



De la conception à l'éco-conception des ouvrages maritimes : intégrer la nature au projet d'aménagement maritime

**Jean-Claude SOUCHE¹, Sylvain PIOCH², Marie SALGUES¹,
Klaartje DE WEERDT³, Alexandra AGOSTINI⁴, Mahmoud HAYEK¹**

1. Centre des Matériaux (C2MA), IMT Mines Alès, Univ. Montpellier, Alès, France.
jean-claude.souche@mines-ales.fr
2. UMR 5175 CEFE, Université Paul Valéry, Montpellier, SupAgro, EPHE, Laboratoire Biologie Ecologie Environnement - UPV, Route de Mende, 34000 Montpellier, France.
3. Norwegian University of Science and Technology NTNU, Trondheim, Norway.
4. Office de l'Environnement de la Corse, Route de Campo Dell'Oro 20090 Ajaccio, France.

Résumé

L'activité humaine sur le littoral a un impact majeur sur l'environnement et sur la biodiversité sous-marine. La démarche d'éco-conception permet d'intégrer les objectifs environnementaux à la conception structurelle des ouvrages qui sont aptes à remplir leurs fonctions techniques et une fonction environnementale de support de la biodiversité. L'éco-conception des ouvrages est une approche globale et systémique qui est initiée par le client au moment du programme et qui se poursuit lors de la conception puis jusqu'à la phase d'exécution. A la demande de l'Office Environnemental de la Corse, cette méthodologie a été appliquée au projet expérimental de récifs artificiels et de corps morts du Ricantu dans la baie d'Ajaccio. Les ouvrages immergés ont pour but de proposer des habitats destinés aux espèces cibles à forte valeur ajoutée pour la pêche. Cet article décrit la démarche suivie pour éco-concevoir les ouvrages à construire 1) méthodologie suivie, 2) essais préliminaires en laboratoire pour évaluer les paramètres prioritaires, 3) réalisation d'ouvrages à l'échelle 1. La relation écosystème-ouvrage, le design des formes et des matériaux ont été investigués avec des objectifs de biomimétisme affirmés. Le suivi scientifique des ouvrages expérimentaux depuis près de 2 ans offre un retour d'expérience concret indispensable à la consolidation de la méthodologie à adopter dans le but de concevoir des ouvrages éco-conçus durables.

Soumis le 18 janvier 2019, accepté le 3 mai 2019, en ligne le 13 mai 2019.

Pour citer cet article :

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.

DOI: <https://doi.org/10.5150/revue-paralia.2019.n01>

1. Introduction

Les océans occupent les $\frac{3}{4}$ de la surface du globe. Les zones côtières, quant à elles, représentent 10 % des terres émergées mais abritent plus de 50 % de la population mondiale (AGROPOLISINTERNATIONAL, 2014). Les activités humaines qui en résultent conduisent à une forte artificialisation des littoraux (HALPERN *et al.*, 2008) et à des changements majeurs dans les écosystèmes (BULLERI & CHAPMAN, 2010). Le "mitage" des espaces naturels marins, entraîne une perte de connectivité spatiale (BISHOP *et al.*, 2017) et conduit à une érosion de la biodiversité (BARNOSKY *et al.* 2012), à l'heure de l'anthropocène (CORLETT, 2015). Le maintien des connectivités paysagères passe par une stratégie d'aménagement environnementale systémique, qui intègre la réduction des impacts lors de la conception technique des ouvrages (PIOCH *et al.*, 2018). C'est ce concept qui est promu par la World Association for Waterborne Transport Infrastructure (PIANC) sous l'appellation de "building with nature" (PIANC WG, 2011). Cette nouvelle approche en génie civil consiste à réaliser des infrastructures supports de biodiversité en intégrant des paramètres environnementaux spécifiques aux milieux aménagés, en s'inspirant de processus naturels, tout en proposant des solutions économiques et techniquement viables (DE VRIEND & VAN KONINGSVELD, 2015). L'éco-conception des ouvrages permet de développer de tels projets. Son principe s'inspire de l'idée de "renaturation de la culture", que proposait Jean-Marie Pelt en 1977 dans "L'homme renaturé". Ce concept se développe au travers de "l'écologie de la réconciliation" développé par Rosenzweig, qui plaide pour un "win-win" entre l'homme et la nature, dès lors que nous acceptons, dès la conception, que nos ouvrages soient supports de biodiversité (LACROIX & PIOCH, 2011). De plus, la notion d'éco-conception s'intègre parfaitement au sein de la séquence hiérarchique Eviter, Réduire et Compenser (ERC) mise en œuvre lors des études d'impacts de projets, récemment renforcée en France par le concept du "pas de perte nette" et consacré dans la Loi RBNP du 8/08/2016 de reconquête de la biodiversité.

De nombreux travaux de recherche actuels concluent à la nécessité absolue de concilier conception des ouvrages, économie des projets et design favorable à une biodiversité choisie (PIOCH *et al.* 2018). Les axes de recherche proposés sont larges (SOUCHE *et al.*, 2018a) :

- a) En premier lieu, à l'échelle macroscopique, ils ont trait à l'implantation et à la conception globale des ouvrages. En effet, différents travaux mettent en lumière l'aspect favorable de géométries irrégulières et hétérogènes (LUCKHURST & LUCKHURST, 1978 ; PAIS *et al.*, 2013), ou encore d'aménagements spécifiques au sein des ouvrages (BULLERI & CHAPMAN, 2010 ; FIRTH *et al.*, 2013). Enfin, à cette échelle, les partis pris architecturaux influencent directement la colonisation par certains organismes vivants (ROUANET *et al.*, 2015).
- b) En deuxième lieu, l'échelle de l'interface entre l'ouvrage et le milieu naturel est également investiguée. Certains chercheurs ont mis en évidence l'importance des

propriétés physico-chimiques de surface des ouvrages (TRAN *et al.*, 2012 ; STRAIN *et al.*, 2018) : rugosité (McGUINNESS & UNDERWOOD, 1986 ; PIOCH *et al.*, 2015 ; COOMBES *et al.*, 2015), porosité (GUILBEAU *et al.*, 2003), couleurs des supports (DONG *et al.*, 2010 ; PIOCH *et al.*, 2011) propriétés chimiques de surface des matériaux (GUILBEAU *et al.*, 2003 ; LEE *et al.*, 2008 ; MANSO *et al.*, 2014).

- c) Enfin, la question de la composition du matériau en lui-même est à considérer, (ANDERSON & UNDERWOOD, 1994 ; ANDERSSON *et al.*, 2009 ; GIANNANTONIO *et al.*, 2009). Certains auteurs proposent des bétons améliorés comme (DEVILLERS *et al.*, 2009 ; PERKOL-FINKEL & SELLA, 2014 ; CUADRADO-RICA *et al.*, 2015 ; SOUCHE *et al.*, 2016) ou bien l'emploi de matériaux bio-sourcés comme proposé par MORRIS *et al.* (2017).

Mais, tous les travaux de recherche soulignent l'influence majeure des paramètres environnementaux liés à l'écosystème local où l'ouvrage va être construit. Le tableau 1 recense de manière non exhaustive quelques exemples issus de la littérature.

Tableau 1. Effet des conditions environnementales sur la colonisation marine.

<i>Conditions</i>	<i>Effet</i>	<i>Lieu/ durée/référence</i>
<i>Ecosystème et site d'implantation</i>	<i>Un même ouvrage à différents endroits générera un assemblage différent</i>	(SHERMAN <i>et al.</i> , 2001)
<i>Période d'immersion et saison</i>	<i>Assemblage différent selon la période d'immersion et la saisonnalité</i> <i>Evolutivité de la colonisation au cours du temps</i>	(ANDERSON & UNDERWOOD, 1994) (CHOI <i>et al.</i> , 2006) (QVARFORDT <i>et al.</i> , 2006) (FÄRBER <i>et al.</i> , 2015)
<i>Durée d'immersion</i>	<i>Comparaison récifs artificiels - sites naturels sur 20 ans. Impact de l'âge</i> <i>Essais sur un an. Effet de la durée d'immersion</i>	(PERKOL-FINKEL <i>et al.</i> , 2005) (NICOLETTI <i>et al.</i> , 2007) (VAZ-PINTO <i>et al.</i> , 2014)
<i>Hydrodynamique</i>	<i>Importance des conditions hydrodynamiques sur la colonisation</i> <i>Effet de la conception d'ouvrages marins (digues ou production énergie) sur la flore et la faune marine</i>	<i>Chapitre 3 - Sheng Peter,</i> (SEAMAN, 2000) (ZANUTTIGH <i>et al.</i> , 2009) (WITT <i>et al.</i> , 2012)
<i>Pente du support</i>	<i>Diminution de la biomasse avec l'angle, assemblage différent (horizontal > vertical)</i> <i>Vulnérabilité du support aux dépôts de Matières en Suspensions (MES)</i>	<i>Japon/ 7 semaines</i> (SOMSUEB <i>et al.</i> , 2001) (AZEVEDO <i>et al.</i> , 2006)
<i>Température</i>	<i>Facteurs principaux concernant la colonisation de ciliés : température, salinité, nutriments</i>	<i>Chine/ 1 an</i> (GONG <i>et al.</i> , 2005)
<i>Luminosité</i>	<i>Existence d'un optimum selon les espèces</i>	<i>Australie/ 4 mois</i> (MUNDY & BABCOCK, 1998)

L'analyse de la bibliographie met donc en lumière l'importance et la multiplicité des facteurs environnementaux sur la colonisation, tant en termes de quantité que de qualité des assemblages créés. Ces facteurs locaux sont à prendre en compte comme des données d'entrée incontournables pour la conception d'infrastructures marines mieux intégrées à leur environnement.

