



HAL
open science

Effets de bétons bio-actifs sur la colonisation marine en environnement méditerranéen

Jean-Claude Souche, G. Le Saout, Marie Salgues, Sylvain Pioch

► **To cite this version:**

Jean-Claude Souche, G. Le Saout, Marie Salgues, Sylvain Pioch. Effets de bétons bio-actifs sur la colonisation marine en environnement méditerranéen. *Matériaux et Techniques*, 2017, 104 (5), <10.1051/mattech/2016033>. <ineris-01665628>

HAL Id: ineris-01665628

<https://ineris.hal.science/ineris-01665628v1>

Submitted on 16 Dec 2017

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

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



HAL Authorization

EFFETS DE BETONS BIO-ACTIFS SUR LA COLONISATION MARINE EN ENVIRONNEMENT MEDITERRANEEN

Effect of concrete with bio-active admixture on marine colonisation in mediterranean environment

Jean-Claude Souche* (1), Gwenn Le Saout (1), Marie Salgues (1) Sylvain Pioch (2)

(1) Centre des Matériaux des mines d'Alès (C2MA), École des mines d'Alès (EMA), 6, avenue de Clavières, 30319 Alès Cedex, France

(2) UMR 5175 CEFE, Université Paul Valéry, Montpellier, SupAgro, EPHE, Laboratoire Biologie Ecologie Environnement - UPV, Route de Mende, 34000 Montpellier, France

Jean-claude.souche@mines-ales.fr

Résumé

Les phénomènes de colonisation de substrats en béton sont des éléments d'avenir pour l'amélioration des fonctions écologiques d'ouvrages maritimes éco-conçus. C'est dans cet objectif que L'École des mines d'Alès et l'Université Montpellier III-CEFE UMR 5175 ont fabriqué et immergé quatre bétons de formulations différentes durant 56 jours. La colonisation par des organismes vivants sur un béton de référence, un béton à base de granulats biogènes et de deux bio-bétons contenant des activateurs organique ou minéral a été observée expérimentalement au moyen de prises régulières de photographies de la surface des éprouvettes puis par traitement d'images. Certaines formulations semblent améliorer la colonisation biologique, notamment celles associant des bio-activateurs : développement de biofilms, algues et petits animaux. Dans le même temps, l'emploi de certains ajouts peut aussi influencer de manière négative et significative sur la résistance mécanique du matériau. L'effet perturbateur de paramètres du milieu tels qu'une sédimentation aléatoire a également été mis en lumière.

La formulation d'un éco-béton résulte d'un compromis entre des objectifs fonctionnels de résistance mécanique et de durabilité dans l'environnement et des objectifs environnementaux de colonisation par le vivant.

Mots clefs : béton, colonisation marine, organismes benthiques, bio-adjuvant, écoconception

« Ce manuscrit a été accepté pour être publié dans la revue *Matériaux & Techniques* - <http://www.mattech-journal.org/>, volume 104, publié le 06 mars 2017 accessible en ligne à : <https://doi.org/10.1051/mattech/2016033> »

Abstract :

The concrete colonization provides pathways development for eco-design of maritime structures to improve marine biodiversity. However the current knowledge dealing with the relation material-environment is insufficient. Ecole des Mines d'Alès and UM3-CEFE UMR5175 University built and immersed four concretes samples to study its colonization by benthic fauna during 56 days.

To represent different materials, four concretes were chosen: an ordinary one, a concrete including sea shells aggregates and two concretes with bio-activators admixtures. Then, the colonization has been followed using photographs and images analysis.

Some concretes seem to improve the marine colonization as the bio-activators admixtures: biofilms are well developed, algae grow up and marine organisms are present. Nevertheless, some admixtures can have negative effects on structural strengths of concrete. At the same time, the experimental tests highlight the major role of environmental factors like random sedimentation.

The concrete mix design for a marine structure must take into account the mechanical strengths and durability targets as well as the environmental goals to boost the fauna and flora colonization.

Key words : concrete, marine colonization, benthic fauna, bio-admixture, ecodesign

1. Introduction (Introduction)

Aujourd'hui l'écoconception des ouvrages maritimes devient une préoccupation majeure et usuelle des acteurs portuaires. L'AIPCN « Association mondiale pour les infrastructures de transport maritimes et fluviales » met l'accent sur la nécessité de concevoir des ouvrages selon le concept de développement durable [1] [2] et édite des recommandations professionnelles sur le sujet. L'AIPCN se base notamment sur les prescriptions des ingénieurs de l'USACE [3] ou encore sur les recommandations du projet européen Ecoshape [4].

Le principe est bien de prendre en compte le milieu naturel pour concevoir un ouvrage qui diminue l'empreinte écologique du développement humain et qui favorise le développement d'écosystèmes diversifiés pour améliorer leur résilience [5] [6]. Par exemple, de nombreux travaux ont été réalisés sur la thématique des brise-lames, depuis le retour d'expérience sur les carapaces en béton d'ouvrages exécutés depuis 10 ans [7] jusqu'au projet européen Theseus [8] qui propose des solutions techniques pour atténuer les impacts sur l'environnement et augmenter l'accueil de la biodiversité.

En effet, les ouvrages artificiels marins créés par l'homme modifient le milieu naturel [9] et au fil du temps, deviennent à leur tour de nouveaux écosystèmes dont il faut comprendre les mécanismes de peuplement [10] [11]. Cependant les

facteurs en jeu sont très divers : zone d'immersion et implantation [12], saisons et temps d'immersion [13], conception de l'ouvrage [6] [11], type de matériaux utilisés [14] [15] [16].

