

Liège, Belgique
7-8 Novembre 2018

L'ÉCOCONCEPTION MARITIME : LE PARAMÈTRE MATÉRIAUX

SOUCHÉ Jean-Claude^A, SALGUES Marie^A, PIOCH Sylvain^B, DE WEERDT Klaartje^C

A IMT Mines Alès, Centre des Matériaux de l'École des mines d'Alès

B UMR 5175 CEFE, Université Paul Valéry, Montpellier

C Norwegian University of Science and Technology NTNU, Trondheim, Norway

Résumé : Aujourd'hui, les évolutions pour préserver l'écosystème planétaire ne sont pas à la hauteur des enjeux malgré la prise de conscience progressive des aménageurs publics et privés qui se tournent vers 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 lier l'ouvrage et ses matériaux constitutifs à l'écosystème environnant. Elle favorise donc l'intégration des ouvrages aux écosystèmes pour développer la biodiversité, au service des usagers et des riverains du port, 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.

Cet article va donc s'appuyer sur les pratiques passées pour proposer une nouvelle méthodologie d'écoconception avec un angle de vue orienté vers les matériaux de construction. Un parallèle méthodologique sera mené entre l'écoconception des ouvrages marins et le design du matériau béton selon l'approche performantielle qui garantit l'atteinte d'objectifs de durabilité pour le matériau béton.

Mots-clés : écoconception, durabilité, approche performantielle, gain écologique, récif artificiel

1. INTRODUCTION

L'artificialisation des zones côtières conduit à une érosion importante et croissante de la biodiversité, en 2000 environ 25% des espèces marines avait disparu d'après l'Indice Planète Vivante (LPI) publié par l'ONU environnement. Dans le souci du maintien de cette biodiversité, l'Évaluation des écosystèmes pour le millénaire (EMA ou MEA en anglais) a été publié en 2005, sous l'égide de l'ONU. Son objectif, qui consiste à évaluer les conséquences de l'érosion de la biodiversité sur les services rendus aux hommes, a été décliné en France au sein de plusieurs programmes, comme l'étude exploratoire pour une évaluation des services rendus par les écosystèmes en France (CREDOC et al. 2009) piloté par le Ministère de l'environnement.

Ces études concluent 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 (AGROPOLISInternational 2014).

Toutefois, l'évaluation démontre qu'avec des actions appropriées au cours des cinquante prochaines années, la dégradation des écosystèmes et des services rendus à l'homme pour son bien-être, n'est pas irréversible. A l'heure actuelle, de lentes évolutions sont en cours mais ne sont pas à la hauteur des enjeux. Certains aménageurs publics ou privés prennent conscience de la situation et tentent de produire des projets respectueux de l'environnement, dans une optique de développement durable (PIANC WG 2011) (AGROPOLISInternational 2014). Ils se heurtent encore trop souvent à la réglementation et aux services instructeurs qui représentent un réel verrou pour généraliser de nouvelles pratiques.

L'une des voies est l'écoconception des ouvrages d'arts maritimes (Lacroix and Pioch 2011) (Pioch et al. 2011) L'écoconception est le fait de concevoir techniquement des projets en considérant également des préoccupations écologiques globales et locales¹. Il s'ensuit que l'ouvrage artificiel marin intégré dans son écosystème va subir une colonisation par les organismes vivants (Giraudel, Garcia, and Ledoux 2014). Il devient dès lors prioritaire, dans un double objectif de protection de l'environnement et de durabilité de l'ouvrage, de comprendre les mécanismes de peuplement (Baine 2001) (Azevedo, Carloni, and Carvalho 2006) (Bulleri and Chapman 2010).

Cependant les facteurs en jeu sont très divers : zone d'immersion et implantation (Blouet et al. 2014), saisons et temps d'immersion (Vaz-Pinto et al. 2014), conception de l'ouvrage (Pioch et al. 2011), type de matériaux utilisés (Anderson and Underwood 1994) (Fitzhardinge and Bailey-Brock 1989) (Lee et al. 2008) (Souche et al. 2016). Le choix des matériaux pour un ouvrage marin est donc majeur tant il va influencer sur la conception, les formes ou encore les états de surface.

