HAL
open science

# L'écoconception maritime : une révolution pour les maitres d'ouvrages

Marie Salgues, Sylvain Pioch, Jean-Claude Souche, Klaartje de Weerdt

## To cite this version:

Marie Salgues, Sylvain Pioch, Jean-Claude Souche, Klaartje de Weerdt. L'écoconception maritime : une révolution pour les maitres d'ouvrages. Revue Paralia, 2020, 13, pp.n01.1-n01.18. 10.5150/revue-paralia.2020.n01 . hal-02506978

**HAL Id: hal-02506978**

**https://imt-mines-ales.hal.science/hal-02506978**

Submitted on 7 May 2020

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

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

# L'écoconception maritime : une révolution pour les maitres d'ouvrages

**Marie SALGUES [1], Sylvain PIOCH [2],**
**Jean-Claude SOUCHE [1], Klaartje DE WEERDT [3]**

1. DMS – Durabilité des Matériaux et Structures – LMGC, IMT Mines Alès, Univ Montpellier, CNRS, Alès, France.
   *jean-claude.souche@mines-ales.fr*
2. UMR 5175 CEFE, Université Paul Valéry, Université de Montpellier, SupAgro, EPHE, Laboratoire Biologie Ecologie Environnement, Route de Mende, 34000 Montpellier, France.
3. Norwegian University of Science and Technology NTNU, Trondheim, Norway.

**Résumé :**
Aujourd'hui, les évolutions technologiques pour préserver l'écosystème planétaire ne sont pas à la hauteur des enjeux, malgré la prise de conscience réelle des aménageurs publics et privés qui élaborent des projets plus respectueux de l'environnement, dans une optique de développement durable. L'une des voies d'amélioration est l'écoconception des projets de génie civil maritime qui permet de relier l'ouvrage et ses matériaux constitutifs à l'écosystème environnant. Elle favorise l'intégration des ouvrages aux écosystèmes pour développer la biodiversité, dans un projet inscrit sur un territoire au capital naturel à gérer et à préserver. Les exigences de résistance et de durabilité doivent être enrichies de gains environnementaux, qualifiables et quantifiables par les politiques publiques.
Dans cette démarche, la triple relation écosystème – ouvrages – matériaux des ouvrages est un paramètre clé à considérer. Le couplage entre l'approche performantielle de formulation des bétons et une méthodologie d'écoconception serait une réponse innovante et systémique à la problématique.

## 1. Introduction

Le dernier rapport de la plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES, 2019) est très clair, les trois-quarts de l'environnement planétaire sont altérés par l'activité humaine. Depuis 1900, les populations d'espèces locales dans la plupart des grands habitats terrestres ont diminué d'au moins 20 %. Mais pire, ces chiffres sont catastrophiques en mer où plus de 40 % des populations d'espèces d'amphibiens, 33 % de celles des récifs coralliens et, au total, plus d'un tiers des populations de mammifères marins ont baissé. Les études du centre de recherche pour l'étude et l'éducation des conditions de vie (CREDOC, 2009) concluaient, dès 2009, que "l'activité humaine exerce des pressions si fortes sur l'environnement, que la capacité des écosystèmes de la planète à soutenir les générations futures n'est plus assurée". Le capital naturel de la Terre s'en trouve considérablement réduit, empruntant aux générations futures nos modes de vie prédateurs de nature (MEA, 2005). Pour l'IPBES (2019), les 5 principaux facteurs d'érosion de la biodiversité sont le changement d'utilisation des terres avec l'agriculture (1/3 des surfaces terrestres) ou l'artificialisation (urbanisation, infrastructures linéaires, mines et industries), l'exploitation des ressources naturelles (pêche, bois des forêts…), le changement climatique, la pollution et l'introduction d'espèces invasives. Mais parmi ces 5 facteurs, dont tous sont de sources anthropiques, le pire est celui lié l'artificialisation et au changement d'utilisation des terres, responsables de 25 à 30% des pressions directes sur les écosystèmes. En effet, au niveau mondial la superficie des zones urbaines a doublé depuis 1992, et pas moins de 1,2 million de km² seront urbanisés d'ici à 2030 (hors infrastructures linéaires, mines et industries), soit +185% depuis 2010 (SETO *et al*. 2012). Avec 11 milliards d'êtres humains annoncés pour 2100, il est évident que les pressions sur les milieux naturels vont s'accroitre.

Toutefois, avec des actions appropriées pour les cinquante prochaines années, la dégradation des écosystèmes, et des services rendus à l'homme pour son bien-être, n'est pas irréversible, d'après les experts de l'IPBES (2019). Pourtant, sur le sujet de l'artificialisation, objet de cet article, les efforts pour inventer de nouveaux modes d'aménagement ne sont pas à la hauteur des enjeux, même si certains aménageurs publics ou privés prennent conscience de la situation et tentent de concevoir des projets respectueux de l'environnement (PIANC WG 2011), dans une optique de développement désirable (AGROPOLIS International 2019).

L'une des voies pour diminuer l'impact négatif des aménagements humains en mer pourrait être l'écoconception des ouvrages d'arts maritimes (LACROIX & PIOCH, 2011 ; PIOCH *et al*., 2011 ; DE VRIEND & VAN KONINGSVELD, 2012). L'écoconception est le fait de concevoir techniquement des projets en considérant également des préoccupations écologiques globales et locales d'après la définition de Syntec-ingénierie en 2010. Cette démarche de conception des ouvrages vise à utiliser des pratiques d'éco-ingénierie pour concevoir des projets d'infrastructures côtières. La

finalité est de créer des fonctions écologiques spécifiques aux côtés des fonctions technico-économiques de ces ouvrages.

