

# Béton de broyats de déchets de coquilles d’huitres à faible impact environnemental : études de cas sur différentes applications industrielles

**Benjamin Niez<sup>1</sup>, Olivier Nouailletas<sup>2</sup>, Tematuani A Tehei Hantz<sup>1</sup>, Andrew Wilson<sup>1</sup>, Shijie Guo<sup>1</sup>, David Grégoire<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Université de Pau et des Pays de l’Adour, UPPA, CNRS, LFCR, Anglet, France

<sup>2</sup> Université de Pau et des Pays de l’Adour, UPPA, ISA BTP, Anglet, France

## RESUME

De nos jours, le béton à granulats minéraux reste le matériau le plus utilisé dans le monde dans le domaine du Génie Civil. Néanmoins, l’élaboration des constituants de ce matériau (ciment et granulats) génère de nombreux impacts néfastes pour l’environnement (émission de CO<sub>2</sub> et épuisement des ressources). Plusieurs solutions existent pour limiter ce coût environnemental. A titre d’exemple, il est possible de diminuer la teneur en clinker du ciment voire d’utiliser du ciment sans clinker ou de substituer les granulats minéraux par des granulats issus de déchets industriels. Dans cette optique, notre laboratoire développe des bétons plus respectueux de l’environnement en remplaçant la totalité des granulats minéraux (sable et graviers) par des broyats de déchets de coquilles d’huitres associés à différents types de liants avec ou sans clinker. Nous travaillons également avec divers acteurs locaux (collectivités et entreprises) pour la mise en place de ces bétons sur des sites démonstrateurs dans une démarche d’économie locale et circulaire. Ce travail se concentre sur la mise en œuvre de ces bétons et l’étude de leur durabilité sur différents sites d’applications industrielles soumis à des environnements potentiellement agressifs. Leur durabilité est étudiée au travers du suivi de leurs propriétés mécaniques par auscultation ultrasonique.

## Mots-clefs

Béton bas carbone, Granulats de coquilles d’huitres, Economie circulaire, Construction durable, Etudes de cas industriels

## I. INTRODUCTION

Le béton à granulats minéraux est largement utilisé dans le domaine de la construction grâce à sa bonne durabilité et son coût de production faible. Néanmoins, son élaboration rencontre deux problèmes environnementaux majeurs : une empreinte carbone élevée et l’épuisement des ressources minérales. En effet, la production mondiale annuelle du ciment, un des composants du béton, génère 7% des émissions mondiales de CO<sub>2</sub>, soit environ trois fois plus que le transport aérien (GCCA, 2021). Si l’industrie cimentière mondiale était un pays, elle serait le troisième pays le plus émetteur de CO<sub>2</sub> derrière la Chine et les États-Unis (AFP, 2021). Soixante-dix pour cent de ces émissions proviennent de l’obtention du clinker par décarbonatation, composant principal du ciment traditionnel (AFP, 2021). Pour réduire l’impact carbone du ciment, il est donc pertinent de

réduire la quantité de clinker voire d'utiliser du ciment, sans clinker, activé par réaction alcaline. Le deuxième impact néfaste pour l'environnement est l'épuisement des ressources minérales pour la fabrication du sable et des graviers pour le béton (Beiser, 2019, Meredith, 2021, UNEP, 2022). Il est donc raisonnable de se diriger vers l'utilisation de déchets industriels en remplacement des granulats minéraux (Kralj and Markic, 2008) dans une stratégie d'économie locale et circulaire. Dans le monde, quarante pour cent de la population vit à moins de 100 kilomètres des côtes (Chapalain et al., 2023). De plus, l'élevage de mollusques (huitres, coquilles Saint-Jacques, etc.) représente 23% de la production totale de l'industrie aquacole mondiale (Jovic et al., 2019) et produit une grande quantité de déchets puisqu'environ 90% du poids du mollusque est inutilisé dans cette industrie (Summa et al., 2022). Différents auteurs ont utilisé différents broyats de coquillages en remplacement d'agrégats conventionnels, le plus souvent avec un taux de remplacement faible et inférieur à 50%. Sans être exhaustif, le tableau 1 présente différentes études à différents taux de remplacement pour différents types de coquillages.

