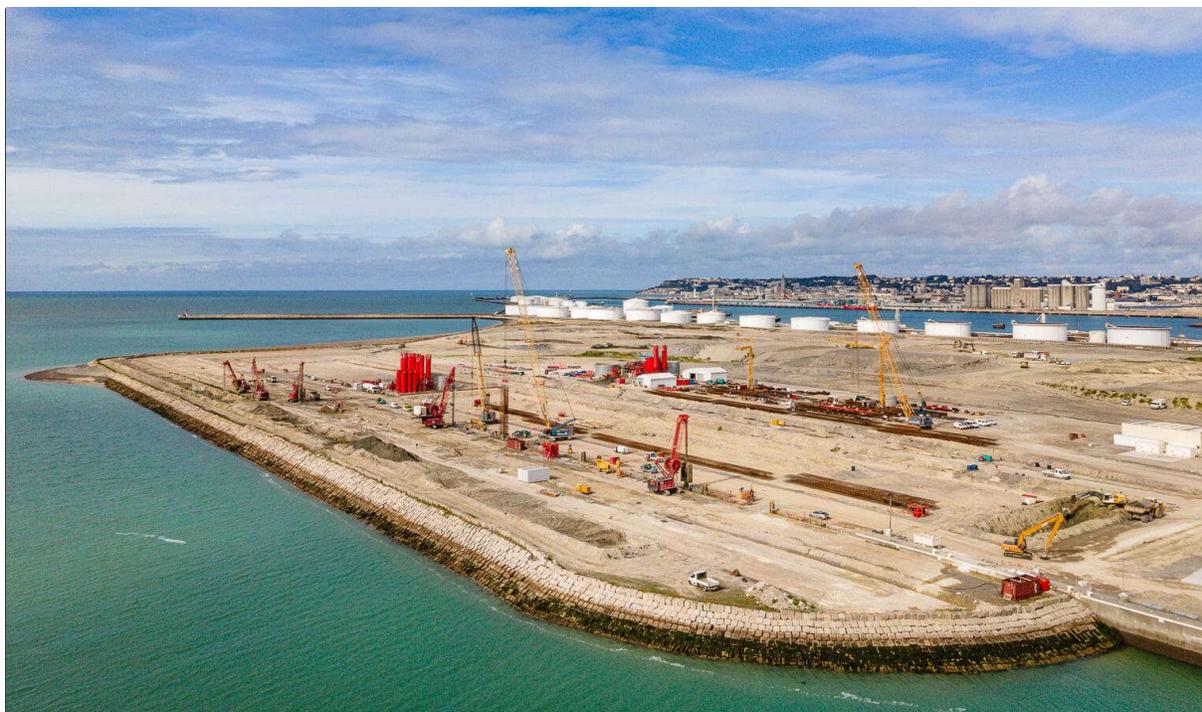
- **Bio-inspiration** : Approche créative basée sur l'observation des systèmes biologiques.
- **Biomimétique** : Coopération interdisciplinaire de la biologie et de la technologie ou d'autres domaines d'innovation dans le but de résoudre des problèmes pratiques par le biais de l'analyse fonctionnelle des systèmes biologiques, de leur abstraction en modèles et du transfert et de l'application de ces modèles à la solution.
- **Biomimétisme** : Philosophie constituée d'approches conceptuelles interdisciplinaires prenant pour modèle la nature afin de relever les défis de développement durable (social, environnemental et économique)

A ce jour, l'application de ces approches à l'écoconception des infrastructures maritimes se fait principalement autour de la notion de bio-inspiration. Le design des ouvrages est défini en s'inspirant de structures écologiquement fonctionnelles observées dans les habitats naturels (e.g. intégration de piscines intertidales sur les digues de protection par inspiration de structures équivalentes sur les estrans rocheux naturels).

Fiches projets GES & matériaux

DIMINUER L'EMPREINTE CARBONE DES INFRASTRUCTURES : UTILISATION DE BETON BAS CARBONE (PORT DU HAVRE)

Émissions de gaz à effet de serre, infrastructures portuaires, empreinte carbone, évaluation du cycle de vie



Chantier de construction de 700 ml de quai sur Port 2000 (phase 3)

Source : Soletanche Bachy

CONTEXTE

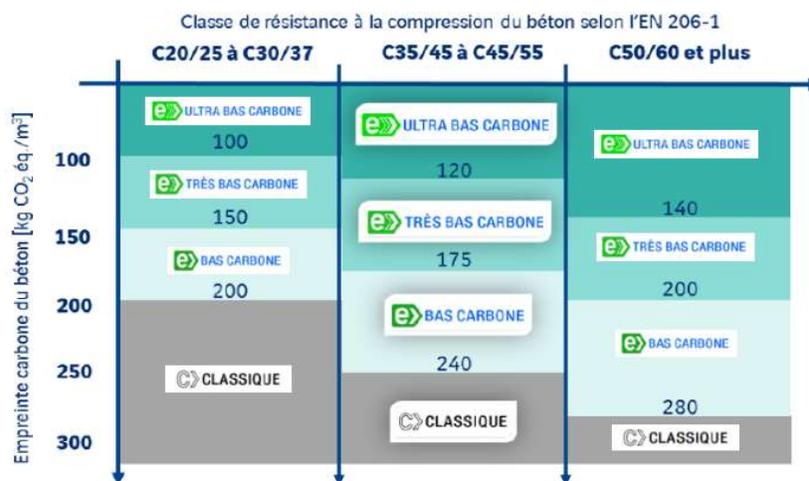
Dans le cadre de l'extension des quais de Port 2000, qui doit permettre à terme de doubler le trafic conteneur sur le port, le port du Havre a appliqué une approche d'écoconception pour diminuer l'empreinte carbone des travaux portuaires, notamment, via l'utilisation de béton bas carbone. La construction des quais, phasée dans le temps, a permis d'améliorer au fur et à mesure l'empreinte carbone du projet :

- Phase 1 (2001 – 2005) : 4 postes à quai constitués de 70 000 m³ de béton de paroi moulée
- Phase 2 (2007-2010) : 6 postes à quai constitués de 125 600m³ de béton de paroi moulée
- Phase 3 (2020 - 2022) : 2 postes à quai constitués de 36 750 m³ de béton de paroi moulée

MESURES D'ECOCONCEPTION MISES EN ŒUVRE

Dès la phase 2 de développement, le port du Havre a privilégié l'utilisation de béton bas carbone (163 kg éq. CO₂/m³), présentant déjà une empreinte carbone réduite par rapport à l'utilisation de béton « classique » compris entre 200 et 300 kg éq. CO₂/m³ selon le type de béton utilisé.

Dans le cadre de la phase 3 de développement de port 2000, le port du Havre a choisi d'aller plus loin dans la démarche d'écoconception en expérimentant l'utilisation de bétons dits « très bas carbone » pour 35 500 m³ de matériaux et « ultra bas carbone », pour 1 000 m³ de matériaux constituant la paroi moulée des quais (700 ml). Conformément aux normes françaises d'un béton de classe C30/35, ces matériaux ont des facteurs d'émissions respectivement de 147 kg éq. CO₂/m³ et 96 kg éq. CO₂/m³.



Caractéristiques des bétons bas carbone à ultra bas carbone (Source : Soletanche Bachy)

Pour pouvoir utiliser des matériaux plus innovants encore avec une empreinte carbone toujours plus faibles, les entreprises de travaux et maître d'ouvrages doivent néanmoins trouver des alternatives pour se conformer aux normes et agréments techniques garantissant la performance technique des matériaux utilisés. Ainsi, toujours dans le cadre de développement de la phase 3 de port 2000, le Port du Havre a expérimenté avec Soletanche Bachy, Vinci Construction France et Ecocem, l'utilisation de béton ultra bas carbone contenant du laitier de haut fourneau activé au carbonate de sodium dont le facteur d'émission est estimé à 71 kg éq. CO₂/m³.

Pour pouvoir valider l'utilisation de ce type de béton malgré l'écart à la norme, la réalisation d'un plot d'essai avec la réalisation d'une barrette et plusieurs essais *in-situ* pour valider les indicateurs de durabilité du béton a été effectué sur le chantier. Les résultats de ce plot d'essai ont permis de confirmer qu'une optimisation des formulations de béton pouvait être envisagée pour réduire l'empreinte carbone des bétons de construction en milieu portuaire.

RESULTATS ET INDICATEURS

Si l'on compare avec un béton standard avec un facteur d'émission de 200-300 kg éq. CO₂/m³ (source: CEREMA), on diminue de l'ordre de 50 à 68% l'empreinte carbone liée au béton dans un projet comme celui du port du Havre.

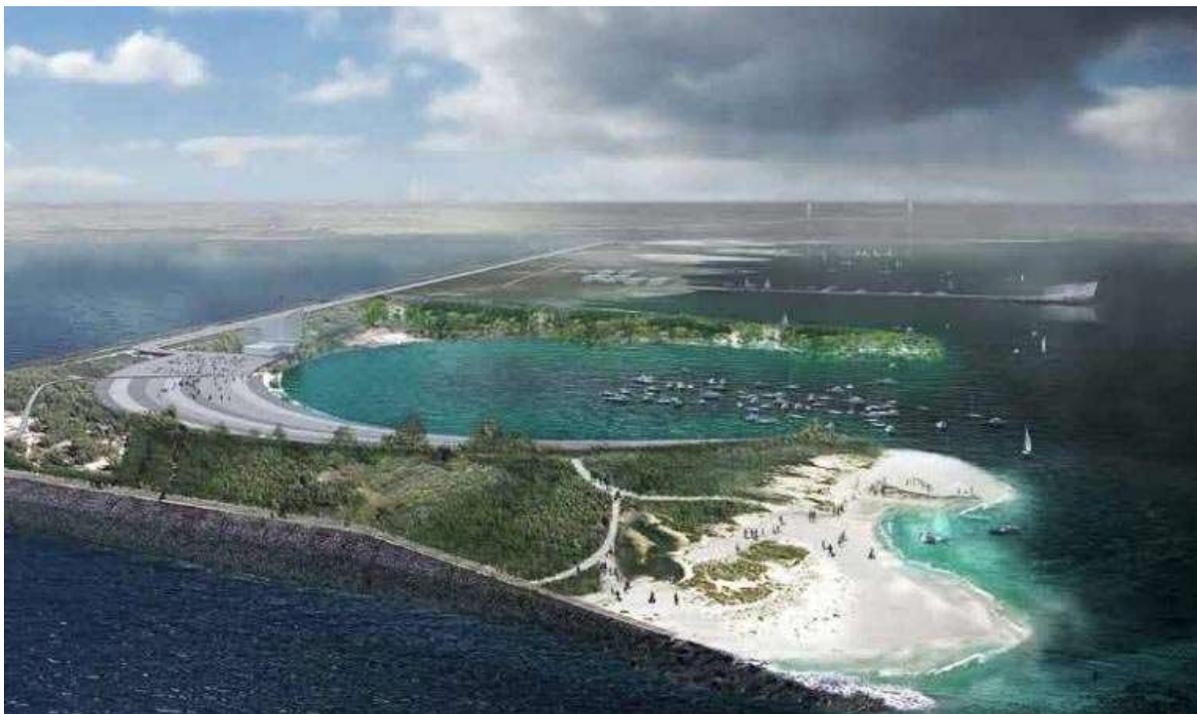
PLUS D'INFOS

Soletanche Bachy. <https://www.soletanche-bachy.com/fr/actualites/exegy-by-soletanche-bachy-premiere-barrette-en-beton-de-fondation-ultra-bas-carbone>

Revue Travaux n°983 – Spécial bétons du futur – Développement, essais et mise en œuvre de béton ultra bas carbone lors de la réalisation de la paroi moulée de Port 2000 (Phase 3 au Havre)

CONSTRUIRE AVEC LA NATURE : GALVESTON BAY PARK PROJECT

Adaptation au changement climatique, économie circulaire, renaturation



Représentation du Galveston bay park project (Texas – Etats-Unis)

CONTEXTE

Selon une récente étude sur les ports américains, seuls dix sur 300 ont développé un plan de résilience. Il a été conclu dans un rapport de 2016 que peu de ports dans le monde sont préparés à la montée du niveau de la mer, aux ouragans puissants et aux importantes marées de tempête. Le coût mondial actuel pour protéger tous les ports est estimé à jusqu'à 205 milliards de dollars américains d'ici 2100. Malgré la réponse lente de la plupart des gouvernements nationaux pour sécuriser les ports, des solutions locales innovantes et moins coûteuses commencent à combler ce vide. De plus, ces solutions se révèlent plus novatrices et moins coûteuses, tout en offrant une protection et des avantages locaux. Des ports tels que le Port de Tallinn en Estonie, le Port de San Diego en Californie du Sud et le Port de Houston sur la côte du Texas créent des collaborations public-privé pour combiner des solutions écologiques avec des infrastructures traditionnelles, qui sont l'approche privilégiée par la plupart des gouvernements nationaux.

Un des plus grands plans d'infrastructure écologique qui pourrait servir de modèle pour les ports du monde entier émerge de la région de Galveston Bay, au Texas. Galveston Bay et le Houston Ship Channel abritent l'un des plus grands complexes de raffinage pétrolier et de production de produits pétrochimiques au monde, contribuant à plus de 13% de la capacité de raffinage des États-Unis, une part importante de carburant pour avions et militaire, ainsi qu'à plus de 25% de la production de produits chimiques clés tels que l'éthylène et le propylène. Une étude du SSPEED Center de l'Université Rice à Houston a conclu qu'un ouragan de catégorie 4 frappant directement cette région serait dévastateur, provoquant la pire catastrophe environnementale de l'histoire des États-Unis. De plus, il menacerait gravement la sécurité nationale ainsi que les économies régionale et nationale en raison de la perte de raffinage et de production chimique de la région. Avec plus de 800 000 personnes vivant le long du rivage ouest de la baie et exposées à des inondations importantes, les pertes en vies humaines et la dégradation environnementale seraient considérables.

MESURES D'ÉCOCONCEPTION MISES EN ŒUVRE

Le "Galveston Bay Park Plan" est une initiative pragmatique et économique qui permettrait de renforcer la sécurité de la baie supérieure de Galveston en créant une série d'îles qui assurerait une protection du port contre les ouragans. Ces aménagements seraient alimentés à partir des matériaux issus de l'élargissement du canal portuaire, prévu pour pouvoir recevoir des navires de taille croissante. Ce projet, qui implique une collaboration entre l'autorité du port de Houston, la ville de Houston, le comté de Harris et des contributeurs privés, est considéré comme le plus grand projet d'infrastructure écologique des États-Unis. Il offre une alternative aux propositions du gouvernement fédéral, qui prévoient la construction d'un système de barrières et de portes dans le golfe du Mexique, mais ne fournissent pas une protection adéquate pour la baie supérieure. En impliquant toutes les parties prenantes, en utilisant des matériaux disponibles localement et en offrant des avantages publics, ce projet illustre une approche novatrice pour la construction d'infrastructures portuaires résilientes au XXI^e siècle.