Il en résulte une relation d'interdépendance entre le type d'ouvrage, les conditions d'exposition, le substrat, la saisonnalité, la colonisation par les organismes vivants qui est évolutive dans le temps [12] [14] [17] [18] et qui implique d'intégrer des objectifs environnementaux au cœur de la conception structurelle d'un ouvrage [6] [10] [19], qui devient alors « éco-conception ».

Dans ce contexte, le choix du matériaux de construction a un effet sur les cinétiques de colonisation et sur les espèces cibles [9] [15] [20]. Le matériau béton est reconnu comme plutôt favorable à l'installation de la biodiversité [15] [21]. 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, hydriaires...). Le cycle et la vitesse de colonisation vont dépendre des conditions environnementales [6] [18] comme de la nature du substrat (composition, texture, physico-chimie du support...) [14] [22].

La majorité des substrats à base de matériaux cimentaires ont un pH défavorable pour le développement de biotes [21]. Afin d'améliorer les facteurs de colonisation, il est possible de réduire le pH de surface du matériau de 13 à 9 environ en utilisant des ciments adaptés [23] ou en appliquant des traitements de surface [16]. Il est aussi envisageable de modifier la formulation (traitement de masse) en ajoutant des additifs pour activer la croissance des biotes colonisateurs [16].

Une première étude, réalisée en 2008, a permis la caractérisation puis l'emploi d'un matériau à moindre impact environnemental [24] puis a été suivie d'une campagne d'immersion d'échantillons dans le port de Carnon, France [25]. Deux autres campagnes d'immersion ont également été menées dans la lagune de l'IFREMER à Palavas en 2014 [26] et dans le port de la Grande Motte en 2015.

Ce document décrit et analyse les deux dernières campagnes d'immersion où quatre formulations de béton sont étudiées afin d'identifier les facteurs les plus différenciant pour l'évolution de la colonisation en fonction des spécificités de chacune des formulations et d'états de surface différenciés : un béton de référence noté (B), un béton à base de déchets de coquillages (BB), un bio béton contenant un activateur liquide organique noté (BE) et un bio béton incorporant un activateur liquide et des ajouts (poudres A et B) noté (BEP). Pour chaque formulation, différents états de surface sont comparés : lisse de décoffrage, brut de sciage, rugueux (faible rugosité < 1 mm).

2. PROGRAMME EXPERIMENTAL (EXPERIMENTAL PROGRAM)

2.1 Matériaux (Raw materials)

Quatre formulations de bétons ont été mises en oeuvre. Les bétons utilisés sont tous formulés avec un ciment Portland CEM I 52,5 N PM ES, un sable silico calcaire recomposé, un gravier silico-calcaire naturel, ainsi qu'un super-plastifiant

haut réducteur d'eau avec un rapport eau sur ciment de 0.6. Les compositions de ces bétons sont présentées dans le tableau 1.

Tableau 1: Formulation des bétons B, BB, BE et BEP, f_{c28} est la résistance à la compression à 28 jours mesurée selon la norme NF-EN-12390-3.

Formulation		B	BB	BE	BEP
	Densité (kg.m^{-3})	dosages pour 1 m^3 (kg)			
Gravier (5,6/11,2)	2.56	951	951	951	951
Sable (0/4)	2.62	827	580	827	745.3
Sable Bio minéral	2.60	-	247	-	-
Ciment Portland	3.19	333.3	333.3	333.3	333.3
Poudre A		-	-		81.9
Poudre B		-	-		27.5
Activateur	1.18	-	-	2.4	2.4
Superplastifiant	1.06	2.4	2.4	2.4	2.4
Eau	1	220.3	220.3	217.9	217.9
Affaissement (cm)		15	2.5	18	21
f_{c28} (MPa) $\{\sigma\}$		43.5 {1.1}	46.2 {0.6}	43.5 {0.2}	9.8 {0.2}

Dans le cas de la formulation BB, le sable naturel est substitué à hauteur de 30 % en masse par un granulat bio-minéral obtenu par traitement d'un mélange de coquillages. Le procédé d'obtention de ce granulat est décrit sur la figure 1. Le sable obtenu est recomposé selon la distribution granulométrique des sables normalisés CEN. On pourra se reporter à l'étude précédente [24] pour une caractérisation physico-chimique plus complète d'un sable similaire. Toutefois, d'après la norme granulats [27], il faut porter un intérêt particulier à deux caractéristiques de ce sable : la teneur en chlore et la teneur en matières organiques¹ qui doivent être les plus faibles possible afin de permettre une utilisation dans les bétons.

Le sable recomposé utilisé dans le béton BB, comporte 9 % de matières organiques et 2.5 % de teneur en chlore, valeurs acceptables uniquement pour des bétons non armés, ce qui limite le champ d'utilisation de tels granulats biogènes.