**TABLEAU 1.** Exemples d'études à différents taux de remplacement du squelette granulaire par des déchets de coquillages.

Référence	Coquillages	Matériaux	Taux de remplacement	Dosage en liant (kg/m <sup>3</sup> )
(Edalat-Behbahani <i>et al.</i> , 2021)	Coque	Béton	100% du sable	400
(Bamigboye <i>et al.</i> , 2020)	Senilia senilis	Béton	10%, 20%, 30%, 40%, 50% en masse des granulats grossiers	310
(Liu <i>et al.</i> , 2020)	Huitres	Mortier	20% en masse du sable	608
(Cardoso <i>et al.</i> , 2024)	Sururu	Mortier	10%, 20%, 40% en masse du sable	1872
(Martínez-García <i>et al.</i> , 2019)	Moules	Mortier	25%, 50%, 75% en volume du sable	629
(Georges <i>et al.</i> , 2021)	Huitres	Béton	20% en masse des granulats grossiers	350
(Guimaraes <i>et al.</i> , 2024)	Huitres	Mortier	100% en volume	450
(Luo <i>et al.</i> , 2024)	Huitres	Béton	100% en volume	535

Récemment, des études à 100% de taux de remplacement ont été réalisées avec des dosages en ciment élevés dans des mortiers (Guimaraes *et al.*, 2024) ou des bétons (Luo *et al.*, 2024). Dans cette étude, le dosage en ciment employé correspond à celui de bétons standards. Ainsi, le remplacement total des granulats minéraux par des déchets de coquillages locaux se révèle être une alternative pertinente pour les projets en développement dans les régions côtières comme la région Nouvelle-

Aquitaine. Notre laboratoire a donc participé à la formulation d'un béton de coquilles d'huitres provenant de fermes aquacoles locales (Hossegor, Arcachon) pour des projets à l'échelle de la région : le village d'accueil de la Dune du Pilat et un dispositif de protection temporaire anti-submersion du Casino de Biarritz. Dans cet article, nous présenterons la mise en œuvre de ces bétons et l'étude de leur durabilité sur ces deux sites d'applications industrielles soumis à des environnements potentiellement agressifs. La méthode non destructive d'auscultation par ultrasons est utilisée pour suivre l'évolution *in situ* et en laboratoire de ces bétons et est accompagnée d'essais de compression en laboratoire.

## II. MATERIELS & METHODES

### A. Sites démonstrateurs : la Dune du Pilat et la Grande Plage à Biarritz

La Dune du Pilat est un site naturel situé sur la côte atlantique dans le sud-ouest de la France. Destination touristique majeure, elle accueille chaque année jusqu'à 2 millions de visiteurs. En contrebas, un village d'accueil a été rénové suite aux incendies de 2022 dans lequel certaines structures ont été réalisées en béton de coquillages (escaliers et chemin piétonnier). Ce projet a regroupé quatre acteurs locaux non académiques : le grand site de la Dune du Pilat, le Comité Régional de la Conchyloculture d'Arcachon Aquitaine, l'entreprise CMR/Exedra de La Teste-de-Buch et l'entreprise Edycem localisée à Biganos.

La Grande Plage de Biarritz et notamment son casino sont soumis aux phénomènes de vagues de submersion lors des périodes de fortes houles et de forts coefficients de marée. De ce fait, un dispositif de protection temporaire est mis en place devant le casino avant chacune de ces périodes : des big bag de sable (1m<sup>3</sup>) jouent le rôle de digue amovible. Afin de dimensionner des ouvrages de protection plus pérennes et mieux acceptés socialement, il est nécessaire de connaître les sollicitations réelles subies par ce type d'ouvrage. Le projet, mené en partenariat avec Denis Morichon de l'équipe SIAME/IVS de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour, consiste à remplacer un des big Bag par un bloc de 1 m<sup>3</sup> de béton de coquillages ferrailé muni de capteurs de pression pour mesurer l'impact réel des vagues de submersion sur ce type d'ouvrage.