RESULTATS ET INDICATEURS

Le projet est prévu pour être développé d'ici à 2030.

PLUS D'INFOS

[GALVESTON BAY PARK PLAN | SSPEED Center \(rice.edu\)](#)

<https://www.weforum.org/agenda/2022/08/ports-green-infrastructure-environmental-risks-climate/>

LE PLAN D'ACTION DE REDUCTION DE L'IMPACT GES DU PORT DE LONG BEACH (ETATS-UNIS)

Emissions de gaz à effet de serre, Industrie, Energie



Source: Port of Long Beach

CONTEXTE

Le port de Long Beach, en Californie, est l'un des ports les plus actifs et les plus importants des États-Unis. Il est situé dans la baie de San Pedro, à proximité de Los Angeles et joue un rôle essentiel dans le commerce international et la logistique. Le port de Long Beach traite une grande quantité de marchandises, notamment des conteneurs, des produits pétroliers, des automobiles et des marchandises en vrac.

En raison de l'ampleur de son activité et de l'impact environnemental associé, le port de Long Beach a pris conscience il y a plusieurs années de la nécessité de réduire significativement l'impact carbone de ses activités. Les opérations portuaires, les manutentions (bord à quai et sur le parc) ainsi que les transferts à l'intérieur des terminaux via des véhicules terrestres sont responsables d'émissions significatives de gaz à effet de serre, de polluants atmosphériques et de particules fines. Ces émissions contribuent à la pollution de l'air, au changement climatique et à des problèmes de santé publique.

Pour limiter l'impact de ses activités, le port de Long Beach a pris des mesures pour réduire son impact carbone grâce à son Clean Air Action Plan (CAAP), ou Plan d'action pour un air pur dès 2006. Ce programme environnemental ambitieux a été développé, en collaboration avec le port de Los Angeles voisin, afin de réduire les émissions de GES et d'améliorer la qualité de l'air dans la région portuaire.

Le CAAP vise à atteindre des objectifs spécifiques de réduction des émissions d'ici 2023 et à long terme. Il comprend des initiatives telles que la promotion de l'utilisation de véhicules et d'équipements plus propres, la mise en œuvre de technologies de pointe pour réduire les émissions des navires, la limitation des émissions des trains et des camions et l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments portuaires.

En mettant en œuvre le CAAP, le port de Long Beach a réussi à réduire considérablement les émissions de polluants atmosphériques et à améliorer la qualité de l'air local. Cela a des avantages importants pour la santé des communautés environnantes et pour l'environnement en général.

MESURES D'ÉCOCONCEPTION MISES EN ŒUVRE

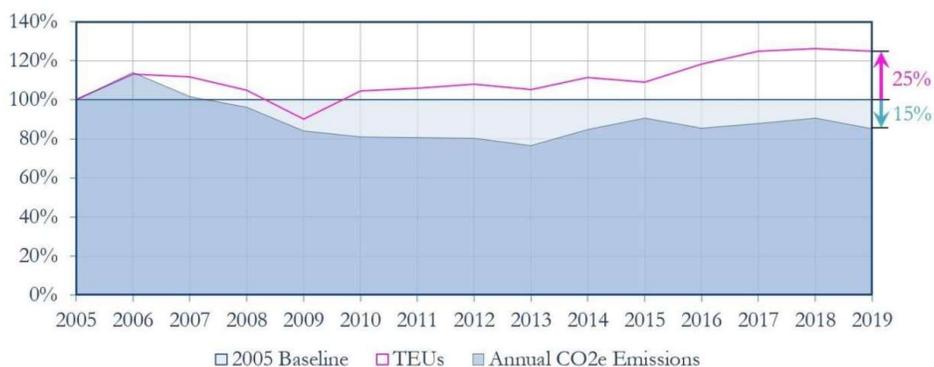
Le port de Long Beach a mis en place diverses mesures pour réduire les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) et atteindre ses objectifs en matière de réduction des émissions. Voici quelques exemples des mesures prises dans le cadre du Clean Air Action Plan (CAAP) :

1. **Utilisation de l'électricité à quai** : Le port a encouragé l'utilisation de l'électricité à quai (shore power) dès 2008 avec l'adaptation de l'infrastructure portuaire pour intégrer un système OPS sur le terminal conteneur. Ces branchements OPS ont, dans les années suivantes été développées sur l'ensemble des terminaux (terminal pétrolier, etc.), correspondant à un montant d'investissement total de 185 millions de dollars. Au lieu de faire fonctionner leurs moteurs diesel, les navires peuvent se connecter à des sources d'électricité à terre, réduisant ainsi les émissions de CO₂ associées à leur fonctionnement. Depuis 2017, à minima 50% des porte-conteneurs amarrés à quais sont alimentés en électricité lorsqu'ils sont à quai.
2. **Economie circulaire** : dans le cadre leur projet de construction du terminal conteneur LBCT, le Port of Long Beach a créé des partenariats avec les projets de dragage d'autres zones de la région pour réutiliser au maximum des sédiments dragués dans le cadre d'autres projet pour construire sa nouvelle infrastructure, limitant ainsi au maximum les opérations de dragage.
3. **Modernisation de l'équipement portuaire et adaptation de l'infrastructure pour favoriser le report modal** : Toujours dans l'optique de limiter les émissions de gaz à effet de serre liées à l'exploitation, le port a agi sur deux leviers pour réduire les émissions de GES liés à la manutention portuaire :
 1. En remplaçant progressivement **son équipement portuaire** plus ancien et plus polluant par des équipements plus modernes et respectueux de l'environnement. Cela comprend les véhicules de manutention des conteneurs, les chariots élévateurs et les grues portuaires, qui sont maintenant plus efficaces et émettent moins de CO₂.
 2. En adaptant l'infrastructure pour favoriser **le report modal**, via le développement de transport ferré/rail (notamment sur le terminal conteneur LBCT qui dispose du terminal ferroviaire de plus grande capacité mondiale pour le report modal).
4. **Amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments / de l'infrastructure portuaire** : Le CAAP encourage l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments et des infrastructures portuaires.
 1. Via **la rénovation des bâtiments anciens** avec l'utilisation de technologies plus économes en énergie, l'optimisation des systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation et la mise en œuvre de pratiques de gestion énergétique efficaces.
 2. Via l'application de **standards exigeants pour les constructions neuves** (LEED gold) : efficacité énergétique maximale, réutilisation et limitation maximale des consommations en eau, utilisation d'un pourcentage maximal de matériaux recyclés dans la construction des bâtiments, intégrations de dispositifs d'énergie renouvelables sur la structure des bâtiments et des parkings (photovoltaïque).
5. **Utilisation de carburants plus propres** : Le CAAP encourage l'utilisation de carburants plus propres pour les navires, les trains et les véhicules terrestres opérant dans le port. Cela inclut l'utilisation de carburants à faible teneur en soufre, de carburants à faible émission et le passage à des technologies de véhicules plus propres, tels que les véhicules électriques. Ces modifications de motorisation ont induit une modification de l'infrastructure portuaire pour s'adapter à ces nouveaux carburants (reprise du réseau électrique pour s'adapter à la demande électrique plus importante, déploiement de bornes de chargement, etc.).

RESULTATS ET INDICATEURS

Grâce à ces mesures et à d'autres initiatives, le port de Long Beach a réussi à réduire les émissions de CO2 de manière significative au fil des ans. Ces différentes mesures ont montré une baisse significative des émissions de CO2 : entre 2005 et 2019, le port a enregistré une réduction de 15% des émissions de CO2 liées aux activités portuaires, malgré une augmentation du volume de fret traité de 25%.

Ces efforts continuent de se poursuivre dans le cadre du CAAP et d'autres initiatives environnementales visant à faire du port de Long Beach un port plus respectueux de l'environnement et à réduire encore davantage son impact carbone.



Evolution des émissions de GES du port de LongBeach entre 2005 et 2019 trafic maritime
Source : LongBeach 2019_Air_Emissions_Inventory_Presentation

PLUS D'INFOS

<https://cleanairactionplan.org/>

<https://polb.com/port-info/green-port/>

PROMOTION DE L'UTILISATION DE BETONS BAS CARBONE SUR LE PORT ET DANS L'ETAT DE NEW-YORK (ETATS-UNIS)

Bétons bas carbone, émissions de GES

CONTEXTE

En 2020, l'autorité portuaire de New-York New Jersey a engagé un programme ambitieux visant à réduire l'empreinte carbone de ses infrastructures et à promouvoir l'application des principes de l'économie circulaire sur ses projets : le Clean Construction Program.

Le programme inclut l'application de la certification LEED, le développement et l'utilisation de bétons bas carbone, le suivi de données environnementales spécifiques sur chantier auprès des entreprises, la facilitation de l'innovation et l'implémentation de projets pilotes sur les infrastructures du port, favoriser le recyclage des matériaux et la valorisation des déchets de chantier et le déploiement d'engins efficaces sur chantier.

Ces engagements s'inscrivent dans l'objectif du port d'atteindre zéro émissions nettes de GES en 2050.

Cette démarche est concomitante avec une démarche entreprise à l'échelle de l'état de New-York et entrant en vigueur en 2025. Une série de lois passées au niveau de l'Etat permet désormais d'imposer des spécifications d'empreinte carbone applicable sur les chantiers de travaux financés par les autorités publiques.

MESURES D'ECOCOCEPTION MISES EN ŒUVRE

L'une de ces mesures consiste à réduire la quantité de ciment de plus de 25% dans certains ouvrages en béton et à implémenter des projets pilotes en appui au développement de bétons bas carbone. Le programme inclut également un important objectif de valorisation de bétons recyclés issus de la déconstruction de ses infrastructures.

En appui de ces objectifs, l'autorité portuaire a établi des partenariats académiques qui ont conduit à développer des formulations de béton spécifiques à ses besoins, testées sur des infrastructures permettant de maîtriser les risques, puis validées pour une application élargie à d'autres infrastructures du port.

Pour information, les limites d'empreinte carbone des bétons admis sur les chantiers de travaux publics au niveau de l'état de New York à compter de 2025 s'établissent entre 366 kg éq. CO₂/m³ pour les matériaux de plus faible résistance et 711 kg éq. CO₂/m³ pour les matériaux de plus forte résistance. Les spécifications sont établies au niveau de l'Etat et sont fournies dans des lignes directrices spécifiques: Buy Clean Concrete Guidelines.

RESULTATS ET INDICATEURS

En 2023, ces partenariats avaient permis de mettre au point 18 formulations permettant un gain d'émissions allant jusqu'à 37%. Ces résultats sont promus au travers de spécifications établies à destination des entreprises pour la réalisation de futurs ouvrages.

PLUS D'INFOS

[Clean Construction \(panynj.gov\)](https://www.panynj.gov/clean-construction)

[NYS Buy Clean Concrete Guidelines | Office of General Services](#)

[GreenNY Specification: Lower Carbon Concrete | Office of General Services](#)

DEMONSTRATEUR POUR L'UTILISATION DE RESSOURCES LOCALES POUR LA FABRICATION DE BETON DU PORT D'ANVERS (BELGIQUE)

Matériaux, économie circulaire, recyclage

CONTEXTE

Le projet de recherche et d'innovation européen PIONEERS adresse l'enjeu qu'ont les ports européens de réduire leurs impacts environnementaux tout en restant compétitifs. Le port d'Anvers s'est donné pour objectif dans le cadre de ce projet de démontrer le passage à l'échelle et la répliquabilité d'un certain nombre d'innovations portant sur 5 thématiques complémentaires dont le déploiement d'infrastructures portuaires plus durables.

L'un des démonstrateurs porte sur la création d'un quai de 3 kilomètres de long et nécessitant 346 000 m³ de béton. Environ 215 000 tonnes de sables sont nécessaires à l'élaboration de ces bétons, dont la principale source serait issue de dragage en mer du Nord. L'objectif du projet est de remplacer le sable nécessaire à la production du béton par du sable valorisé à partir des matériaux d'excavation.

MESURES D'ECOCONCEPTION MISES EN ŒUVRE

La construction de ce quai nécessite l'excavation de 30 millions de m³ de sol. Ce sol étant très hétérogène, les scénarios usuels de valorisation conduiraient à ne pouvoir valoriser qu'une fraction limitée de ces matériaux dans des filières à faible valeur ajoutée (e.g. relèvement de terrain).

Les partenaires du projet ont caractérisé les différents types de sol présents sur place, sélectionnés ceux présentant le potentiel le plus élevé de valorisation du point de vue de leur contenu en sable pour la fabrication de bétons et les ont traités afin de pouvoir les utiliser pour la construction des murs de quai.

RESULTATS ET INDICATEURS

L'objectif du projet est de remplacer plus de 40 % du sable nécessaire à la fabrication des bétons du quai.

