

# Evaluation à court terme des performances de bétons à base de sédiments de dragage en milieu marin

Habiba LHARTI<sup>1</sup>, Mahmoud HAYEK<sup>2</sup>, Tara SOLEIMANI<sup>3</sup>, Marie SALGUES<sup>1</sup>, Klaartje De Weerdt<sup>4</sup>, Jean-Claude SOUCHE<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LMGC, Université de Montpellier, IMT Mines Ales, CNRS, 30100 Ales, France

<sup>2</sup> Department of Civil and Building Engineering, Université de Sherbrooke, 2500 Blvd. de l'Université, Sherbrooke, QC J1K 2R1, Canada

<sup>3</sup>HSM, Université de Montpellier, IMT Mines Ales, CNRS, IRD, 30100 Ales

<sup>4</sup>Department of Structural Engineering, NTNU, Norway

**RESUME** Le béton est un matériau majeur de la construction, en particulier dans le milieu maritime, mais son empreinte carbone et l'épuisement des ressources naturelles de sable impose une réflexion sur des alternatives durables. Cette étude propose d'intégrer des sédiments de dragage non traités en substitution partielle du sable dans la composition de bétons marins et d'étudier leur durabilité et leurs avantages sur les plans économique, environnemental et écologique. Une campagne expérimentale a été menée afin de caractériser les performances des bétons avant et après immersion (résistance mécanique, porosité, absorption d'eau, perméabilité au gaz), ainsi que leur impact environnemental à travers le suivi de leur biocolonisation en surface et une analyse de cycle de vie. Les résultats ont montré que les bétons à base de sédiments possèdent des propriétés mécaniques et de durabilité comparable à celles des bétons traditionnels après une immersion de 70 jours. Les teneurs en chlorures se maintiennent en dessous des seuils réglementaires. Par ailleurs, ces bétons s'intègrent dans l'écosystème marin et leur biocolonisation à court terme pourrait être accélérée. Cette recherche ouvre de nouvelles perspectives pour une gestion plus durable des ressources naturelles, tout en contribuant à la préservation des écosystèmes marins, à la réduction des déchets industriels et à la diminution de l'empreinte carbone liée aux matériaux de construction.

**Mots-clefs** Sédiments de dragage, durabilité en milieu marin, biocolonisation, empreinte carbone

## I. INTRODUCTION

Le béton est l'un des matériaux de construction les plus répandus dans le monde, apprécié pour ses performances mécaniques, sa durabilité et son coût abordable. Cependant, sa production, en particulier celle du ciment, contribue à environ 8 % des émissions mondiales de CO<sub>2</sub>, tandis que l'extraction massive de sable nécessaire à sa fabrication exerce une pression croissante sur les ressources naturelles et les écosystèmes. Ces enjeux environnementaux incitent à explorer des alternatives plus durables pour la formulation du béton, notamment en intégrant des matériaux recyclés ou des sous-produits industriels. Parmi ces ressources, les sédiments de dragage, générés en grande quantité lors de l'entretien des ports et des voies navigables, sont souvent perçus comme des déchets. Leur utilisation comme substitut partiel au sable dans les formulations de

béton représente une opportunité intéressante, alignée avec les principes de l'économie circulaire, tout en réduisant les impacts environnementaux liés à l'exploitation du sable naturel. Le taux maximum de substitution durable du sable par les sédiments dans le béton pourrait être optimisé par un compromis entre la résistance mécanique et l'ouvrabilité attendues du béton, les impacts économiques et environnementaux du superplastifiant ainsi que le transport des sédiments (Soleimani et al. 2023).

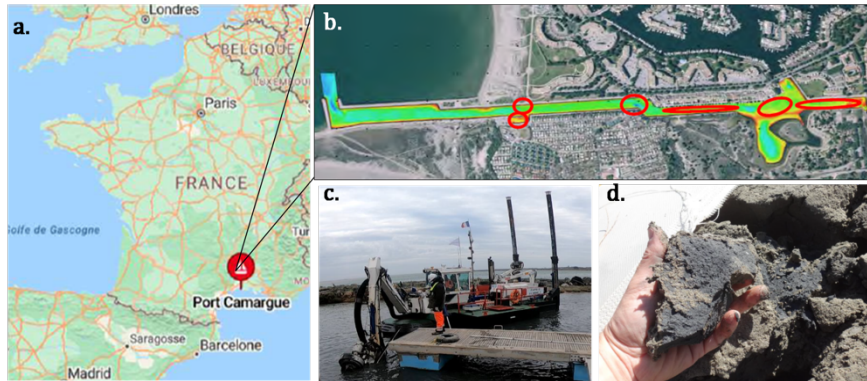
En milieu marin, cette approche présente un double avantage : diminuer l'empreinte écologique des infrastructures portuaires et promouvoir une intégration écologique des structures marines. Cette étude vise à évaluer l'intégration de 30 % de sédiments de dragage recyclés issus du Port Camargue (France) comme substitut partiel au sable dans des formulations de béton marin. Les propriétés mécaniques et de durabilité sont examinées à travers des tests de résistance à la compression, de porosité, de perméabilité, de pénétration des chlorures et de suivi de la biocolonisation. Ces propriétés sont comparées à un béton de référence (BR). Les résultats montrent que les bétons intégrant des sédiments marins (BSM) affichent des performances mécaniques similaires à celles du béton de référence, tout en favorisant une colonisation biologique importante. Cette étude a également permis d'envisager la mise en œuvre d'un corps mort éco-conçu avec la formulation étudiée, le béton marin sédimentaire (BSM). Ce lest, doté de surfaces texturées biomimétiques, est conçu pour favoriser la biocolonisation en milieu marin et attirer certaines espèces cibles. Les observations après 3 semaines d'immersion dans l'eau de mer confirment le potentiel des sédiments de dragage comme alternative viable dans les formulations de béton écoresponsables, ouvrant ainsi la voie à une gestion plus durable des infrastructures marines dans un contexte de transition écologique.