### B. Formulations des bétons mis en œuvre

Toutes les formulations de béton d'huitres ont été développées et validées en amont en laboratoire par notre équipe recherche. Pour chaque cas d'application considéré, les industriels impliqués fournissent une formulation de béton classique adaptée au cahier des charges. Cette formulation est ensuite modifiée en remplaçant en volume l'entièreté du squelette granulaire par des broyats de déchets d'huitre tout en gardant le taux de ciment constant. L'augmentation de la porosité intergranulaire du squelette granulaire, inhérente à l'utilisation de broyats de déchets de coquillage en remplacement de granulats considérés sphériques, est compensée par l'utilisation de filler calcaire afin de remplir entièrement cette porosité par la pâte de ciment. La méthodologie complète ainsi que les formulations sont détaillées dans (Hantz, 2024) et (Wilson, 2024).

Pour le projet de la Dune du Pilat, l'entreprise Edycem Biganos avait la charge de la production du béton de coquillages. Le béton proposé était dosé à 311 kg/m<sup>3</sup> de ciment CEM III/A avec un rapport eau efficace sur ciment de 0.47 (Hantz, 2024). Les granulats (0/10) utilisés étaient composés à 100%

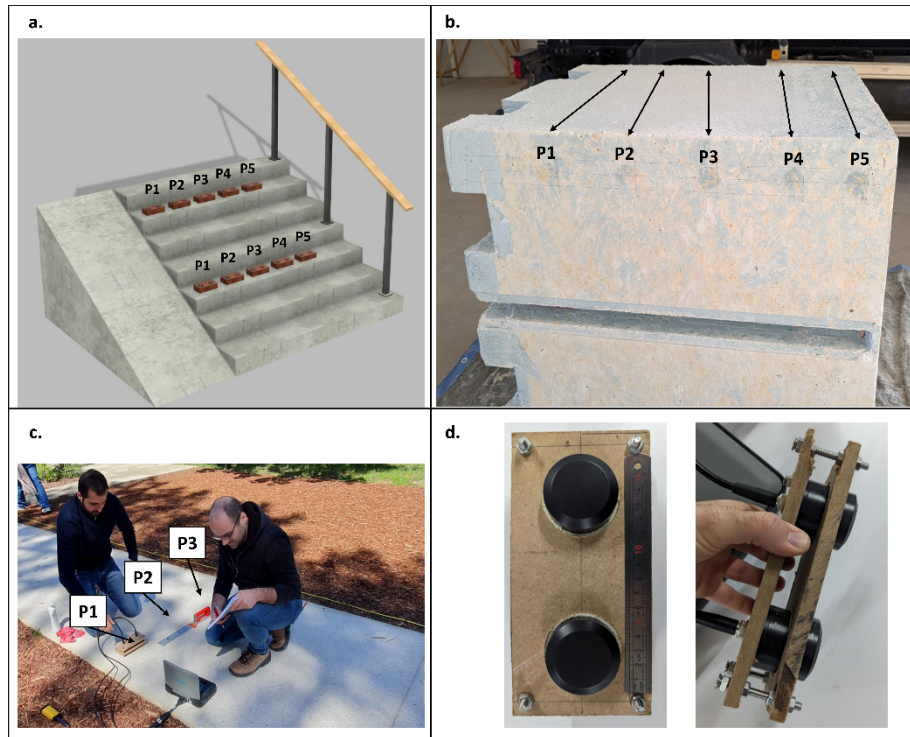
de déchets de coquillages générés par les ostréiculteurs du CRCAA (Arcachon/Hossegor). La très grande majorité des coquillages récupérés était des huîtres *Crassostrea gigas* mais certains ostréiculteurs avaient également mis au rebut des moules sauvages locales. Ainsi, la porosité intergranulaire était de 61.9 % pour une masse volumique apparente de 933.5 kg/m<sup>3</sup> et un coefficient d'absorption WA24 de 3.13% (Hantz, 2024). En parallèle du coulage de ces structures, des éprouvettes 11x22cm ont été élaborées puis conservées dans l'eau afin de réaliser un suivi de la résistance en compression au laboratoire (EN12390-2 et EN12390-3).