La difficulté réside dans la nécessité d'intégrer ces concepts d'éco-ingénierie dès les premières phases de la conception d'un projet (opportunité ou faisabilité). Bien que des pertes écologiques soient inhérentes à tout projet de construction, et que la priorité reste à l'évitement de tout impact humain, l'écoconception vise à réduire ces pertes dès les choix techniques de conception, en priorité et sans miser toute la stratégie de validation réglementaire d'un projet sur la compensation des impacts écologiques. En effet, considérer un projet uniquement en fonction de la quantité de mesures compensatoires à réaliser revient à une négociation sur le niveau de destruction de la nature, et non une réflexion sur des nouvelles formes d'aménagement (écoconception) pour un co-développement entre l'homme et le milieu naturel, qui nous est vital, rappelons-le. L'écoconception vise ainsi à stimuler une nouvelle approche réflexive de génie civil, vers un "éco-génie civil". Cela nécessite une valorisation intrinsèque de la nature dans le but de réduire les pertes écologiques sur les espèces, les habitats et les fonctionnalités écologiques préexistantes au projet d'aménagement (PIOCH *et al*., 2018). Soulignons qu'il s'agit d'une démarche de restauration écologique et non d'une artificialisation des milieux naturels qui viserait la création d'une nouvelle "nature", aux fonctionnalités écologiques non préexistante, ni viable en dehors de toute intervention humaine d'entretien.

Il s'agit pour cela de connaitre les processus naturels de colonisation par des organismes vivants marins, sur des types d'habitats naturels comme sur des ouvrages artificiels (GIRAUDEL *et al*., 2014). Il devient dès lors prioritaire, dans un double objectif de protection de l'environnement et de l'ouvrage, de comprendre également les mécanismes de peuplement qui pourraient altérer ou protéger l'ouvrage mais également le vivant qui le colonise (BAINE, 2001 ; AZEVEDO *et al*., 2006 ; BULLERI & CHAPMAN, 2010 ; SOUCHE *et al*., 2016). La bio-colonisation des ouvrages de génie civil dans le milieu marin pourrait modifier leur durabilité ainsi que porter atteinte au milieu naturel ; par exemple en étant le support d'espèces invasives, profitant de substrats "jeunes" diminuant la compétition avec les espèces natives, locales implantées sur des substrats plus anciens (MACURA *et al*., 2019).

La maîtrise de la durée de vie des bétons est un enjeu économique majeur pour les investisseurs, les gestionnaires et les usagers. Mais les adjuvants, les matériaux ou les types de surfaces offerts à la colonisation pourraient également nuire à la biodiversité. L'approche performantielle est une démarche innovante, globale et prédictive de la durabilité des structures en béton et permet d'aborder les exigences liées au matériau béton vis-à-vis de sa durée de vie tout comme les exigences d'amélioration de la colonisation.

A chaque nouveau projet, se pose la question de la diminution des impacts négatifs sur la biodiversité (JACOB *et al*., 2015). L'évaluation environnementale repose sur 3 étapes

d'une séquence hiérarchique visant à Eviter, sinon Réduire et enfin Compenser les impacts significatifs sur la biodiversité (séquence ERC). Cette approche suscite de nombreuses controverses. Les recommandations sur la bonne application de la séquence ERC publiées en 2012 (Doctrine) et 2013 (Lignes directrices), par le ministère français en charge de l'environnement, ont été complétées par la proposition du principe de "pas perte nette" (PPN) de biodiversité défini par la loi pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages (RBNP, 8 août 2016).

Cependant les acteurs publics et privés concernés sont mal armés pour satisfaire l'ambition de la doctrine française ERC avec une finalité de PPN, et plus encore de la question de la compensation (JACOB, 2015). En particulier les services instructeurs sont trop rarement en capacité d'opposer des arguments techniques et scientifiques aux propositions des maîtres d'ouvrage. La qualité de ces propositions en termes de résultat net pour la biodiversité en souffre, notamment en milieu marin où une récente étude menée par Jacob (2017) montre que sur 55 études d'impacts réalisées entre 2000 et 2015, seules 13 mesures compensatoires ont été préconisées dans les arrêtés d'autorisation, mais aucune réalisée après vérification sur le terrain. Les travaux de WEISSGERBER *et al*. (2019) montrent que dans 80 % des cas, les mesures de compensation ne permettent pas d'éviter une perte de biodiversité après la réalisation d'un projet. Par ailleurs, les exigences concernant la faisabilité juridique (maîtrise foncière) et financière (garanties) ou la pérennité (durées d'engagement) restent très hétérogènes et peu lisibles (CALVET *et al*., 2019).

Le risque est de conclure à l'échec du dispositif pour revenir à une situation antérieure : des projets destructeurs de la nature, mais sans réduction, ni compensation effective. Soulignons que cette éventualité ne serait pas soutenable par le milieu marin tellement le mode de vie consumériste actuel de l'homme, prédateur de ressources naturelles conduit à la destruction massive des écosystèmes et à négation des pertes comme de leurs conséquences.

De toute évidence, les aménageurs publics et privés se retrouvent donc confrontés à trois principaux challenges, qui sont sources d'innovation et qui ont pour but la réconciliation homme / nature, lors de la conception des projets maritimes :

- Concilier deux approches telles que l'écoconception et l'approche performantielle au sein d'un même projet,
- S'insérer dans les contexte normatifs de la construction des infrastructures et de la réglementation environnementale, dans un objectif de PPN de biodiversité,
- Associer et expliquer au public les efforts faits pour préserver l'environnement et diminuer l'impact du projet, car la société, les jeunes générations en particulier, est de plus en plus critique et soucieuse de l'environnement.

Dans cet article, nous discutons de nouvelles pistes pour répondre à ces trois challenges, en diminuant les pertes liées au projet d'aménagement, via une approche d'écoconception maritime. Nous concentrerons notre propos au niveau du design et du

matériau béton, selon l'approche performantielle qui garantit la durabilité et l'amélioration de la colonisation. Il sera mis en évidence qu'un matériau de construction peut être déterminé pour respecter des exigences de qualité de réalisation et des objectifs environnementaux.
En effet, un béton formulé conformément aux spécifications de l'approche performantielle pourrait répondre simultanément aux fonctions techniques et environnementales auxquelles un ouvrage éco-conçu doit répondre. Finalement, nous détaillerons les attentes des maîtres d'ouvrage afin de faciliter des prises de décision vertueuses attendues socialement, pour diminuer les impacts négatifs de futurs projets maritimes.