Au-delà de ces aspects techniques, le choix des matériaux de construction est aussi révélateur de la philosophie de l'aménagement : l'utilisation de déchets industriels accentue l'image négative pour des aménagements insérés dans un milieu naturel marin (Pioch 2008).

Après un bref historique des matériaux utilisés pour la réalisation d'aménagements marins de type récifs artificiels, les pratiques futures d'écoconception seront développées selon un angle orienté matériaux de construction. Un parallèle méthodologique sera mené entre l'écoconception des ouvrages et le design du matériau béton selon l'approche performantielle qui garantit la durabilité du matériau béton. Il sera mis en évidence qu'un matériau de construction peut être dimensionné pour respecter des exigences de qualité et pour répondre à des objectifs environnementaux. 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.

2. HISTORIQUE DES MATÉRIAUX UTILISÉS POUR LA CONSTRUCTION DE RÉCIFS ARTIFICIELS

Cette histoire remonte aux temps de l'empereur Joo, au Japon, au XVII^{ième} siècle, époque dont date les premières traces écrites de conception d'ouvrages pour la pêche à partir de blocs de roches disposés dans

¹ Syntec-ingénierie. 2010

des épaves de navires immergées en mer (Pioch 2008). La description technique est très précise, et le choix des matériaux (pierres et bois de charpente de navires) est lié, d'emblée à des questions d'habitats (volume, fonctions écologiques) et de durabilité. Mais ce n'est véritablement qu'au XX^{ème} siècle que cette diversité structurale de développera vraiment, d'abord au Japon, puis dans le reste du monde.

Deux guides de conception de récifs artificiels (Seaman and M. Sprague 1991) (Fourrier et al. 2015) listent les différents matériaux et leurs principaux usages. Les informations fournies sont à prendre avec précaution. En effet de nombreuses expériences d'immersion de matériaux de récupération (pneus, carcasses, épaves...) ont été menées dans le passé aux États-Unis par exemple avec des résultats parfois mitigés. En France, l'administration de l'environnement (DREAL) est vigilante à ce que des produits qui pourraient être assimilés à des déchets ne soient pas mis en œuvre comme récifs artificiels, en respect de la convention OSPAR (Convention pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du Nord-Est adoptée en 1992). Ces ouvrages doivent être conçus en rapport avec leur usage et être esthétiques (Fourrier et al. 2015). Ces considérations réduisent considérablement le choix de matériaux de construction pour le réalisation de récifs artificiels.

Le choix des industriels s'est principalement porté sur les matériaux manufacturés les plus utilisés dans la construction : le béton et l'acier. Ces deux matériaux sont à comparer à des matériaux naturels comme la pierre ou issus de la pétrochimie comme certains « plastiques » spécifiquement étudiés et adaptés au milieu marin.. Le tableau 1 compare les avantages – inconvénients du béton, de l'acier, de la pierre naturelle, et de matières « plastiques » adaptées usuellement utilisés dans la construction de récifs artificiels.

Tableau 1. : Synthèse des avantages et des inconvénients des principaux matériaux utilisés pour la réalisation de RA (Lukens and Seelberg 2004)