En premier lieu, contrairement à une logique constructive usuelle plus attachée à des questions de résistance et de durabilité, il est nécessaire d'étudier prioritairement l'écosystème où sera implanté l'ouvrage (espèces, fonctions écologiques, habitats). En effet, les recherches liées aux structures artificielles démontrent clairement que les espèces utilisent ces nouveaux habitats, dès lors qu'ils répondent à leurs besoins naturels : reproduction, nourricerie, nurserie ou protection (CRESSON *et al.*, 2014). L'ouvrage peut donc être étudié finement afin de mimer des fonctionnalités écologiques proches du milieu naturel, à condition que celles-ci aient été définies et reproduites correctement (PERKOL-FINKEL *et al.*, 2006).

In fine, il apparaît que les pratiques constructives usuelles classiques en ingénierie maritime sont limitées et doivent être améliorées pour intégrer cette dimension écologique. Il s'agit de moderniser le travail de l'ingénieur pour passer de la conception d'ouvrage à l'éco-conception d'ouvrage. Cette nouvelle approche méthodologique vise à intégrer les objectifs environnementaux au cœur de la conception structurelle d'un ouvrage (PIOCH *et al.*, 2018 ; SOUCHE *et al.*, 2018a). Dans cet objectif, nous commencerons par définir et préciser la méthodologie d'étude proposée. Au vu de la quantité de paramètres sur lesquels il est possible de travailler, nous avons effectué des études en laboratoire afin de définir les paramètres clefs. Après cette phase préliminaire, les résultats des essais ont été transposés à la réalisation d'ouvrages expérimentaux, à l'échelle 1. Ces ouvrages ont été immergés dans le golfe d'Ajaccio pour l'Office Environnemental de la Corse (OEC). Ils ont fait l'objet d'une réflexion approfondie sur la relation écosystème-ouvrage et sur leur design dans le but d'obtenir des infrastructures bio-mimétiques qui s'intègrent parfaitement dans leur milieu.

2. L'éco-conception, positionnement et méthodologie

2.1 Définition et état de l'art

Pour Syntec (Fédération professionnelle des entreprises d'ingénierie de France)¹, l'éco-conception consiste à : "*Concevoir techniquement des projets en considérant également des préoccupations écologiques globales et locales. L'éco-conception peut s'appliquer à un grand nombre de secteurs, sans générer de surcoût à terme*".

Depuis 10 ans, l'Université Paul Valéry à Montpellier et IMT Mines Alès ont investigué le champ de l'éco-conception, en axant les travaux de recherche sur les géométries ou sur les matériaux utilisés (PIOCH, 2008 ; DEVILLERS *et al.*, 2009). Mais la première réalisation d'un ouvrage d'art maritime éco-conçu est relative à la réalisation d'une

canalisation sous-marine en HDPE de 400 mm, pour 2.5 km de long à Mayotte en 2009, sur des fonds de 0 à -26 m, pour un coût de 5 millions d'€ (PIOCH *et al.*, 2011). Le suivi écologique a mis en évidence la présence de macrophytes, d'invertébrés, de juvéniles et de poissons juvéniles ou adultes de plus de 48 espèces d'après l'état initial du milieu marin PARETO APNEE LAGONIA de 2010. Ces bons résultats sont sans commune mesure (moins d'une quinzaine d'espèces fixées) avec ce qui est constaté sur l'ancienne canalisation encore en place.

En Europe, le projet européen THESEUS relatif aux ouvrages de défense, a démontré que des dispositions environnementales intégrées très tôt à la conception favorise une plus grande liberté d'innovation pour améliorer la performance des ouvrages et pour un coût acceptable (FIRTH *et al.*, 2014). Ces recherches ont dégagé trois recommandations : 1) adapter la géométrie de la digue pour proposer une topographie favorable aux espèces natives, 2) réduire les opérations de maintenance, 3) favoriser la colonisation par des espèces locales ciblées.

En parallèle, en Hollande, le concept de "Building with Nature" a été appliqué au projet et au label Ecoshape. La méthodologie de conception qui en résulte peut s'énoncer comme suit : 1) comprendre les besoins techniques et environnementaux, 2) identifier des variantes qui proposent un service écologique, 3) comparer les solutions, les évaluer et retenir la meilleure, 4) préciser la solution proposée et 5) l'implémenter dans la phase suivante du projet (DE VRIEND & VAN KONINGSVELD, 2015).

Par conséquent, l'élargissement aux fonctions environnementales de la conception des ouvrages marins est une préoccupation croissante dans les projets d'aménagement et il faut donc développer les recherches en s'appuyant sur des démonstrateurs. En effet, les corpus de connaissances sont encore faibles pour fournir des critères d'aide au choix, aux décideurs, aux ingénieurs et aux entreprises (SELLA & PERKOL-FINKEL, 2015). S'il est possible de modifier les matériaux de construction ou les états de surface pour créer une diversité favorable à l'écosystème, ces modifications ne doivent pas aller contre les fonctionnalités techniques des ouvrages (PERKOL-FINKEL *et al.*, 2018).

2.2 Méthodologie proposée pour l'éco-conception des ouvrages d'art maritimes

Dans le cadre de cet article, la méthodologie adoptée ambitionne d'inscrire tous les objectifs technico-environnementaux, dans une vision systémique dès le démarrage du projet. L'objectif est une recherche permanente du "win-win" socio-écologique et un double bénéfice, celui des hommes et celui de la nature (PIOCH *et al.*, 2018). L'éco-conception qui en résulte nécessite une étroite collaboration entre l'ingénieur civil et l'ingénieur écologue pour prendre en compte tous les aspects, technico-environnementaux, économiques et sociaux tout au long du projet. Ce travail ne peut être complet sans l'implication de tous les acteurs, Maître d'Ouvrage, exploitant et futurs usagers (SOUCHE *et al.*, 2018a). Rappelons que les objectifs écologiques ne

peuvent pas faire passer au second plan les exigences techniques et les règles de l'art qui doivent garantir la fiabilité structurale des ouvrages maritimes.

La méthodologie usuelle d'études et de travaux, s'en trouve nécessairement modifiée et doit être adaptée. La démarche d'éco-conception nécessite donc l'adoption d'une approche systémique, (figure 1) basée sur une méthode de type AGILE qui influe sur le processus classique d'études de l'ouvrage (SOUCHE *et al.*, 2018b). Dans une telle approche, dès le début de l'opération, la concertation de toutes les compétences (ingénieurs, services de l'Etat, collectivités territoriales, associations environnementales...) est indispensable pour co-construire le projet et pour trouver de meilleures solutions adaptées aux particularités locales. Il est fondamental de lier théorie et savoir empirique en mobilisant des expertises locales rarement utilisées dans la conception d'ouvrages, comme les usagers et les professionnels de la mer (capitaineries, plaisanciers, pêcheurs, ...).

Le droit, les sciences économiques, la sociologie et, plus généralement, les disciplines qui se consacrent à la compréhension de la relation hommes-milieux naturels, sont à considérer et à associer avec les avancées les plus récentes de la recherche (génie civil, écologie, hydraulique, technologies) pour proposer de nouveaux outils, ou méthodes, innovants bien sûr, mais réalistes, faisables, économiquement et écologiquement pertinents.

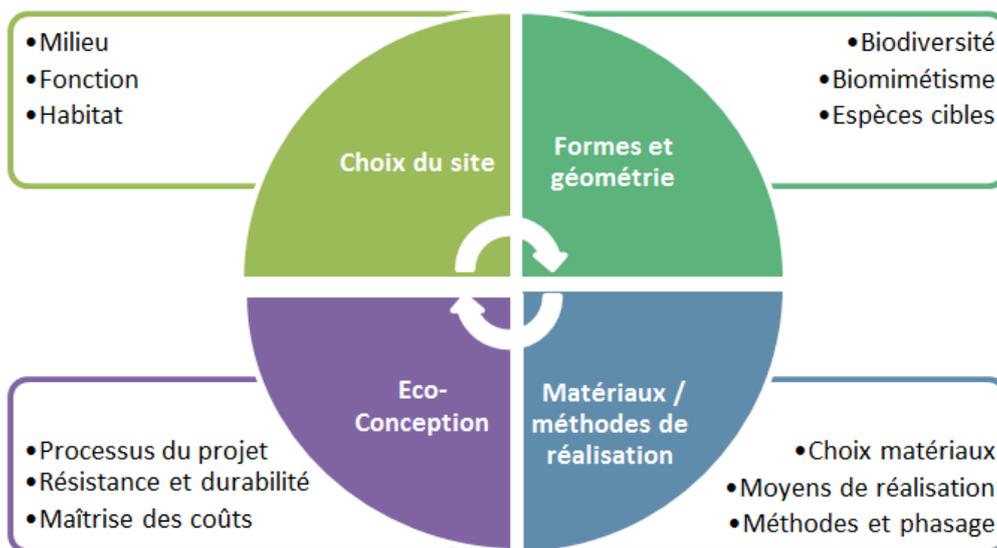


Figure 1. La démarche d'éco-conception, une approche systémique.