## II. MATERIAUX ET METHODS

### A. Site d'étude

Le port de Camargue (Figure 1), situé dans le delta du Rhône au sud de la France, se distingue par un environnement riche et diversifié composé de zones humides, de marais salants et de vastes étendues aquatiques. Ce port joue un rôle essentiel en tant qu'infrastructure pour la pêche et la navigation de plaisance. Toutefois, en raison de l'accumulation constante de sédiments (Figure 1b) issus des apports du Rhône et des dynamiques côtières environnantes, des opérations de dragage régulières sont nécessaires pour maintenir ses fonctionnalités (Figure 1c).

En 2021, une campagne de dragage a été menée au port de Camargue, au cours de laquelle 4000 m<sup>3</sup> de sédiments ont été extraits à l'aide d'une méthode d'aspiration hydraulique. Les analyses granulométriques des matériaux dragués ont révélé une composition majoritairement constituée de sable limoneux, avec environ 80 % de particules de taille inférieure à 80 microns et 20 % de sable fin. Les sédiments collectés ont été provisoirement stockés dans des tubes géotextiles. Sur les 4000 m<sup>3</sup> de sédiments extraits, 3500 m<sup>3</sup> ont été réutilisés pour la restauration de la plage nord du port, tandis que les 500 m<sup>3</sup> restants, constitués principalement de particules fines, ont été entreposés à terre en vue d'un traitement et d'une valorisation ultérieurs (Figure 1d).



**Figure 1.** Port de Camargue. (a) Localisation. (b) Plan d'échantillonnage des sédiments à draguer dans le chenal Sud du port de Camargue. (c) Vue de la drague hydraulique aspiratrice (photo JC Souche). (d) Photographie des sédiments de Port Camargue après ressuage (photo JC Souche).

### B. Formulation béton à base de sédiments

Les échantillons (Figure 1d) ont été collectés et stockés en laboratoire à 20 °C, dans des sacs hermétiques pour préserver leurs caractéristiques. Avant leur utilisation dans le béton, ils ont été séchés à l'air libre pendant 48 heures, réduisant leur teneur en eau résiduelle à 10 % (Hayek et al. 2024). Les formulations de béton (Hayek et al. 2024) ont été élaborées selon la méthode Dreux-Gorisse (DREUX et FESTA 1998), avec un ciment Portland (52.5 N, 50 %) et du laitier granulé de haut fourneau (50 %). Le rapport eau/ciment a été fixé à 0,5, et les granulats comprenaient du gravier silico-calcaire (6,3/14 mm), du sable (0/4 mm) et un filler calcaire. Un superplastifiant a été ajouté pour améliorer la fluidité.

Deux formulations distinctes ont été analysées (Hayek et al., 2024) : un béton témoin sans ajout de sédiments marins (BR) et un béton expérimental intégrant 30 % de sédiments marins en substitution partielle du sable (BSM). Pour garantir des propriétés mécaniques et une maniabilité comparable entre les deux formulations, des ajustements ont été effectués sur les proportions de gravier, de sable et d'eau (Tableau 1). Par ailleurs, la teneur en superplastifiant a été augmentée à 2 %, permettant d'atteindre un affaissement de  $185 \pm 25$  mm (classe S4 d'affaissement selon la norme européenne).