## 2. Approches pour la conception d'ouvrages éco-conçus et intégrés au milieu marin

Le matériau béton, largement utilisé pour les ouvrages à la mer, est reconnu comme résistant, durable et favorable à l'installation de la biodiversité. En effet, une fois immergé, il subit une colonisation spontanée par des organismes opportunistes, ubiquistes, primo-colonisateurs : biofilm bactérien suivi d'algues unicellulaires puis avec le temps d'organismes plus complexes (bivalves, vers en tubes, tuniciers, hydraires …) (CRESSON *et al*., 2014). Le cycle et la vitesse de colonisation vont dépendre des conditions environnementales comme de la nature du substrat (composition, physico-chimie du support…).
Bien que les substrats à base de matériaux cimentaires présentent deux inconvénients : un pH basique qui semblerait défavorable pour le développement de biotes (PERKOL-FINKEL & SELLA, 2014) ainsi qu'un possible relargage de traces de métaux lourds ou autres composants dans le milieu (HILLIER *et al*., 1999), ils sont usuellement utilisés comme solution pour la conception d'ouvrages classiques. Le relargage potentiel d'éléments nocifs dans le milieu marin est à relativiser d'après les résultats de Souche et al. (2019).
La formulation d'un béton durable, pouvant également être le support de la biodiversité, nécessite une démarche de conception novatrice qui doit considérer simultanément les concepts d'écoconception maritime définis par Pioch et al. (2018) et d'approche performantielle (LINGER *et al*., 2014).

### 2.1 Démarche de conception usuelle

Dans la démarche de conception usuelle, un projet commence par la définition du besoin par le Maître d'ouvrage au travers du programme de l'aménagement. En réponse, le concepteur propose une solution architecturale et technique au projet dont il doit vérifier la faisabilité, à la fois sur les plans technique, financier et réglementaire.
Par ailleurs, l'aménagement doit s'intégrer dans son environnement, en étant respectueux de l'Homme, des paysages et des milieux naturels, soucieux d'économiser l'espace, d'épargner les espèces, de limiter la pollution de l'eau, de l'air ou des sols (Art

L. 122-1. du Code de l'Environnement en respect de la Directive européenne du 27 juin 1985). Pour vérifier ces exigences un bureau d'études environnementales doit réaliser une étude d'impact (étude d'incidence sur l'environnement) qui est une étape essentielle de l'évaluation environnementale des travaux d'aménagement réalisés lors de l'avant-projet. Cette démarche est destinée à prendre en compte des préoccupations socio-environnementales dès la conception d'un aménagement par son promoteur, à éclairer les services appelés à décider de l'opportunité d'en autoriser la réalisation et à informer le public en le faisant participer à la prise de décision (Art L. 122-1 du CE).
Ces études socio-environnementales complémentaires sont souvent menées par des acteurs différents qui, s'ils se complètent, ne proposent pas de vision intégrée de l'aménagement (saucissonnages des études car menées par des experts très spécialisés).
La conception se termine par la définition du projet qui détaille la qualité à atteindre, le coût et les délais de réalisation. Les spécifications techniques relatives aux matériaux de construction, qui serviront de base aux contrats de travaux des entreprises pour la réalisation de l'ouvrage, y sont définies.
Par exemple, pour le matériau béton, la norme (NF EN 206/CN, 2014) traduit une démarche prescriptive basée sur une obligation de moyens relative à la résistance et la durabilité du béton. Les exigences de cette norme sont fonction de l'agressivité de l'environnement de l'ouvrage et de sa durée d'utilisation. Les valeurs limites sont principalement liées à la composition du béton : dosage minimal en ciment, quantité d'eau, résistance à la compression, etc…
Cette approche se concentre sur la composition du liant et réduit l'utilisation des additions. En effet elle ne prend pas en compte certains paramètres pertinents du point de vue de la durabilité, de qualifier certaines compositions de bétons (bétons composés par exemple) pourtant techniquement intéressantes et à coût égal. La normalisation NF EN permet de corriger ces manquements, en faisant appel à la notion d'approche performantielle pour la durabilité.

### 2.2 La prise en compte de la durabilité, l'approche performantielle pour le béton

L'approche performantielle place la durabilité de l'ouvrage au cœur des préoccupations du concepteur. Elle est rendue possible grâce aux articles 5.2.5.3 et 5.3.3 de la norme EN 206-1. Cette nouvelle approche fixe les exigences de durabilité à atteindre en fonction de l'agressivité du milieu marin, par exemple. C'est une méthodologie multicritères, globale, scientifiquement fondée, et innovante pour la spécification, l'évaluation et la prédiction de la durabilité des structures en béton armé et précontraint (Figure 1).
Elle est fondée sur la notion d'indicateurs de durabilité associés à des critères performantiels et des valeurs seuils à respecter. La bonne connaissance des phénomènes de dégradation associée à la compréhension des différents mécanismes physico-

chimiques a autorisé la mise en place de cette méthodologie qui est adaptée aux exigences de résistance envers les agressions subies par le matériau.
Cette approche a été largement utilisée pour des grands ouvrages de génie civil (e.g. viaduc de Millau, pont Vasco de Gama sur le Tage). L'approche performantielle nécessite des changements importants dans les relations entre les acteurs de la construction, un renforcement des responsabilités de chacun et une anticipation de la problématique matériaux lors de la conception de l'aménagement. Elle répond à l'enjeu croissant de durabilité pour le Maître d'ouvrage car elle offre au concepteur une plus grande variété de solutions. En retour elle stimule l'innovation car elle donne une plus grande liberté pour la formulation.