Matériaux	Avantages	Inconvénients	Commentaires
Le béton	Matériau facile à modeler Surface adaptée à la fixation d'organismes, Résistant et durable (50 ans), non polluant Coût modéré	Manipulation et transport (poids) Durabilité à étudier Faiblesse des bétons en zones tropicales (température et salinité)	Matériau le plus utilisé Nombreuses études disponibles et retour d'expériences positif Grande variété de compositions et de texture Facilité de création de trous et cavités
L'acier	Bonnes qualités mécaniques Larges possibilités d'architecture Résistance intéressante pour de grandes structures	Oxydation et hétérogénéité de la corrosion, Assemblages de pièces (soudures, rivets, boulons, ...) Coût plus importants Durabilité de 20 à 30 ans	Au Japon, les métaux sont parfois protégés par du béton Aspect esthétique des structures après quelques années perfectible (rouille) L'électrodéposition peut être utilisée pour "naturaliser" la surface avec des carbonates naturels (Biorock®, Géocorail®)
La pierre	Bon substrat de fixation Bonne résistance mécanique et chimique aux conditions marines Aspect paysager naturel Coût faible	Faibles possibilités architecturales. Manipulations peu aisées Pas de cavités intra structurelles et surface développée réduite	Valorisation de l'aspect "naturel". Intégration esthétique et paysagère. Amas d'énormements ressemblant aux éboulis naturels
Le plastique	Bonne résistance aux conditions marines Grandes possibilités architecturales Capacités de flottaison	Coût en général très élevé Perception polluante si dégradation Densité faible (ancrages nécessaires) Surface lisse, peu adaptée à la colonisation	Son utilisation se limite souvent à la réalisation de dispositifs mobiles pour la conchyliculture, de dispositifs flottants ou à l'assemblage de modules réalisés à l'aide d'un autre matériau

Finalement, le matériau béton, largement utilisé, 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, hydrides ...). 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 très basique qui semblerait défavorable pour le développement de biotes (Perkol-Finkel and 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 éco-conçus.

3. DU PASSÉ VERS LE FUTUR : QUELS MATERIAUX POUR CONSTRUIRE DES OUVRAGES ÉCO-CONÇUS ET INTÉGRÉS AU MILIEU MARIN ?

3.1 Démarche de conception usuelle

Un projet commence toujours par la définition du besoin par le Maître d'ouvrage au travers du programme de l'aménagement. En réponse, le concepteur propose une réponse architecturale et technique de l'ouvrage dont il doit vérifier la faisabilité, sur les plans technique, financier, et règlementaires.

Par ailleurs, l'aménagement doit s'intégrer dans son environnement, en étant respectueux de l'Homme, des paysages et des milieux naturels. Il doit être soucieux d'économiser l'espace, d'épargner les espèces, de limiter la pollution de l'eau, de l'air ou des sols. Pour vérifier ces exigences un bureau d'études environnementales doit réaliser une étude d'impact qui autorise l'évaluation environnementale des travaux d'aménagement projetés. Cette démarche est destinée à intégrer les préoccupations environnementales dès la conception d'un aménagement par son promoteur, à éclairer les services instructeurs et à informer le public en le faisant participer à la prise de décision (Art L. 122-1. du Code de l'Environnement ; Directive européenne du 27 juin 1985).

Ces études menées sur les plans technique et environnemental sont souvent menées par des acteurs différents qui s'ils se complètent, ne proposent pas de vision intégrée de l'aménagement. La conception se termine par la rédaction des spécifications qui détaillent la qualité à atteindre, le coût des travaux et les délais de réalisation qui serviront de base aux contrats de travaux des entreprises pour la réalisation de l'ouvrage.

Par exemple, pour le matériau béton, la norme (NF EN 206/CN 2014 n.d.) 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 ne prend pas en compte certains paramètres pertinents du point de vue de la durabilité. Elle se concentre sur la composition du liant et réduit l'utilisation des additions. Une telle approche ne permet donc pas de qualifier certaines compositions de bétons (bétons composés par exemple) pourtant techniquement intéressantes et à coût égal. La norme permet de corriger ces manquements en faisant appel à la notion d'approche performantielle pour la durabilité (Figure 1)

3.2 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 NF EN 206-1. Cette nouvelle approche fixe les exigences de durabilité à atteindre en fonction de l'agressivité du milieu (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 (Figure 1).