PLUS D'INFOS

<https://pioneers-ports.eu/>

DEMONSTRATEUR POUR LA PRODUCTION D'ENERGIE MAREMOTRICE SUR LES INFRASTRUCTURES DU PORT D'ANVERS (BELGIQUE)

Energie, réduction de GES

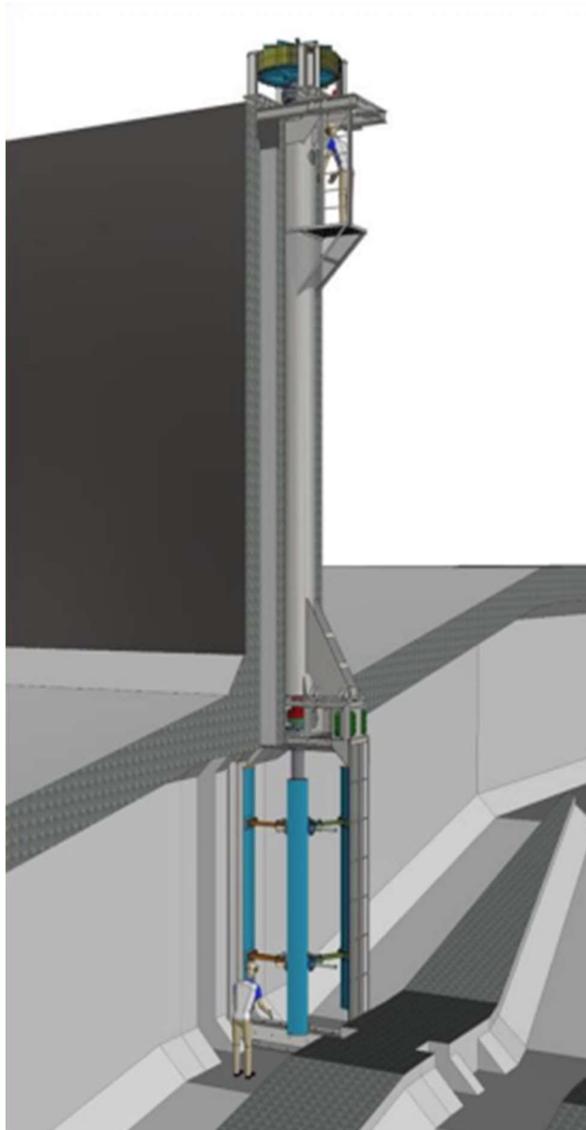
CONTEXTE

Le projet de recherche et d'innovation européen PIONEERS adresse l'enjeu qu'ont les ports européens de réduire leurs impacts environnementaux tout en restant compétitifs. Le port d'Anvers s'est donné pour objectif dans le cadre de ce projet de démontrer le passage à l'échelle et la répliquabilité d'un certain nombre d'innovations portant sur 5 thématiques complémentaires dont la réduction de l'empreinte environnementale des ports au travers de la production, du stockage et de la distribution d'énergie renouvelable.

L'un des démonstrateurs porte sur le développement d'un concept d'un générateur d'énergie marémotrice qui puisse être déployé sous différentes formes sur des infrastructures portuaires. Le projet est né de l'objectif d'évaluer la faisabilité de production d'électricité à partir des courants circulant dans les buses associées aux écluses du port (jusqu'à 8m/s).

MESURES D'ECOCONCEPTION MISES EN ŒUVRE

Le projet a consisté à développer un prototype de générateur adapté au contexte spécifique d'application (-15 m, boues, déchets...). Le prototype se compose d'une turbine verticale à trois pales, montée sur une structure support conçue spécifiquement pour être introduite dans un puit vertical de l'infrastructure et débouchant sur une buse horizontale de circulation des eaux. En partie haute, à 15 m au-dessus de la turbine, un générateur permet de convertir l'énergie de rotation de l'axe en électricité.



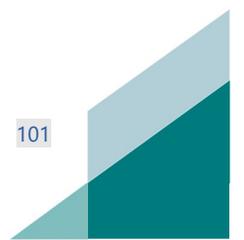
RESULTATS ET INDICATEURS

Les essais ont démontré la faisabilité de déployer ce type de générateur sur les infrastructures du port. Le déploiement à plus grande échelle et l'optimisation du générateur sont à l'étude.

PLUS D'INFOS

<https://pioneers-ports.eu/>

[Port of Antwerp – Hydroturbine – World Port Sustainability Program \(sustainableworldports.org\)](https://sustainableworldports.org/)

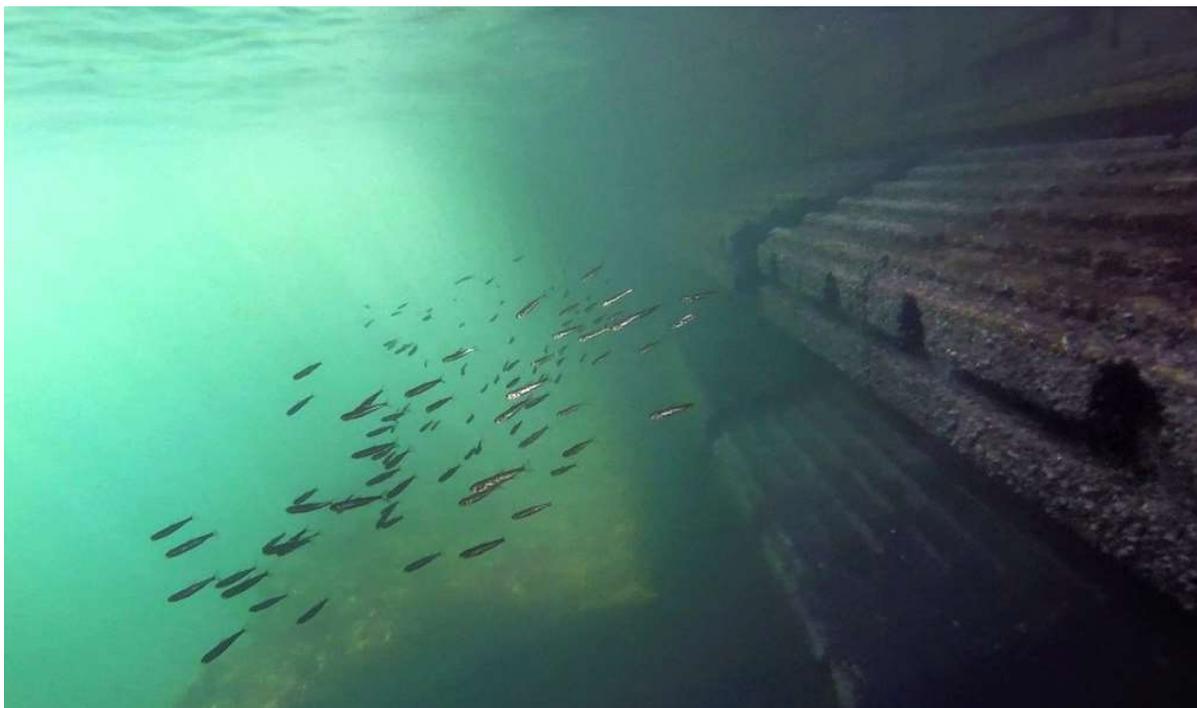


Fiches projets biodiversité

LES OUVRAGES VERTICAUX

ECOCONCEPTION DU FRONT DE MER DE SEATTLE EN FAVEUR DE LA MIGRATION DU SAUMON (ETATS-UNIS)

Connectivité, estuaire, migration, nurserie, béton, matriçage, préfabrication, ouvrage neuf, réhabilitation, ouvrage existant



Saumons juvéniles évoluant le long du mur digue éco-conçu du front de mer de Seattle
(Source : Mike Caputo / University of Washington)

CONTEXTE

Le développement du front de mer de Seattle a induit une perte considérable d'habitats côtiers diversifiés tels que des plages en pente douce, des substrats rocheux au profils accidentés et des berges végétalisées conduisant à une transformation irréversible de cet écosystème estuarien et de son fonctionnement. Parmi les espèces d'intérêt majeur affectées par cette urbanisation figurent les espèces de poissons amphihalines pour lesquelles la connectivité entre les habitats essentiels a été rompue. C'est le cas du saumon, dont la migration entre l'océan Pacifique et le fleuve Duwamish est fragilisée par le manque d'habitats adaptés le long des berges verticales artificialisées.

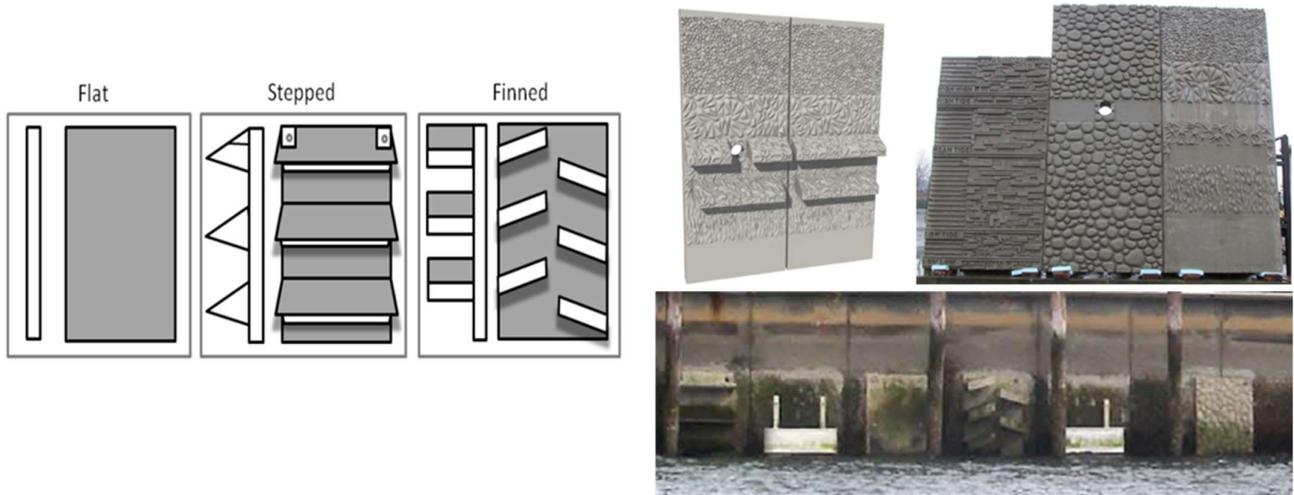
Suite à un tremblement de terre, un projet majeur de réhabilitation du front de mer a été entrepris en 2015 pour un montant de plus de 750 millions de dollars. La ville de Seattle a décidé d'intégrer une forte ambition en matière d'écoconception des nouveaux ouvrages réalisés au contact de l'écosystème aquatique, et ce afin notamment de favoriser la réhabilitation de la capacité migratoire du saumon, espèce à fort intérêt de conservation, dont les stades juvéniles longent les berges pour éviter le courant à la dévalaison.

Plusieurs solutions ont été conçues et déployées sur différents types d'ouvrages verticaux, faisant de ce projet l'un des projets les plus ambitieux à date en matière d'écoconception à bénéfice écologique subaquatique.

MESURES D'ÉCOCONCEPTION MISES EN ŒUVRE

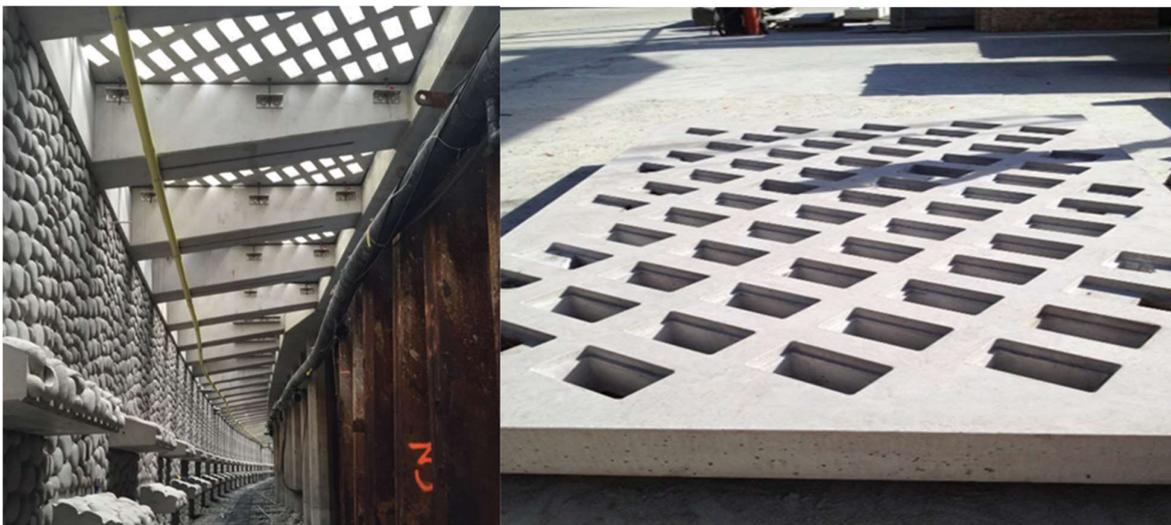
Panneaux matricés et création de petits fonds horizontaux

Le projet Elliott Bay Seawall cible le rétablissement de corridors écologiques pour les stades juvéniles de saumons quinnat (*Oncorhynchus tshawytscha*) le long des berges de l'estuaire urbanisé du Duwamish. Il a permis la création le long des nouveaux ouvrages de zones intertidales matérialisées par des bancs horizontaux à faible profondeur. Ces derniers visent à faciliter les échanges mais aussi l'abris et l'alimentation (amélioration de la colonisation) pour cette espèce migratrice locale, ainsi que la rétention d'eau pour les espèces fixées.



Puits de lumière

Situés le long de la nouvelle promenade piétonne sur la partie supérieure de l'ouvrage, les puits de lumière se matérialisent par des panneaux en béton qui intègrent 63 vitres en verre. Cette optimisation permet la pénétration de la lumière dans des niveaux suffisants pour induire la colonisation des parties supérieures des panneaux immergés par les premiers producteurs primaires. Le développement de ces algues et microalgues favorise l'installation d'une chaîne trophique propice à l'alimentation des juvéniles de saumons et complète la complexification tridimensionnelle des murs verticaux apportés par les panneaux et marches horizontales.



RESULTATS ET INDICATEURS

Cinq ans après la fin des travaux, les suivis réalisés par l'Université de Washington confirment la présence de plusieurs dizaines de milliers de stades juvénile de salmonidés dans les ouvrages entre Mars et Octobre 2022. La présence de poissons de roches, de tourteaux, de bancs de lançons ainsi que de bancs de harengs est également notée. Des macroalgues telles que les kelps ont également colonisé les ouvrages écoconçus et forment des microhabitats complémentaires tant pour la faune piscicole que pour différentes espèces de crustacés.

PLUS D'INFOS

<https://www.washington.edu/boundless/seattle-waterfront-renewal/>

<https://depts.washington.edu/wetlab/research/seawall/>

[*UW Wetland Ecosystem Team - 2022 Year 5 Seattle Seawall Fish Monitoring*](#)

[*Can Seattle's Seawall Protect The City's Waterfront While Protecting Fish?*](#)

BIBLIOGRAPHIE

Accola KL, Horne JK, Cordell JR, Toft JD (2022) Acoustic characterization of juvenile Pacific salmon distributions along an eco-engineered seawall. *Mar Ecol Prog Ser* 682:207-220.