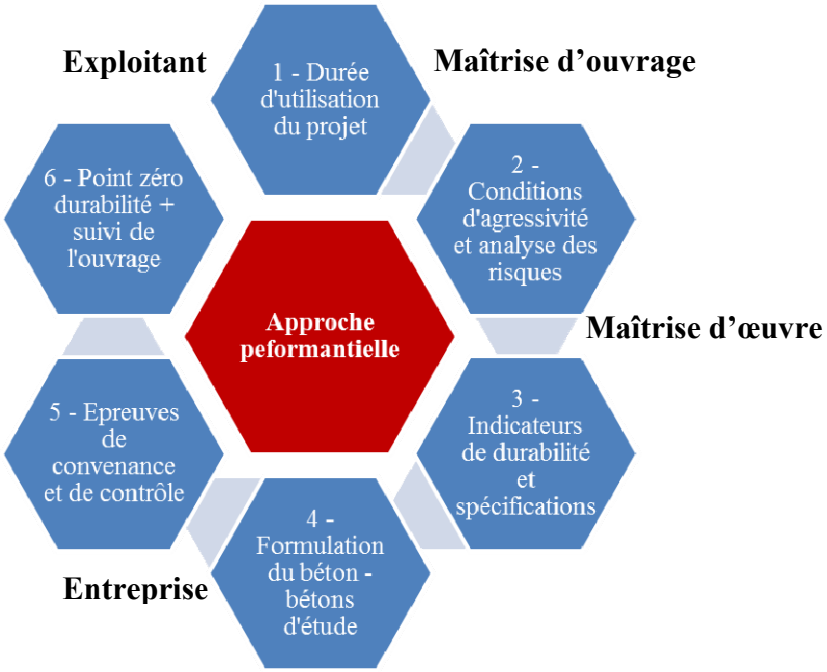


*Figure 1. Méthodologie de l'approche performantielle d'après (CIMBETON).*

La démarche performantielle permet donc de prendre en compte la globalité des aspects technico-économiques d'un ouvrage au sein de son environnement et de maîtriser la durabilité du matériau. En revanche, cette approche qui traite de la durabilité du matériau béton ne s'intéresse pas à l'intégration environnementale des ouvrages, qui est un des défis d'avenir de l'aménagement en milieu marin.

2.3 Les objectifs environnementaux et l'écoconception

L'écoconception est une démarche innovante, une modernisation dans la conception d'un ouvrage classique. Elle consiste à intégrer des objectifs environnementaux au cœur de la définition technique d'un aménagement pour que celui-ci assure des fonctions utiles pour la biodiversité, en complément de la fonction sociotechnique première. La

finalité est d'intégrer, autant qu'améliorer, le projet et son évolution dans le milieu naturel, avec une priorité : le développement d'ouvrages immergés favorables aux écosystèmes.

Au niveau des recherches en écoconception le Japon, la Corée et les États-Unis sont les pays leader, notamment du point de vue des matériaux utilisés (PIOCH *et al*., 2011). Leurs recherches portent sur de nouveaux critères permettant d'apprécier la valeur des matériaux immergés d'ordres biologiques, ce qui comprend la qualité du substrat offert pour la faune et la flore sessile et l'inertie vis-à-vis du milieu environnant.

Après des expérimentations au Japon et en Corée dans les années 70/80 associant béton et granulats coquilliers marins (moules, huitres, etc.), les Etats Unis ont orienté leurs travaux sur la rugosité et la mise en œuvre des ouvrages (LUCKHURST & LUCKHURST, 1978).

A l'échelle du matériau, l'incorporation de coquilles dans des matériaux cimentaires a fait l'objet de plusieurs étude récentes (YOON et al., 2004 ; YANG et al., 2010 ; WANG et al., 2011 ; ROBILLARD-ENGELAERE, 2012 ; NGUYEN, 2014 ; SAFI et al., 2015). Bien que, le suivi en plongés depuis 2009 de récifs artificiels en béton coquiller (PIOCH & MONIER, 2009) ait permis de valider le bon comportement de ce type de bio-béton en conditions naturelles (i)la bonne colonisation dse surfaces, (ii)occupation par des espèces halieutiques cibles (bars, daurades, sars, congres), (iii) rôle fonctionnel de ces habitats (abris, nourricerie, site de reproduction pour le bar et les sparidés) (BLOUET et al. 2014), il est démontré que ce type de béton est moins durable qu'un béton standard. L'emploi de granulats coquillers, pourtant avec des taux de substitution moyens (≈20%) amène une forte augmentation de l'air entraîné, conduisant à une chute sensible des résistances mécaniques et à une forte augmentation de la porosité, préjudiciable pour la durabilité du matériau sans pour autant augmenter significativement la colonisation par les organismes vivants (CUADRADO-RICA *et al*., 2015).

L'acier a également été utilisé en sa qualité de conducteur de faibles courants électriques imposés, afin de faire précipiter à sa surface des cristaux formant des roches bio-concrétionnées par électrolyse d'ions dissous dans l'eau de mer (HILBERTZ, 1978). Ce matériau naturel baptisé "bio-rocks©" ou "géocorail©", selon le process utilisé, peut favoriser l'implantation de coraux recherchant des substrats calcaires par exemple. Il est intéressant de noter que la majorité des ouvrages destinés à améliorer la biodiversité ont été conçus sur la base de travaux liés aux matériaux et à leur mise en œuvre tridimensionnelle, vers des états de surface biocompatibles (LACROIX & PIOCH, 2011 ; PERKOL-FINKEL & SELLA, 2014 ; SOUCHE et al., 2019).

En Europe, l'effet des micro-organismes est en général perçu comme une détérioration probable de l'ouvrage (cas des ouvrages d'assainissement ou de certains ouvrages agricoles) contre laquelle il faut se prémunir. Il n'est donc pas usuel de chercher à favoriser une colonisation des matériaux constituants les ouvrages par les êtres vivants,

de tels axes de recherche sont donc récents (MANSO *et al*. 2014). La réflexion autour de matériaux éco-conçus, favorables à la colonisation d'espèces marines et améliorant l'intégration de l'ouvrage aux écosystèmes est un nouveau champ de recherche, très porteur dans le contexte de crise environnementale rappelé en introduction (CUADRADO-RICA *et al*., 2015 ; SOUCHE *et al*., 2016).

Toutefois, la volonté d'ajouter une fonctionnalité écologique à l'ouvrage, bien que tout à fait louable et à promouvoir, ne peut en aucun cas se traduire par une diminution des performances globales. Or, les mesures usuelles qui favorisent le développement de la colonisation (augmentation de la porosité, baisse du pH...) s'accompagnent, hélas, d'une dégradation plus ou moins importante des performances du béton (ou de ses armatures éventuelles). Il s'agit notamment de problèmes en termes de rhéologie à l'état frais (mise en œuvre), de résistances à long terme et enfin de durabilité (CUADRADO-RICA *et al*., 2015). Par exemple, lorsque les contraintes appliquées à l'ouvrage exigent de mettre en œuvre des bétons affichant une résistance en compression supérieure à 35 MPa (classe d'exposition XS3), il semble non envisageable de déroger à la norme sur les agrégats, excluant de fait les formulations intégrant des fortes proportions de sables coquilliers (DEVILLERS *et al*., 2009). Ou bien, la diminution du pH du béton qui semble favorable à la colonisation par certaines espèces (PERKOL-FINKEL & SELLA, 2014) peut conduire à une dépassivation et donc une corrosion irrémédiable des armatures du béton armé, ce qui pourrait conduire à une dégradation de l'ouvrage plus rapide.