En premier lieu, l'étude porte sur l'état initial du milieu récepteur du futur projet pour définir toutes les enjeux, contraintes et objectifs technico-environnementaux. D'un point de vue environnemental, les questions portent sur les fonctions écologiques de l'ouvrage, les types d'habitats et les espèces en bénéficiant. Plus largement, la relation ouvrage-milieu doit être étudiée ainsi que la capacité à mimer les milieux naturels du

site de projet. La considération des paramètres biophysiques de l'environnement est un élément clé pour l'intégration d'éléments proactifs, tant pour le milieu naturel que pour une bonne durabilité de l'infrastructure (écosystèmes, houles, substrats, ...).

Dans un deuxième temps, des réponses techniques sont élaborées pour créer des infrastructures durables et conformes aux exigences de solidité et de durabilité. La maintenance des ouvrages doit être réduite avec une intervention humaine *a posteriori* minimale. Ce travail intègre les contraintes d'aménagement des territoires et d'organisation des activités économiques, pour minimiser les impacts anthropiques sur l'environnement (aspects réglementaires liés à l'évaluation environnementale, la loi Littoral, les SDAGE, SCoT, PLU). La conception proposée peut répondre à des objectifs de restauration d'écosystèmes dégradés et de création de nouveaux écosystèmes. Le génie écologique, c'est-à-dire la manipulation *in situ* de systèmes écologiques et la mise au point d'outils biologiques, doit permettre de maximiser les fonctions écologiques créées par des ouvrages maritimes artificiels.

La réalisation des travaux doit favoriser des technologies et des méthodes donnant aux espèces vagiles la possibilité de se déplacer vers d'autres habitats naturels, ou éventuellement mis à leur disposition. Par exemple, le recours à la préfabrication et à des techniques minorant le temps d'intervention *in situ* est à favoriser lorsque cela est possible. L'origine des matériaux utilisés, le lieu et les techniques de fabrication des éléments de structure ainsi que leur transport sont à considérer, en termes de dépense énergétique (Bilan carbone) et en termes d'analyse du cycle de vie (ACV). Ces préoccupations doivent être prises en compte dans la perspective d'un équilibre financier du projet et d'une faisabilité technologique des mesures proposées.

Une fois les travaux réalisés, une structure de gestion locale peut être mise en place pour s'assurer du bon usage des milieux naturels que l'ouvrage supporte. Elle associe l'opérateur économique chargé de l'exploitation et les acteurs usagers de l'ouvrage. Ce gestionnaire est en charge de la mise en œuvre et du suivi d'une charte d'utilisation, seule garantie locale pour une cohérence d'actions entre la pérennité de l'ouvrage, sa maintenance, sa fonctionnalité et les écosystèmes s'y développant. L'essentiel est de fournir un cadre aux usages et de définir clairement les droits et devoirs de chacun, en regard d'objectifs technico-économiques, mais également environnementaux.

3. Développement expérimental amont au projet

Sur la base de la démarche méthodologique précédemment développée, cette section présente les essais préalables réalisés en laboratoire. L'objectif était d'identifier les paramètres clés à utiliser dans le cadre du projet réel du "Ricantu". Les essais en laboratoire ont donc été fonction du contexte local du projet. Ils ont permis de mettre au point des solutions techniques mises en œuvre et immergées en 2017 à Ajaccio.

La campagne expérimentale a été réalisée au C2MA de l'IMT Mines d'Alès et à la station Ifremer de Palavas-les-Flots. Elle fait suite à quatre programmes de recherche

réalisés de 2008 à 2016 au sein des ports de Carnon, de la Grande Motte et de l'étang du Prévost à Palavas dont les résultats ont été publiés (DEVILLERS *et al.*, 2009 ; SOUCHE *et al.*, 2015 ; PIOCH *et al.*, 2015 ; SOUCHE *et al.*, 2016).

Les recherches présentées dans cet article ont porté sur trois échelles d'investigation :

- a) A l'échelle spatiale, l'implantation des ouvrages a été déterminée pour optimiser la continuité paysagère avec le milieu naturel voisin. L'architecture de l'ouvrage est la résultante des fonctions écologiques choisies et des habitats adaptés aux espèces cibles. Techniquement, ces ouvrages ont fait appel à la préfabrication pour s'adapter à des moyens de levage locaux limités. L'assemblage définitif a été réalisé à l'aide de moyens sub-aquatiques.
- b) A l'échelle de l'interface ouvrage / milieu, les paramètres rugosité, pH de surface et couleur ont été investigués. La lixiviation éventuelle de substances issues du béton, et potentiellement néfastes à la colonisation, a été mesurée dans l'eau déminéralisée et dans l'eau de mer.
- c) A l'échelle du matériau, une approche multi-matériaux est proposée en fonction des objectifs techniques et écologiques de chaque partie des ouvrages (dessus, dessous, parties intérieures, côtés...).

3.1 Matériaux et méthodes

Les matériaux utilisés pour les ouvrages réalisés sont principalement l'acier, des cordages en matières composites et du béton. Dans cette sous-section un focus sur le matériau béton est proposé. Les formulations de béton utilisées varient en fonction du type de liant utilisé composé soit de 100 % de ciment blanc CEM I PM 52,5 pour le béton témoin soit de 40 % de ciment blanc CEM I PM 52,5 et de 60 % de laitier pour les deux autres formulations conformément au tableau 2.

Tableau 2. Formulations des bétons testés et résultats (affaissement au cône d'Abrams et résistances mécaniques à 28 jours).

	CEM 1	Laitier	Sable (0/4) mm	Granulats (4/20) mm	Eau totale / Eau efficace	Affaissement (cm) Résistances μ et $\{\sigma\}$ (MPa)
	350	--	771	1074	165	20
Béton témoin (BT)					151	50,8 {2,1}
Béton Laitier lisse - rugueux (BL) - (BR)	140	210	771	1074	165 151	18 47,8 {0,5}
Béton Laitier lisse rose (BLR)	140	210	771	1074	165 151	19 48,9 {1,74}

L'affaissement et la résistance mécanique à 28 jours ont été mesurés conformément aux normes NF EN 12350-2 et NF EN 12390-3.

Des gâchées de béton de 25 litres permettaient de confectionner des disques de 11 cm de diamètre et de 7 cm de haut qui ont été immergés dans l'eau de mer à 28 jours. Le béton "laitier blanc" est fabriqué selon deux variantes : parement lisse et parement rugueux, ce qui représente au total 4 bétons testés (Figure 2).

Au final, par béton testé, douze disques ont été réalisés et placés dans des bacs à la station IFREMER de Palavas-les-Flots entre avril et mai 2016. Les bacs étaient alimentés par de l'eau de mer en circuit ouvert et soumis à des conditions environnementales extérieures de saison (température, ensoleillement, salinité de l'eau).



Figure 2- bac d'immersion des échantillons (figure à gauche) et échantillons immergés (figure à droite) Station Ifremer de Palavas-les-Flots.

Chronologiquement différents essais et mesures ont été effectués sur les échantillons :

- a) La mesure de pH des bétons a été faite en mélangeant 5 grammes de béton durci prélevés en surface du disque et mélangé avec 50 ml d'eau distillée (pH 7) conformément aux essais réalisés par (PERKOL-FINKEL & SELLA, 2014).
- b) Une étude de la lixiviation de composés a été effectuée dans de l'eau déminéralisée et dans de l'eau de mer à l'aide d'une spectrométrie de masse avec ionisation par plasma. L'eau était renouvelée tous les 7 jours.
- c) La vitesse et la distribution de la colonisation ont été suivies par prises de vue photographiques de la surface des disques tous les 7 jours. La surface recouverte par les organismes était quantifiée à l'aide du logiciel "images J" (SCHNEIDER *et al.*, 2012). Un exemple de détermination de la surface recouverte est présenté sur la Figure 3. Le seuillage lors de la segmentation de l'image s'effectue manuellement. La méthodologie et le traitement statistique sont identiques à ce qui est décrit dans les articles de PIOCH *et al.* (2015) et de SOUCHE *et al.* (2016).