¹ Teneurs calculées selon la norme NF EN 12620

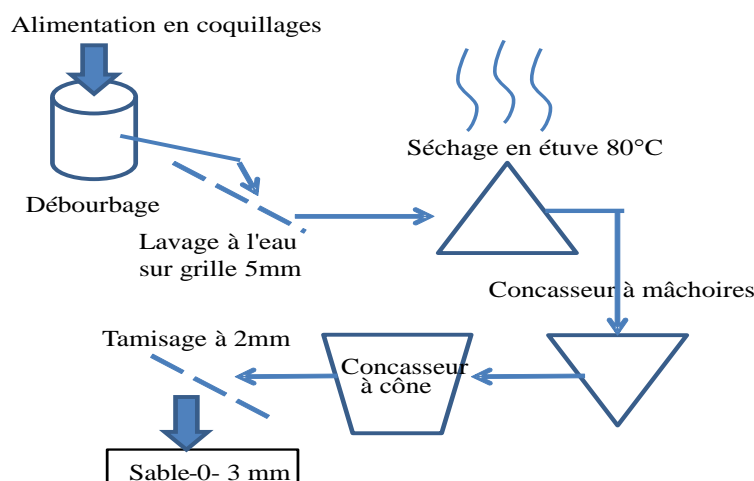


Figure 1: Procédé d'obtention d'un sable bio minéral.

Concernant les bio-activateurs utilisés, la poudre A est un mélange homogène constitué de grains solides de taille millimétrique. La poudre B est beaucoup plus complexe. Les observations au microscope électronique à balayage associées à la microanalyse par énergie dispersive de rayons X révèlent la présence de matières organiques. La composition spécifique des poudres A et B est sous protection industrielle et ne peut être divulguée dans cet article. Toutefois ces ajouts sont supposés favoriser la colonisation du matériau béton par les organismes vivants. Les bétons BE et BEP sont également mélangés à un activateur répondant aux besoins des organismes colonisateurs marins, pour en accélérer leur colonisation.

2.2 Méthodes (test conditions)

Les gâchées de béton de 25 litres permettent de confectionner des éprouvettes 11 x 22 cm qui sont conservées sous eau 7 jours avant d'être sciées en disques de 7 cm d'épaisseur. Pour la moitié des disques, les états de surfaces sont travaillés mécaniquement à la disqueuse de manière à créer une rugosité de surface inférieure au millimètre. A contrario, l'autre moitié est laissée avec un état de surface brut de sciage et lisse. Les disques possédant une face coffrée sont également conservés et étudiés. Au total, douze disques par formulation et par état de surface ont été réalisés.

Les disques ont été placés dans des bacs d'immersion standardisés, disposés en milieu naturel (lagune euryhaline, station IFREMER) en mars 2014 et dans l'avant-port du port de la Grande Motte en mars 2015.



Figure 2: Exemple de positionnement d'éprouvettes dans le milieu, port de la Grande Motte, 2015

Les bacs sont maintenus à 15 centimètres sous la surface et à bonne distance du fond afin de profiter d'une luminosité maximale et d'éviter un envasement perturbateur. Les éprouvettes étant en milieu ouvert, il n'y a pas eu de suivi des paramètres physico-chimiques du milieu. La vitesse et la distribution de la colonisation ont été suivies par prises de photographies de la surface des disques tous les 7 jours, puis par comptage de la surface colonisée à l'aide du logiciel de traitement d'images *ImageJ* [28] qui permet une analyse statistique² des données.

Nous pouvons ainsi suivre l'évolution de la colonisation de la surface des disques de béton en fonction du temps, de la formulation du béton et de son état de surface. Un exemple de quantification est présenté sur la figure 3.

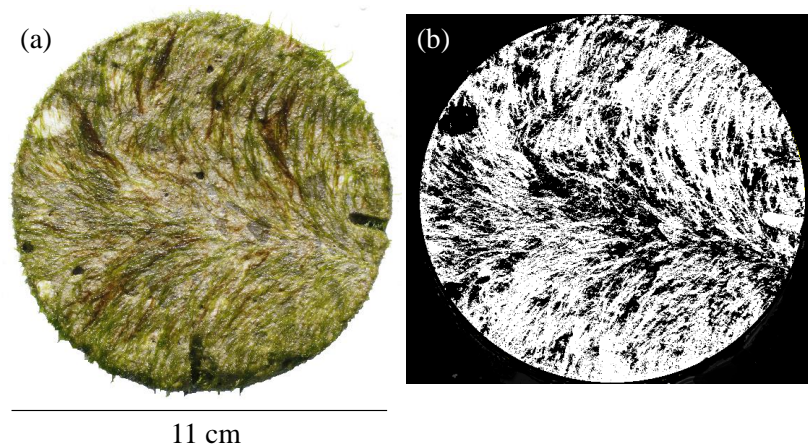


Figure 3: Exemple de traitement et d'analyse d'image avec le logiciel ImageJ sur un béton (B) à surface rugueuse, image originale (a) et après traitement (b).

² Les données obtenues ont été analysées statistiquement (ANOVA après transformation en arcsinus des %, $\alpha=0.05$).

L'aire non colonisée (en noir sur l'éprouvette) représente 36 % de la surface totale du disque.

L'effet de l'activateur spécifique E sur la cinétique d'hydratation des pâtes de ciment est suivi à l'aide d'un calorimètre isotherme TAM Air de la société TA Instruments. Cet appareil mesure la différence de flux de chaleur entre un échantillon et une référence avec une température maintenue constante à 25°C. Les formulations sont celles du tableau 1 sans sable ni gravier et avec un rapport eau sur ciment de 0.4.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1 Propriétés physiques et mécaniques (Physical and mechanical properties)

Les bétons B, BB, BE et BEP présentent des masses volumiques comparables : maximum de 2380 Kg.m⁻³ pour B et minimum de 2325 Kg.m⁻³ pour BEP. L'usage de 30 % de sable bio-minéral, d'adjuvant ou d'ajout ne semble pas impacter ce paramètre. En revanche, l'utilisation de ce granulat dégrade fortement l'ouvrabilité qui se traduit par une valeur d'affaissement au cône de 2,5 (tableau 1).