Pour le projet de la Grande Plage de Biarritz, le bloc de béton a été fabriqué en laboratoire et le béton était dosé à 335 kg/m<sup>3</sup> de ciment Hoffmann, ciment sans clinker à activation alcaline avec un rapport eau efficace sur ciment de 0.4 (Wilson, 2024). Pour ce béton, nous avons également un taux de remplacement de 100% des granulats minéraux par des broyats de coquilles d'huîtres fournies par l'entreprise Ovive SA. En parallèle du coulage du bloc, des éprouvettes 11x22cm ont été coulées puis stockées dans l'eau pour la réalisation d'essais de compression. Une de ces éprouvettes est laissée à l'air ambiant au laboratoire pour le suivi par auscultation ultrasonique et le suivi de la masse volumique (nommée Témoin dans la suite de l'article).

### *C. Contrôle non destructif in situ*

La méthode de contrôle non destructif employée sur ces deux projets est l'auscultation ultrasonique. Cette méthode (NF EN 12504-4) consiste à mesurer le temps de transmission que met une onde de compression (onde P) pour se déplacer dans le béton entre deux transducteurs.

Dans le projet de la Dune du Pilat, la transmission est indirecte *i.e.* les deux transducteurs sont appliqués sur la même face du béton à une distance maintenue fixe (11 cm) par un dispositif créé à cet effet (Nguyen, 2014). Dans le deuxième projet, la transmission est directe *i.e.* les transducteurs sont appliqués sur les deux faces parallèles du bloc de béton à une distance constante de 89.9 centimètres.



**Figure 1.** Auscultation par ultrasons sur les structures de béton de coquillages *in situ*. Les marques Pi représentent les différents points de mesure aux ultrasons. a. et c. Structures situées sur le site de la Dune du Pilat (emmarchement et chemin piétonnier). b. Bloc de 1m<sup>3</sup> de béton de coquillages du projet de la Grande Plage de Biarritz. d. Support pour les transducteurs lors des mesures en méthode indirecte dans le cas du projet de la Dune du Pilat (a. et c.).

Ces mesures nous permettent de calculer la vitesse de propagation de l'onde P dans ces bétons ( $V_P$ ), paramètre relié au module dynamique et à la masse volumique du matériau (Equation 1). Le module dynamique est un paramètre dépendant du module d'élasticité ( $E$ ) et du coefficient de Poisson ( $\nu$ ) du matériau (Equation 2). Le suivi de cette vitesse au cours du temps permet donc de suivre le vieillissement du béton. L'appareil utilisé est un Pundit PL-200 équipé de transducteurs pour onde P de fréquence 54kHz (longueur d'onde de 68.5mm).

$$V_P = \sqrt{\frac{M}{\rho}} \quad (\text{Equation 1})$$

$$M = \frac{E * (1 - \nu)}{(1 + \nu) * (1 - 2 * \nu)} \quad (\text{Equation 2})$$

Chaque campagne de mesure non destructives *in situ* a été accompagné des mêmes mesures au laboratoire sur des éprouvettes cylindriques 11x22 cm en méthode directe.