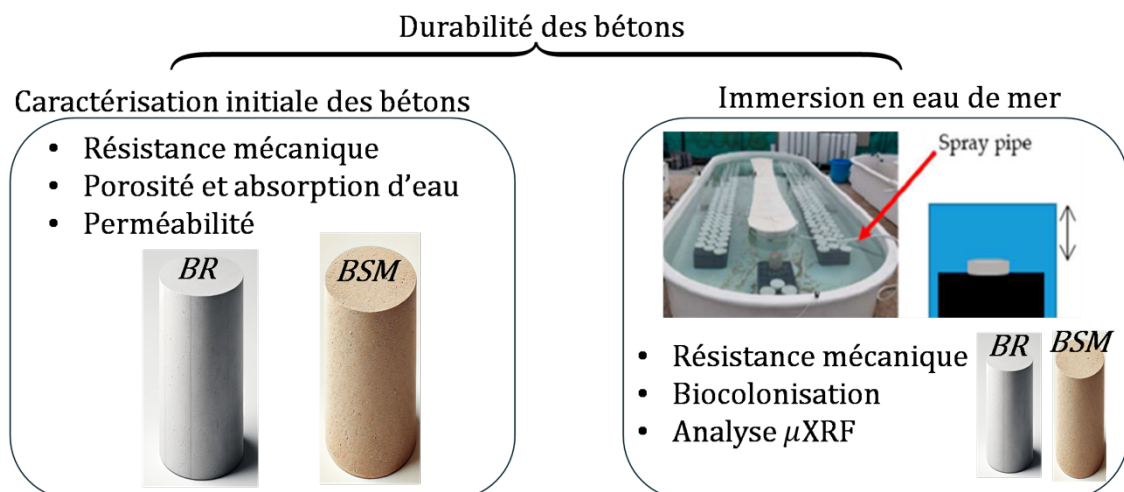
**TABLEAU 1.** Formulation béton de référence (BR) et béton à base de sédiments marins (BSM)

Matériau	Béton de référence (BR) (0 %)	Béton avec sédiments marins (BSM) (30 %)
Gravier 6,3/14 (kg)	580	580
Gravier 4/6,3 (kg)	300	320
Sable 0/4 ou filler (kg)	1020	658
Sédiments marins (kg)	0	282
CEM1 52,5 (kg)	174	174
Laitier GGBS, Ecocem® (kg)	174	174
Rapport eau/liant (w/b)	0,5	0,5
Eau (kg)	186,06	173
Superplastifiant (%)	0,2	2
Volume de pâte (L)	293,58	336,12

### C. Plan expérimental

Cette étude vise à évaluer les performances mécaniques, physiques et durables de deux formulations de béton : les bétons de référence (BR) et les bétons contenant des sédiments marins (BSM). Avant immersion dans un environnement marin, une caractérisation initiale a été réalisée selon des normes standardisées. La résistance à la compression a été mesurée après des périodes de cure de 3, 7, 28 et 90 jours, afin de déterminer les propriétés mécaniques des bétons à l'état initial. La porosité et l'absorption d'eau ont été évaluées après 28 jours de cure, en quantifiant la porosité totale et les vides connectés à l'aide d'une méthode de saturation et de séchage. La perméabilité intrinsèque a été mesurée à l'aide de la méthode CEMBUREAU, qui permet de caractériser la capacité des matériaux à limiter la pénétration des agents agressifs. Enfin, un dosage initial des ions chlorure a été effectué via la méthode de Mohr pour établir une base de référence avant exposition.

Pour évaluer la durabilité à court terme, les éprouvettes des formulations BR et BSM ont été immergées dans de l'eau de mer naturelle pendant 70 jours. Les propriétés résiduelles ont ensuite été analysées (Figure 2) : la résistance mécanique a été mesurée pour observer l'évolution sous conditions marines, tandis que la biocolonisation des surfaces a été étudiée par quantification visuelle et mesure de masse humide à intervalles réguliers (28, 42, 56 et 70 jours). Une analyse Micro-XRF a permis de cartographier la répartition des ions dans les matériaux après 70 jours d'immersion, fournissant des informations sur la pénétration des chlorures. Enfin, un dosage des ions chlorure a été réalisé par titrage au nitrate d'argent sur des échantillons prélevés à différentes profondeurs (1, 2 et 3 cm), permettant d'évaluer la progression des chlorures à l'intérieur des bétons.



**Figure 2** Schéma du plan expérimental pour évaluer la durabilité des bétons BR (référence) et BSM (sédiments marins). À gauche, la caractérisation initiale inclut la résistance mécanique, la porosité, la perméabilité et le dosage des chlorures. À droite, l'immersion en eau de mer est suivie d'une caractérisation pour étudier la résistance résiduelle, la biocolonisation, l'analyse Micro-XRF et la pénétration des chlorures.