Toutefois, les flux de chaleur des bétons B et BE mesurés en fonction du temps sont différents d'après la figure 4. La présence de l'activateur E influence le début d'hydratation en augmentant la période d'induction d'environ 6 heures (Figure 4).

Différents mécanismes ont été proposés pour expliquer l'effet des adjuvants sur l'hydratation des composants du clinker Portland [29]. Par exemple, dans le cas d'adjuvant organique, l'absorption des produits organiques sur les phases solides peut retarder l'hydratation [30]. Toutefois, la complexité du composant E ne permet pas pour le moment de trancher sur le mécanisme à l'origine du retard d'hydratation. Le même constat peut être dressé pour le béton BEP mais n'existe pas pour le béton BB.

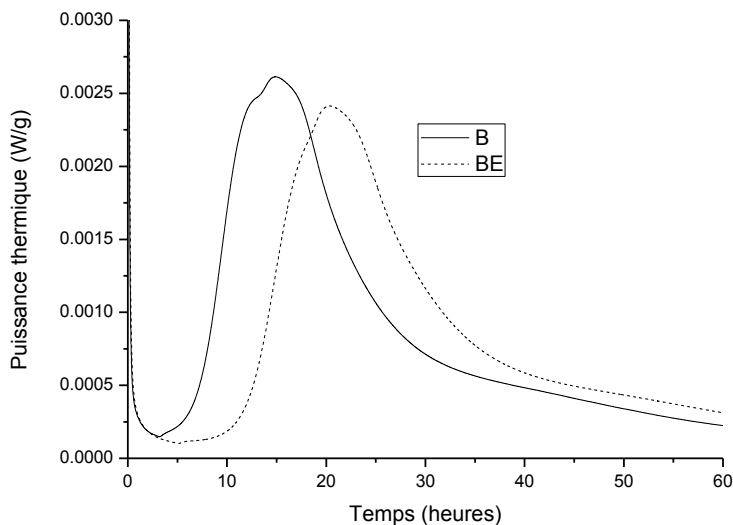


Figure 4: Évolution du flux de chaleur des pâtes de ciment B et BE lors de la prise.

Les bétons B, BB, BE présentent des résultats mécaniques de résistances à la compression à 28 jours relativement similaires, respectivement 43.5, 46.2, 43.5 MPa. Ces résultats sont conformes aux mesures antérieures [24], mais où le taux de substitution des sables biogènes n'était que de 15 %. Le béton BB incorporant un sable biogène à hauteur de 30 % ne présente pas de chute sensible des caractéristiques mécaniques malgré une teneur en matière organique de 9 % de ce sable.

Pour le béton BB, le résultat est à pondérer car selon Cuadrado-Rica et al. [31], l'emploi de granulats coquillers avec de forts taux de substitution (20, 40, 60%) amène une forte augmentation de l'air entraîné (1% pour 0 %, 2,5 % pour 20 % et de l'ordre de 6 % pour 40 et 60 %) et une chute sensible des résistances mécaniques (de 49 à 33 MPa respectivement pour des taux de substitution de 0 à 60 %). L'autre effet de la hausse d'air entraîné est une forte augmentation de la porosité qui facilite la pénétration des agents agressifs dans le béton ce qui est fortement préjudiciable à leur durabilité.

Le béton BEP présente une chute de résistance notable avec une moyenne de 9.8 MPa à 28 jours. Une étude DRX des pâtes de ciments intégrant les poudres A et B montre que la pâte de ciment présente un retard d'hydratation par rapport à une pâte de ciment sans ajout. Les raies associées à la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sur des échantillons dont l'hydratation a été stoppée à 6 jours ont été comparées et sont nettement moins importantes dans le cas des ciments avec ajout. Ce retard d'hydratation peut s'expliquer par la présence de matières organiques dans la poudre B utilisée dans le béton BEP [30]. La matière organique contribue également à augmenter l'air occlus et induit par conséquent une forte diminution des résistances mécaniques à 28 jours.

Les adjuvants ou ajouts dans un béton, bien qu'ayant de potentiels effets favorables vis-à-vis de la colonisation par le vivant, peuvent réduire les résistances mécaniques des bétons et dégrader leur durabilité. La recherche d'un compromis résistance/durabilité/colonisation sera donc l'objectif à atteindre. Cette étude étant essentiellement orientée sur le processus de colonisation, les résistances à la compression et à la traction des bétons après immersion n'ont pas été suivies dans le temps.

3.2 Colonisation des disques (Samples colonization)

3.2.1 Campagne d'immersion 2014 (Immersion program 2014)

La colonisation des différents bétons par les organismes vivants débute par l'apparition d'un fin film bactérien, puis par l'apparition d'algues brunes et/ou vertes³ qui vont se développer au cours du temps (figure 5). Dans des conditions similaires de milieu (lumière, profondeur, température...), différentes surfaces et différents types de matériaux ont été immergés et comparés.

³ Algues vertes de type *Cladophora vagabunda* (Linnaeus) , algues rouges (de couleur brune) probablement *Centroceras clavulatum* (Dillwyn) ou/et *Spyridia filamentosa*.