#### D. Mesures destructives au laboratoire

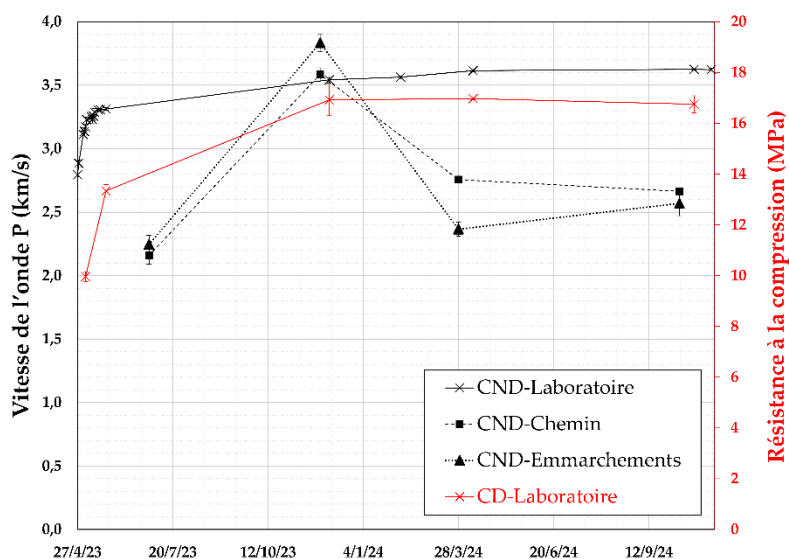
Lors de chaque campagne de mesure, des essais de compression (NF EN 12390-4) sont réalisés sur des lots de trois éprouvettes 11x22 cm : un essai cyclique dans le domaine élastique et un essai à la

rupture. Ces essais permettent respectivement d'obtenir le module d'élasticité et la résistance en compression des bétons testés. Ces essais sont réalisés sur une presse électromécanique de capacité 700kN (3R, modèle SYNTECH).

### III. RESULTATS

#### A. Projet de la Dune du Pilat

Les essais destructifs et non destructifs réalisés au laboratoire s'accordent sur une stabilisation des propriétés mécaniques du béton de coquillages à partir de 230 jours après le coulage (J+230). Nous obtenons une asymptote à 16.9MPa et 3.6 km/s respectivement pour la résistance à la compression et la vitesse de l'onde P du béton testé (Figure 2). Concernant les essais menés sur site, nous avons réalisés quatre campagnes sur le chemin piétonnier et les escaliers. La vitesse de l'onde P varie de 2.2 km/s à J+73 à 2.6 km/s à J+541. La deuxième campagne de mesures donne des résultats plus élevés : nous atteignons une vitesse de l'onde P de 3.6 et 3.8 km/s respectivement sur le chemin et les emmarchements.



**Figure 2.** Suivi des propriétés du béton au laboratoire et *in situ*. Les courbes en noir correspondent à la vitesse de l'onde P et celle en rouge la résistance en compression. C(N)D : Contrôle (Non) Destructif.

#### B. Projet de la Grande Plage de Biarritz

Concernant le projet de Biarritz, la vitesse de l'onde P semble atteindre une asymptote à 3.5 km/s pour les mesures réalisées au laboratoire (Figure 3). Sur le bloc de 1 m<sup>3</sup> situé sur site, les valeurs tendent vers 3.2 km/s. Ces mesures du temps de transmission de l'onde P ont été accompagnées de mesures de temps de transmission de l'onde S (onde de cisaillement). Nous obtenons ainsi un module d'élasticité du béton (E) respectivement de 16.7 et 18 GPa pour les essais *in situ* et au laboratoire à J+34 à partir des formules présentées ci-dessous (Equation 3 et 4). La masse volumique  $\rho$  retenue pour ces bétons a été mesurée à chaque campagne de mesures sur l'éprouvette Témoin.