Sawyer AC, Toft JD, Cordell JR (2020) Seawall as salmon habitat: Eco-engineering improves the distribution and foraging of juvenile Pacific salmon. *Ecol. Eng.* 151:105856. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105856>

Cordell JR, Munsch SH, Shelton M and JD Toft (2017a) Effects of piers on assemblage composition, abundance, and taxa richness of small epibenthic invertebrates. *Hydrobiologia* 802 211-220 DOI [10.1007/s10750-017-3262-8](https://doi.org/10.1007/s10750-017-3262-8)

Cordell JR, Toft JD, Munsch SH and M Goff (2017b) Benches, beaches, and bumps: how habitat monitoring and experimental science can inform urban seawall design, in *Living Shorelines: The Science and Management of Nature-Based Coastal Protection* (pp. 419 – 436). CRC Press.

Munsch, SH, JR Cordell, JD Toft (2017) Effects of shoreline armoring and overwater structures on coastal and estuarine fish: opportunities for habitat improvement. *Journal of Applied Ecology*. DOI: [10.1111/1365-2664.12906](https://doi.org/10.1111/1365-2664.12906)

Munsch, SH, JR Cordell, JD Toft (2015) Effects of seawall armoring on juvenile Pacific salmon diets in an urban estuarine embayment. *Marine Ecology Progress Series* 535:213–229.

Munsch, SH, JR Cordell, JD Toft, E Morgan (2014) Effects of Seawalls and Piers on Fish Assemblages and Juvenile Salmon Feeding Behavior, *North American Journal of Fisheries Management*, 34:4, 814-827, DOI: [10.1080/02755947.2014.910579](https://doi.org/10.1080/02755947.2014.910579)

Toft JD, Ogston AS, Heerhartz SM, Cordell JR, Flemer EE (2013) Ecological response and physical stability of habitat enhancements along an urban armored shoreline. *Ecological Engineering* 57:97–108.

Toft JD, Cordell JR, Simenstad CA, Stamatiou LA (2007) Fish distribution, abundance, and behavior along city shoreline types in Puget Sound. *North American Journal of Fisheries Management* 27:465–480. DOI: [10.1007/s10750-017-3262-8](https://doi.org/10.1007/s10750-017-3262-8)

LES OUVRAGES VERTICAUX

ECOCONCEPTION DU FRONT DE MER DE VANCOUVER POUR LIMITER LES EFFETS DE VERTICALISATION DE L'ESTRAN (CANADA)

Connectivité, estuaire, migration, nurserie, béton, matriçage, préfabrication, ouvrage neuf, réhabilitation, ouvrage existant



Colonisation benthique du mur digue éco-conçu du front de mer de Vancouver
(Source : LMN Architects)

CONTEXTE

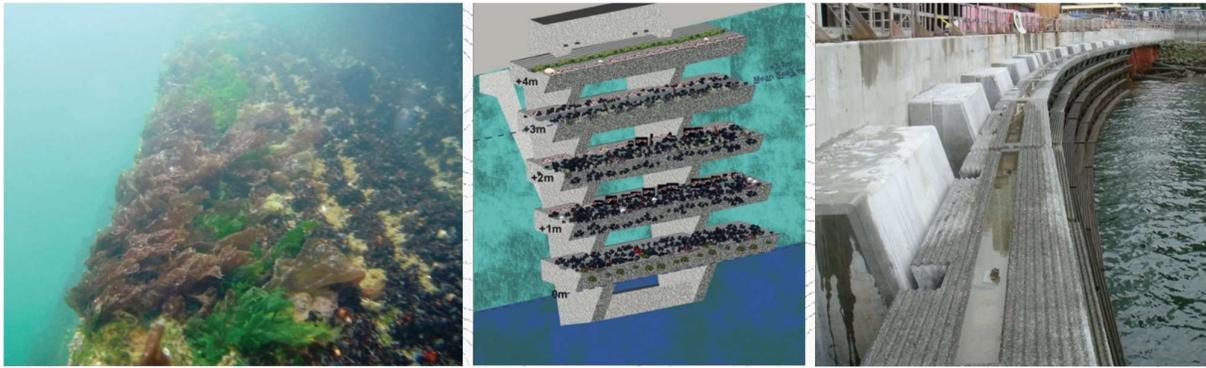
A l'occasion des Jeux Olympiques d'hiver de 2010, la création du nouveau centre de convention de la ville de Vancouver au Canada a été associée à la mise en œuvre de mesures compensatoires ciblant différentes fonctionnalités écologiques impactées suite à la verticalisation de l'estran (augmentation de la pente, réduction de la zone intertidale).

Avec un budget de plus de 8 millions d'euros, un nouveau concept dénommé "habitat skirt" a été développé puis mis en œuvre sur près de 500 mètres linéaires. Cette solution inédite ciblant la reconstitution de petits fonds horizontaux de substrats durs et zone de rétention d'eau a permis de créer 6 000 m² d'habitats le long de l'ouvrage.

MESURES D'ECOCONCEPTION MISES EN ŒUVRE

Les escaliers matriçés

Baptisée "Habitat skirt", la solution mise en œuvre se matérialise par une série de poutres en béton de 6,7 m de long par 1,3 m de large. Elles se succèdent sur toute la hauteur de la zone de balancement des marées depuis les secteurs de marnage supérieurs jusqu'à l'étage infralittoral constamment immergé. Les poutres sont présentées en escalier de façon à maximiser l'accessibilité à la lumière pour les espèces photophiles et réduire la pente au maximum sur les 4 m de hauteur d'ouvrages éco-conçus. Des dépressions ont également été prévues de façon à retenir l'eau à marée descendante.



RESULTATS ET INDICATEURS

Les résultats des suivis écologiques disponibles concluent à un intérêt positif de la démarche d'écoconception entreprise. Les auteurs décrivent un habitat productif, avec l'installation pérenne de communautés animales et végétales fixées diversifiées et de nature similaire aux zones naturelles de référence suivies en comparaison.

L'installation d'espèces ingénieuses comme la moule du Pacifique (*Mytilus trossulus*) et différentes algues brunes (dont *Fucus distichus*) sont elles-mêmes à l'origine de nouvelles fonctions écologiques comme l'abris de juvéniles ou l'alimentation de stades adulte.

La reconstitution d'un réseau trophique est notée avec la présence d'oursins qui s'alimentent d'algues brunes, ou encore de crabes et d'étoiles de mer qui se nourrissent d'oursins.

PLUS D'INFOS

<https://blogs.ubc.ca/vcchabitatskirt/marine-habitat-compensation/>

<https://blogs.ubc.ca/vcchabitatskirt>

http://tidewatercurrent.com/2014_summer/Vancouver_Habitat_Skirt.html

[Vancouver Convention Centre West/Expansion - Featured Project](#)

BIBLIOGRAPHIE

Dafforn, K. A., Mayer-Pinto, M., Morris, R. L., & Waltham, N. J. (2015). Application of management tools to integrate ecological principles with the design of marine infrastructure. *Journal of Environmental Management*, 158, 61-73.

Leonard, D. E., & Kullmann, H. G. (2010). Design of marine habitat mitigation structure. In *Ports 2010: Building on the Past, Respecting the Future* (pp. 584-592).

Slogan, J. R. (2015). Evaluation of design, environmental, and sustainability attributes affecting urban fisheries restoration habitat in Vancouver, British Columbia, Canada (Doctoral dissertation, University of British Columbia).

Mayer-Pinto, M., Johnston, E. L., Bugnot, A. B., Glasby, T. M., Airoidi, L., Mitchell, A., & Dafforn, K. A. (2017). Building 'blue': an eco-engineering framework for foreshore developments. *Journal of Environmental Management*, 189, 109-114.

Munsch, S. H., Cordell, J. R., & Toft, J. D. (2017). Effects of shoreline armoring and overwater structures on coastal and estuarine fish: opportunities for habitat improvement. *Journal of Applied Ecology*, 54(5), 1373-1384.

Nowell, J., Ge, L., Kim, C., & Yan, X. (2015) *Fucus gardneri* in North East False Creek. 64p.

LES OUVRAGES VERTICAUX

LE « QUAI VIVANT » DU PORT DE SYDNEY POUR AMELIORER LES FONCTIONALITES ECOLOGIQUES DU PORT (AUSTRALIE)

Benthique, espèces fixées, béton, impression 3D, zone intertidale, biomimétisme



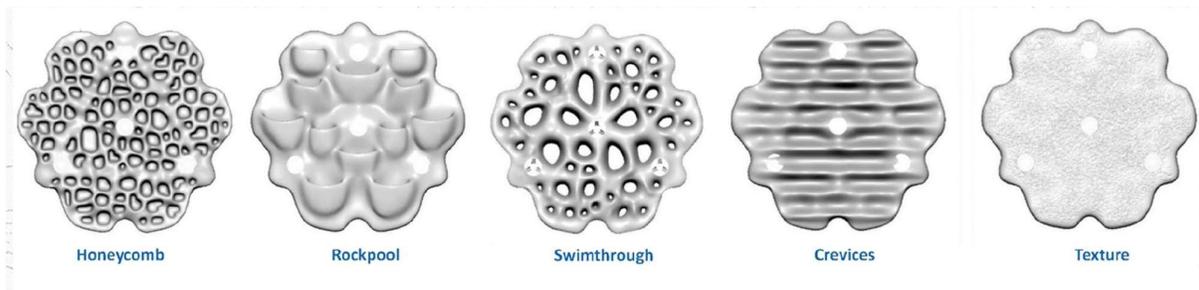
Ecoconception d'un mur maçonné dans le port de Sydney
(Source : ReefDesign Lab)

CONTEXTE

La zone portuaire estuarienne de Sydney accueille historiquement de nombreuses études d'écoconception portuaire. Elle s'intègre notamment dans le cadre d'un projet mondial (World Harbour Project) qui a vocation à restaurer la qualité de l'eau et la vie sous-marine dans les villes portuaires. Lancé en 2014, ce programme accompagne maintenant 26 ports dans le monde, dont celui de Sydney. Le présent projet résulte des grandes stratégies proposées au cours du temps sur ce secteur biogéographique.

MESURES D'ECOCONCEPTION MISES EN ŒUVRE

Afin de recréer les riches écosystèmes des zones intertidales dans les zones artificialisées, des dalles en béton matricées et en tout ou partie imprimées en 3D ont été installées en 2018-2019 sur différentes parois verticales du port. Elles ont pour objectif de complexifier l'ouvrage par une conception biomimétique de plusieurs modules. Les différents designs visent à recréer des zones de rétention d'eau, d'ombre et de microhabitats. Le matériau retenu résiste à l'alternance humidité-sécheresse des zones intertidales. Chaque unité mesure environ 55cm et pèse 25kg (manuportables) et est fixée (tige inox 16mm) sur les parois verticales existantes. Pour 10 mètres linéaires de quai, on compte environ 70 dalles. Au total, plus de 1000 unités ont été installées. Ces dernières visent à favoriser la colonisation par des espèces benthiques, créer de l'habitat pour la faune et la flore locales, notamment pour les espèces ingénieuses comme les macroalgues, des espèces filtrantes fixées et différents poissons estuariens.



Méthodologie de pose et fixation unitaire des dallettes écoconçues le long de la paroi verticale d'un ouvrage maçonné existant

En parallèle, un suivi a été réalisé durant 3 ans par le Sydney Institute of Marine Science afin de permettre de mieux comprendre comment améliorer en zone intertidale la colonisation par les espèces sessiles fixées et les poissons tout en évitant l'installation d'espèces non indigènes sur des dallettes plus petites.

Des dallettes en béton de différents types (rainures, rugosité, ..) ont été suivies via du comptage visuel, des quadrats, des mesures de températures, des vidéos, ou encore un ensemencement en huîtres et corallinaceae. Des tests en aquarium ont aussi été effectués. Les indicateurs suivis étaient la diversité et l'abondance des communautés de poissons, le comportement des poissons (nombre de signe d'alimentation), le pourcentage de couverture espèces fixées, le taux d'espèces non indigènes, le taux de filtration des particules en suspension.



a) Flat



b) 2.5 cm



c) 5 cm

Dallettes suivies dans le cadre du monitoring du projet

RESULTATS ET INDICATEURS

Plus de 90 espèces ont été comptabilisées le long de l'ouvrage écoconçu avec une diversité de 30 à 40% supérieure le long des linéaire éco-conçus. Des différences ont été observés entre les designs notamment en fonction de leur capacité à retenir de l'eau et à créer des abris. Ces différences varient par ailleurs en fonction de la hauteur d'installation sur l'ouvrage.

Sur les dalles, les premières espèces (algues, huîtres, patelles, escargots de mer) sont apparues dès le premier mois d'installation. Les expérimentations réalisées dans le port de Sydney ont fait l'objet de plusieurs publications scientifiques :

- Strain et al 2019 suggèrent que la complexité des dalles réduit la pression de prédation des poissons sur les huîtres juvéniles en comparaison à un ouvrage standard en béton lisse ;
- Ushiana et al 2019 décrivent que la complexité de ces mêmes dalles (pourtant petites) affecte le comportement des poissons (refuge, alimentation). Les poissons cryptobenthiques interagissent davantage avec des dalles complexifiées, mais se nourrissent davantage sur les dalles plates (moins de refuges pour les proies). Les poissons pélagiques interagissent et se nourrissent davantage sur des dalles naturellement colonisées que des dalles témoins non colonisées (indépendamment de la complexité physique).
- Vozzo et al 2021 décrivent que la complexité des dalles augmente la richesse spécifique (nombre d'espèces) et le taux de filtration de particules en suspension mesuré en aquarium. Le préensemencement des dalles a un effet positif sur ces deux indicateurs ainsi que sur la diversité fonctionnelle. La colonisation en espèces non indigènes ne varie pas en fonction de la complexité des dalles sauf sur le traitement lisse, ou l'apport préalable d'huîtres montre un intérêt pour limiter ce risque sur de nouveaux ouvrages.

PLUS D'INFOS

['Living seawalls' bring back biodiversity - YouTube](#)

[UNSW Science Partner Stories | Living Seawalls with Lendlease and Infrastructure NSW - YouTube](#)

<https://www.sims.org.au/page/130/living-seawalls-landing>

<https://www.reefdesignlab.com/living-seawalls>

<https://www.volvocars.com/au/why-volvo/discover/living-seawall>

BIBLIOGRAPHIE

Bishop, M. J., Vozzo, M. L., Mayer-Pinto, M., & Dafforn, K. A. (2022). Complexity–biodiversity relationships on marine urban structures: reintroducing habitat heterogeneity through eco-engineering. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 377(1857), 20210393.

Strain, E. M. A., Morris, R. L., Coleman, R. A., Figueira, W. F., Steinberg, P. D., Johnston, E. L., & Bishop, M. J. (2018). Increasing microhabitat complexity on seawalls can reduce fish predation on native oysters. *Ecological Engineering*, 120, 637-644.