Elle est fondée sur des indicateurs de durabilité associés à des critères de performance et des valeurs seuils à respecter. La bonne connaissance des phénomènes de dégradation alliée à la compréhension des différents mécanismes physico-chimiques ont autorisées la mise en place de cette méthodologie qui est adaptée aux exigences de résistance aux agressions auxquelles le matériau va être soumis.

Cette approche a été largement utilisée pour des grands ouvrages de génie civil (viaduc de Millau, pont Vasco de Gama sur le Tage, ..). L'approche performantielle modifie les relations entre les acteurs de la construction, renforce les responsabilités de chacun et une nécessite une anticipation de la problématique matériaux lors de la conception des ouvrages. Elle répond à l'enjeu croissant de durabilité pour le Maître d'ouvrage, elle offre au concepteur une plus grande variété de solutions, elle permet à l'entreprise d'innover et de prendre de plus grandes libertés pour la formulation des bétons utilisés.

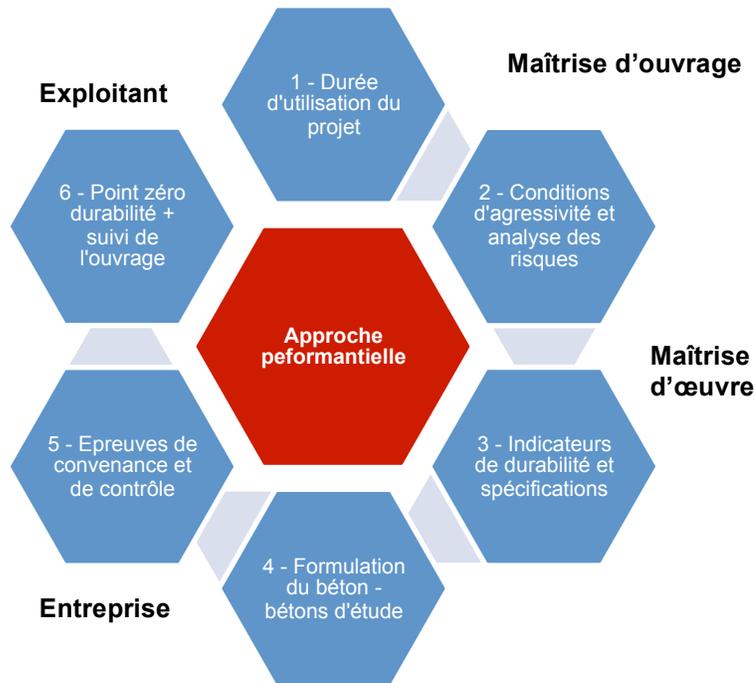


Figure 1 : Méthodologie de l'approche performantielle (d'après doc CIMBETON)

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, elle ne s'intéresse pas à l'intégration environnementale des ouvrages qui est un imposé du Développement Durable en milieu marin.

3.3 Les objectifs environnementaux et l'éco-conception

L'écoconception est une démarche différente dans la conception d'un ouvrage. Elle consiste à intégrer des objectifs environnementaux au cœur de la définition technique d'un aménagement pour que celui-ci assure un service environnemental complémentaire à la fonction technique première. La finalité est d'intégrer le projet dans le milieu naturel et de réduire ses impacts, avec une priorité : le développement d'ouvrages immergés favorables aux écosystèmes.

Au niveau des matériaux, le Japon, la Corée et les États-Unis sont les pays leader dans la recherche de matériaux éco-conçus (Pioch et al. 2011). Les critères d'appréciation de la valeur des matériaux sont alors d'ordre biologique, comme 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 coquillés marins (moules, huîtres, etc.), les États-Unis ont orientés leurs travaux sur la rugosité et la mise en œuvre des ouvrages (Luckhurst and Luckhurst 1978). L'acier a également été utilisé pour faire apparaître à sa surface des roches naturellement concrétionnées par électrolyse d'ions dissous dans l'eau de mer (Hilbertz 1978). Ce matériaux naturel « bio-rocks »@ peut favoriser l'implantation de coraux par exemple. La majorité des ouvrages destinés à améliorer la productivité biologique ont été conçus sur

la base de travaux en lien avec les matériaux et leur mise en œuvre de manière à obtenir des états de surface biocompatibles (Lacroix and Pioch 2011) (Perkol-Finkel and Sella 2014).