### III. Résultats : propriétés du béton avant immersion en eau de mer

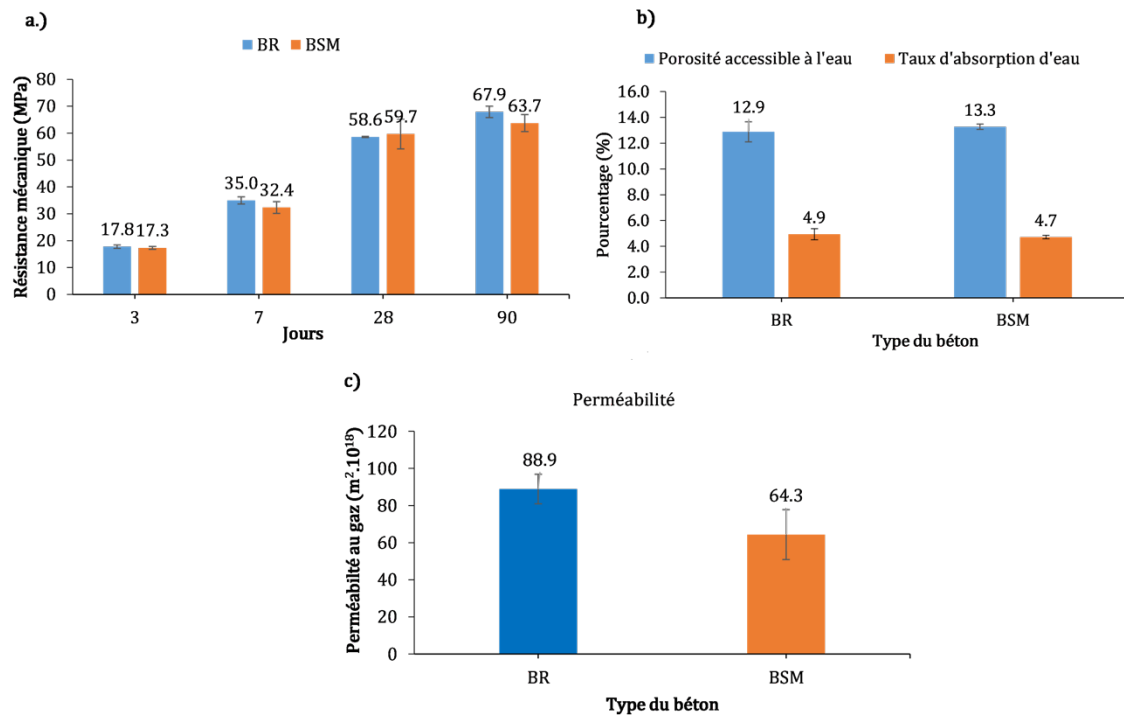
#### A. Comportement à la compression

L'évolution de la résistance à la compression des deux formulations de béton (BC et BSM) a été étudiée sur des périodes de cure de 3, 7, 28 et 90 jours. Après 3 jours de cure, les résistances des deux formulations sont quasi identiques (Figure 3a), avec 17,8 MPa pour le béton BC et 17,3 MPa pour le béton BSM, ce qui indique que l'ajout de sédiments marins n'a pas d'impact notable sur la résistance initiale. Après 7 jours de cure, une légère différence est constatée, le béton BC atteignant 35,0 MPa contre 32,4 MPa pour le béton BSM. À 28 jours, le béton BSM affiche une résistance légèrement supérieure de 59,7 MPa par rapport à 58,6 MPa pour le béton BC. Cependant, cette tendance s'inverse après 90 jours de cure, où le béton BC présente une résistance légèrement plus élevée de 67,9 MPa contre 63,7 MPa pour le béton BSM. Globalement, les écarts entre les deux formulations restent minimes, démontrant que la substitution de 30 % du sable par des sédiments marins n'affecte pas significativement la résistance à la compression, même à des âges avancés.

#### B. Porosité et perméabilité au gaz

Après 28 jours de cure, les échantillons ont été subdivisés en trois sections afin d'effectuer des tests de porosité et d'absorption d'eau avant leur immersion dans l'eau de mer. La porosité à l'eau mesurée pour le béton de référence (BR) est de 12,9 %, tandis que celle du béton contenant des sédiments marins (BSM) est légèrement plus élevée, atteignant 13,3 % (Figure 3b). En ce qui concerne l'absorption d'eau, le béton BR présente une valeur de 4,9 %, tandis que le béton BSM affiche une valeur légèrement inférieure de 4,7 %. L'incorporation de 30 % de sédiments marins en remplacement du sable dans le béton BSM semble entraîner une légère augmentation de la porosité, probablement attribuable à la granulométrie fine et à la grande surface spécifique des sédiments.

Les mesures de perméabilité au gaz (Figure 3c) montrent que le béton BSM, avec 30 % de substitution du sable par des sédiments marins, présente une perméabilité intrinsèque significativement plus faible ( $64,3 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ ) que celle du béton BR ( $88,9 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ ). Cette diminution de la perméabilité pourrait indiquer une microstructure plus compacte dans le béton BSM, caractérisée par des pores obstrués ou moins interconnectés, en opposition à une structure poreuse davantage connectée dans le béton BR. La perméabilité réduite du béton BSM suggère une meilleure résistance à l'infiltration des gaz, ce qui pourrait contribuer à une durabilité accrue en limitant la pénétration d'agents agressifs tels que le dioxyde de carbone et les ions chlorure.