Ushiana, S., Mayer-Pinto, M., Bugnot, A. B., Johnston, E. L., & Dafforn, K. A. (2019). Eco-engineering increases habitat availability and utilisation of seawalls by fish. *Ecological Engineering*, 138, 403-411.

Vozzo, M. L., Mayer-Pinto, M., Bishop, M. J., Cumbo, V. R., Bugnot, A. B., Dafforn, K. A., ... & Strain, E. M. A. (2021). Making seawalls multifunctional: The positive effects of seeded bivalves and habitat structure on species diversity and filtration rates. *Marine Environmental Research*, 165, 105243.

LES OUVRAGES VERTICAUX

DEVELOPPEMENT DE LA FONCTIONNALITE DE NOURRICERIE DE LA PLATEFORME MEGAYACHT DU PORT DE LA CIOTAT (FRANCE)

Juvenile, poissons, biomimétisme, herbier, nourricerie, nurserie



Nurseries à poissons installées le long d'un nouveau quai du port de la Ciotat. Le module Roselière est un module d'habillage écologique biomimétique capable de reproduire la complexité architecturale des herbiers
(Source : Seaboost)

CONTEXTE

La commune de La Ciotat bénéficie d'une façade littorale dite de petits fonds côtiers où siège une biodiversité emblématique de Méditerranée dépendante des fonctionnalités écologiques que peuvent offrir les zones naturelles et artificialisées.

Les eaux calmes peu profondes sont des lieux propices et essentiels au développement des cycles biologiques des stades juvéniles d'espèces de poissons. La complexité offerte par des zones portuaires est insuffisante pour subvenir à l'abondance et la diversité d'espèces qui peuvent peupler et se développer dans ces milieux.

Dans le cadre du projet de construction d'une plateforme de réparation navale pour méga-yachts de 4000 tonnes, différentes mesures environnementales ont été imposées par arrêté préfectoral au titulaire La Ciotat Shipyards.

Ainsi en 2021, une nourricerie portuaire à grande échelle a été mise en place le long du nouvel ouvrage de 250 mètres linéaires.

MESURES D'ÉCOCOCEPTION MISES EN ŒUVRE

La Ciotat Shipyards a équipé ce nouvel ouvrage en modules écologiques de nurserie, de type herbier artificiel. Au total 78.30 ml de quai ont été équipés sur une profondeur de 5.80 m créant plus de 450 m² et 360m³ de nurseries artificielles, pour un budget de 130 000 €. C'est 96 modules qui ont ainsi été déployés.

Le dispositif déployé est constitué de patchs d'herbier artificiels successifs espacés d'intervalles réguliers assurant une continuité écologique et fonction de réservoir de biodiversité au sein du port. Chaque patch est constitué de 8 modules herbiers artificiels type Roselières de longueur unitaire de plus de 6m tendus horizontalement successivement dans la colonne d'eau entre -0.6m NGF et -6.40m NGF. Le module Roselière recrée par biomimétisme la complexité architecturale des herbiers de posidonie. Il vise ainsi à cibler plus spécifiquement la fonction de nourricerie pour différentes espèces de poisson inféodées aux herbiers, et ce, tout en améliorant l'intégration paysagère du nouvel ouvrage maritime.



Vue en perspective de l'ensemble des patchs sur les verticaux de quais (Source : Seaboost)

RESULTATS ET INDICATEURS

Les premières immersions réalisées suite à l'installation des modules ont permis de mettre en évidence la présence de plusieurs dizaines de milliers de juvéniles de poissons le long du nouveau quai. Les espèces alors présentes au stade juvénile étaient des sars (*Diplodus sargus*, *D. vulgaris*, *D. puntazzo*), des saupes (*Sarpa salpa*), des pageots (*Pagellus sp.*). Un plan de suivi des installations prévu sur une durée de 5 ans est actuellement en cours.

PLUS D'INFOS

[Un système de nurseries artificielles pour les poissons dans le port de La Ciotat - La Ciotat Shipyards \(laciotat-shipyards.com\)](https://www.laciotat-shipyards.com)

<https://www.dropbox.com/scl/fo/th8e0u4s80cc1yjbsqkma/h?dl=0&rlkey=qywfpoi705jmpj918wqhdvqjf>

<https://www.dropbox.com/s/e7jdnlhu9uncifl/Derush%20brut%20plong%C3%A9e%20livraison%20Mai%202022.mp4?dl=0>

DIGUES ET PROTECTIONS COTIERES

AMENAGEMENTS POUR LA RETENTION D'EAU SUR LA DIGUE DE MUTTON ISLAND, GALWAY CITY (IRLANDE)

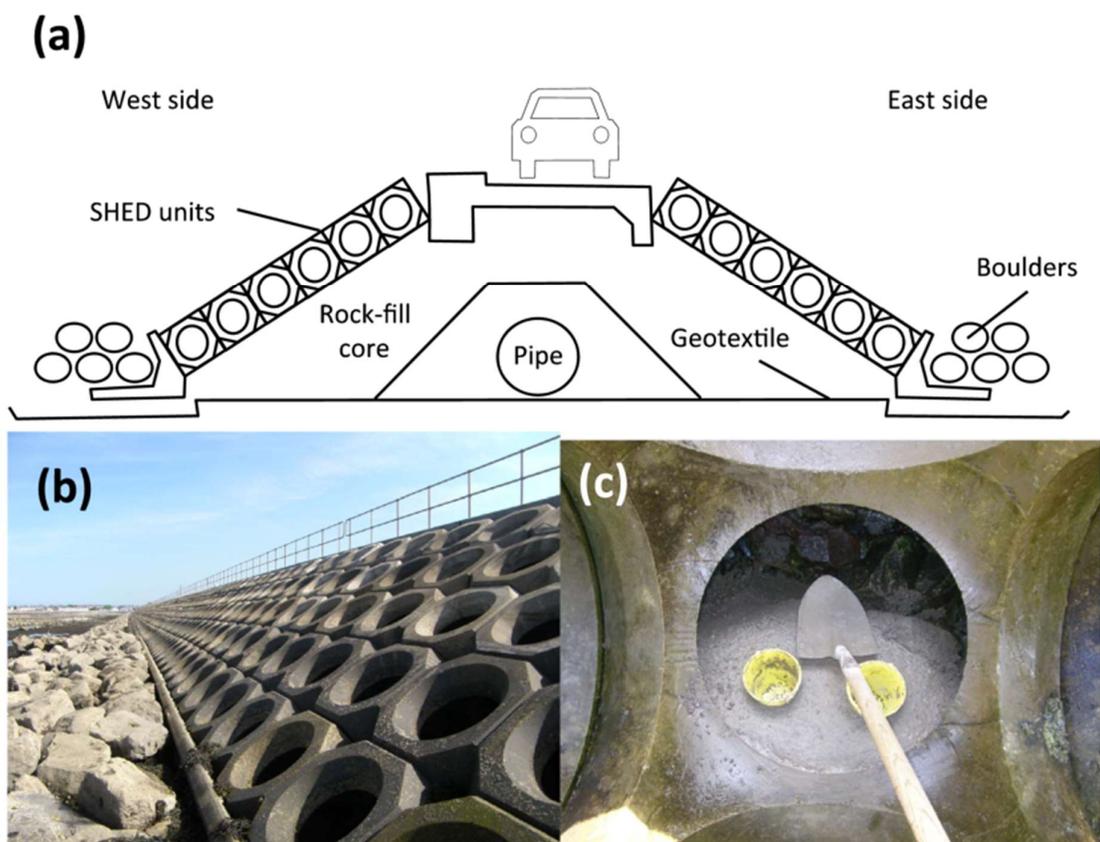
Digues, Intertidal, estuaire, piscine, béton, matriçage, préfabrication, réhabilitation, rénovation

CONTEXTE

L'île de Mutton est reliée à la ville de Galway (Irlande) par une chaussée surélevée de près d'un kilomètre. Cette dernière est protégée de part et d'autre par une digue poreuse en éléments préfabriqués de type SHED rappelant des alvéoles de ruches d'abeilles. Si ces solutions ont l'avantage de dissiper la houle, elles ne permettent pas la rétention de l'eau et les communautés présentes s'avèrent appauvries en comparaison à celles des écosystèmes naturels des estrans adjacents.

MESURES D'ECOCONCEPTION MISES EN ŒUVRE

Entre 2013 et 2014, 80 éléments alvéolaires préfabriqués ont été transformés manuellement en piscines intertidales de façon à retenir ponctuellement l'eau de chaque côté de la digue et ce à différentes hauteurs de marnage. Les méthodes employées ont été artisanales (maçonnerie de l'ouvrage existant). Des zones de rétention d'eau de l'ordre 10 à 14 cm de diamètre et de profondeur ont ainsi été réalisées.



RESULTATS ET INDICATEURS

Les suivis ont été réalisés 12 puis 24 mois après installation. Des groupes taxonomiques spécifiques ont été observés dans zones de rétention d'eau créées, validant l'intérêt de la démarche. Une diversité plus importante a été observée sur les piscines exposées à l'océan et au niveau le plus bas des installations. La zonation de certaines espèces ingénieuses de macroalgues comme la laminaire *Laminaria digitata* a été augmentée vers le haut de l'ouvrage grâce à la rétention d'eau. Après 24 mois, les petites zones de rétention d'eau se sont complètement sédimentées du côté protégé des vagues et les cuvettes n'étaient plus exploitables si ce n'est par des communautés spécifiques aux vasières. Cette étude montre l'intérêt des suivis sur le long terme (> 12 mois) qui restent assez rares pour les projets d'écoconception portuaire. Le taux de sédimentation doit être évalué avant la mise en œuvre. Il est également possible de recréer des zones de substrats meubles à l'intérieur des ouvrages linéaires en profitant de la sédimentation progressive.

PLUS D'INFOS

<https://www.irishtimes.com/news/science/putting-the-marine-life-back-into-ocean-sprawl-1.2878213>

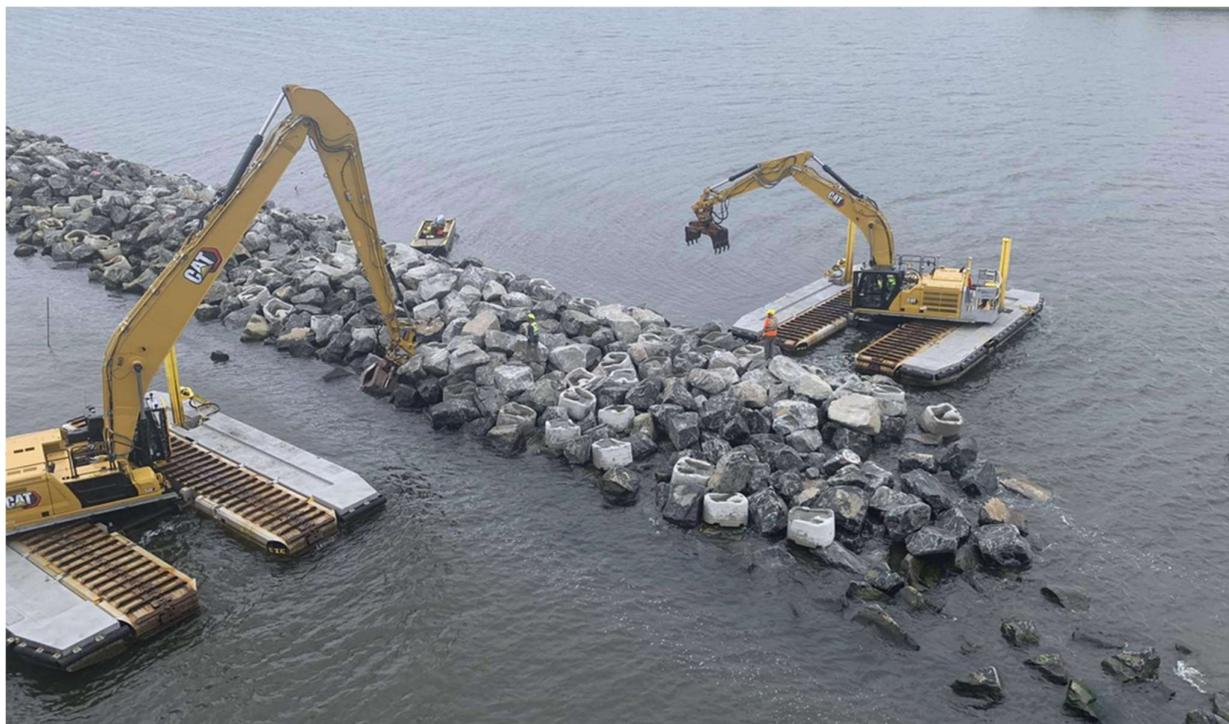
BIBLIOGRAPHIE

Firth, L. B., Browne, K. A., Knights, A. M., Hawkins, S. J., & Nash, R. (2016). Eco-engineered rock pools: a concrete solution to biodiversity loss and urban sprawl in the marine environment. *Environmental Research Letters*, 11(9), 094015.

DIGUES ET PROTECTION COTIERE

« DIGUE VIVANTE » DE STATEN ISLAND (ETATS-UNIS)

Digues, brise-lames, nouvel ouvrage, adaptation changement climatique, piscines intertidales, restauration



Mises en place de cuvettes intertidales sur le brise-lame de Staten island

CONTEXTE

En 2012, l'ouragan Sandy frappe les Etats-Unis entraînant des dégâts considérables notamment sur les côtes. Le ministère américain du logement et du développement urbain lance alors le concours Rebuild By Design (RBD) visant à répondre aux dommages occasionnés dans le Nord Est. Le gagnant pourra alors implémenter son projet grâce à la bourse du Community Development Block Grant Disaster Recovery et aux financements de l'état de New York. Le projet Staten Island Living Breakwater, le gagnant du concours, est lancé.

Il s'agit d'un projet de 107 millions d'euros ayant pour objectifs de prévenir de l'érosion, d'atténuer l'énergie des vagues et d'améliorer la résilience des écosystèmes et de la société. Pour y parvenir, diverses mesures sont prévues :

- des brise-lames écoconçus pour réduire les risques et abriter la vie marine ;
- restauration du trait de côte ;
- restauration des populations d'huîtres ;
- un programme pédagogique.

La construction des brise-lames est toujours en cours et devrait se terminer pendant l'été 2023. Les étapes de restauration dureront jusqu'à fin 2024.