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 constituant les ouvrages par les êtres vivants. De tels axes de recherche sont 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 donc très récente (Cuadrado-Rica et al. 2015) (Souche et al. 2016).

Toutefois, la volonté d'ajouter une fonctionnalité écologique à l'ouvrage ne peut en aucun cas se traduire par une diminution de ses 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) en termes de rhéologie à l'état frais (mise en œuvre), de résistances à long terme et de durabilité (Cuadrado et al. 2014). 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 (Devilleers et al. 2009). Ou bien, la diminution du pH du béton qui semble favorable à la colonisation par certaines espèces (Perkol-Finkel and Sella 2014) peut conduire à une dépassement et donc une corrosion des armatures du béton armé ce qui pourrait conduire à une dégradation de l'ouvrage plus rapide.

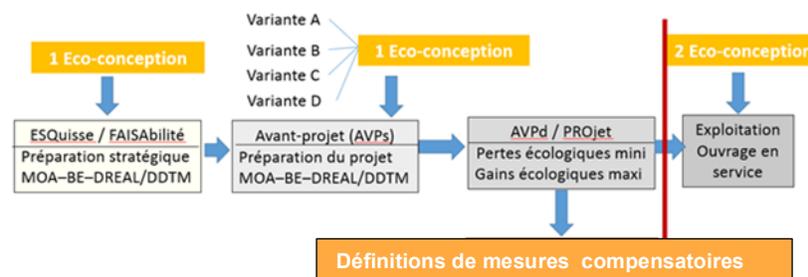


Figure 2 : L'écoconception dans la genèse du projet

L'intégration d'objectifs environnementaux réalistes dès la phase amont du projet permet de concevoir un ouvrage multi - fonctions qui va chercher à minimiser les pertes écologiques, à maximiser les gains pour l'écosystème avant d'arriver à la définition des mesures compensatoires (Figure 2). D'autre part, les phases de préparation du projet sont favorables à l'association des acteurs concernés autour de l'aménagement. En ce sens, elles facilitent le travail du Maître d'ouvrage dans sa recherche de transparence, dans sa volonté de consultation des acteurs concernés et dans ses objectifs d'acceptation sociale du projet.

Cette approche intégrée réduit donc les risques qui pèsent sur le projet et permet au Maître d'ouvrage de maîtriser totalement le processus de déroulement du projet. Au-delà d'une intégration environnementale, l'écoconception se révèle alors comme une approche stratégique dont l'enjeu même est la réussite du projet dans des délais compatibles avec le calendrier prévisionnel.

4. L'ÉCOCONCEPTION INTÉGRATRICE DE L'APPROCHE PERFORMANTIELLE

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

- la recherche d'une résistance appropriée est une exigence fondamentale,
- la garantie d'une durabilité adaptée pour la durée de service envisagée est indispensable. Les derniers développements de l'approche performantielle visent à remplir cet objectif pour le béton,

- la co-fonctionnalité environnementale nécessite une écoconception des ouvrages.

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

- le matériau 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 ; dans la masse, le matériau doit prioriser la résistance et les exigences de durabilité (par exemple, la qualité du béton doit garantir la conservation d'armatures de béton armé)
- 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 s'exprime en semaines et est rythmée par les saisons et par l'évolution des constantes du milieu ou par d'autres effets de l'environnement (Ardizzone, Gravina, and Belluscio 1989) (Vaz-Pinto et al. 2014).