Les essais de compression menés en parallèle donnent une résistance à la compression de 18.6 MPa à J+34.

$$E = \frac{V_p^2 * \rho * (1 + \nu) * (1 - 2 * \nu)}{(1 - \nu)} \quad (\text{Equation 3})$$

$$\nu = \frac{1 - 2 * (\frac{V_s}{V_p})^2}{2 - 2 * (\frac{V_s}{V_p})^2} \quad (\text{Equation 4})$$

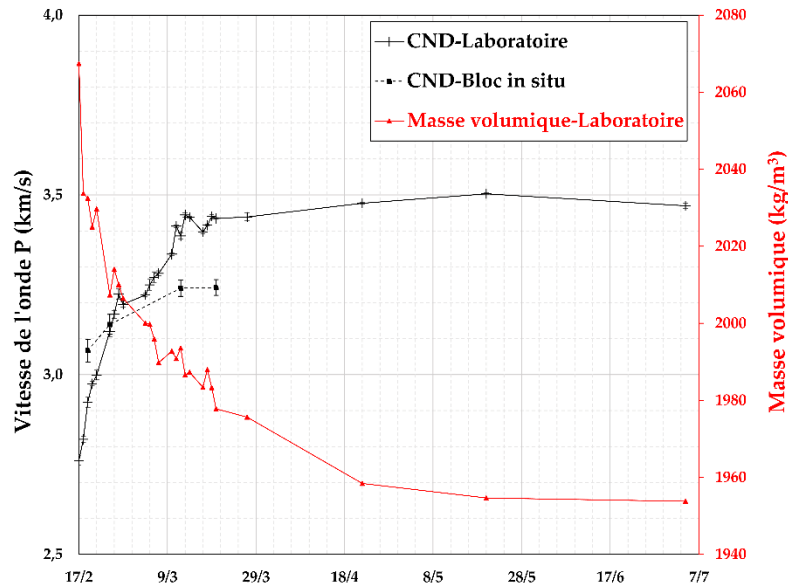


Figure 3. Évolution de la vitesse de l'onde P du béton en laboratoire (trait continu) et *in situ* (trait discontinu).

### III. DISCUSSIONS & CONCLUSIONS

Pour les deux projets, nous retrouvons une asymptote équivalente à hauteur de 3.5 km/s. Cette valeur de la vitesse de l'onde P tend vers la valeur moyenne attendue de 3.7 km/s pour un béton ordinaire (Proceq, 2014).

Pour le projet de la Dune du Pilat, on observe des valeurs *in situ* de vitesse de l'onde P significativement inférieures à l'exception des mesures de la deuxième campagne. Cet écart peut être expliqué par deux facteurs : premièrement, les mesures *in situ* ont été réalisées en méthode de transmission indirecte. D'après Garnier et al. (2012), les vitesses de l'onde P obtenues par la méthode indirecte seront 5 à 20% plus faible que celles mesurées par méthode directe. De plus, contrairement aux structures des bétons sur site qui sont soumises à des conditions hygroscopiques variables, l'éprouvette de suivi au laboratoire est stockée dans l'eau entre chaque campagne de mesure. Des tests au laboratoire ont montré que la saturation en eau d'une éprouvette de béton entraîne une augmentation de la vitesse de l'onde P (transmission indirecte) de 50%. Cette variation due à la teneur en eau du béton pourrait également expliquer les valeurs singulières de la deuxième campagne de mesures sur site (+38%). En effet, d'après les données récoltées par la station de La

Teste-de-Buch à proximité de la Dune du Pilat, la pluviométrie avait atteint 240 mm avant cette campagne contre 130 mm pour les autres campagnes de mesures (infoclimat.fr, 2025). Les valeurs obtenues lors de cette deuxième campagne avaient ainsi atteint celles mesurées sur l'éprouvette de suivi saturée au laboratoire. Malgré cette valeur singulière, nous observons que la vitesse de propagation de l'onde P sur les trois autres campagnes ne décroît pas, illustrant la bonne durabilité de ce béton après deux saisons estivales que l'on sait être de fortes affluences.