MESURES D'ÉCOCONCEPTION MISES EN ŒUVRE

La première étape du projet concerne la construction des brise-lames. Le système de brise-lames consiste en une série de neuf segments (soit un total de 730 mètres linéaires) écologiquement améliorés. Voici ci-dessous le schéma représentant le brise-lame éco-conçu.

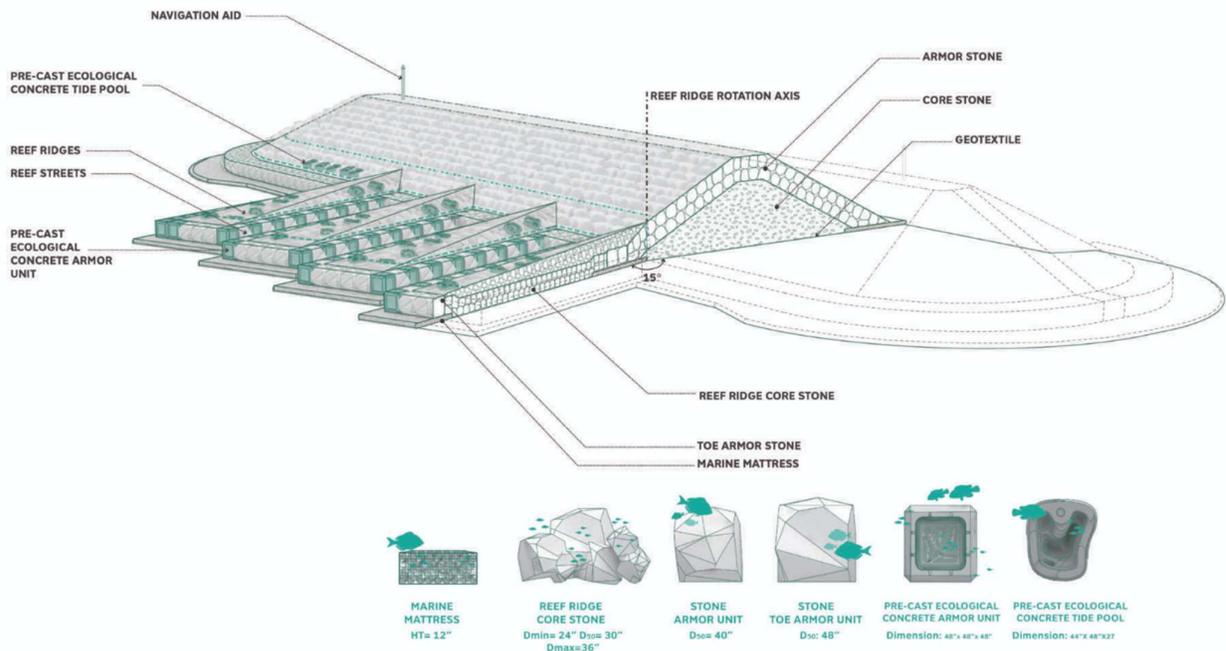


Schéma d'un segment de brise-lame éco-conçu (Source : Scapestudio.com)

Plusieurs solutions sont mises en place pour améliorer les capacités d'accueil de la faune et de la flore marine :

- des piscines intertidales sont installées dans la partie supérieure du segment principal : elles se situent dans la zone intertidale et visent à permettre le développement des écosystèmes associés à cette zonation (cf. zoom sur les piscines intertidales) ;
- des "crêtes récifales" et des "rues récifales" issues des saillies rocheuses perpendiculaires au tronçon principal : ces caractéristiques modifient localement le comportement des vagues offrant ainsi une plus grande diversité d'habitats ce qui favorise le recrutement d'espèces et recrée des petits fonds horizontaux ;
- des unités en béton écologiquement améliorés constituent une partie de la couche extérieure des brise-lames.

Bien que non directement associées au futur ouvrage, les mesures de restauration comprennent également le projet Billion Oyster (BOP) dont l'objectif est de construire un récif ostréicole naturel le long du littoral sud de Staten Island. Le récif réduira la puissance des vagues lors d'événements climatiques extrêmes et restaurera les habitats marins. Les mesures mises en œuvre pour y parvenir sont :

- la construction d'habitats appropriés pour le développement de récifs d'huître dans la structure des brise-lames ;
- l'installation d'une nurserie flottante d'huîtres ;
- la culture hors site (écloserie).

RESULTATS ET INDICATEURS

Le projet est toujours en phase de construction. Le suivi de l'efficacité des mesures d'écoconception pour la faune et la flore n'a pas encore été réalisé. Le protocole du suivi devrait être développé en consultation avec le NYSDEC (New York State Department of Environmental Conservation), le NMFS (National Marine Fisheries Service) et l'USACE (U.S Army Corps of Engineers).

Une étude préalable concernant l'efficacité des brise-lames contre l'érosion par modélisation a été publiée en 2019. L'article conclut que les modèles physiques et numériques démontrent que le projet atteindra bien ses objectifs : réduction de l'érosion côtière, maintien du trait de côte et réduction de l'énergie des vagues. Un suivi post-construction est tout de même prévu.

Une étude d'impact complète a été réalisée par le GOSR (Governor's office of storm recovery). Le chapitre 9 se concentre sur l'impact du projet sur les ressources naturelles. L'étude conclut que :

- l'augmentation de la largeur et de la stabilité des plages améliorerait les zones de frai des limules, fournirait un habitat type plage à d'autres organismes et stabiliserait les marais salés de la zone littorale.
- l'habitat rocheux à fort relief fourni par les brise-lames serait conçu pour attirer et retenir les invertébrés benthiques créateurs d'habitat et les coquillages dont les bivalves. Les caractéristiques écologiques des brise-lames faciliteraient le recrutement d'une riche communauté d'invertébrés benthiques et d'algues encroûtantes et fourniraient un abri et pour les poissons, y compris les espèces menacées et/ou en voie de disparition qui pourraient être présentes dans la baie de Raritan.

PLUS D'INFOS

[*Living Breakwaters protégera le littoral de Tottenville - YouTube*](#)

<https://www.scapestudio.com/projects/living-breakwaters/>

[*Living breakwaters project background and design | office of resilient homes & communities | governor's office of storm recovery \(ny.gov\)*](#)

[*"The Living Breakwaters PDR Efforts EConcrete Resource Analysis" by Guianina Ferrari, Shervon Stephens et al. \(cuny.edu\)*](#)

[*"The Living Breakwaters PDR Efforts: Conceptual Scheduling" by Calvin O. Walters Jr. \(cuny.edu\)*](#)

[*Environmental Docs | Office of Resilient Homes & Communities | Governor's Office of Storm Recovery \(ny.gov\)*](#)

BIBLIOGRAPHIE

Marrone, J., Zhou, S., Brashear, P., Howe, B., & Baker, S. E. (2019). Numerical and Physical Modeling to Inform Design of the LivingBreakwaters Project, Staten Island, New York. *Coastal structures*, 1044-1054. https://doi.org/10.18451/978-3-939230-64-9_105

Coastal and Social Resiliency Initiatives for Tottenville Shoreline - Chapitre 9. (2018). Dans *OFFICE OF RESILIENT HOMES & COMMUNITIES | GOVERNOR'S OFFICE OF STORM RECOVERY*. https://stormrecovery.ny.gov/sites/default/files/crp/community/documents/Chapter%209_Natural%20Resources.pdf

DIGUES ET BRISE-LAMES

DEVELOPPEMENT CORALIEN SUR LES DIGUES DU PORT DE NAHA, OKINAWA (JAPON)

Digues, brise-lames, nouvel ouvrage, adaptation changement climatique, corail, restauration

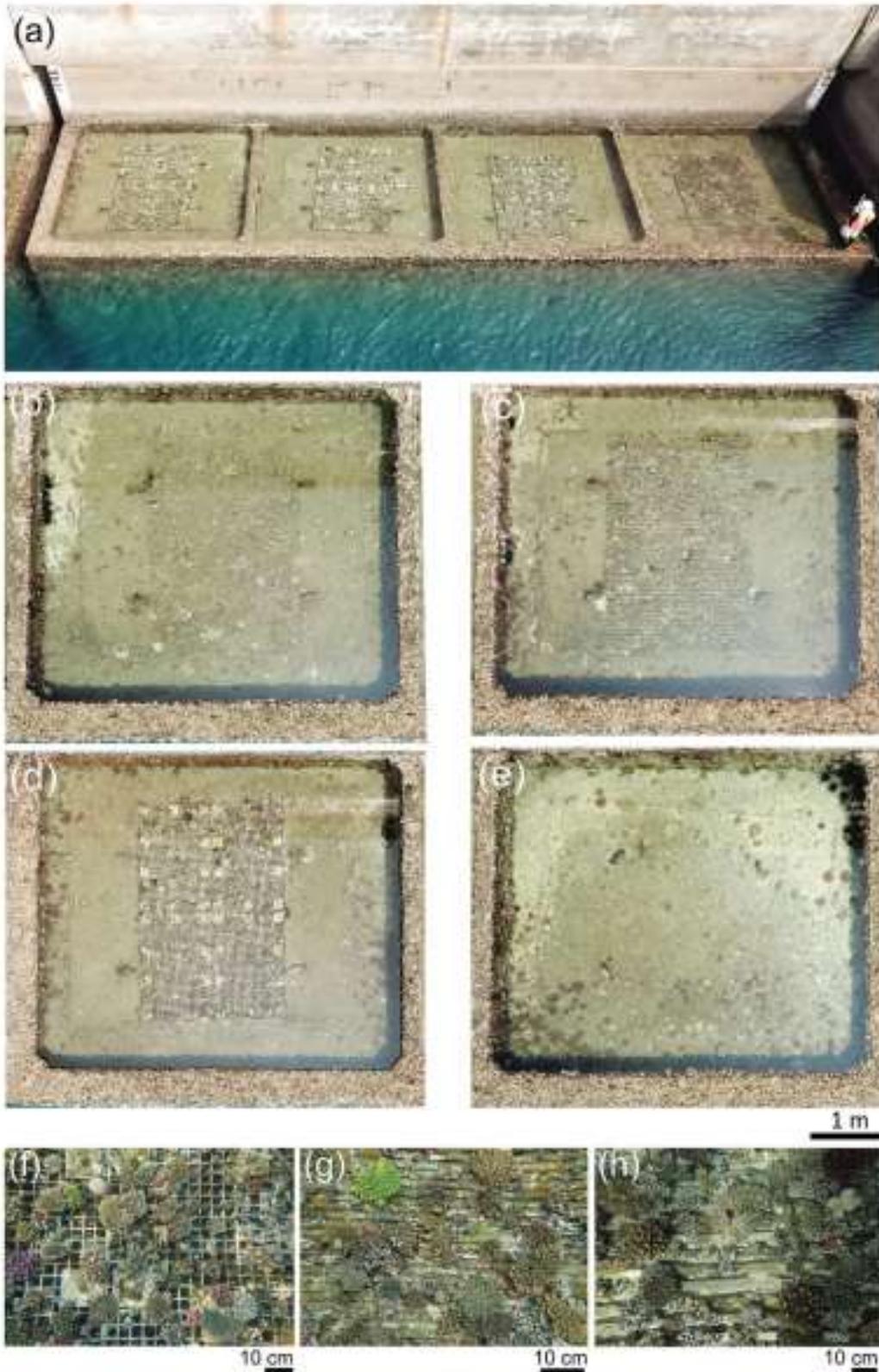


CONTEXTE

Entre 2012 et 2014, le port de Naha, province d'Okinawa au Japon, a réalisé une section de brise-lames éco-conçues de 150 mètres linéaires ciblant spécifiquement une amélioration du recrutement et de la croissance corallienne. Le reste de l'ouvrage est constitué d'une carapace de blocs manufacturés en béton sur la partie externe de l'ouvrage. La partie interne de l'ouvrage côté port se matérialise par une association de caissons béton constitués de parois verticales d'environ 5 m de hauteur qui reposent sur une couche de blocs manufacturés sur la partie interne (côté port) jusqu'à -20 m.

MESURES D'ECOCONCEPTION MISES EN ŒUVRE

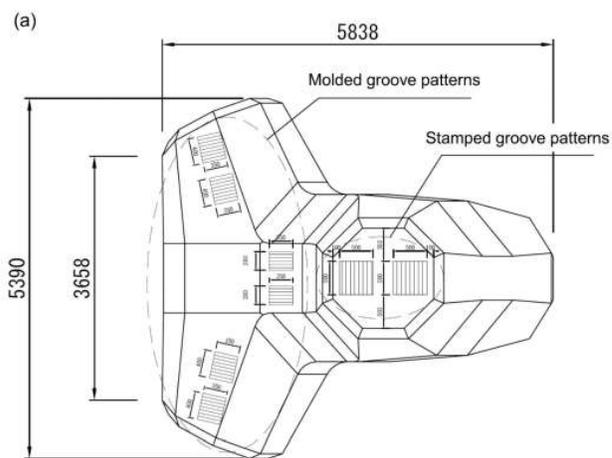
Côté port, la section de brise-lames écoconçue intègre dans sa conception des zones de rétentions d'eau, la création de petits fonds horizontaux avec une pente réduite, des parements d'ouvrages verticaux, des failles entre les caissons pour faciliter l'échange d'eau, d'oxygène et de nutriments entre la partie extérieure (côté large) et intérieure (côté port) de l'ouvrage et de blocs manufacturés en béton présentant une rugosité de surface adaptée. Les zones de rétentions d'eau font environs 400 x 450 cm pour une profondeur de 50-65cm.