**Figure 3** Caractérisation des bétons de référence (BR) et du béton contenant 30 % de sédiments marins (BSM) avant immersion dans l'eau de mer. (a) résistance à la compression à 3, 7, 28 et 90 jours. (b) Porosité à l'eau. (c) Perméabilité au gaz.

La substitution de 30 % du sable par des sédiments marins a un impact limité sur la résistance mécanique aux jeunes âges, comme le montrent les résultats après 90 jours de cure. En matière de durabilité, le béton BSM présente une porosité à l'eau légèrement plus élevée, probablement due à la finesse granulométrique des sédiments marins, tout en affichant un taux d'absorption d'eau légèrement réduit. Cette caractéristique pourrait indiquer un avantage en termes de rétention d'eau dans la matrice cimentaire. L'amélioration la plus notable concerne toutefois la perméabilité au gaz, nettement plus faible pour le BSM, traduisant une microstructure plus dense et une meilleure résistance aux agents agressifs. Pour approfondir ces observations, des analyses supplémentaires seront réalisées après 42 et 70 jours d'immersion dans de l'eau de mer naturelle, afin d'évaluer plus précisément leur comportement en conditions marines.

#### IV. Résultats : propriétés du béton après immersion en eau de mer

##### A. Comportement à la compression

Les résistances à la compression des deux types de béton, le béton de référence (BR) et le béton contenant des sédiments marins (BSM), ont été mesurées après 42 et 70 jours d'immersion dans l'eau de mer. Les résultats, obtenus (Figure 4a) à partir de la moyenne des essais sur trois éprouvettes cylindriques de dimensions 11 × 22 cm, montrent que, après 42 jours, les résistances des deux formulations sont similaires et restent proches de 60 MPa, comme celles mesurées après 28 jours de cure avant immersion (Figure 3a). Cela indique que l'exposition à l'eau de mer n'a pas d'impact significatif sur la résistance à la compression des deux bétons. Après 70 jours

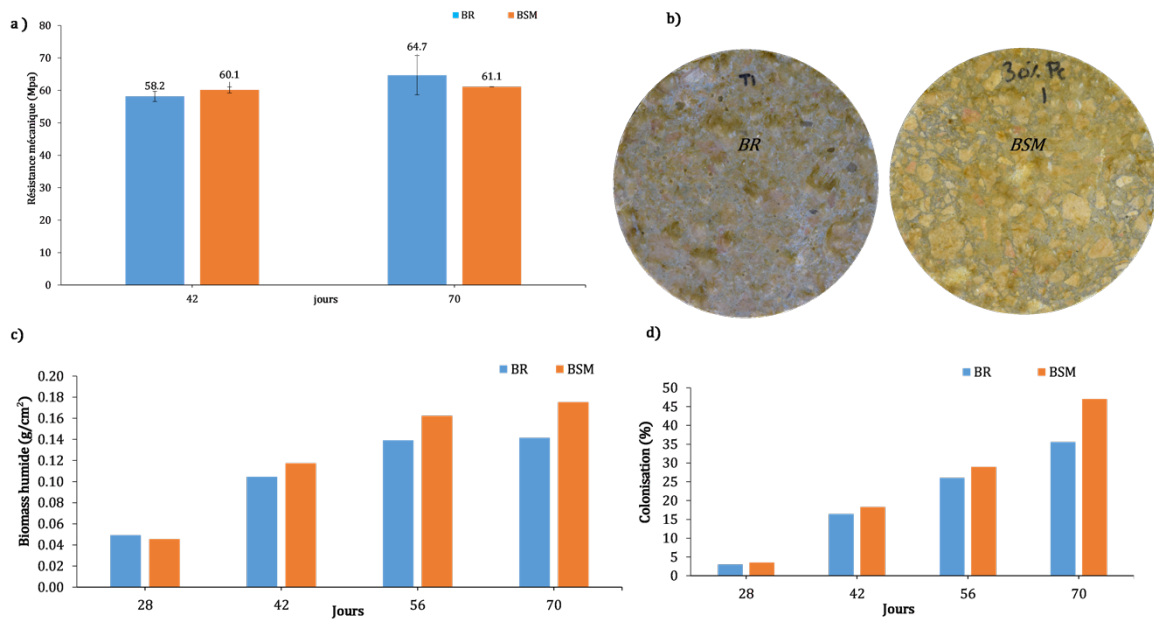
d'immersion, une légère différence apparaît : le béton BR montre une amélioration de sa résistance à la compression, avec une augmentation d'environ 11 % dans l'eau de mer par rapport aux mesures à 42 jours, tandis que le béton BSM conserve des performances stables. Les barres d'erreur associées aux mesures du béton BR sont néanmoins importantes, reflétant une possible variabilité liée à des irrégularités dans la fabrication des échantillons.