Figure 5 : 21 jours, béton B, surface coffrée (à g) colonisation par algues brunes au centre, Béton BEP surface rugueuse colonisation par algues vertes en périphérie (à d)

Sur l'ensemble des échantillons, les 15 premiers jours ne permettent pas de voir, à l'œil nu, un développement significatif des biofilms d'algues pionnières colonisatrices (même si leur présence ponctuelle et limitée, est constatée).

À 21 jours, on constate que les disques à surface lisse sont plutôt colonisés au centre par des algues brunes filamenteuses, sauf pour le béton BEP où on constate la présence d'un film d'algues vertes plutôt en périphérie et qui est bien développé (plusieurs millimètres à quelques centimètres de largeur) pour l'état de surface rugueux (Figure 5). Pour tous les autres échantillons, surfaces brutes sciée ou rugueuse, la colonisation se concentre plutôt en périphérie et avec des algues vertes.

Le béton BE conjugué, lui, les deux effets, mince colonisation d'algues brunes au centre et film d'algues vertes en périphérie. Cette colonisation par les algues vertes à 21 j est intéressante car la succession « classique », observée sur un substrat en béton ordinaire, aurait pu être : algue brune (peu exigeante en lumière, et tolérant des conditions physico-chimique peu favorables), puis verte (plus exigeantes en lumière et physico-chimie favorable).

L'adjuvant E semble avoir un effet bénéfique sur la qualité du milieu récepteur.

De plus, grâce à l'adjuvant et aux ajouts E et EP, la vitesse de colonisation sur BE et BEP semble également plus rapide pour le développement d'un état d'équilibre correspondant à une diversité plus importante (deux espèces au lieu d'une avec une succession plus rapide).

Après 21 jours, la colonisation s'installe et progresse en termes de surfaces colonisées comme de taille des algues. En effet, sur l'ensemble des échantillons, on constate que les algues vertes ont tendance à remplacer les algues brunes. Ce qui correspond à une succession classique au vu de l'ensoleillement croissant au printemps et du milieu trophique favorable, au printemps, aux algues vertes (températures croissantes, salinités faibles).

A 42 jours, les disques avec une surface coffrée commencent à peine à se coloniser par les algues vertes en périphérie, alors que les échantillons avec un état de surface sciée présentent une population d'algues vertes bien plus développée. L'irrégularité de la surface est donc favorable à un développement

des algues sur le matériau. Ce constat est cohérent avec de nombreuses observations de la bibliographie [32]

En outre, le béton BE est le seul échantillon qui a une surface complètement colonisée par des algues vertes bien développées en longs filaments, ceci dès l'âge de 28 jours (Figure 6). L'activateur E semble avoir joué un rôle favorable pour la croissance des algues vertes.

Après 42 j au fil des relevés de terrain, lorsque les algues vertes sont présentes, il a été constaté la présence de crustacés comme les gamares (*Gammarus sp.*) et de crevettes grises juvéniles (*Crangon crangon*), colonisant ces entrelacs d'algues.

Compte tenu de la taille des aspérités (< 1 mm), les disques à surface rugueuse présentent peu de différences avec les disques à surface sciée sauf pour le BEP dont la colonisation est plus développée en longueur et en épaisseur des thalles ainsi que plus uniforme sur toute la surface de l'échantillon. Ce dernier point semble bien confirmer qu'un substrat rugueux est plus favorable à un développement horizontal homogène et régulier des algues en surface du béton.

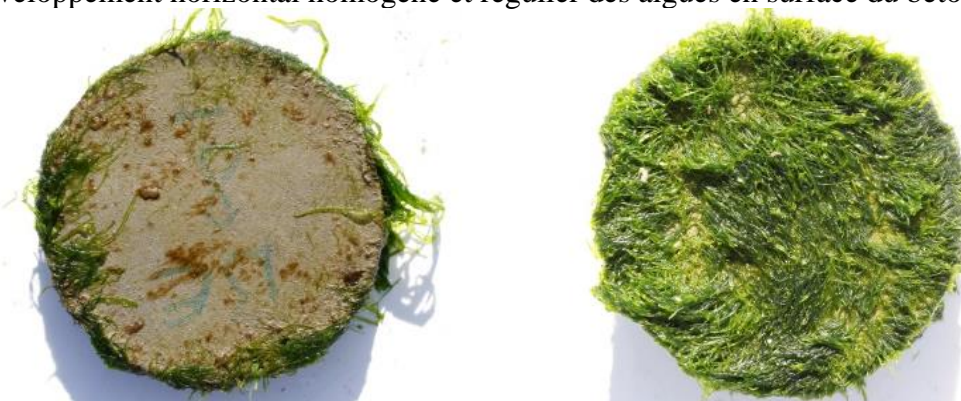


Figure 6: Béton BE à 42 jours, surface coffrée (à g), surface sciée (à d).

L'observation des échantillons a pris fin à 56 jours soit deux mois après l'immersion. Le développement des algues s'est accru sur tous les échantillons et quelques mollusques bivalves comme les moules (*Mytilus edulis*) sont venus se fixer sur certains disques en béton. Le béton BE (avec bio-activateur organique) à surface sciée reste visuellement celui qui est le plus colonisé par les algues vertes.

Pour le BB, on ne constate pas de différence entre les trois états de surfaces pas plus qu'un effet bénéfique pour la colonisation par rapport aux autres bétons (figure 7).

Pour le béton ordinaire B, comparativement aux autres bétons, les résultats sont plutôt bons (figure 7) et ils semblent contradictoires avec l'idée que les bétons bio-activés favoriseraient la biodiversité par rapport aux bétons ordinaires⁴. En effet, la surface basique de ces bétons a entraîné une baisse de la compétition interspécifique, en favorisant quelques espèces basophiles comme les algues brunes.