Concernant le projet de Biarritz, les valeurs de vitesse obtenues diffèrent légèrement entre les mesures sur site et en laboratoire (environ 10%). Cette différence ne provient ni de la méthode de transmission choisie (directe) ni du stockage des échantillons : le bloc et l'éprouvette de suivi du laboratoire sont stockés à l'air libre. Une première explication de cette différence pourrait venir de la longueur entre les transducteurs qui est respectivement de 22 cm et 90 cm pour l'éprouvette de suivi et le bloc de 1m<sup>3</sup>. On pourrait envisager que le phénomène d'atténuation de l'onde sur la longueur du bloc puisse rendre difficile une détection automatiquement précise du front de l'onde P et ainsi obtenir des valeurs de temps de transmission plus élevées. De plus, bien que les barres d'acier du béton ne soient pas dans la zone de mesure, celles-ci, perpendiculaires au sens de propagation de l'onde P, pourraient engendrer une dispersion de l'onde et diminuer ainsi sa vitesse (Garnier, 2012). Enfin, le bloc ayant un volume nettement supérieur à celui de l'éprouvette de suivi, il sèche plus lentement, ce qui pourrait expliquer l'obtention d'une vitesse de propagation plus faible. Ce bloc a été placé sur la plage à la suite de la quatrième campagne de mesure pour la période des grandes marées de fin mars. Le suivi par auscultation ultrasonique devra être poursuivi sur les prochains mois afin de voir l'impact de sa mise en service comme ouvrage de protection lors de prochaines périodes de grandes houles avec des coefficients de marée importants.

Ces deux projets sur sites démonstrateurs permettent de mettre en lumière la bonne durabilité d'un béton de coquillages à 100% de taux de remplacement ainsi que sa transférabilité à des applications industrielles dans une stratégie d'économie locale et circulaire. D'un point de vue méthodologique, l'évaluation *in situ* de leur durabilité par auscultation ultrasonique doit être analysée au regard des conditions environnementales imposées à ce matériau et pourra être accompagnée d'autres méthodes CND comme la mesure de l'indice de rebondissement au scléromètre (EN-12504-2).

D'autres études sur ce matériau ont débuté au sein de notre laboratoire, visant notamment à améliorer les performances mécaniques de ce béton en diminuant le taux de remplacement des granulats ou encore à étudier la biocolonisation de ces bétons (site démonstrateur de la digue de Socoa à Ciboure). Nous avons également travaillé sur le coulage d'environ 1000 m<sup>2</sup> de béton de coquillages à 100% de taux de remplacement pour le nouveau centre aquatique d'Anglet (plages, chemin et parvis). Un suivi *in situ* de la durabilité de ce béton est en cours par auscultation ultrasonique et mesure de l'indice de rebondissement au scléromètre.

## REMERCIEMENTS

**Ce travail a été partiellement financé par le programme français d'Investissement d'Avenir (ANR-16-IDEX-0002) dans le cadre du Hub E2S UPPA Newpores, par le projet de collaboration UPPA/DRM PINCTADA, par le programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne dans le cadre de la convention de subvention Marie Skłodowska-Curie n°945416 et par la Région Nouvelle Aquitaine et l'Institut Carnot ISIFOR dans le cadre du projet**

**VALOCOQ+BBC. Les auteurs remercient également nos partenaires (le Grand Site de la Dune du Pilat, le comité régional de la Conchyliculture Arcachon Aquitaine, l'équipe SIAME/IVS et la mairie de Biarritz) et nos fournisseurs (Ovive SA, CMR Exedra, Edycem, Hoffmann Green Cement, Omya et ECRD). Nous remercions enfin Maryline Comoé, Amandia Reynal et Dimitri Salmon pour leurs contributions diverses durant leurs stages d'initiation à la recherche.**

## REFERENCES

AFP (2021). Le béton-ciment, troisième "pays" des émissions de gaz à effet de serre. <https://www.geo.fr/environnement/le-beton-ciment-troisieme-pays-des-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-206744> (accessed 6.12.2025).

Bamigboye, G.O., Okara O., Bassey, D.E., Jolayemi, K.J. & Aji-Malofin, D. (2020). The use of *Senilia senilis* seashells as a substitute for coarse aggregate in eco-friendly concrete. *Journal of Building Engineering*, 32, 101811.