Zoom sur la partie interne (côté port) écoconçue du brise-lame à différentes échelles du plus large (haut) au plus proche (bas)
 (Source : Tanaya et al., 2021)



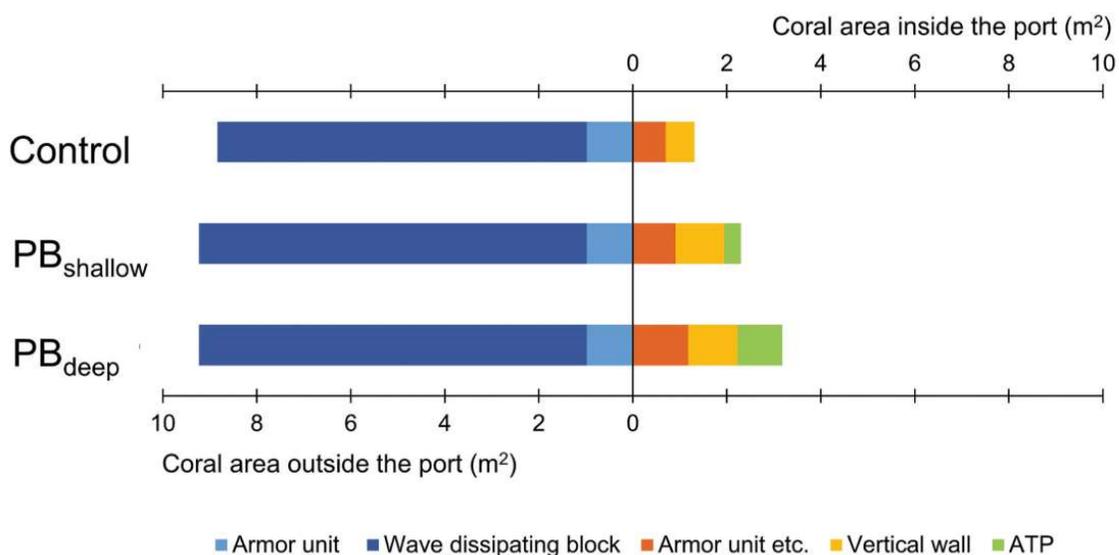
Parements d'ouvrages verticaux intégrant des rainurages adaptés au recrutement corallien installés le long des profondeurs intermédiaires de l'ouvrage depuis la surface jusqu'à -5m de profondeur (Source : Tanaya et al., 2021)



Blocs de digues manufacturés intégrant des rainurages adaptés au recrutement corallien installés en pieds d'ouvrage jusqu'à -20 m de profondeur (Source : Tanaya et al., 2021)

RESULTATS ET INDICATEURS

Le suivi de l'efficacité des mesures d'écoconception pour la faune et plus spécifiquement les coraux, montre 4-5 ans après la réalisation de l'ouvrage que la couverture corallienne est entre 10 à 20 % supérieure le long du linéaire écoconçu en comparaison au linéaire d'ouvrage témoin. Les zones de rétention d'eau (vert) les plus profonds enregistre une augmentation de l'ordre de 40%. Les parois verticales écoconçues (jaune) montrent une colonisation également supérieure en comparaison au paroi verticale témoin du caisson.



Surface corallienne mesurée sur les sections d'ouvrages témoin (control), écoconçues peu profondes (PBshallow), écoconçues profondes (PB DEEP) (Source : Tanaya et al. 2021)

L'effet de la colonisation corallienne sur d'autres fonctionnalités écologiques comme les nurseries à poissons n'a pas été étudié mais les auteurs suggèrent un effet positif lié à l'augmentation de la tridimensionnalité de l'habitat, notamment au niveau des petits fonds horizontaux.

BIBLIOGRAPHIE

Tanaya, T., Kinjo, N., Okada, W., Yasuda, M., & Kuwae, T. (2021). Improvement of the coral growth and cost effectiveness of hybrid infrastructure by an innovative breakwater design in Naha Port, Okinawa, Japan. *Coastal Engineering Journal*, 63(3), 248-262.

DIGUES ET BRISE-LAMES

ACCROISSEMENT DE LA FONCTION DE NOURRICERIE DE LA DIGUE DU LARGE DU GRAND PORT MARITIME DE MARSEILLE (FRANCE)

Digues, enrochements, Juvénile, poissons, biomimétisme, herbier, macroalgues, nourricerie, nurserie



Installations de microhabitats type Oursins dans les ouvrages en enrochements du Grand Port Maritime de Marseille (Source : Seabost)

CONTEXTE

GIREL est un programme de Recherche et Développement portant sur la Gestion des Infrastructures pour la Réhabilitation Ecologique du Littoral. Cette opération pilote ambitieuse et multi-thématiques se situe dans l'enceinte du Grand Port Maritime de Marseille, sur les sites de Fos-sur-Mer et de Marseille. GIREL vise à apprécier la capacité technique à retrouver au sein du port des fonctionnalités écologiques perdues lors de la construction des aménagements grâce à l'équipement des infrastructures type quai verticaux et digues en enrochements principalement avec des nourriceries artificielles à poissons. Les équipements développés et testés dans le cadre du pilote Eco-Récifs ciblent spécifiquement l'augmentation de la microcomplexité architecturale des digues en enrochements. En effet si ces dernières développent de très larges cavités adaptées à certaines espèces au stade adulte, elles manquent néanmoins de microhabitats du fait de leur conception. Le projet a eu lieu en 2012-2014, pour un coût total de plus d'un million d'euros.

MESURES D'ECOCONCEPTION MISES EN ŒUVRE

L'Oursin est une nourricerie bioinspiré de l'oursin diadème tropical qui abrite au sein de ses épines des juvéniles de poissons. Cette solution vise à reproduire les propriétés d'abri et de protection des individus juvéniles entre les piquants au sein d'environnements où les microhabitats sont limités. Ils sont positionnés sur des pentes d'enrochements et fixés individuellement par groupe de 20 unités. Ils peuvent s'installer par scellement ou fixation mécanique sur infrastructure ou enrochement., ou par suspension dans la colonne d'eau (sous pontons, piles, pieux, ...). 240 unités ont été installées dans le Grand Port Maritime de Marseille dans le cadre du projet GIREL.

RESULTATS ET INDICATEURS

En 2014, un premier suivi par transects en plongée et vidéos stationnaires non appâtées. Des comparaisons ont été faites entre des linéaires de digues et de quais non équipés par des nourriceries.

De nouvelles campagnes de suivi ont été effectuées par l'Ifremer en 2022 et 2023. Ces dernières montrent qu'après 9 ans, les nourriceries type Oursins sont toujours en place et restent fonctionnelles d'un point de vue écologique, supportant plusieurs fonctionnalités écologiques caractéristiques des petits fonds côtiers :

- 32 espèces de poissons ont été observées au sein des bassins portuaires du GPM.

- L'apport de nurserie type Oursins eu un effet significatif sur l'augmentation de la richesse spécifique et des abondances d'individus au stade juvéniles tant sur les digues que sur les quais.
- Contrairement aux ouvrages verticaux, les digues en enrochements ont une capacité intrinsèque à accueillir des juvéniles mais qui peut être améliorée par l'apport de nourricerie type Oursin.
- Les stades juvéniles de certaines espèces sont plus sensibles à l'apport de micro-habitats (labres, sparailon), d'autres y sont rapidement indifférents en grandissant (saupe, oblade, sar commun).
- En zone de déferlement, les nourriceries légères présentent un risque de casse au cours du temps, les secteurs protégés et/ou avec un faible fetch sont à privilégier.
- Plusieurs taxons ont été observés avec des comportements d'alimentation au sein des nourriceries se colonisant au fur et à mesure du temps (*Symphodus sp.*, *Diplodus annularis* et *Sarpa salpa*). Les Oursins offrent donc un abri mais également une zone de croissance et d'alimentation grâce à la colonisation observée au cours du temps.

Il s'agit du projet avec le plus long retour d'expériences identifié dans le cadre de ce guide pour un ouvrage portuaire éco-conçu.

PLUS D'INFOS

<https://www.polemermediterranee.com/Activites-Projets/Environnement-et-valorisation-du-littoral/GIREL>

<https://www.seaboost.fr/projet/girel/>

<https://youtu.be/xOY0XBJq8Gs>

<https://youtu.be/-YLeLSVpyb8>

BIBLIOGRAPHIE

Lapinski M. et al., (2014), Support to nursery functionalities of the port of Marseille-Fos given by artificial microhabitats, RECIF :Congress on artificial reefs : from materials to ecosystems – ESITC Caen.

Lapinski M. et al., (2017), Can the second industrial port of the Mediterranean Sea support a nursery functionality for fish? 11th CARAH | International Conference on Artificial Reefs and Related Habitats, 2017 – 11-13 September - Kuala Terengganu, MALAYSIA.

Lapinski, M., Boissery, P., Dupuy de la Grand Rive R., & Perrot, M. (2017). Innovative solutions for the enhancement of biodiversity on coastal infrastructures: case studies of artificial port nurseries and modular mooring reefs. In *Coastal and Maritime Mediterranean Conference. Edition* (Vol. 4).

DIGUES ET BRISE-LAMES

MATELAS ECOCONÇUS POUR LA PROTECTION CONTRE L'ÉROSION COTIÈRE DE SHARK RIVER ISLAND (ÉTATS-UNIS)

Littoral, matelas, protection, érosion, stabilisation, ouvrage neuf



Matelas stabilisateur écoconçu (source : econcretetech.com)

CONTEXTE

Le littoral de Floride est soumis à de multiples aléas tels que les ouragans. Pour protéger les côtes de l'érosion, il est possible de mettre en place un système de blocs de béton articulés (ACBM = Articulated Concrete Block Mattresses). Il s'agit d'une matrice de blocs de béton individuels placés ensemble pour former un revêtement résistant à l'érosion avec des caractéristiques de performance hydraulique spécifiques.

MESURE D'ÉCONCONCEPTION

ECONCRETE a adapté l'ACBM traditionnel pour que celui-ci facilite l'installation des organismes marins. Ces nouveaux matelas sont appelés ECO ACBMs. Ils sont produits de sorte à avoir une grande complexité de surface pour créer divers micro-habitats. Grâce à leurs rebords, les blocs permettent la retenue d'eau et donc le développement d'habitats intertidaux.

RESULTATS ET INDICATEURS

Le projet pilote montre que les ECO ACBMs présentent des valeurs de diversité moyenne et de richesse moyenne supérieures à celles des ACBMs témoins.

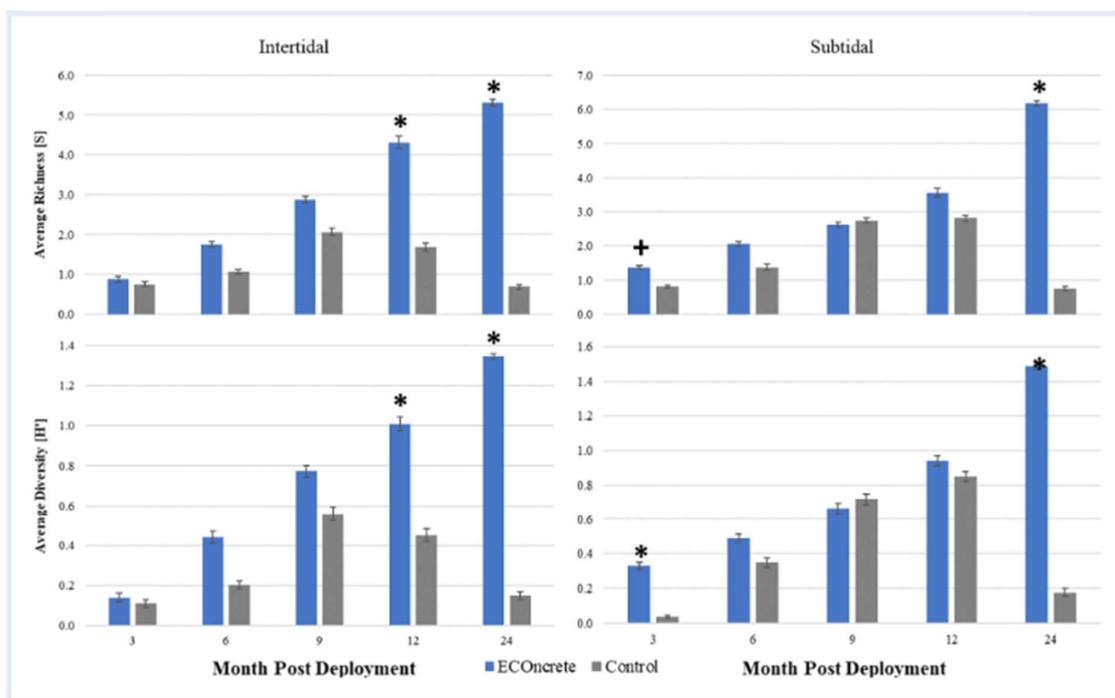


FIGURE 3 Differences in univariate parameters between ECO and control blocks at 3, 6, 9, 12, and 24 months postdeployment for intertidal (left) and subtidal (right) areas. *Significant differences ($p < 0.05$); †Marginal differences. Error bars represent the standard error

Résultats écologiques du projet pilote

L'étude conclut que cet ouvrage permet bien de remplir à la fois la fonctionnalité écologique et la fonctionnalité structurelle requise pour limiter l'érosion sur le long terme. Suite au projet pilote, 42 matelas supplémentaires ont été installés pour sécuriser le site.

PLUS D'INFOS

[Design, production, and validation of the biological and structural performance of an ecologically engineered concrete block mattress: A Nature-Inclusive Design for shoreline and offshore construction \(wiley.com\)](#)

BIBLIOGRAPHIE

Perkol-Finkel, S., and I. Sella. 2014. Ecologically active concrete for coastal and marine infrastructure: innovative matrices and designs. In: Allsop, W., Burgess, K. (Eds.), *From Sea to Shore — Meeting the Challenges of the Sea*. ICE Publishing, pp. 1139–1149.

Perkol-Finkel, S., and I. Sella. 2015. Harnessing urban coastal infrastructure for ecological enhancement. *Maritime Engineering*, 168 (MA3): 102–110.

Sella, I., and S. Perkol-Finkel. 2015. Blue is the new green — Ecological enhancement of concrete based coastal and marine infrastructure. *Ecological Engineering*, 84: 260–272. ISSN 0925-8574.

Sella, I., T. Hadary, A. Rella, B. Riegl, D. Swack, and S. Perkol-Finkel. 2021. Design, production, and validation of the biological and structural performance of an ecologically engineered concrete block mattress: A Nature-Inclusive Design for shoreline and offshore construction. *Integr. Environ. Assess. Manag.*, 2021;00: 1–15

LES DIGUES ET BRISE-LAMES

EXPERIMENTATION DE CUVETTES INTERTIDALES IMPRIMÉES EN 3D SUR LE MOLE DE PORT-HALIGUEN (BRETAGNE)

Intertidal, béton, matriçage, impression 3D, réhabilitation, ouvrage existant



Piscines intertidales en impression 3D installées à Port-Haliguen
(Source : Seaboost)

CONTEXTE

Mené en ría d'Étel entre 2017 et 2019, le projet Anticelto avait pour objectifs, d'une part, de réaliser le suivi de deux espèces invasives notamment en milieu portuaire, *Celtodoryx ciocalyptoides* et *Undaria pinnatifida*, afin de mieux connaître leurs aires de distribution et évaluer leurs impacts sur la faune marine endémique. D'autre part, il visait à proposer de premières préconisations d'une stratégie de lutte éco-respectueuse vis-à-vis de ces 2 espèces invasives. Pour ce faire, plusieurs stratégies ont été retenues dont le test de solutions et matériaux visant à favoriser le développement de communautés fixées diversifiées pour lutter contre les espèces invasives via une augmentation des mécanismes de compétition interspécifiques.