Une autre difficulté repose non sur l'approche technique, mais sur la maitrise d'ouvrage et les phases dévolues à la conception d'un projet. L'intégration d'objectifs environnementaux réalistes dès la phase amont du projet permet de concevoir un ouvrage tout en diminuant les effets négatifs mais en augmentant les gains pour l'écosystème. Cette intégration s'insère bien en amont de la définition des mesures compensatoires, qui interviennent à la fin de la séquence de conception, en phase d'avant-projet définitif ou de projet (Figure 2).

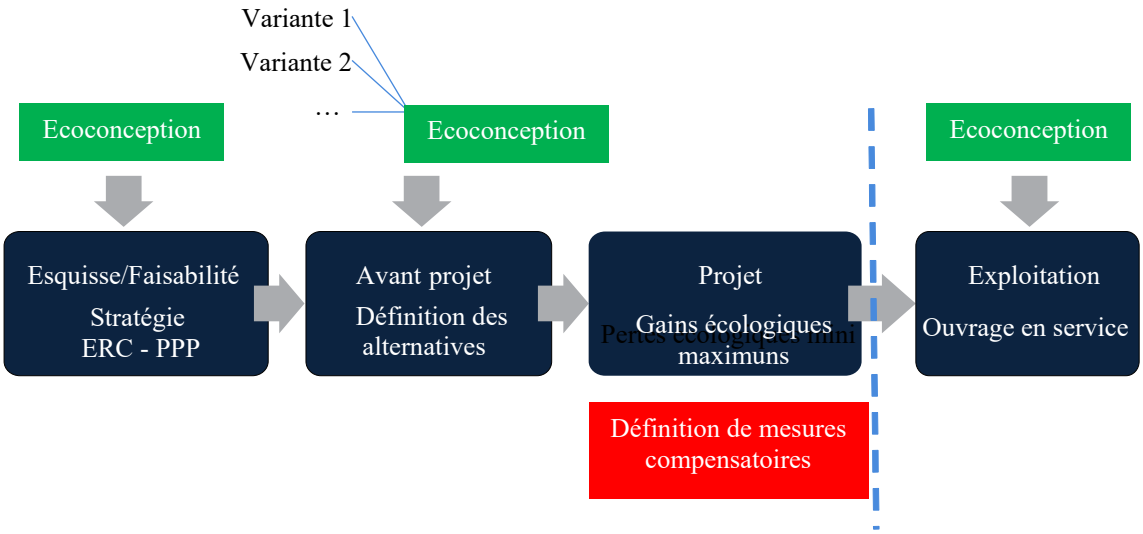


*Figure 2. L'écoconception dans la genèse du projet.*

D'autre part, des phases de préparation du projet discutant des solutions pour développer la biodiversité et mieux intégrer le projet à son environnement, sont favorables à l'association d'acteurs souvent peu sollicités, comme les citoyens, l'Agence Française de la Biodiversité (AFB) ou les associations environnementales. En ce sens, elles facilitent le travail du Maître d'ouvrage dans sa recherche de transparence, dans sa volonté de consultation du public ou de participer à un effort de développement désirable, dans une société plus concernée par les problématiques écologiques.
Cette approche intégrée réduirait donc les risques de rejet social ou d'impacts négatifs sur l'environnement, ce qui permet au Maître d'ouvrage de mieux maîtriser le processus de validation de son projet. Au-delà d'une intégration environnementale, l'écoconception se révèle alors comme une approche répondant à une demande sociale et une exigence vitale, où les enjeux socio-écologiques rejoignent la demande d'une maîtrise d'ouvrage souhaitant la réussite du projet.

2.4 L'écoconception : vecteur d'intégration de l'approche performantielle

L'enjeu devient donc triple pour les ouvrages en interaction avec le milieu marin :

- la recherche d'une résistance appropriée,
- la garantie d'une durabilité adaptée pour la durée de service envisagée. Les derniers développements de l'approche performantielle visent à remplir cet objectif,
- la co-fonctionnalité environnementale, qui nécessite une écoconception des ouvrages dès la conception du projet.

Cette triple combinaison nécessite un large champ de connaissances et d'expertises afin de réaliser un ouvrage durable, et cela dans tous les sens du terme (Figure 3).
Pour pouvoir envisager d'atteindre simultanément tous ces objectifs, il faut également intégrer deux objectifs fondamentaux en termes de localisation et de durée :

- le matériau : il doit offrir deux niveaux d'action pour le concepteur : en surface, l'interface avec le milieu doit être étudiée pour répondre à des objectifs environnementaux d'après SOUCHE *et al*. (2019) (support pour des espèces, créer des habitats et des fonctions écologiques spécifiques au milieu concerné notamment en jouant sur le design et la rugosité du matériau) ; dans la masse, le matériau doit prioriser la résistance et les exigences de durabilité (par exemple, la qualité du béton doit garantir la conservation des armatures d'un béton armé) ;
- les conditions environnantes : si les impératifs de durabilité sont calibrés pour une durée de service de plusieurs décennies (usuellement 50 à 100 ans), la colonisation de la surface des ouvrages par les organismes vivants du milieu marin est évolutive dans le temps. Elle est rythmée par les saisons, les pressions naturelles ou anthropiques et par l'évolution des constantes du milieu (ARDIZZONE et al., 1989 ; VAZ-PINTO et al., 2014).

Par conséquent, il faut arriver à concilier pour un même matériau, la garantie d'un niveau de performance cohérent avec des besoins de résistance et de durabilité à long terme et dont les caractéristiques de surface offrent un support rapidement colonisable pour les organismes vivants.

En Israël, PERKOL-FINKEL & SELLA (2014) démontrent que le pH du béton peut jouer un rôle sur la colonisation par les organismes vivants. Toutefois, ils soulignent également que la texture et le design macroscopique de la surface du béton sont des paramètres dominants dans le processus de colonisation.

En Norvège, les résultats obtenus par des études insitu ont révélé que le béton exposé à l'eau de mer subit des attaques dont celle des ions chlorure. Le matériau ainsi que son pH en sont modifiés près de la surface et ce dès 21 jours d'immersion. Il est également constaté que le changement de phases hydratées en surface est indépendant des types de liants étudiés (DE WEERDT *et al*., 2014).