### *B. Biocolonisation*

La biocolonisation des bétons a été étudiée en immergeant des échantillons dans de l'eau de mer naturelle, après une cure de 90 jours. Les éprouvettes cylindriques initiales de 11 × 22 cm ont été découpées en échantillons de 11 × 11 cm. La biocolonisation a été évaluée par deux méthodes complémentaires : la mesure de la biomasse humide, en comparant la masse des échantillons avant et après immersion à des intervalles définis, et une analyse d'images avec le logiciel ImageJ 1.38x pour quantifier les surfaces colonisées par les organismes marins fixés, notamment les organismes sessiles, les algues, et les zones non colonisées (Hayek et al. 2021). Les mesures ont été effectuées après 28, 42, 56 et 70 jours d'immersion pour chaque type de béton.

Les résultats des graphiques mettent en évidence une augmentation progressive de la biomasse humide (Figure 4c) et du taux de couverture en biocolonisation (Figure 4b) au fil du temps pour les deux types de béton. Cependant, le béton contenant des sédiments marins (BSM) affiche des valeurs nettement supérieures à celles du béton de référence (BR), notamment après 56 et 70 jours d'immersion, pour des conditions d'exposition similaires. Cette tendance peut être attribuée aux caractéristiques des sédiments marins, comme leur rugosité et leur composition chimique, notamment la présence des substances organiques pouvant jouer le rôle de nutriments.

Les images (Figure 4b) renforcent cette observation : alors que le béton de référence (BR) présente une colonisation limitée et dispersée, le béton BSM révèle une surface presque entièrement recouverte, avec une densité et une homogénéité significativement importante. Ces résultats soulignent le rôle des sédiments marins dans l'amplification et l'accélération de la colonisation biologique à court terme. Des études microstructurales à court (Margapuram et al. 2024), moyen et long terme sont alors indispensables pour examiner de manière approfondie les effets induits par cette colonisation biologique sur les performances des bétons, qu'ils soient positifs (bioprotection) ou négatifs (biodégradation).

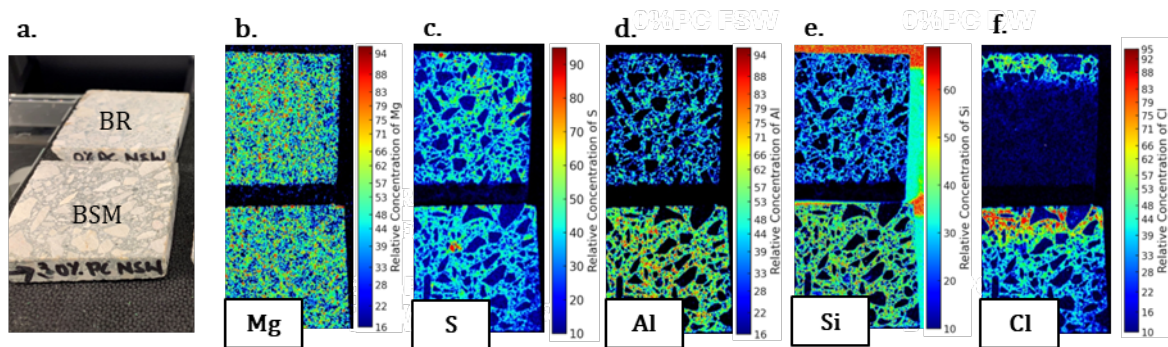


**Figure 4** Caractérisation des bétons de référence (BR) et du béton contenant 30 % de sédiments marins (BSM) après immersion dans l'eau de mer. (a) Résistance à la compression des BR et BSM après 42 et 70 jours d'immersion. (b) Observation de l'évolution de la biocolonisation sur les surfaces des BR et BSM après 70 jours. (c) Mesure de la biomasse humide ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) des BR et BSM à différents temps d'immersion (28, 42, 56 et 70 jours). (d) Taux de couverture par biocolonisation (%) des BR et BSM au fil du temps.