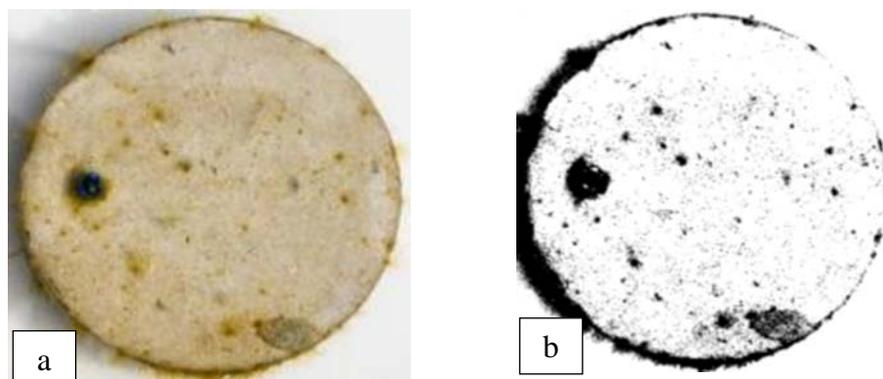


Figure 3. Analyse d'image (logiciel Image J) de la colonisation du béton témoin, image originale (figure a) et après traitement (figure b). L'aire colonisée est de couleur noire.

- d) A partir des échantillons vieillis dans l'eau de mer, des coupes ont été réalisées et des cartes élémentaires des surfaces découpées sont obtenues à l'aide d'un scanneur de fluorescence de rayons x (FRX).

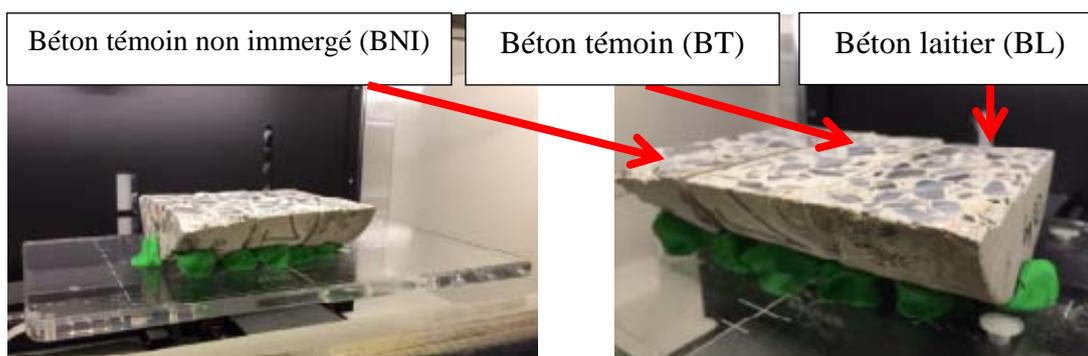


Figure 4. Système M4 Tornado μ XRF (Bruker) équipé avec un tube rayon X (source Ag) avec un collimateur et deux détecteurs de dérive au silicium (DDS) sans filtres.

3.2 Résultats et discussion

3.2.1 Effet du pH sur la colonisation

D'après la bibliographie le choix du liant CEM I ou ciment au laitier influe sur le pH de surface du matériau qui lui-même influe sur la colonisation (FENKEL & SELLA, 2014 ; MANSO *et al.*, 2014). Toutefois, des expérimentations réalisées en Norvège (DE WEERDT *et al.*, 2014 ; JAKOBSEN *et al.* 2016) mettent en évidence que les bétons exposés à l'environnement marin sont soumis à une attaque rapide de l'eau de mer (moins de 21 jours) et sont sujets à des changements élémentaires de phase près de la surface, et ce indépendamment du type de liant testé. Le choix du ciment n'aurait donc plus d'impact sur la chimie de surface du matériau cimentaire au-delà de quelques semaines ce qui limiterait l'impact sur la colonisation par les algues.

Ces résultats qui peuvent paraître contradictoires au premier abord nous ont conduit à mener en parallèle, l'étude de la colonisation et l'étude du changement de phase en surface à NTNU/SINTEF, Trondheim, Norvège. Les résultats obtenus ont permis de motiver le choix du liant pour les ouvrages expérimentaux à réaliser en Corse.

Dans un premier temps, le pH de surface a été mesuré et des valeurs de 12,5 pour le béton (BT) et 10,5 – 10,9 pour les bétons (BL), (BLR), (BR) ont été mesurées. C'est conforme aux valeurs de la bibliographie (PERKOL-FINKEL & SELLA, 2014).

En parallèle des tests de lixiviation ont été réalisés sur le béton témoin et le béton au laitier pour vérifier la capacité de relargage de substances toxiques dans de l'eau déminéralisée et dans de l'eau de mer.

- Dans l'eau déminéralisée, on assiste à une attaque classique de la portlandite du béton (BT) par lixiviation. La lixiviation de métaux lourds n'est pas mesurable avec les moyens de mesure utilisés. Ces résultats sont conformes aux résultats obtenus dans l'étude de HILLIER *et al.*, (1999).
- Dans l'eau de mer, aucune modification d'analyse chimique n'a été constatée avant ou après immersion des échantillons, quels que soient les bétons testés. Ces résultats sont cohérents avec les résultats de McMANUS *et al.*, (2018) : pas de différences entre les bétons à base de ciment Portland ou de ciment aux laitiers et peu de relargage attendu dans le milieu naturel où le taux de dilution est infini.

Dans un deuxième temps, la colonisation de surface a fait l'objet d'un suivi quantitatif en fonction du temps par photographie puis analyse d'images (figure 5). Les courbes obtenues permettent de comparer les différents bétons testés dans un environnement similaire et de mesurer les effets des paramètres testés sur la colonisation par des algues et macrophytes au printemps en Méditerranée.

La figure 5 reporte la moyenne des mesures effectuées sur les 12 échantillons immergés. L'écart type varie de 5 à 9% selon les points de mesure.

Au jeune âge, la comparaison entre le béton témoin (BT) et le béton au laitier (BL) met en évidence un meilleur comportement de ce dernier avec près de deux fois plus de surface colonisée au bout d'un mois conformément à GUILBEAU *et al.*, (2003) ; PERKOL-FINKEL & SELLA, (2014) et McMANUS *et al.*, (2018).

Au-delà de 5 semaines, le développement des algues vertes s'effectue dans les trois dimensions et rend impossible l'étude par analyses d'images. Il serait alors nécessaire d'effectuer des analyses par pesée conformément aux essais réalisés par GUILBEAU *et al.*, (2003). De telles mesures n'ont pas été effectuées mais on a pu constater visuellement qu'à partir de 5 semaines la colonisation s'uniformise sur les disques.

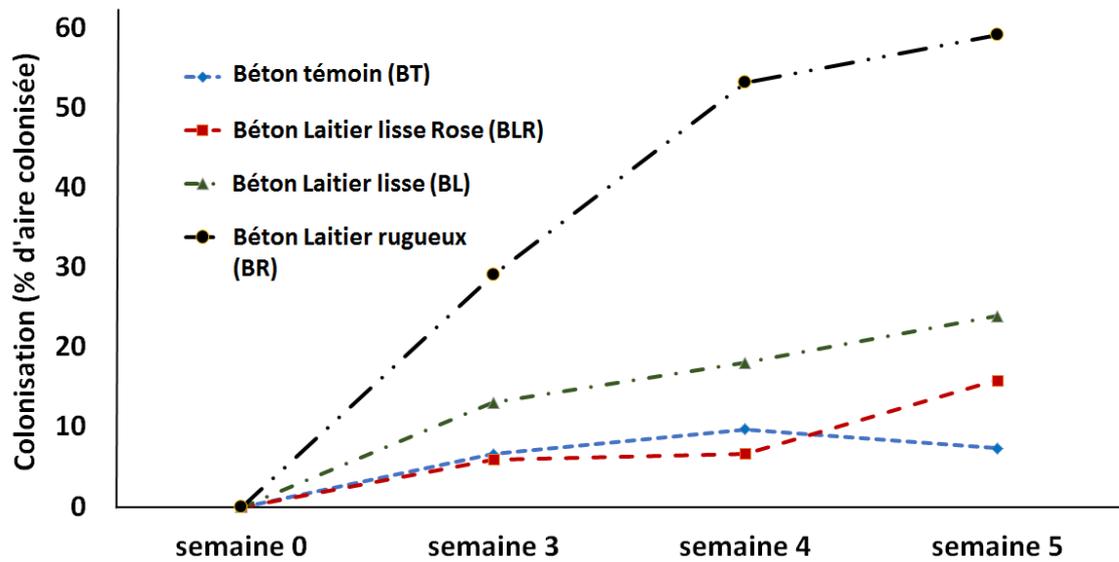


Figure 5. Colonisation moyenne en % de surface totale en fonction du temps.

3.2.2 Effet du vieillissement de surface

En parallèle du suivi de la colonisation, l'effet de l'attaque des bétons par l'eau de mer sur des bétons à surface lisse donc comparable a été investigué à 90 jours, (figure 6).