MESURES D'ÉCOCONCEPTION MISES EN ŒUVRE

En 2019, trois piscines intertidales imprimées en 3D et développant différentes zones de rétention d'eau (hauteur et volume variable) ont été installées au pieds d'un ouvrage vertical à l'intérieur du port de Port-Haliguen depuis l'avant-port jusqu'au fond du port. Des campagnes de suivi mensuel visant à évaluer la colonisation du matériau à l'extérieur et à l'intérieur des cuvettes 3D ont été réalisées en 2019 entre les mois d'avril et de septembre. En parallèle, des suivis par photoquadrats ont été menés à différents niveaux de marnage sur des dalettes tests de matériaux béton (20 x 20cm) et sur des panneaux béton de complexification plus large (190 x 80cm) et comparés aux ouvrages en place et aux cuvettes.

RESULTATS ET INDICATEURS

Les faces extérieures des cuvettes sont rapidement colonisées dès le mois d'avril par des ulves et par divers gastéropodes brouteurs associés (*Gibbula sp.* et *Littorina sp.*). La richesse spécifique moyenne est faible au mois d'avril mais double à partir de mai-juin avec l'apparition, à l'intérieur des cuvettes, d'ascidies du genre *Ciona sp.* et *Ascidia sp.* (*Ascidia mentula*) et, le long des parois extérieures, de balanes du genre *Austrominius sp.* C'est au cours des mois d'août et de septembre, que la richesse spécifique est la plus élevée avec l'apparition de *Fucus vesiculosus*, d'algues rouges, de vers tubicoles, de clavelines, d'éponges du genre *Sycon* et d'une faune vagile associée (crabes, crevettes, gobies, comatules, etc.). Les peuplements semblent toujours en cours de complexification. En comparaison avec l'ouvrage vertical actuel, la rétention d'eau a été obtenue avec succès. Différentes espèces de crustacés (crabes, crevettes...) sont observées de façon régulière à l'intérieur des cuvettes. La zonation des ceintures de macroalgues brunes a par ailleurs été augmentée vers l'étage supérieur de près d'un mètre en comparaison à l'ouvrage actuel. Les tests sur les panneaux béton ont mis en évidence l'intérêt de la porosité des matériaux pour ces mêmes espèces de fucales.

PLUS D'INFOS

[Anticelto : Ingénierie écologique en mer à marée \(Morbihan\)](#)

BIBLIOGRAPHIE

Sauleau, P., Lapinski, M., & Perrot, M. (2019). Rapport d'étude Anticelto, 78 p. Appel à projet 2017 façade Manche Atlantique, Agence Française pour la Biodiversité.

Lapinski, M., Perrot, M., & Sauleau, P. (2022). Can port concrete infrastructures be optimized to promote algal and macrofaunal colonisation in the marine intertidal zone? Case study of Port Haliguen (Brittany, France). In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 1245, No. 1, p. 012001). IOP Publishing.

MOUILLAGES ET LESTS

ECOCONCEPTION DES CORPS-MORTS DE BALISAGE DES 300M DU CAP D'AGDE (HERAULT)

Balisage, Mouillage, Juvénile, poissons, biomimétisme, nourricerie, nurserie



Lest de balisage des 300 m éco-conçu imprimé en 3D (Source : Aire Marine Protégée Cap Agathoise, Seabooast)

CONTEXTE

Pour délimiter la frontière entre zone de navigation des bateaux et zone de baignades, des bouées de balisage sont mises en flottaison à 300 mètres du littoral au printemps et retirées l'hiver. Ces bouées sont traditionnellement amarrées sur des lests en bétons (coulé dans des pneus) et se déplacent l'hiver pendant les coups de mer entraînant une dégradation des fonds sous-marins, rocheux et herbiers de posidonies. Chaque année, certains de ces lests se retrouvent sur la plage ou demeurent introuvables, de nouveaux sont ainsi immergées pour les remplacer. Ces lests peu respectueux de l'environnement sont destinés à être remplacés petit à petit par des corps morts éco-conçus qui sont stables face aux houles hivernales et qui comportent une vraie valeur d'habitats pour la biodiversité locale : c'est le cas du balisage des 300 mètres du Cap d'Agde et de Velras.

Ainsi, afin de répondre au besoin réglementaire de ce balisage, tout en préservant les fonds marins de l'impact mécanique important, 6 éco-lests expérimentaux ont été immergées et suivie en 2017. Ces éco-lests étaient composés d'une partie lest et d'une partie habitat ciblant les juvéniles des espèces de poissons côtier.

Fort de ce retour d'expérience, 32 éco-lests nommés XReefs ont été immergés en 2019 dans le cadre du programme Récif'Lab. Localisés le long du littoral agathois, ces éco-lests ont un objectif triple, à savoir : 1) maintenir efficacement le balisage réglementaire des 300 mètres durant la saison estivale tout en 2) agissant pour la préservation de l'environnement marin en évitant les dégradations causées par les lests utilisés habituellement et 3) en proposant un habitat pour les juvéniles de poissons côtiers.

MESURES D'ÉCOCONCEPTION MISES EN ŒUVRE

Les XReefs ont été conçus par la technologie d'impression 3D béton. Cette technique permet de répliquer à l'infini un même design et augmente les possibilités de réaliser des formes complexes impossibles à réaliser avec un moule. Il est ainsi possible de créer une multitude de formes et d'abris pour la faune et la flore sous-marine.

Le remplissage du socle de ce récif artificiel a été fait à partir de béton "bas carbone". Ce béton a la particularité d'utiliser du ciment pour lequel des déchets issus de l'industrie sidérurgique ont été introduit durant sa fabrication. Cette technique permet de diminuer de 50% à 70% les émissions de CO₂ lors de la fabrication du ciment.

Ils ont aussi été conçus pour répondre aux contraintes hydrodynamiques dans ces petits fonds. La taille, le design et le poids de ces éco-lests ont été dimensionnés pour faire face aux plus fortes houles pour une période de 30 ans. Des tests en canal à houle ont été réalisés auprès de l'École Centrale de Marseille.

RÉSULTATS ET INDICATEURS

Afin de suivre l'efficacité de ces aménagements, un suivi de paramètres physiques et biologiques a été effectuée par les agents de l'Aire Marine Protégée de la côte agathoise durant les 2 années qui ont suivis l'immersion. Les analyses suivantes sont réalisées afin d'interpréter les mesures faites sur la colonisation des XReefs et son évolution : richesse spécifique ; abondance totale ; abondance par module.

Rapidement après l'immersion, des espèces pionnières d'algues et d'invertébrés sessiles ont commencé à coloniser la surface de ces éco-lests, avec un recouvrement total de la surface de béton dans l'année. Puis la faune ichthyique et les macro-invertébrés mobiles ont rapidement pris possession des lieux. Sur l'intégralité des suivis, 41 espèces de poissons ont été dénombrées ainsi que 9 espèces de macro-invertébrés mobiles.

Ci-dessous, une série de figures et de photographies permet de mieux apprécier la diversité mise en évidence sur les XReefs.



Schéma de la répartition d'espèces au niveau des XReefs (gauche) / Banc de juvéniles de rougets près d'un module (Source : Seabooost)

Les suivis ont également mis en évidence que l'abondance des espèces est fortement influencée par l'ensablement des modules. En effet, sur l'intégralité du suivi, l'abondance moyenne est globalement stable, sauf pour le secteur Est lors de la deuxième année où les phénomènes d'ensablement diminuent la disponibilité en habitats de ces éco-lests.

BIBLIOGRAPHIE

Lapinski, M., Boissery, P., Dupuy de la Grand Rive R., & Perrot, M. (2017). Innovative solutions for the enhancement of biodiversity on coastal infrastructures: case studies of artificial port nurseries and modular mooring reefs. In *Coastal and Maritime Mediterranean Conference. Edition* (Vol. 4).

ORGANISMES CONSULTÉS

Plusieurs organismes ont été consultés pour la réalisation de ce document, avec en priorité des maîtres d'ouvrage et gestionnaires de port, des entreprises impliquées dans le développement et le déploiement de solutions d'écoconception d'ouvrages portuaires et enfin des organismes techniques et scientifiques. La liste des organismes consultés figure ci-après.

Ports

- Grand port maritime de Dunkerque
- Grand port maritime de Nantes Saint-Nazaire
- Grand port maritime de La Rochelle
- Grand port maritime de Bordeaux
- Grand port maritime de Marseille
- Grand port maritime de La Réunion
- Grand port maritime de Guadeloupe
- Grand port maritime de Guyane
- Service portuaire de Toulon Provence Métropole
- Port de Sète

Organismes techniques, scientifiques et institutionnels

- Ifremer
- Office Français de la Biodiversité
- Association Internationale des Villes Portuaires
- Direction générale de l'aménagement, du logement et de la nature du Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires

Entreprises

- Vinci Construction Maritime et Fluviale
- Bouygues Travaux Publics
- ETPO
- Ecocéan
- Suez consulting
- Econcrete

BIBLIOGRAPHIE

ADEME, Rethore, O., Hugrel, C., Palluau M., Bleu Safran, Audard G., Osset, P., Solinnen. (2020). Guide d'aide à la sélection des méthodes d'évaluation environnementale. 53 pp.

Alligand G., Bigard C., Crepin L., Khallouki D., Legendre T., Tressol A., (2023). Définition des mesures « éviter, réduire, compenser » relatives au milieu marin, Commissariat général au développement durable, CGEDD, 80 pp.

Andreadakis, A., Bigard, C., Delille, N., Sarrazin, F., & Schwab, T. (2021). Approche standardisée du dimensionnement de la compensation écologique. *Guide de mise en œuvre, Paris, CGDD (Commissariat Général au Développement Durable)*.

CETMEF, L. (2008). Guide d'utilisation du béton en site maritime.

d'Azur, D. P. A. C (2018). Guide cadre Eval_Impact. *Impacts des projets d'activités et d'aménagements en milieu marin méditerranéen. Recommandations des services instructeurs. Fascicule 2 - Etapes clés de l'évaluation environnementale et analyse des impacts sur les espèces et habitats marins*

De Larrard, F., & Colina, H. (2018). Le béton recyclé. *Ouvrages Scientifiques*. 792 pp.

Fremont A., (2019). Le transport maritime depuis 1945 : facteur clé de la mondialisation. *Entreprises et Histoire*, 94 pp 16-29.

Gudéfin A., Lenfant P., Fonbonne S., Boissery P. (2022). Guide technique - Evaluation des pilotes expérimentaux et des travaux de restauration écologique, cas des nurseries portuaires. ICO Solutions / DRIVER / Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, 54p.

Mahevas, S. (2009). Simulation de la dynamique de pêche: modélisation, complexité et incertitude. 52 pp.

PIANC. (2014). Sustainable Ports – A guide for port authorities

PIANC. (2019). Carbon Management for Port and Navigation Infrastructure.

PIANC. (2020). Climate Change Adaptation Planning for Ports and Inland Waterways.

Pioch, S., & Souche, J. C. (2021). L'écoconception des infrastructures maritimes: Vers un aménagement intégré à l'environnement. ISTE Group.

Rethore O., ADEME, Audard G., Osset P., Solinnen, Palluau M., Hugrel C., Bleu Safran. (2021). Empreinte projet : évaluer l'empreinte environnementale d'un projet. Guide méthodologique 133pp.

Saravia de los Reyes, R., Fernández-Sánchez, G., Esteban, M. D., & Rodríguez, R. R. (2020). Carbon footprint of a port infrastructure from a life cycle approach. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(20), 7414.

Schaefer, N., Bishop, M. J., Foster-Thorpe, C., Hoey, A. S., Mayer-Pinto, M., Sherman, C. D. H., ... & Dafforn, K. A. (2023). Ecological engineering of marine infrastructure for biosecurity-Phase 3. Report prepared for the Department of Agriculture, Fisheries and Forestry. 237pp.

Sutton-Grier, A. E., Wowk, K., & Bamford, H. (2015). Future of our coasts: The potential for natural and hybrid infrastructure to enhance the resilience of our coastal communities, economies and ecosystems. *Environmental Science & Policy*, 51, 137-148.

van Eekelen, E., & Bouw, M. (Eds.). (2021). *Building with nature: creating, implementing, and upscaling nature-based solutions*. nai010 publishers.

Wiecek, D. (2009). Environmentally friendly seawalls: A guide to improving the environmental value of seawalls and seawall-lined foreshores in estuaries. *New South Wales, Australia*.

Webographie

La Stratégie Nationale Portuaire (SNP) : <https://www.ecologie.gouv.fr/strategie-nationale-portuaire-snp>

La Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin : <https://dcsmm.milieu marin france.fr/>

Le Plan National Energie Climat :

https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/2019%2002%2014%20projet%20de%20PNIEC%20France_Version%20consolidee.pdf

La Stratégie Nationale Bas Carbone : <https://www.ecologie.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc>

Emission des gaz à effet de serre de 1990 à 2022 (Insee) : <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2015759>

La Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte : <https://www.ecologie.gouv.fr/loi-transition-energetique-croissance-verte>

La Stratégie Nationale de Recherche Énergétique :

<https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/SNRE%20vf%20d%C3%A9c%202016.pdf>

Synthèse du 6^e rapport de synthèse du GIEC : <https://www.ecologie.gouv.fr/publication-du-6e-rapport-synthese-du-giec>

MEDAM – Observatoire des aménagements gagnés sur le domaine marin en Méditerranée : <http://www.medam.org/index.php/fr/home/123-medam-le-bilan/119-lineaire-artificialise-par-les-amenagements-gagnes-sur-la-mer>

L'écoconception des produits : <https://www.ecologie.gouv.fr/leco-conception-des-produits>

Publications du Centre National pour l'Ecoconception : <https://www.eco-conception.fr/library/1-les-productions-du-pole-eco-conception/>

Publications de l'UMR MCD (CEREMA) : Matériaux pour une construction durable :

<https://www.cerema.fr/fr/innovation-recherche/recherche/equipes/umr-mcd-materiaux-construction-durable>

La certification ECOPORTS : <https://www.ecoport.com/>

La certification Ports propres et actifs en Biodiversité :

<https://certification.afnor.org/environnement/certification-afaq-ports-propres-ports-actifs-biodiversite>



**MINISTÈRE
CHARGÉ
DES TRANSPORTS**

*Liberté
Égalité
Fraternité*