### C. Micro-XRF

Les sections transversales des échantillons de béton (Figure 5a) ont été analysées par  $\mu\text{XRF}$  pour évaluer la pénétration des éléments critiques après immersion dans l'eau de mer naturelle. Les mécanismes de dégradation étudiés incluent l'infiltration des chlorures (Cl), l'accumulation des sulfates (S), ainsi que les effets des ions magnésium (Mg), aluminium (Al) et silicium (Si). Ces phénomènes sont influencés par divers facteurs, notamment la présence de sédiments, l'activité des microorganismes et la qualité de l'eau de mer. Le Mg (Figure 5b) est principalement concentré en surface, probablement en raison de la formation de  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , bien que cette précipitation reste peu visible sur les images  $\mu\text{XRF}$ , en partie en raison de la courte période d'exposition (70 jours). Le S (Figure 5c) présente une pénétration limitée dans les deux types de béton, ce qui pourrait s'expliquer par l'activité microbienne altérant la microstructure du béton, notamment par la formation de biofilms. L'Al (Figure 5d), quant à lui, est plus abondant dans le béton contenant des sédiments marins (BSM), mettant en évidence leur richesse en aluminosilicates et leur possible interaction chimique avec les sulfates. Le Si (Figure 5e) se concentre principalement autour des granulats dans le béton BSM, soulignant son rôle essentiel dans la phase calcium-silicate-hydrate (C-S-H) et son importance pour la durabilité chimique. L'infiltration des chlorures (Cl) (Figure 5f) est majoritairement localisée en surface, avec des concentrations significativement plus élevées dans le béton BSM. Cela peut être attribué à la teneur élevée en chlorures des sédiments marins et de l'eau marine. À l'inverse, le béton de référence (BR) présente des niveaux d'infiltration de chlorures nettement plus faibles, indiquant une meilleure résistance à leur accumulation. Ces différences pourraient s'expliquer principalement par la substitution de 30 % du sable par des sédiments marins dans le BSM. Ces sédiments, riches en chlorures, peuvent contribuer à une

charge supplémentaire en ions chlorure ou favoriser leur rétention dans la matrice du béton. Cependant, il est important de noter que, dans les deux formulations, la teneur en chlorures reste inférieure à la limite réglementaire de 1 % en masse de ciment, conformément à la norme française pour les bétons sans armatures métalliques ou avec des composants résistants à la corrosion.

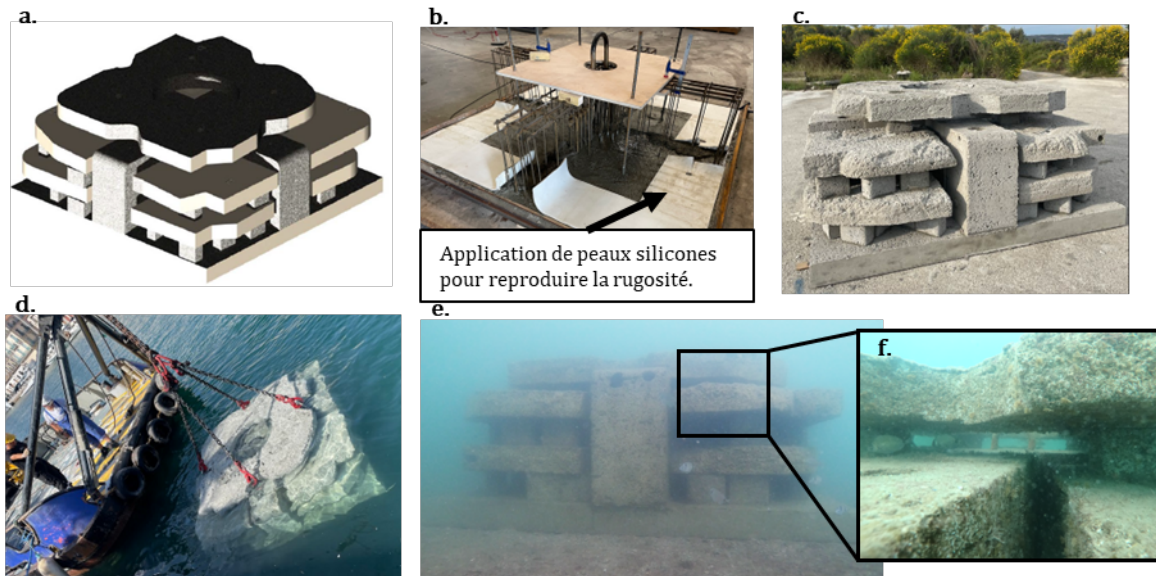


**Figure 5** (a) Échantillons de béton examinés (BR et BSM) après 70 jours d'immersion en eau de mer. (b),(c), (d), (e), (f) Cartographies élémentaires obtenues par analyse  $\mu$ XRF pour les principaux éléments (Mg, S, Al, Si et Cl).