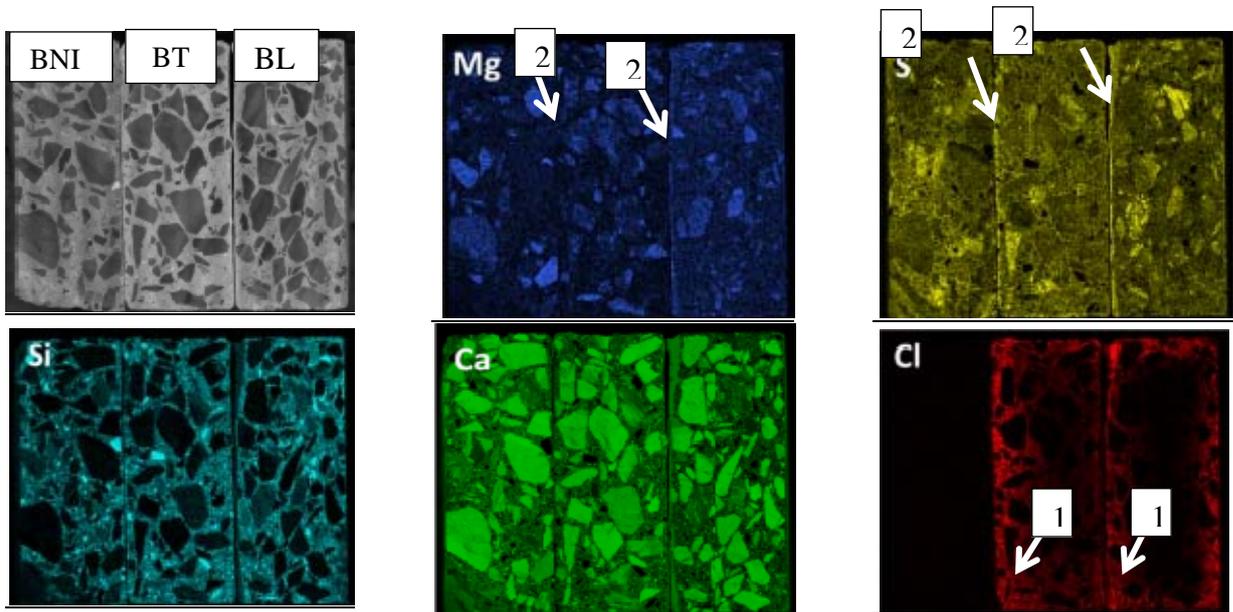


Figure 6. Cartes élémentaires comparatives d'un échantillon de béton non immergé, du béton témoin immergé 90 jours et du béton "laitier blanc" immergé 90 jours

Les résultats mettent en évidence un sable riche en silice et des granulats calcaires riches en Ca mais également en Al-Fe-K-S-Mg. Le béton au laitier contient un peu plus de Mg et un peu moins de Ca que le béton témoin.

Après exposition à l'eau de mer, les constats suivants peuvent être dressés :

- Pour les bétons (BT) et (BL) il est constaté un enrichissement sensible en Cl contrairement au béton (BNI). On constate la présence d'un peu plus de Cl dans le béton témoin [1] que dans le béton au laitier.
- Pour les bétons (BT) et (BL), il est mesuré un léger enrichissement en ions Mg et S en surface des bétons immergés [2]

Globalement des tendances similaires entre le béton (BT) et le béton (BL) sont constatées. Elles mettent bien en évidence une modification chimique de surface des bétons sous l'effet de l'exposition à l'eau de mer conformément à JAKOBSEN *et al.*, (2016). Ces constats concourent à expliquer l'uniformisation de la colonisation constatée visuellement au bout de quelques semaines et le fait qu'à plus long terme, le pH de surface du matériau influe moins sur la colonisation que d'autres critères.

3.2.3 Effet de la texture

La texture d'un béton immergé est un paramètre reconnu important pour la colonisation d'un support minéral par des organismes vivants marins. Dans cette étude, il a été décidé de tester une rugosité multi-échelle (du mm au dm) qui est recommandée en conclusion de nombreux travaux bibliographiques. La technologie de coffrage utilisée pour l'obtention de cette rugosité est identique à celle des futurs ouvrages expérimentaux de la baie d'Ajaccio où il a été choisi de copier l'état de surface d'une roche naturelle locale.

Ce choix de "bio-mimétisme" en termes de design géométrique mais aussi d'état de surface des matériaux est la conséquence de l'analyse de la bibliographie qui met en lumière que les substrats naturels présentent généralement de meilleurs résultats quantitatifs et qualitatifs que les substrats artificiels (RELINI *et al.*, 1998 ; PERKOL-FINKEL & BENAYAHU, 2004 ; NICOLETTI *et al.*, 2007 ; PERKOL-FINKEL & BENAYAHU, 2007 ; CRESSON *et al.*, 2014 ; FIRTH *et al.*, 2014).

La figure 7 récapitule les différents bétons testés et les résultats qualitatifs obtenus en termes de colonisation au cours des 5 premières semaines.

En termes de résultats, la figure 7 montre que le béton (BR) a une colonisation plus importante dès les premiers instants et jusqu'à la semaine 5 où le pourcentage de colonisation est 4 fois plus grand que pour le béton (BL).

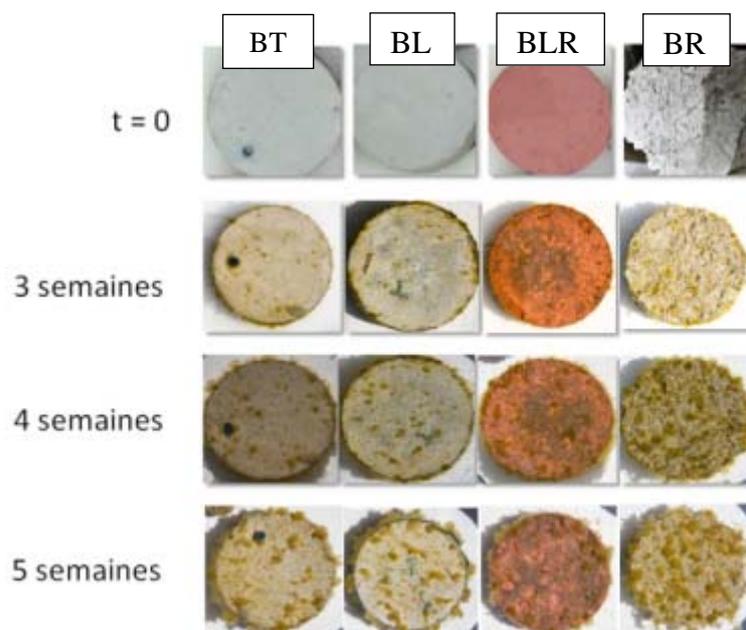


Figure 7. Suivi qualitatif représentatif de la colonisation d'un échantillon moyen de chaque béton testé.

3.2.4 Effet de la couleur du substratum

La plupart des ouvrages maritimes sont réalisés en béton gris. Il a donc été décidé de réaliser d'une part des bétons blancs et d'autre part un béton de couleur rose vif. En effet, plusieurs études (DONG *et al.*, 2010 ; PIOCH *et al.*, 2011) s'entendent sur le fait que les couleurs vives et foncées (rouge, rose, noir) seraient plus efficaces que les couleurs claires et ternes comme le blanc et le gris vis-à-vis de la colonisation. Les deux bétons (BL) et (BLR) ont la même composition, la même texture, et sont placés dans le même environnement. Ils ne diffèrent que par leur couleur. Les résultats obtenus ne mettent pas en évidence un effet majeur de la couleur sur la colonisation. Le béton (BLR) est moins colonisé que le béton (BL). Toutefois, il faut nuancer les résultats obtenus sous 50 cm d'eau, car en mer les couleurs sont modifiées sous l'effet de l'absorption sélective sous-marine qui voit le rouge quasiment totalement absorbé dès que des profondeurs de 3 à 4 mètres sont atteintes.

3.3 Bilan de la phase de développement

Les essais en laboratoire ont été réalisés pour être représentatifs des ouvrages expérimentaux à construire à Ajaccio. Les paramètres testés ont permis d'étayer les choix à faire quant à l'objectif d'une colonisation efficace des ouvrages futurs. Au final, il a été choisi de réaliser des ouvrages biomimétiques qui reproduisent des sites naturels voisins, et de jouer sur les paramètres "rugosité" et "texture de surface" des ouvrages en béton. En effet, ce paramètre est celui qui a montré les meilleurs résultats lors des essais. Compte tenu du faible gain apporté par le choix d'un ciment au laitier et de

L'absence de ce type de liant localement à Ajaccio, il a été décidé de conserver un liant CEM I prise mer (PM). Enfin des constats complémentaires relativement à l'effet des couleurs ont été menés à des profondeurs de 30 mètres sous la surface.

4. Les ouvrages expérimentaux du golfe d'Ajaccio

4.1 Contexte et objectifs

L'Office de l'Environnement de la Corse (OEC), Maître d'ouvrage, a engagé une opération de construction d'ouvrages (récifs artificiels et lests) de nouvelle génération au fond du golfe d'Ajaccio, au niveau de la plage du Ricantu (figure 8) avec pour objectif l'augmentation de la production halieutique et la reconstitution des biocénoses marines. Cette opération s'inscrit dans un programme plus vaste d'actions de valorisation et de protection de ce golfe vis-à-vis des pressions anthropiques. Le golfe d'Ajaccio est classé zone Natura 2000 (FR 9402017) et fait l'objet d'un plan de gestion qui précise les moyens à utiliser pour le maintien ou le rétablissement des habitats naturels et des espèces dans un état de conservation favorable.