Ces expériences menées en laboratoire montrent donc que les modifications de phases et donc de pH en surface sont indépendantes de la nature du béton à cœur. Elles montrent aussi que les paramètres physiques (relief macroscopique) sont majeurs dans le processus de colonisation. Rapidement, le béton, en interagissant avec son milieu, baisse son pH de surface selon une échelle de temps compatible pour une colonisation saisonnière par le vivant.

Par conséquent, le béton et le choix du liant sont uniquement fonction des exigences de résistance et de durabilité, sans contradiction avec la colonisation de surface. Celle–ci doit en revanche prendre en compte un matériau rapidement modifié suite aux attaques chimiques à l'interface béton – milieu.

Notons enfin, que COOMBES *et al*. (2013) ou HARSHADA *et al*. (2017) commencent à se poser la question de l'effet positif ou négatif de la bio colonisation sur la durabilité du matériau, en fonction de la localisation de l'environnement marin et de la nature de cette colonisation : biofilm, lichens, macro-algues, algues, mollusques ou crustacés. Il

semble même possible que la bio colonisation par certaines espèces, notamment les crustacés comme la balane ou des mollusques comme la moule, puisse être favorable en minorant les gradients thermiques dans le matériau et en minorant la pénétration d'ions agressifs tels que les chlorures et les sulfates (COOMBES *et al*., 2017).

Ainsi, la biocolonisation qui était en général perçue comme une "bio détérioration" pourrait devenir en milieu marin une "bio protection" des ouvrages, grâce aux effets de la barrière supplémentaire offerte par des organismes installés en surface. Il est donc établi que la présence d'organismes vivants en surface des ouvrages en béton en milieu marin va impacter la durabilité du matériau dans un sens ou dans un autre.

En approche performantielle, l'étude de la durabilité du matériau béton fait appel à des modèles prédictifs propres au matériau et à l'environnement sans prendre en compte l'interface "biologique" matériau-environnement. Afin de réaliser un parallèle avec la méthodologie proposée pour l'approche performantielle, des indicateurs d'éco conception pourraient compléter les indicateurs de durabilité généraux et spécifiques. Ces indicateurs d'écoconception seraient liés à des caractéristiques physico-chimiques de la surface du matériau en fonction de l'historique de peuplement biologique à l'instant $t$ par les organismes bactériens, végétaux ou animaux (avec influence sur la colonisation à l'instant $t+dt$).

En termes méthodologiques, il en résulte qu'une réflexion sur l'écoconception d'ouvrages maritimes doit être mise en place et formalisée de manière à définir des objectifs, dès la genèse du projet, en parallèle des objectifs de durabilité développés par l'approche performantielle. Cette compatibilité et cette complémentarité des deux approches permet de concilier l'exigence de durabilité et de résistance avec une colonisation facilitée par les organismes vivants dans un but affirmé de gains écologiques maximums des ouvrages. Ces différents aspects traités de manière simultanée apportent une vision multi-échelles de l'ouvrage dans sa globalité, et du matériau qui le constitue. Les possibles incohérences entre les différents objectifs à atteindre, écologiques *versus* technico-économiques, seraient alors mieux identifiées et éventuellement améliorées en amont du projet.

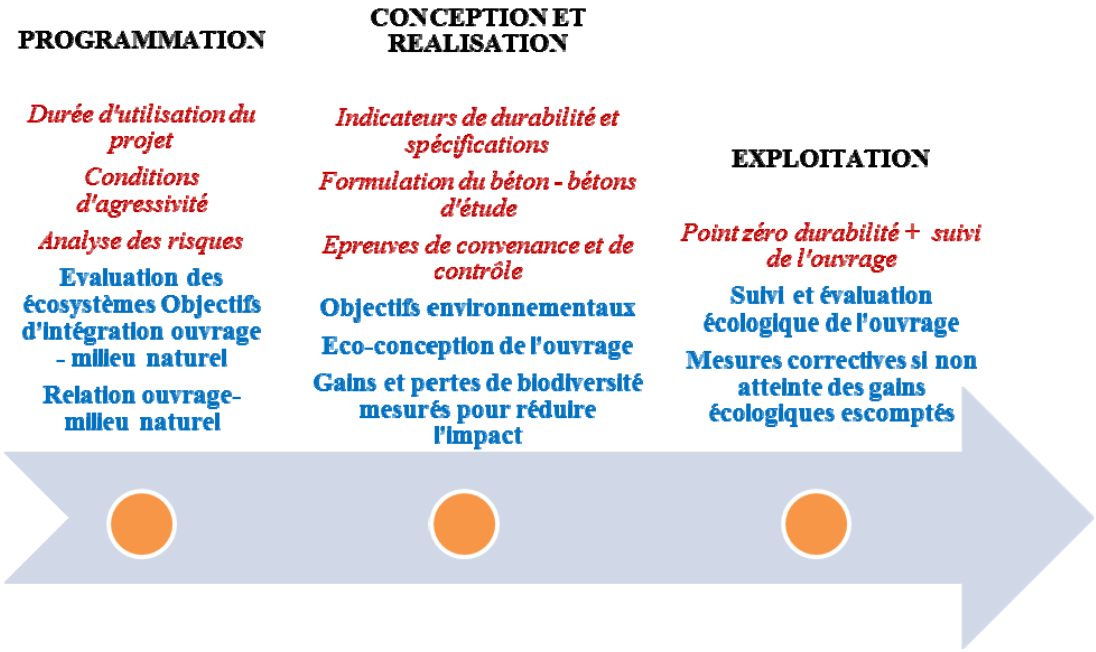


*Figure 3. Parallèle méthodologique entre approche performantielle et écoconception.*

## 3. Conclusion

La relation écosystèmes – ouvrages – matériaux des ouvrages est un paramètre à étudier car certains matériaux peuvent induire des sélections importantes d'espèces colonisatrices, parfois invasives ou rompre des connectivités écologiques majeures comme l'ont analysé MACURA *et al*. (2019).

Dans l'optique de réaliser des ouvrages en béton éco-conçus qui apportent des gains environnementaux et qui répondent aux exigences de résistance et de durabilité, il semble opportun de coupler l'approche performantielle de formulation des bétons avec une méthodologie d'écoconception.