De plus, il est toujours possible en milieu naturel que des facteurs non maîtrisés, lors des expériences, influent sur les résultats. La position des disques

⁴ Première campagne d'immersion de disques bétons avec des bétons étudiés dans le port de Carnon, France en 2008 [25].

de béton B en amont des courants dominants peut avoir favorisé la colonisation en les positionnant comme les premiers supports exposés aux flux biologiques.

Il faut donc être prudent sur la conclusion formulée et attendre d'autres campagnes d'immersion à plus grande échelle et en milieu marin ouvert (mer) qui infirmeront ou confirmeront ces résultats.

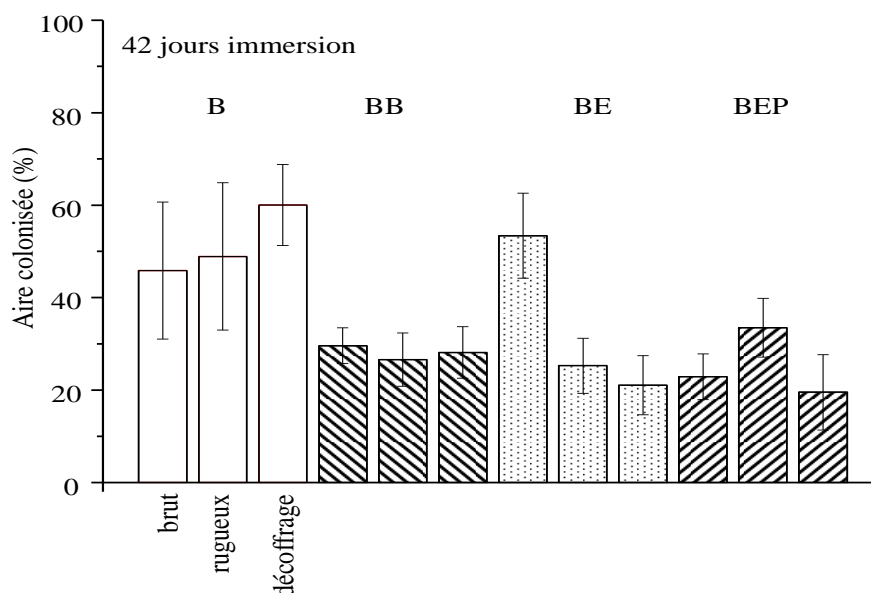


Figure 7: Moyenne et intervalle de confiance à 95 % d'aire colonisée pour les différentes formulations après 42 jours d'immersion.

3.2.1 Campagne d'immersion 2015 (Immersion program 2015)

Lors de cette campagne d'immersion au sein de l'avant-port de la Grande Motte, qualitativement, une mauvaise météo et des facteurs environnementaux liés à la qualité de l'eau ont perturbés les expériences. Toutefois, il n'y a pas eu de suivi quantitatif des constantes du milieu portuaire.

Le facteur le plus gênant a été la présence de dépôts sédimentaires importants et aléatoires. La présence de ces dépôts sur les échantillons constitue un stress majeur pour les organismes car la barrière impénétrable pour la lumière et l'oxygène est un frein majeur pour l'installation et le développement des macroalgues [16].

La figure 8 montre deux éprouvettes voisines et de même âge. La première a vu se développer une colonisation par des algues communes opportunistes et ubiquistes qui s'avèreront être *enteromorpha compressa* et *enteromorpha intestinalis* à raison de 80 % de la surface. La deuxième a subi un dépôt sédimentaire qui a perturbé le processus d'installation de la colonisation.

Après quelques jours, le dépôt sédimentaire se solidifie et modifie la nature du substrat. La colonisation des organismes est alors effective sur le nouveau matériau constitué par le sédiment ce qui a pour conséquence de niveler les réponses des différents matériaux supports vis-à-vis de la cinétique d'installation des organismes et de leur développement.

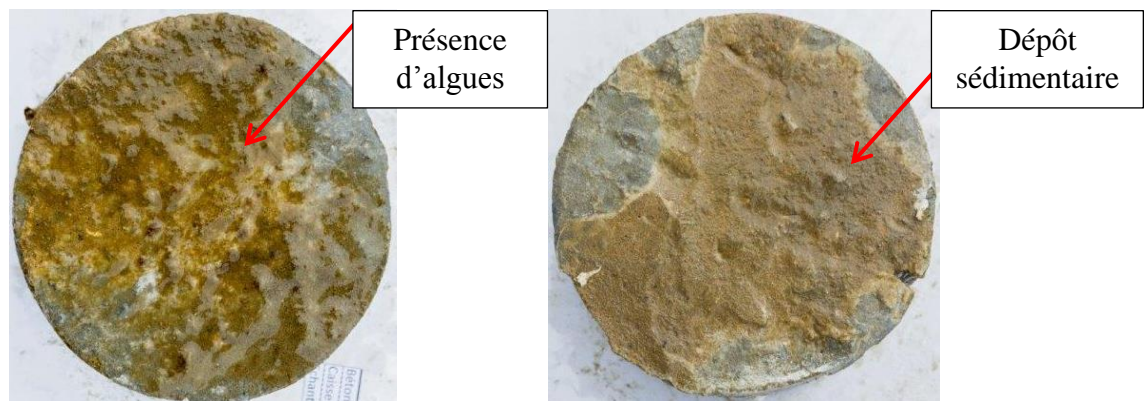


Figure 7: présence d'algues vertes sur 80 % de la surface de l'éprouvette (à g) et dépôt sédimentaire présent sur ¾ de la surface (à d)

4. CONCLUSION (CONCLUSION)

La présente étude s'est focalisée sur l'analyse comparée de la colonisation de supports différenciés par leur composition chimique et par leurs états de surfaces. Nous avons donc pu compléter nos connaissances sur l'impact des formulations de béton et des états de surface améliorant la colonisation.