Par conséquent, il faut arriver à concilier un matériau qui garantit un niveau de performance cohérent avec les 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, des auteurs démontrent que le pH du béton peut jouer un rôle sur la colonisation par les organismes vivants (Perkol-Finkel and Sella 2014). 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 in-situ 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 Weerd, Justnes, and Geiker 2014). Ces expériences de 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 prendre en compte un matériau rapidement modifié en surface suite aux attaques chimiques du milieu.

Enfin, des auteurs tels que (Coombes et al. 2013) (Harshada, Desai, and Gupta 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 la colonisation (biofilm, lichens, macro-algues, crustacés...). Il semblerait même possible que la bio colonisation par certaines espèces (balanes, moules etc...) 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).

La « bio colonisation » est en général perçue comme une « bio détérioration » mais en milieu marin elle pourrait devenir une « bio protection » des ouvrages grâce aux effets de la barrière supplémentaire offerte par les organismes qui se sont 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 « vivant » matériau-environnement qui fait l'objet de l'écoconception et qui ajoute une dimension. 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 à l'instant t par les organismes bactériens, végétaux ou animaux (avec influence sur la colonisation à l'instant t+dt).

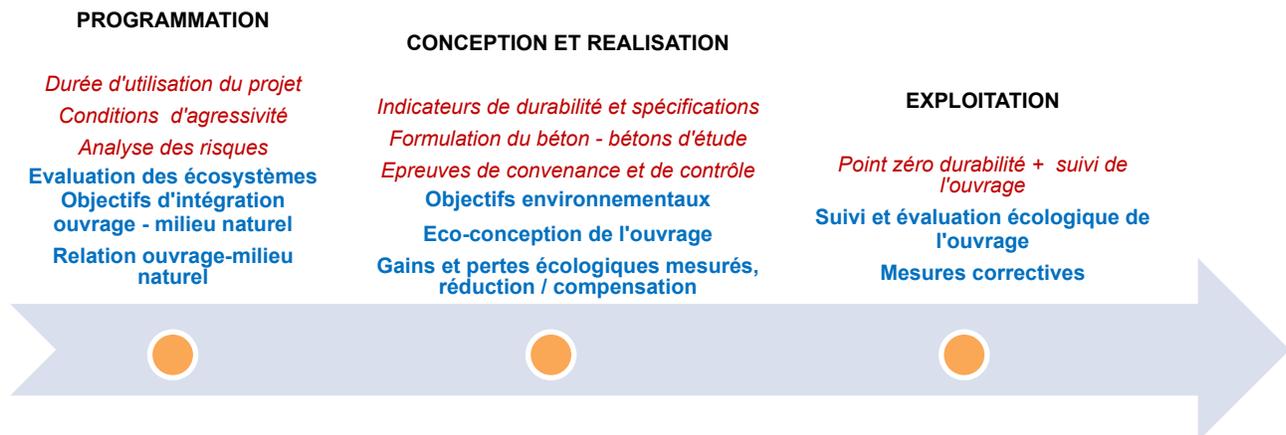


Figure 3 : Parallèle méthodologique entre approche performantielle et écoconception

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 seront alors identifiés et réglés en amont du projet.

5. CONCLUSION

Ce rapide tour d'horizon des différents matériaux historiquement utilisés, nous amène à nous interroger sur la relation écosystème – ouvrages – matériaux des ouvrages. En effet, certains matériaux peuvent induire des sélections importantes d'espèces colonisatrices, parfois invasives ou rompre des connectivités écologiques. La toxicité ou l'évolution dans le milieu naturel de matériaux comme les mâchefers ou les pneus posent des questions sur le relargage à long terme dans le milieu corrosif marin.

Globalement, les matériaux de construction usuels que sont le béton et l'acier restent des solutions techniques connues et éprouvées pour la construction d'ouvrages à la mer. 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 de dimensionnement et de choix du matériau 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 et intégrée.