Cette méthodologie complète le dimensionnement et le choix du matériau, elle permet d'avoir une vision globale du matériau à l'ouvrage, pour une conception durable dans tous les sens du terme : durabilité dans le temps et gains environnementaux maximums. Il est donc nécessaire de mettre en place des indicateurs d'écoconception en lien avec les résultats écologiques espérés et fonction de l'évolution des paramètres "matériau" à l'interface avec le milieu biophysique. Les besoins en recherche sur l'effet du matériau sur les organismes vivants puis sur la réciproque, sont encore importants pour arriver à une démarche fiable, intégrée et prédictive.

Enfin, la nécessité de recyclage de matériaux peut amener l'avènement de bio-bétons qui devront répondre aux critères techniques habituellement exigés (performances techniques et fonctionnelles, qualité architecturale, durabilité, sécurité, facilité d'entretien, etc…), mais aussi à des critères environnementaux ou socio-environnementaux, tout au long du cycle de vie, exigés par une demande sociale

soucieuse de l'environnement. L'avenir semble donc ouvert pour des matériaux associant bio-activité et durabilité, afin de créer des ouvrages marins fonctionnels et durables, s'inscrivant dans un mouvement de réconciliation entre l'Homme et la nature pour un développement désirable.

**Remerciements :**
Les auteurs remercient l'IFREMER, sation de Palavas les Flots, la Région Occitanie (le port de Sète en particulier), l'Office de l'environnement de la Corse et la SEMSAMAR pour leur soutien technique et financier à travers les projets de recherche-action menés dans le domaine de l'Eco-Conception des ouvrages à la mer.

## 4. Références bibliographiques


AGROPOLIS INTERNATIONAL (2014). *Atelier de réflexion prospective MERMED Adaptation aux changements globaux en mer Méditerranée.* 156 p.

AGROPOLIS (2019). *Sciences marines et littorales en Occitanie.* Dossier Agropolis International, numéro 24, 132 p.

ARDIZZONE G.D., GRAVINA M.F., BELLUSCIO A. (1989). *Temporal development of epibenthic communities on artificial Reefs in the central mediterranean sea*. Bulletin of Marine Science, Vol. 44, pp 592–608.

AZEVEDO F.B.B., CARLONI G.G., CARVALHEIRA L.V. (2006). *Colonization of benthic organisms on different artificial substratum in Ilha Grande Bay, Rio de Janeiro, Brazil*. Brazilian Archives of Biology and Technology, Vol. 49, pp 263–275. https://doi.org/10.1590/S1516-89132006000300012

BAINE M. (2001). *Artificial reefs: a review of their design, application, management and performance.* Ocean & Coastal Management, Vol. 44, pp 241–259. https://doi.org/10.1016/S0964-5691(01)00048-5

BLOUET S., CHERE E., DUPUY DE LA GRANDRIVE R., LENFANT P. (2014). *Bilan de 30 ans d'immersions de recifs artificiels sur la cote agathoise (Mediterranée, France).* Guide Cepralmar. January, pp 1–8.

BULLERI F., CHAPMAN M.G. (2010). *The introduction of coastal infrastructure as a driver of change in marine environments.* Journal of Applied Ecology, Vol. 47, pp 26-35. https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2009.01751.x

CALVET C., LE COENT P., NAPOLEONE C., QUÉTIER F. (2019). *Challenges of achieving biodiversity offset outcomes through agri-environmental schemes: evidence from an empirical study in Southern France*. Ecological Economics, Vol. 163, pp 11-125. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.03.026

COOMBES M.A., NAYLOR L.A., VILES H.A., THOMPSON, RC. (2013). *Bioprotection and disturbance: seaweed, microclimatic stability and conditions for mechanical weathering in the intertidal zone.* Geomorphology, Vol. 202, pp 4–14. http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.09.014

COOMBES M.A., VILES H.A., NAYLOR L.A., LA MARCA E.C. (2017). *Cool barnacles: do common biogenic structures enhance or retard rates of deterioration of intertidal rocks and concrete?* Science of the Total Environment, Vol. 580, pp 1034-1045. http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.058

CREDOC, ASCONIT CONSULTANTS, PARETO, BIOTOPE (2009). Etude exploratoire pour une evaluation des services rendus par les ecosystemes en France Application du millennium ecosystem assessment.

CRESSON P., RUITTON S., OURGAUD M., HARMELIN-VIVIEN M. (2014). *Contrasting perception of fish trophic level from stomach content and stable isotope analyses : A Mediterranean artificial reef experience*. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, Vol. 452, pp 54–62. https://doi.org/10.1016/j.jembe.2013.11.014

CUADRADO-RICA H., SEBAIBI N., BOUTOUIL M., BOUDART B. (2015). *Properties of ordinary concretes incorporating crushed queen scallop shells*. Materials and Structures, Vol. 49, pp 1805–1816. https://doi.org/10.1617/s11527-015-0613-7

DE VRIEND H., VAN KONINGSVELD M. (2015). *Building with nature*. Ecoshape Building with nature, 39 p.

DE WEERDT K., JUSTNES H., GEIKER M.R. (2014). *Changes in the phase assemblage of concrete exposed to sea water*. Cement and Concrete Composites, Vol. 47, pp 53–63. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.09.015

DEVILLERS P., CLERC L., BUISSON C., PIOCH S., SOUCHE J.C. (2009). *Faisabilité technique d'un béton à base de déchets de coquillages*. XXVII AUGC, Saint Malo 3-5 Juin, 12 p.

GIRAUDEL C., GARCIA N., LEDOUX S. (2014). *Single-Layer breakwater armouring : feedback on the accropodetm technology from site experience.* Coastal Engineering Proceedings, pp 1–15. https://doi.org/10.9753/icce.v34.structures.20

HARSHADA K., DESAI D., GUPTA A. K. (2017). *Deterioration of concrete in marine structure.* Imperial Journal of Interdisciplinary Research (IJIR), Vol. 3, Issue 8.

HILBERTZ W. (1978). *Electrodeposition of minerals in seawater.* OCEANS 78. Washington, DC: IEEE.