Les expériences réalisées, en particulier lors de la campagne d'immersion de 2015, ont souligné la nécessaire maîtrise des facteurs abiotiques tels que la lumière et les dépôts sédimentaires qui peuvent modifier la nature du substrat d'accueil et par conséquent la cinématique de colonisation.

Certaines formulations mises au point semblent prometteuses, notamment celles associant un bio-activateur (E) qui favorise l'installation et le développement de biofilms, d'algues et de petits animaux (en ce qui concerne nos suivis réalisés sur 56 j). De même, les observations faites confirment le côté favorable de la rugosité vis-à-vis de la colonisation.

Dans le même temps, on constate que certains ajouts, poudres A et B, ou granulats (coquilles) peut influencer défavorablement sur les performances du béton en termes de résistance mécanique et de durabilité du matériau.

Un compromis doit donc être trouvé entre les objectifs fonctionnels (résistance mécanique et durabilité) et les objectifs environnementaux de colonisation par les biotes.

Ultérieurement le projet va s'attacher à définir une ou plusieurs formulations optimales pour tenter d'assurer le meilleur compromis entre le béton de structure résistant et durable et un matériau bio-actif favorisant la colonisation par les espèces marines. L'atteinte de ces objectifs passera par une meilleure maîtrise des facteurs naturels extérieurs.

L'effet du matériau support diffère selon l'environnement de l'ouvrage et selon les espèces cibles. Par conséquent, la capacité à effectuer le choix d'un matériau support pour privilégier une espèce donnée en fonction du type et de la situation de l'ouvrage reste une question ouverte qui nécessite de plus amples investigations. Le choix du matériau devra également répondre à des critères pratiques de mise en œuvre et de coûts. Les applications possibles concernent bien sûr les récifs artificiels pour l'accueil de la faune et de la flore marine halieutique

mais touchent aussi l'éco-conception des ouvrages maritimes de tous ordres, neufs ou à réhabiliter : quais, ouvrages de défense, fondations d'éoliennes off-shore, pipe-lines et émissaires en mer...

REMERCIEMENTS (ACKNOWLEDGMENTS)

Les auteurs remercient Béatrice Chatain et Emmanuel Rezzouk (IFREMER, Unité de recherche Biologie des organismes marins exploités) pour leur accueil à la station de Palavas-les-Flots. Ils remercient également Eric Pallier et Pierre Penas du port de la Grande Motte ainsi que Laurent Clerc (C2MA), Christian Buisson (C2MA), Olivier BONATO (CEFE-CNRS). Enfin, il convient de remercier la société Roullier Industries et les étudiants de l'école des mines d'Alès, Vihbu Malik, Laurent Garrigos, Thomas Boussier, Marie Buisson et François Louis pour leur participation à cette étude.

BIBLIOGRAPHIE (REFERENCES)

- [1] H. Köthe and E. Russo, "Environmental Commission - EnviCom," 2011.
- [2] E. 176 PIANC WG, "The World Association for Waterborne Transport Infrastructure," 2011.
- [3] T. Bridges and J. Walker, "Engineering with Nature," Charleston, SC, 2011.
- [4] H. De Vriend and M. Van Koningsveld, *Building With Nature*. Ecoshape Building with nature, 2012.
- [5] S. Blouet, E. Chéré, R. Dupuy de la Granrive, M. Foulquié, N. Daliias, P. Jenfant, and A. Tessier, "Biodiversité marine," *mer océans*, 2013.
- [6] S. Pioch, K. Kilfoyle, H. Levrel, and R. Spieler, "Green Marine Construction," *J. Coast. Res.*, vol. 61, no. 61, pp. 257–268, 2011.
- [7] C. Giraudel, N. Garcia, and S. Ledoux, "Single-layer breakwater armouring: feedback on the accropode™ technology from site experience.," in *Coastal engineering 2014*, 2014, pp. 1–15.
- [8] L. B. Firth, R. C. Thompson, K. Bohn, M. Abbiati, L. Airoidi, T. J. Bouma, F. Bozzeda, V. U. Ceccherelli, M. A. Colangelo, A. Evans, F. Ferrario, M. E. Hanley, H. Hinz, S. P. G. Hoggart, J. E. Jackson, P. Moore, E. H. Morgan, S. Perkol-Finkel, M. W. Skov, E. M. Strain, J. van Belzen, and S. J. Hawkins, "Between a rock and a hard place: Environmental and engineering considerations when designing coastal defence structures," *Coast. Eng.*, vol. 87, pp. 122–135, 2014.
- [9] F. B. B. Azevedo, G. G. Carloni, and L. V. Carvalheira, "Colonization of benthic organisms on different artificial substratum in Ilha Grande Bay, Rio de Janeiro, Brazil," *Brazilian Arch. Biol. Technol.*, vol. 49, no. 2, pp. 263–275, 2006.
- [10] F. Bulleri and M. G. Chapman, "The introduction of coastal infrastructure as a driver of change in marine environments," *J. Appl. Ecol.*, vol. 47, no. 1, pp. 26–35, 2010.
- [11] M. Baine, "Artificial reefs: a review of their design, application, management and performance," *Ocean Coast. Manag.*, vol. 44, no. 3–4, pp. 241–259, 2001.