L'implantation choisie par l'OEC tient donc compte des différents usages dans la baie et a fait l'objet d'une large concertation avec les acteurs locaux. La localisation retenue pour les ouvrages se situe au droit de la zone sableuse du Ricantu à proximité de zones rocheuses et d'herbiers de posidonies, au Sud de la Baie (Figure 8).

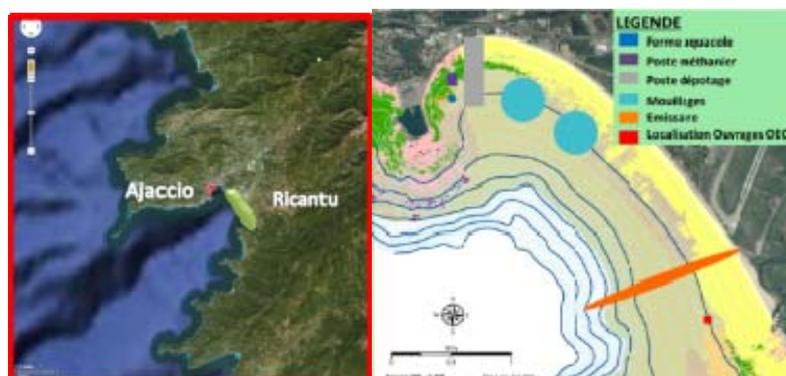


Figure 8. Localisation du site d'immersion des ouvrages.

Suite à la concertation avec les acteurs locaux, l'OEC a conclu à la nécessité de mettre en place une approche innovante et de recherche à l'échelle de ces ouvrages expérimentaux, adaptés aux conditions locales et qui feront l'objet d'un suivi scientifique pendant trois ans. A l'issue du suivi et d'un bilan technico-environnemental, l'OEC envisagera de réaliser un vaste programme d'aménagements du golfe d'Ajaccio.

Ces ouvrages expérimentaux sont de deux types : des récifs artificiels et des corps morts éco-conçus (alliant habitats artificiels et effet de lest pour ancrage). La démarche

adoptée pour la conception des ouvrages s'inspire de la connaissance éthologique des espèces cibles locales, et du design des habitats naturels locaux (bio-mimétisme). Cette démarche est illustrée sur la figure 9.

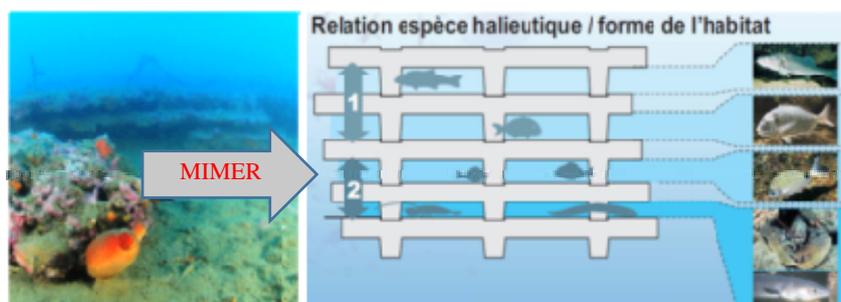


Figure 9. Explication de la démarche d'éco-conception basée sur l'éthologie et le bio-mimétisme, relation ouvrage – milieu.

Le design des formes et des matériaux est déterminé pour répondre au cahier des charges environnemental. De plus, compte tenu de l'absence d'effet d'échelle, l'économie du projet impose de réaliser des ouvrages dont le poids des éléments qui les constituent est limité afin d'utiliser les moyens de manutention et d'immersion locaux. Dès le démarrage des études, le concepteur a donc dû prendre en compte un design modulaire, et intégrer l'aspect constructif des moyens et méthodes de réalisation. A ce stade, l'appui d'experts locaux, usagers de la mer (plongeurs, pêcheurs, apnéistes), a été mobilisé pour affiner la conception de l'ouvrage.

Il en résulte des ouvrages innovants, car conçus avec une vision écosystémique et dont la construction est en complète adéquation avec les moyens techniques locaux.

La conception est partie de "la feuille blanche" avec cinq objectifs principaux :

- a) Offrir des habitats adaptés à des espèces cibles locales (juvéniles et adultes),
- b) Restaurer des ressources halieutiques sur des fonds marins dégradés par les activités humaines,
- c) Tester de nouveaux concepts constructifs adaptés aux moyens techniques locaux,
- d) Tester de nouveaux types de structures : modularité,
- e) Tester différents types de matériaux : béton, acier, cordages, filets et bio-concrétion naturelle par système Géocorail@.

4.2 Ouvrages biomimétiques réalisés en béton

Pour certains ouvrages, (voir figure 10), il a été choisi d'utiliser le matériau béton qui présente plusieurs avantages :

- a) la capacité à être moulé selon des formes libres,
- b) une facilité d'exécution de textures en surface de l'ouvrage,
- c) la possibilité de faire des ouvrages de colorés.



Figure 10. Eléments en béton coulés par ISULA Services.

(a) Pieds de l'élément, (b) inclusions dans le béton, (3) traitement architectonique.

La fabrication des modules a été réalisée par la société ISULA Services basée à Ajaccio à partir d'un béton dosé à 350 kg de ciment CEM I 52,5 PM et dont le rapport Eau /Ciment – E/C est de 0,55. La valeur moyenne des résistances obtenues à 28 jours est de plus de 35 MPa, résistance satisfaisante pour un ouvrage de classe XS2 au sens de la norme EN206-1.

Le coffrage des éléments a été réalisé à l'aide d'un moule en silicone fourni par la société LIB-Industries basée dans le Gard (cf figure 11-b). L'usage de ce coffrage autorise l'obtention d'une rugosité multi-échelles qui est plus propice au développement des assemblages qu'une surface lisse (voir essais en laboratoire préliminaires). De plus, le moule utilisé permet de s'affranchir de l'usage d'huiles de décoffrage qui est à déconseiller si une colonisation est recherchée. Enfin, la technologie proposée par LIB est parfaitement adaptée pour répondre à des objectifs de bio-mimétisme car elle permet de reproduire un état de surface similaire à celui d'une roche en place (voir figure 11-a). ISULA Services a également mis en place des inclusions de différents matériaux en surface des pièces de béton pour favoriser un effet multi-matériaux qui peut être favorable à l'accroche d'une plus grande diversité d'organismes vivants.



Figure 11. Coffrages fournis par LIB Industries

(a) roche naturelle, (b) moule et ferrailage, (3) démoulage.

Une fois en place, dès l'immersion, les résultats esthétiques et biomimétiques se sont révélés très satisfaisants. La figure 12 met en parallèle les nouveaux habitats un mois après l'immersion et des habitats naturels voisins qui ont servi de modèles.

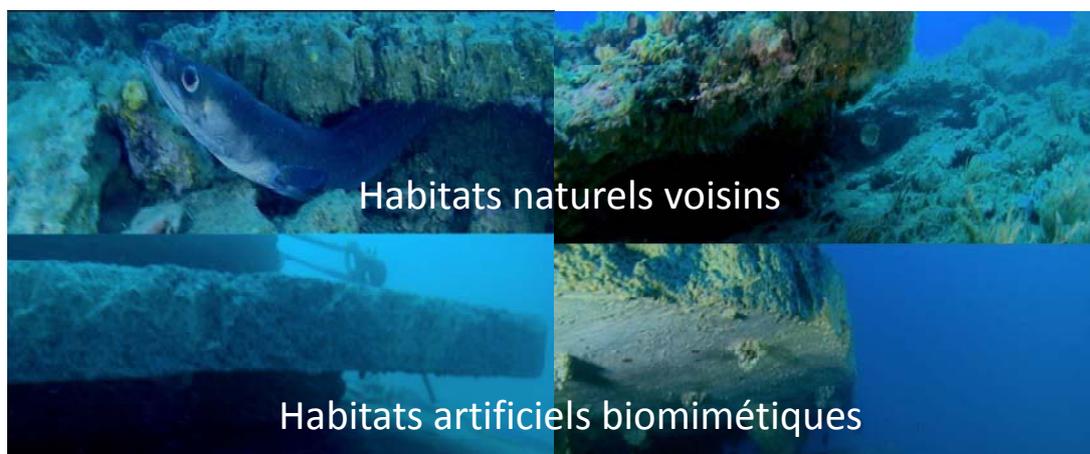


Figure 12. Eléments de récifs artificiels après immersion comparés aux habitats naturels modèles.

4.3 Suivi écologique des ouvrages

Conformément aux spécifications de FOURRIER *et al.*, (2015), les habitats artificiels font l'objet d'un suivi écologique de 3 ans avec des plongées de contrôle 4 fois par an.

Au bout d'une année d'immersion, les premiers résultats du suivi écologique réalisé par les scientifiques de la STARESO, et les plongeurs hyperbares de l'OEC, sont encourageants (figure 13). Ils font notamment état de la présence (noms vernaculaires) :

- dans les inventaires ichtyologiques des espèces cibles halieutiques : langouste, chapon, saint-pierre, rouget, baliste, sar, sériole, etc...
- dans les inventaires faune / flore : hydraires, oursins, spirographes, moules, pagures, étoiles de mer, etc...