HILLIER S.R., SANGHA C.M., PLUNKETT B.A., WALDEN P.J. (1999). *Long-term leaching of toxic trace metals from Portland cement concrete*. Cement and Concrete Research, Vol. 29, pp 515–521. https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00200-2

IPBES. (2019). *Global assessment on biodiversity and ecosystem services.* https://ipbes.net/global-assessment

JACOB C., QUÉTIER F., ARONSON J., PIOCH S., LEVREL H. (2015). *Vers une politique française de compensation des impacts sur la biodiversité plus efficace: défis et perspectives*. VertigO. 14. https://doi.org/10.4000/vertigo.15385

JACOB C. (2017). *Approche géographique de la compensation écologique en milieu marin: analyse de l'émergence d'un système de gouvernance environnementale*. Doctoral dissertation, Université Montpellier 3.

LACROIX D., PIOCH S. (2011). *The multi-use in wind farm projects: more conflicts or a win-win opportunity?* Aquatic Living Resources, Vol. 24, pp 129–135. https://doi.org/10.1051/alr/2011135

LINGER L., ROZIÈRE E., LOUKILI A., CUSSIGH F. (2014). *Concrete equivalent performance concept for durability – an operational guide for the comparative approach.* Conference FIB 2014 Mumbai (India).

LUCKHURST E., LUCKHURST K. (1978). *Analysis of the influence of substrate variables on coral reef fish communities*. Marine Biology, Vol. 323, pp 317–323. https://doi.org/10.1007/BF00455026

MACURA B., BYSTRÖM P., AIROLDI L., ERIKSSON B.K., RUDSTAM L., STØTTRUP J.G. (2019). *Impact of structural habitat modifications in coastal*

*temperate systems on fish recruitment: a systematic review*. Environmental Evidence, 8(1), 14. https://doi.org/10.1186/s13750-019-0157-3

MANSO S., DE MUYNCK W., SEGURA I., AGUADO A., STEPPE K., BOON N., DE BELIE N. (2014). *Bioreceptivity evaluation of cementitious materials designed to stimulate biological growth*. Science of the Total Environment, Vol. 481, pp 232–241. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.02.059

MEA 2005. Site web : www.millenniumassessment.org/fr/

NF EN 206/CN. (2014). *Béton - Spécification, performance, Production et Conformité*. edited by AFNOR.

NGUYEN D.H., BOUTOUIL M., SEBAIBI N., LELEYTER L., BARAUD F. (2014). *A modified method for the design of pervious concrete mix*. Construction & Building Materials, Vol. 73, pp 271-282. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.088

PERKOL-FINKEL S., SELLA I. (2014). *Ecologically active concrete for coastal and marine infrastructure: innovative matrices and designs*. From Sea to Shore – Meeting the Challenges of the Sea, pp 1139–1149.

PIANC WG. (2011). *EnviCom 176*. The World Association for Waterborne Transport Infrastructure.

PIOCH S. (2008). *Les "habitats artificiels" : élément de stratégie pour une gestion intégrée des zones côtières ? Essai de méthodologie d'aménagement en récifs artificiels adaptés à la pêche artisanale côtière.* In French, PhD Thesis. Université Montpellier 3. 227 p.

PIOCH S., MONIER T. (2009). *Procédé de fabrication d'un éco-granulat, d'un béton, et béton associé*. Brevet FR 2 944 788-B1 EGIS EAU.

PIOCH S., KILFOYLE K., LEVREL H., SPIELER R. (2011). *Green Marine Construction.* Journal of Coastal Research, Vol. 61, pp 257–268. https://doi.org/10.2112/SI61-001.24

PIOCH S., RELINI G., SOUCHE JC., STIVE M.J.F., DE MONBRISON D., NASSIF S., SIMARD F., ALLEMAND D., SAUSSOL P., SPIELER R., KILFOYLE K. (2018). *Enhancing eco-engineering of coastal infrastructure with eco-design: Moving from mitigation to integration*. Ecological Engineering, Vol. 120, pp 574–584. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.05.034

RBNP (2016). *LOI n° 2016-1087 du 8 août 2016 pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages*

ROBILLARD-ENGELAERE C. (2012). *Étude de valorisation des coproduits marins coquilliers sous forme d'additions et de granulats dans les matériaux cimentaires*. Ph. D. Université de Caen Basse Normandie.

SAFI B., SAIDI M., DAOUI A., BELLA A., MECHEKAK, A., TOUMI K., (2015). *The use of seashells as a fine aggregate (by sand substitution) in self-compacting mortar (SCM)*. Construction & Building Materials, Vol. 78, pp 430-438. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.009

SETO K.C., GÜNERALP B., HUTYRA L.R. (2012). Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. Proc. Natl. Acad. Sci., Vol. 109, pp 16083–16088. https://doi.org/10.1073/pnas.1211658109

SOUCHE J.C., LE SAOUT G., SALGUES M., PIOCH S. (2016). *Effets de bétons bioactifs sur la colonisation marine en environnement méditerranéen*. Matériaux & Techniques, Vol. 104, Article 504, 8 p. https://doi.org/10.1051/mattech/2016033

SOUCHE J.C., PIOCH S., SALGUES M., DE WEERDT K., AGOSTINI A., HAYEK M. (2019). *De la conception à l'éco-conception des ouvrages maritimes : intégrer la nature au projet d'aménagement maritime*. Revue Paralia, Vol. 12, pp n01.1-n01.26. https://doi.org/10.5150/revue-paralia.2019.n01

VAZ-PINTO F., TORRONTEGI O., PRESTES A.C.L., ALVARO N.V., NETO A.I., MARTINS G.M. (2014). *Invasion success and development of benthic assemblages: Effect of timing, duration of submersion and substrate type*. Marine Environmental Research, Vol. 94, pp 72–79. https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2013.12.007

WANG H.Y., CHEN P.Y., CHEN J.H. (2011). *Effect of waste oyster shell resurgent on engineering properties of cement mortar*. International Workshop on energy, environment & architecture engineering. Xian Ning, 16-18 Avril 201.

WEISSGERBER M., ROTURIER S., JULLIARD R., GUILLET F. (2019). *Biodiversity offsetting: Certainty of the net loss but uncertainty of the net gain*. Biological Conservation, Vol. 237, pp 200-208. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.06.036

YANG E.I., KIM M.Y., PARK H.G., YI S.T. (2010). *Effect of partial replacement of sand with dry oyster shell on the long term performance of concrete*. Construction & Building Materials, Vol. 24, pp 758-765. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.032

YOON H., PARK S., LEE K. (2004). *Oyster shell as substitute for aggregate in mortar*. Waste Management & Research, Vol. 22, pp 158-170. https://doi.org/10.1177/0734242X04042456