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 architecturales, durabilité, sécurité, facilité d'entretien, etc...), mais aussi à des critères environnementaux ou socio-environnementaux, tout au long du cycle de vie. L'avenir semble donc ouvert

pour des matériaux associant bio-activité et durabilité, afin de créer des ouvrages marins fonctionnels et durables, réconciliant l'homme et la nature.

6. RÉFÉRENCES

- AGROPOLISInternational. 2014. *Atelier de Réflexion Prospective MERMED Adaptation Aux Changements Globaux En Mer Méditerranée*.
- Anderson, M. J., and A. J. Underwood. 1994. "Effects of Substratum on the Recruitment and Development of an Intertidal Estuarine Fouling Assemblage." *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 184(2): 217–36.
- Azevedo, F. B B, Giuliano Guilherme Carloni, and L. V. Carvalheira. 2006. "Colonization of Benthic Organisms on Different Artificial Substratum in Ilha Grande Bay, Rio de Janeiro, Brazil." *Brazilian Archives of Biology and Technology* 49(2): 263–75.
- Baine, Mark. 2001. "Artificial Reefs: A Review of Their Design, Application, Management and Performance." *Ocean & Coastal Management* 44(3–4): 241–59.
- Blouet, Sylvain et al. 2014. "Bilan de 30 Ans D'immersions De Recifs Artificiels Sur La Cote Agathoise (Méditerranée , France)." (January): 1–8.
- Bulleri, Fabio, and Maura G. Chapman. 2010. "The Introduction of Coastal Infrastructure as a Driver of Change in Marine Environments." *Journal of Applied Ecology* 47(1): 26–35.
- Coombes, Martin A., Larissa A. Naylor, Heather A. Viles, and Richard C. Thompson. 2013. "Bioprotection and Disturbance: Seaweed, Microclimatic Stability and Conditions for Mechanical Weathering in the Intertidal Zone." *Geomorphology* 202: 4–14. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.09.014>.
- Coombes, Martin A., Heather A. Viles, Larissa A. Naylor, and Emanuela Claudia La Marca. 2017. "Cool Barnacles: Do Common Biogenic Structures Enhance or Retard Rates of Deterioration of Intertidal Rocks and Concrete?" *Science of the Total Environment* 580: 1034–45. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.058>.
- CREDOC, ASCONIT CONSULTANTS, PARETO, and BIOTOPE. 2009. *Crédoc - Synthèse Etude Exploratoire Pour Une Evaluation Des Services Rendus Par Les Ecosystemes En France Application Du Millennium Ecosystem Assessment*.
- Cuadrado-Rica, Héctor, Nassim Sebaibi, Mohamed Boutouil, and Bertrand Boudart. 2015. "Properties of Ordinary Concretes Incorporating Crushed Queen Scallop Shells." *Materials and Structures*: 1805–16. <http://link.springer.com/10.1617/s11527-015-0613-7>.
- Cuadrado, Héctor, Nassim Sebaibi, Mohamed Boutouil, and Bertrand Boudart. 2014. "Réutilisation de Coproduits Coquilliers Marins Dans Des Bétons Auto-Plaçants Pour Des Récifs Artificiels." In *Colloque Ecomatériau*, Montpellier, 1–11.
- Deville, Philippe et al. 2009. "Faisabilité Technique d ' Un Béton à Base de Déchets de Coquillages." In *AUGC 2009*, , 1–12.
- Fitzhardinge, R C, and J.H Bailey-Brock. 1989. "Colonization of Artificial Reef Materials by Coral and Other Sessile Organisms." *Bulletin of Marine Science* 44(2): 567–79.
- Fourrier, Adeline et al. 2015. *Guide Pratique d'aide à l'élaboration , l'exploitation et La Gestion Des Récifs Artificiels En Languedoc-Roussillon*. CEPRALAMR. Région Languedoc Roussillon.
- Giraudel, Cyril, Nicolas Garcia, and Sébastien Ledoux. 2014. "Single-Layer Breakwater Armouring : Feedback on the Accropode™ Technology from Site Experience." In *Coastal Engineering 2014*, , 1–15.
- Harshada, Kadam, D.B Desai, and A K Gupta. 2017. "Deterioration of Concrete in Marine Structure." 3(8).
- Hilbertz, W. 1978. "Electrodeposition of Minerals in Seawater." In *OCEANS 78*, Washington, DC: IEEE.
- Hillier, S. R., C. M. Sangha, B. A. Plunkett, and P. J. Walden. 1999. "Long-Term Leaching of Toxic Trace