Figure 13. Colonisation des ouvrages artificiels par diverses espèces (hydraires, algues brunes, oursins, spirographes, sar, Saint-Pierre...).

5. Conclusions et perspectives

Le projet d'Ajaccio s'inscrit dans un long cheminement qui a commencé lors de la réalisation de premières expérimentations dès 2008 et il démontre qu'il est possible d'afficher des objectifs ambitieux d'éco-conception pour les ouvrages maritimes à construire dans des conditions économiques normales.

Ce projet expérimental a permis de mettre en pratique la méthodologie d'éco-conception sur un cas réel de construction de récifs artificiels et de corps morts. L'articulation essais de laboratoire - travaux a servi à orienter les choix techniques du projet.

Les aménagements de l'OEC ont permis de mettre en exergue des compléments méthodologiques à adopter, pour mener à bien un projet éco-conçu :

- a) Le Maître d'ouvrage doit intégrer la démarche d'éco-conception dès le départ du projet dont l'organisation et le cadencement s'en trouvent impactés.
- b) Les concepteurs doivent travailler en équipe pluridisciplinaire large. La concertation doit être très présente dans un souci d'efficacité technique et environnementale. Le projet doit s'adapter aux conditions techniques et environnementales locales.
- c) Pendant la phase de réalisation, les entreprises doivent être forces de proposition mais doivent être accompagnées pour conserver cohérence avec la conception initiale.

L'objectif écologique qui consiste à instaurer une relation habitat-milieu ne permet pas l'emploi de solutions standards, dites "sur étagères". Cela impose le développement de solutions techniques spécifiques à chaque projet, et à chaque site. Ces solutions se développent par une étude fine de l'ouvrage pour répondre à la fois aux exigences techniques de résistance et de durabilité et aux objectifs environnementaux de support de la biodiversité. L'étude en laboratoire qui précède le chantier permet de motiver les choix faits et de les justifier. En effet, la transposition à des ouvrages réels nécessite de s'engager en amont sur des résultats à atteindre pour un investissement financier donné. Durant l'exploitation de l'ouvrage, le suivi scientifique est primordial pour évaluer objectivement les solutions qui ont été adoptées et pour évaluer les gains écologiques de ces choix par rapport à des ouvrages "classiques".

Des recherches, encadrées par un suivi écologique et technique poussé (durabilité), sont encore nécessaires pour comprendre les mécanismes de colonisation et notamment pour mesurer plus finement l'interaction matériau béton – eau de mer – organismes vivants pendant les premières semaines. Par ailleurs, dès lors que l'installation d'assemblages vivants est favorisée sur des ouvrages, il convient de mesurer l'interaction entre colonisation et durabilité des ouvrages, à l'échelle de la durée de service des ouvrages maritimes pour des échelles allant de 50 à 100 ans.

Les développements des recherches et des techniques sur des sujets tels que l'aménagement du territoire et l'écologie d'une part, les matériaux et structures du génie civil d'autre part, ouvrent de belles perspectives pour le développement futurs d'ouvrages marins éco-conçus biomimétiques.

Remerciements

Les auteurs remercient Emmanuel Rezzouk (IFREMER, station de Palavas-les-Flots, Unité Biologie des organismes marins exploités), l'OEC et tous les acteurs du projet "Ricantu" (administrations, pêcheurs, scientifiques, associations), les sociétés ISULA Services, LIB-industries, l'apnéiste et pêcheur professionnel Pierre ROY, le bureau d'études COGITE, le service des phares et balises d'Ajaccio, le service hyperbare de l'OEC, NTNU, IMT Mines Alès, l'UPV Montpellier 3, les étudiants R.Cherfaoui, F.Lamour, R.Litras, M.Maurel, A.Saidani pour leur participation ou soutien.

6. Références bibliographiques

- AGROPOLISINTERNATIONAL (2014). *Atelier de réflexion prospective MERMED Adaptation aux changements globaux en mer Méditerranée*. 156 p.
- ANDERSON M.J., UNDERWOOD A.J. (1994). *Effects of substratum on the recruitment and development of an intertidal estuarine fouling assemblage*. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, Vol. 184, pp 217–236. [https://doi.org/10.1016/0022-0981\(94\)90006-X](https://doi.org/10.1016/0022-0981(94)90006-X)
- ANDERSSON M.H., BERGGREN M., WILHELMSSON D., ÖHMAN M.C. (2009). *Epibenthic colonization of concrete and steel pilings in a cold-temperate embayment : a Weld experiment*. Helgoland Marine Research, Vol. 63, pp 249–260. <https://doi.org/10.1007/s10152-009-0156-9>
- 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>
- BARNOSKY A., HADLY E., BASCOMPTE J., BERLOW E., BROWN J., FORTELIUS M., GETZ W., HARTE J., HASTINGS A., MARQUET P., MARTINEZ N., MOOERS A., ROOPNARINE P., VERMEIJ G., WILLIAMS J.W., GILLESPIE R., KITZES J., MARSHALL C., MATZKE N., MINDELL D., REVILLA E., SMITH A. (2012). *Approaching a state shift in Earth's biosphere*. Nature Vol. 486, pp 52–58. <https://doi.org/10.1038/nature11018>
- BISHOP M.J., MAYER-PINTO M., AIROLDI L., FIRTH L.B., MORRIS R.L., LOKE L.H.L., HAWKINS S.J., NAYLOR L.A., COLEMAN R.A., CHEE S.Y., DAFFORN, K.A. (2017). *Effects of ocean sprawl on ecological connectivity: impacts and solutions*. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, Vol. 492, pp 7–30. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2017.01.021>
- 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>

CHOI C.G., OHNO M., SOHN C.H. (2006). *Algal succession on different substrata covering the artificial iron reef at Ikata in Shikoku, Japan*. *Algae*, Vol. 21, pp 305–310.

<https://doi.org/10.4490/ALGAE.2006.21.3.305>

COOMBES M.A., LA MARCA E.C., NAYLOR L.A., THOMPSON R.C. (2015). *Getting into the groove: Opportunities to enhance the ecological value of hard coastal infrastructure using fine-scale surface textures*. *Ecological Engineering*, Vol. 77, pp 314–323.

<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.01.032>

CORLETT R.T. (2015). *The Anthropocene concept in ecology and conservation*. *Trends in Ecology & Evolution*, Vol. 30, pp 36–41.

<https://doi.org/10.1016/j.tree.2014.10.007>

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*. 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.

DONG G., DONG S., WANG F., TIAN X. (2010). *Effects of materials, incubation time and colors of artificial shelters on behavior of juvenile sea cucumber *Apostichopus japonicus**. *Aquacultural Engineering*, Vol. 43, pp 1–5.

<https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2010.01.002>

FÄRBER C., WISSHAK M., PYKO I., BELLOU N., FREIWALD A. (2015). *Effects of Water Depth, Seasonal Exposure, and Substrate Orientation on Microbial Bioerosion in the Ionian Sea (Eastern Mediterranean)*. *PLoS One*, Vol. 10, pp 1–13.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0126495>

FENKEL S., SELLA I. (2014). *Perkol-brevet Econcrete*. US.

FIRTH L.B., THOMPSON R.C., BOHN K., ABBIATI M., AIROLDI L., BOUMA T.J., BOZZEDA F., CECCHERELLI V.U., COLANGELO M.A., EVANS A., FERRARIO F., HANLEY M.E., HINZ H., HOGGART S.P.G., JACKSON J.E., MOORE P., MORGAN E.H., PERKOL-FINKEL S., SKOV M.W., STRAIN E.M., VAN BELZEN J., HAWKINS S.J. (2014). *Between a rock and a hard place: Environmental and engineering considerations when designing coastal defence structures*. *Coastal Engineering*, Vol. 87, pp 122–135.

<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.10.015>

FIRTH L.B., THOMPSON R.C., WHITE F.J., SCHOFIELD M., SKOV M.W., HOGGART S.G., JACKSON J., KNIGHTS A.M., HAWKINS S.J. (2013). *The importance of water-retaining features for biodiversity on artificial intertidal coastal defence structures*. Diversity and Distributions, Vol. 19, pp 1275–1283.

<https://doi.org/10.1111/ddi.12079>

FOURRIER A., BARRAL M., DE MONTBRISON D., JOUVENEL J., ROCHE E., THORIN S., PARY B. (2015). *Guide pratique d'aide à l'élaboration, l'exploitation et la gestion des récifs artificiels en Languedoc-Roussillon*. CEPRALAMR. 234 p.

GIANNANTONIO D.J., KURTH J.C., KURTIS K.E., SOBECKY P.A. (2009). *Effects of concrete properties and nutrients on fungal colonization and fouling*. International Biodeterioration and Biodegradation, Vol. 63, pp 252–259.

<https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2008.10.002>

GONG J., SONG W., WARREN A. (2005). *Periphytic ciliate colonization : Annual cycle and responses to environmental conditions*. Aquatic Microbial Ecology, Vol. 39, pp 159–170. <https://doi.org/10.3354/ame039159>

GUILBEAU B.P., HARRY F.P., GAMBRELL R.P., KNOPF F.C., DOOLEY K.M. (2003). *Algae attachment on carbonated cements in fresh and brackish waters - Preliminary results*. Ecological Engineering, Vol. 20, pp 309–319.