## V. Mise en œuvre en conditions réelles

Cette étude a permis de concevoir et d'intégrer écologiquement un lest innovant (Figure 6a), multi-fonctionnel alliant une fonction première structurelle de corps mort pour bateau et une fonction écologique d'habitat pour espèce cible. L'image (Figure 6) illustre la fabrication et l'installation de ce lest dans le port de Sète. Celui-ci est constitué de plusieurs éléments en béton, chacun utilisant une formulation spécifique. Les parties structurelles, comme la croix centrale, ont été réalisées avec un béton standard de type CEM I 52,5 PM, XS2, C30/37, S4, commandé en centrale BPE, assurant une résistance optimale dans des conditions marines exigeantes. Les parties fondrières, comprenant les dalles et les intercalaires (Figures a et c), intègrent le béton BSM formulé avec 30 % de sédiments marins en substitution du sable. Ce béton XS2 C30/37 à affaissement S4 combine des performances mécaniques adaptées aux contraintes marines avec une approche d'économie circulaire, valorisant des ressources locales. Pour l'intégration écologique du lest, la conception du lest répond aux principes de transparence hydraulique, de géométrie bio-mimétique (hauteur faible et formes courbes) et de stabilité. Les surfaces des bétons ont été texturées à l'aide de peaux en silicone (Figure 6b), reproduisant la rugosité et l'aspect des roches naturelles. Ce travail de conception biomimétique reproduit la complexité du milieu naturel ce qui favorise une biocolonisation diversifiée (Figure 6e), tout en créant des habitats (Figure 6f) adaptés aux espèces cibles, telles que les sars, loups et daurades, identifiées comme prioritaires pour la région. Une fois fabriqué (Figure 6c), le lest a été transporté et immergé avec précision (Figure 6d). Sa géométrie, optimisée pour réduire les perturbations hydrodynamiques, intègre des cavités qui facilitent la circulation de l'eau, garantissent une grande stabilité structurelle et limitent les affouillements au fond marin. Ces cavités contribuent également à la transparence hydraulique, essentielle pour préserver les courants marins et renforcer l'ancrage des structures. Trois semaines après l'immersion, une colonisation significative des surfaces texturées par des macroalgues et des espèces cibles ont été observées, soulignant leur attractivité

écologique. Ces résultats confirment le potentiel de ce lest innovant, fabriqué avec des sédiments de dragage, pour restaurer les habitats marins tout en répondant aux exigences structurelles des ouvrages portuaires.



**Figure 6** Conception, fabrication et déploiement d'un éco-lest en béton BSM : (a) Schéma conceptuel, (b) Fabrication et application de peaux en silicone pour reproduire la rugosité naturelle, (c) Éco-lest prêt à l'emploi, (d) Déploiement au port de Sète, (e) Intégration et biocolonisation en milieu marin, (f) Zoom sur les cavités offrant des habitats pour la faune marine.

## VI. Conclusion

L'utilisation des sédiments de dragage comme substitut partiel au sable dans les formulations de béton marin apparaît comme une solution prometteuse. Les résultats obtenus montrent que les bétons intégrant 30 % de sédiments marins (BSM) conservent des performances mécaniques comparables à celles des bétons conventionnels (BR), tout en répondant aux exigences de durabilité en milieu marin. Les tests de durabilité, tels que la perméabilité au gaz et la pénétration des chlorures, confirment que les bétons BSM maintiennent des propriétés stables après une immersion prolongée, tout en respectant les seuils réglementaires en vigueur. Par ailleurs, l'ajout de sédiments favorise une biocolonisation accrue, attribuée à leur rugosité et à leur composition chimique, renforçant ainsi leur intégration écologique dans les écosystèmes marins. L'application à l'échelle réelle, illustrée par l'éco-lest du port de Sète, démontre la faisabilité technique et environnementale de cette approche, qui valorise des matériaux locaux dans une démarche d'économie circulaire. Bien que ces résultats initiaux soient encourageants, des recherches complémentaires sur le comportement à long terme et l'impact environnemental global des bétons à base de sédiments restent nécessaires pour consolider leur adoption comme alternative durable et écoresponsable dans les infrastructures marines.

## REFERENCES

- DREUX, Georges, et Jean FESTA. 1998. *Nouveau guide du béton et de ses constitutants*. Eyrolle.
- Hayek, Mahmoud, Marie Salgues, Jean-Claude Souche, Etienne Cunge, Cyril Giraudel, et Osanne Paireau. 2021. « Influence of the Intrinsic Characteristics of Cementitious Materials on Biofouling in the Marine Environment ». *Sustainability* 13 (5): 2625. <https://doi.org/10.3390/su13052625>.
- Hayek, Mahmoud, Tara Soleimani, Marie Salgues, et Jean-Claude Souche. 2024. « Utilizing Fine Marine Sediment as a Partial Substitute for Sand in Self-Compacting Concrete Specially Designed for Application in Marine Environments ». *Sustainability* 16 (6): 2538. <https://doi.org/10.3390/su16062538>.
- Margapuram, Deeksha, Marie Salgues, Raphaël Lami, Benjamin Erable, Michel Groc, Renaud Vuillemin, Bruno Hesse, et al. 2024. « Short-Term Interactions of Concrete, Biofilm, and Seawater in the Submerged Zone of Marine Environments for Sustainable Floating Offshore Wind Turbines ». *Construction and Building Materials* 451 (novembre):138840. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138840>.
- Soleimani, Tara, Mahmoud Hayek, Guillaume Junqua, Marie Salgues, et Jean-Claude Souche. 2023. « Environmental, Economic and Experimental Assessment of the Valorization of Dredged Sediment through Sand Substitution in Concrete ». *Science of The Total Environment* 858 (février):159980. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159980>.