- Metals from Portland Cement Concrete." *Cement and Concrete Research* 29(4): 515–21.
- Lacroix, Denis, and Sylvain Pioch. 2011. "The Multi-Use in Wind Farm Projects: More Conflicts or a Win-Win Opportunity?" *Aquat. Living Resour. EDP Sciences* 24: 129–35. www.alr-journal.org.
- Lee, Han Seong et al. 2008. "Screening and Formulation of Chemoattractant Coatings for Artificial Reef Structures." *Journal of environmental biology* 29(July): 605–12.
- Luckhurst, E, and K Luckhurst. 1978. "Analysis of the Influence of Substrate Variables on Coral Reef Fish Communities." *Marine Biology* 323: 317–23. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00455026>.
- Lukens, Ronald R., and Carrie Seelberg. 2004. "Guidelines for Marine Artificial Reef Materials." *Artificial Reef Subcommittees. Atlantic and Gulf States Marine Fisheries Commissions*: 205.
- Manso, Sandra et al. 2014. "Bioreceptivity Evaluation of Cementitious Materials Designed to Stimulate Biological Growth." *Science of the Total Environment* 481(1): 232–41. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.02.059>.
- NF EN 206/CN 2014. *NF EN 206/CN Béton - Spécification ,Performance, Production et Conformité*. ed. AFNOR.
- Perkol-Finkel, S, and Ido Sella. 2014. "Ecologically Active Concrete for Coastal and Marine Infrastructure: Innovative Matrices and Designs." *From Sea to Shore - Meeting the Challenges of the Sea* (May): 1139–49. http://www.ice.org.uk/ICE_Web_Portal/media/Events/Breakwaters_2013/Ecologically-Active-Concrete-for-Coastal-and-Marine-Infrastructure---Innovative-Matrices-and-Designs.pdf.
- PIANC WG, EnviCom 176. 2011. *The World Association for Waterborne Transport Infrastructure*.
- Pioch, Sylvain. 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." Université Montpellier III.
- Pioch, Sylvain, Kirk Kilfoyle, Harold Levrel, and Richard Spieler. 2011. "Green Marine Construction." *Journal of Coastal Research* 61(61): 257–68. <http://www.bioone.org/doi/abs/10.2112/SI61-001.1>.
- Seaman, William Jr, and Lucian M. Sprague. 1991. *Artificial Habitats for Marine and Freshwater Fisheries*. Academic P. New York: Harcourt Brace Jovanovich.
- Souche, Jean-Claude, Gwenn Le Saout, Marie Salgues, and Sylvain Pioch. 2016. "Effets de Bétons Bio-Actifs Sur La Colonisation Marine En Environnement Méditerranéen." *Matériaux & Techniques* 104(5): 504. <http://www.mattech-journal.org/10.1051/mattech/2016033>.
- Vaz-Pinto, F. et al. 2014. "Invasion Success and Development of Benthic Assemblages: Effect of Timing, Duration of Submersion and Substrate Type." *Marine Environmental Research* 94: 72–79. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marenvres.2013.12.007>.
- De Vriend, Huib, and Mark Van Koningsveld. 2012. *Nature Building With Nature*. Ecoshape Building with nature.
- De Weerd, Klaartje, Harald Justnes, and Mette R. Geiker. 2014. "Changes in the Phase Assemblage of Concrete Exposed to Sea Water." *Cement and Concrete Composites* 47: 53–63. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.09.015>.