[https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(03\)00026-0](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(03)00026-0)

HALPERN B.S., WALBRIDGE S., SELKOE K.A., KAPPEL C.V., MICHELI F., D'AGROSA C., BRUNO J.F., CASEY K.S., EBERT C., FOX H.E., FUJITA R., HEINEMANN D., LENIHAN H.S., MADIN E.M.P., PERRY M.T., SELIG E.R., SPALDING M., STENECK R. (2008). *A Global Map of Human Impact on Marine Ecosystems*. Science, Vol. 319, pp 948–952. <https://doi.org/10.1126/science.1149345>

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](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00200-2)

JAKOBSEN U.H., DE WEERDT K., GEIKER M.R. (2016). *Elemental zonation in marine concrete*. Cement and Concrete Research, Vol. 85, pp 12–27.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.02.006>

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>

LEE H.S., SIDHARTHAN M., SHIM C.S., KIM Y.D., LIM C.Y. (2008). *Screening and formulation of chemoattractant coatings for artificial reef structures*. Journal of environmental biology, Vol. 29, pp 605–612.

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>

- 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>
- MCGUINNESS K.A., UNDERWOOD A.J. (1986). *Habitat structure and the nature of communities on intertidal boulders*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, Vol. 104, pp 97–123. [https://doi.org/10.1016/0022-0981\(86\)90099-7](https://doi.org/10.1016/0022-0981(86)90099-7)
- McMANUS R.S., ARCHIBALD N., COMBER S., KNIGHTS A.M., THOMPSON R.C., FIRTH L.B. (2018). *Partial replacement of cement for waste aggregates in concrete coastal marine infrastructure: A foundation for ecological enhancement?* *Ecological Engineering*, Vol. 120, pp 655–667. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.06.062>
- MORRIS R.L., GOLDING S., DAFFORN K.A., COLEMAN R.A. (2017). *Can coir increase native biodiversity and reduce colonisation of non-indigenous species in eco-engineered rock pools?* *Ecological Engineering*, Vol. 120, pp 622–630. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.06.038>
- MUNDY C.N., BABCOCK R.C. (1998). *Role of light intensity and spectral quality in coral settlement: Implications for depth-dependent settlement?* *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, Vol. 223, pp 235–255. [https://doi.org/10.1016/S0022-0981\(97\)00167-6](https://doi.org/10.1016/S0022-0981(97)00167-6)
- NICOLETTI L., MARZIALETTI S., PAGANELLI D., ARDIZZONE G.D. (2007). *Long-term changes in a benthic assemblage associated with artificial reefs*. *Hydrobiologia*, Vol. 580, pp 233–240. <https://doi.org/10.1007/s10750-006-0450-3>
- PAIS M.P., HENRIQUES S., COSTA M.J., CABRAL H.N. (2013). *Improving the "chain and tape" method: A combined topography index for marine fish ecology studies*. *Ecological Indicators*, Vol. 25, pp 250–255. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.10.010>
- PERKOL-FINKEL S., BENAYAHU Y. (2004). *Community structure of stony and soft corals on vertical unplanned artificial reefs in Eilat (Red Sea): comparison to natural reefs*. *Coral Reefs*, Vol. 23, pp 195–205. <https://doi.org/10.1007/s00338-004-0384-z>
- PERKOL-FINKEL S., BENAYAHU Y. (2007). *Differential recruitment of benthic communities on neighboring artificial and natural reefs*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, Vol. 340, pp 25–39. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2006.08.008>
- PERKOL-FINKEL S., HADARY T., RELLA A., SHIRAZI R., SELLA I. (2018). *Seascape architecture – incorporating ecological considerations in design of coastal and marine infrastructure*. *Ecological Engineering*, Vol. 120, pp 645–654. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.06.051>
- 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.

- PERKOL-FINKEL S., SHASHAR N., BARNEAH O., BEN-DAVID-ZASLOW R., OREN U., REICHART T., YACOBOVICH T., YAHIEL G., YAHIEL R., BENAYAHU Y. (2005). *Fouling reefal communities on artificial reefs: Does age matter?* Biofouling, Vol. 21, pp 127–140. <https://doi.org/10.1080/08927010500133451>
- PERKOL-FINKEL S., SHASHAR N., BENAYAHU Y. (2006). *Can artificial reefs mimic natural reef communities? The roles of structural features and age.* Marine Environmental Research, Vol. 61, pp 121–135. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2005.08.001>
- PIANC Envicom 176. (2011). *The World Association for Waterborne Transport Infrastructure.* 13 p.
- 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 III. 227 p.
- 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>
- PIOCH S., SOUCHE JC., LE SAOUT G., BONATO O., CLERC L. (2015). *Comparaison expérimentale de la colonisation de bétons bio-actifs en milieu marin.* Conference RECIF, pp 1-8.
- QVARFORDT S., KAUTSKY H., MALM T. (2006). *Development of fouling communities on vertical structures in the Baltic Sea.* Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol. 67, pp 618–628. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2006.01.004>
- RELINI G., TIXI F., RELINI M., TORCHIA G. (1998). *Settlement on concrete blocks immersed in the Ligurian Sea (N-W Mediterranean).* International Biodeterioration & Biodegradation, Vol. 41, pp 57–65. [https://doi.org/10.1016/S0964-8305\(98\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0964-8305(98)80008-5)
- ROUANET E., ASTRUCH P., ANTONIOLI A. (2015). *How Artificial Reef Design and Architectural Complexity Affect the Benthic Colonization.* RECIF Conference, pp 53–60.
- SCHNEIDER C.A., RASBAND W.S., ELICEIRI K.W. (2012). *NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis.* Nature Methods, Vol. 9, pp 671–675. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2089>

- SEAMAN W. (2000). *Artificial Reef Evaluation*. CRC Press. 264 p.
<https://doi.org/10.1201/9781420036633>
- SELLA I., PERKOL-FINKEL S. (2015). *Blue is the new green – Ecological enhancement of concrete based coastal and marine infrastructure*. *Ecological Engineering*, Vol. 84, pp 260–272. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.09.016>
- SHERMAN R., GILLIAM D., SPIELER R. (2001). *Site-dependent differences in artificial reef function: Implications for coral reef restoration*. *Bulletin of Marine Science*, Vol. 69, pp 1053–1056.
- SOMSUEB S., OHNO M., KIMURA, H. (2001). *Development of seaweed communities on suspended substrata with three slope angles*. *Journal of Applied Phycology*, Vol. 13, pp 109–115. <https://doi.org/10.1023/A:1011180527959>
- SOUCHE JC., LE SAOUT G., SALGUES M., PIOCH S. (2016). *Effets de bétons bio-actifs sur la colonisation marine en environnement méditerranéen*. *Matériaux & Techniques*, Vol. 104, Article 504, 8 p. <https://doi.org/10.1051/mattech/2016033>
- SOUCHE JC., MARTARÈCHE F., MONIER T. (2015). *Du béton biogène pour favoriser la biodiversité marine dans les ouvrages maritimes éco-conçus*. Conférence AFGC.
- SOUCHE JC., PIOCH S., SALGUES M., IENNY P., LE SAOÛT G. (2018a). *Interaction des ouvrages avec leur environnement : Le milieu maritime*. Presses des Mines, 196 p.
- SOUCHE JC., SALGUES M., PIOCH S., DE WEERDT K. (2018b). *L'écoconception maritime : le paramètre matériaux*. Conférence Internationale Francophone NoMaD.
- STRAIN E.M.A., OLABARRIA C., MAYER-PINTO M., CUMBO V., MORRIS R.L., BUGNOT A.B., DAFFORN K.A., HEERY E., FIRTH L.B., BROOKS P.R., BISHOP, M.J. (2018). *Eco-engineering urban infrastructure for marine and coastal biodiversity: Which interventions have the greatest ecological benefit?* *Journal of Applied Ecology*, Vol. 55, pp 426–441. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12961>
- TRAN T.H., GOVIN A., GUYONNET R., GROSSEAU P., LORS C., DAMIDOT D., DEVES O., RUOT B. (2012). *Influence of the intrinsic characteristics of mortars on their biofouling by pigmented organisms: Comparison between laboratory and field-scale experiments*. *International Biodeterioration and Biodegradation*, Vol. 86, pp 334–342. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2013.10.005>
- 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>

WITT M.J., SHEEHAN E.V., BEARHOP S., BRODERICK A.C., CONLEY D.C., COTTERELL S.P., CROW E., GRECIAN W.J., HALSBAND C., HODGSON D.J., HOSEGOOD P., INGER R., MILLER P.I., SIMS D.W., THOMPSON R.C., VANSTAEN K., VOTIER S.C., ATTRILL M.J., GODLEY B.J. (2012). *Assessing wave energy effects on biodiversity: the Wave Hub experience*. Philosophical Transactions of the Royal Society, Vol. 370, pp 502–529. <https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0265>

ZANUTTIGH B., LOSADA I.J., THOMPSON R. (2009). *Ecologically based approach to coastal defence design and planning*. 15 p.