- [12] S. Blouet, E. Ch, R. Dupuy, N. Dalias, A. Tessier, M. Foulqui, P. Lenfant, D. Gestion, A. M. Prot, R. L. Esparre, P. V. Domitia, and A. P. Alduy, "Bilan de 30 Ans D'immersions De Recifs Artificiels Sur La Cote Agathoise (Méditerranée , France)," no. January, pp. 1–8, 2014.
- [13] F. Vaz-Pinto, O. Torrontegi, A. C. L. Prestes, N. V. Alvaro, A. I. Neto, and G. M. Martins, "Invasion success and development of benthic assemblages: Effect of timing, duration of submersion and substrate type," *Mar. Environ. Res.*, vol. 94, pp. 72–79, 2014.
- [14] M. J. Anderson and A. J. Underwood, "Effects of substratum on the recruitment and development of an intertidal estuarine fouling assemblage," *J. Exp. Mar. Bio. Ecol.*, vol. 184, no. 2, pp. 217–236, 1994.
- [15] R. C. Fitzhardinge and J. . Bailey-Brock, "Colonization of artificial reef materials by coral and other sessile organisms," *Bull. Mar. Sci.*, vol. 44, no. 2, pp. 567–579, 1989.
- [16] H. S. Lee, M. Sidharthan, C. S. Shim, Y. Do Kim, and C. Y. Lim, "Screening and formulation of chemoattractant coatings for artificial reef structures," *J. Environ. Biol.*, vol. 29, no. July, pp. 605–612, 2008.
- [17] C. Choi, M. Ohno, and C. Sohn, "Algal succession on different substrata covering the artificial iron reef at Ikata in Shikoku, Japan," *Algae*, vol. 21, no. 3, pp. 305–310, 2006.
- [18] S. Somsueb, M. Ohno, and H. Kimura, "Development of seaweed communities on suspended substrata with three slope angles," *J. Appl. Phycol.*, vol. 13, no. 2, pp. 109–115, 2001.
- [19] D. Lacroix and S. Pioch, "The multi-use in wind farm projects: more conflicts or a win-win opportunity?," *Aquat. Living Resour. EDP Sci.*, vol. 24, pp. 129–135, 2011.
- [20] M. Ohno, "Succession of Seaweed Communities on Artificial Reefs in Ashizuri, Tosa Bay, Japan," *The Korean Journal of Phycology*, vol. 8, no. 2. pp. 191–198, 1993.
- [21] B. P. Guilbeau, F. P. Harry, R. P. Gambrell, F. C. Knopf, and K. M. Dooley, "Algae attachment on carbonated cements in fresh and brackish waters - Preliminary results," *Ecol. Eng.*, vol. 20, no. 4, pp. 309–319, 2003.
- [22] K. A. McGuinness and A. J. Underwood, "Habitat structure and the nature of communities on intertidal boulders," *J. Exp. Mar. Bio. Ecol.*, vol. 104, no. 1–3, pp. 97–123, 1986.
- [23] S. Manso, W. De Muynck, I. Segura, A. Aguado, K. Steppe, N. Boon, and N. De Belie, "Bioreceptivity evaluation of cementitious materials designed to stimulate biological growth," *Sci. Total Environ.*, vol. 481, no. 1, pp. 232–241, 2014.
- [24] P. Devillers, L. Clerc, C. Buisson, and S. Pioch, "Faisabilité technique d ' un béton à base de déchets de coquillages," in *AUGC 2009*, 2009, pp. 1–12.
- [25] J.-C. Souche, F. Martarèche, and T. Monier, "Du béton biogène pour favoriser la biodiversité marine dans les ouvrages maritimes éco-conçus," in *GC 2015*, 2015, pp. 1–8.
- [26] S. Pioch, J.-C. Souche, G. Le Saout, O. Bonato, and L. Clerc, "Comparaison expérimentale de la colonisation de bétons bio-actifs en

- milieu marin,” in *RECIF*, 2015, no. décembre, pp. 1–8.
- [27] NF EN 12620+A1, *NF EN 12620+A1 Granulats pour béton*. 2008.
- [28] C. A. Schneider, W. S. Rasband, and K. W. Eliceiri, “NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis,” *Nat. Methods*, vol. 9, pp. 671–675, 2012.
- [29] J. Cheung, A. Jeknavorian, L. Roberts, and D. Silva, “Impact of admixtures on the hydration kinetics of Portland cement,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 41, no. 12, pp. 1289–1309, 2011.
- [30] J. F. Young, “A review of the mechanisms of set-retardation in portland cement pastes containing organic admixtures,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 2, no. 4, pp. 415–433, 1972.
- [31] H. Cuadrado-Rica, N. Sebaibi, M. Boutouil, and B. Boudart, “Properties of ordinary concretes incorporating crushed queen scallop shells,” *Mater. Struct.*, pp. 1805–1816, 2015.
- [32] J. Bohnsack, D. Jonhson, and R. Ambrose, *Ecology of Artificial Reef Habitats and Fishes in Artificial Habitats for Marine and Freshwater Fisheries*. W. Seaman and L.M. Sprague (Eds.), Academic Press, 1991.