Beiser, V. (2019). Why the world is running out of sand. BBC. <https://www.bbc.com/future/article/20191108-why-the-world-is-running-out-of-sand> (accessed 6.12.2025).

Cardoso, A.d.S, Kohlman Rabbani, E.R., da Silva A.L., de Sá, M.K.C.R.G., Monteiro, E.B., & Shakouri, M. (2024). Evaluating Sururu shell waste (*Mytella falcata*) as an eco-friendly recycled aggregate in mortar production. *Frontiers in Built Environment*, 10, 1381169.

Chapalain, G., Duvieilbourg, E., & Guillou, N. (2023). Une zone côtière et des estuaires très prisés mais sous pression. <https://www.cerema.fr/fr/actualites/zone-cotiere-estuaires-tres-prises-pression#:~:text=La%20zone%20c%C3%B4ti%C3%A8re%2C%20partout%20dans,se%20maintenir%20d'ici%202050.> (accessed 6.12.2025)

Edalat-Behbahani, A., Soltanzadeh, F., Emam-Jomeh M., & Soltan-Zadeh, Z. (2021). Sustainable approaches for developing concrete and mortar using waste seashell. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 25(10), 1874-1893.

Garnier, V. (2012). Ultrasounds through transmission. Non-Destructive Assessment of Concrete Structures: Reliability and Limits of Single and Combined Techniques. Breyse D., RILEM, Springer books, 17-27.

Georges, M., Bourguiba, A., Chateigner, D., Sebaibi, N., & Boutouil, M (2021). The study of long-term durability and bio-colonization of concrete in marine environment. *Environmental and Sustainability Indicators*, 10, 100120.

Global Cement and Concrete Association (GCCA) (2021). Global cement and concrete industry announces roadmap to achieve groundbreaking 'net zero' co2 emissions by 2050. <https://gccassociation.org/news/global-cement-and-concrete-industry-announces-roadmap-to-achieve-groundbreaking-net-zero-co2-emissions-by-2050/> (accessed 6.12.2025).

Guimaraes, A.C., Nouailletas, O., Perlot, C., & Grégoire, D. (2024). Granular Skeleton Optimisation and the Influence of the Cement Paste Content in Bio-Based Oyster Shell Mortar with 100% Aggregate Replacement. *Sustainability*, 16(6), 2297.

Infoclimat.fr (2025). <https://www.infoclimat.fr/climatologie-mensuelle/00063/septembre/2024/la-teste-de-buch.html> (accessed 6.12.2025)

Hantz, T (2024). Béton à faible impact environnemental pour la valorisation de coquilles d'huitres perlières *Pinctada* de Polynésie Française. Thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour.

Jovic, M., Mandic, M., Sljivic-Ivanovic, M., & Smiciklas, I. (2019). Recent trends in application of shell waste from mariculture. *Studia Marina*, 32, 47-62.

Kralj, D., & Markic, M. (2008). Building materials reuse and recycle. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 4, 409-418.

Liu, R., Chen, D., Cai, X., Deng, Z., & Liao, Y. (2020). Hardened properties of mortar mixtures containing pre-treated waste oyster shells. *Journal of Cleaner Production*, 266, 121729.

Luo, K., Zhang, M., Jiang, Q., Wang, S., & Zhuo, X. (2024). Evaluation of using oyster shell as a complete replacement for aggregate to make eco-friendly concrete. *Journal of Building Engineering*, 84, 108587.

Martínez-García, C., González-Fonteboá, B., Carro-López, D., & Martínez-Abella, F. (2019). Impact of mussel shell aggregates on air lime mortars. Pore structure and carbonation. *Journal of Cleaner Production*, 215, 650–668.

Meredith, S. (2021). A sand shortage? The world is running out of a crucial – but under-appreciated – commodity. CNBC. <https://www.cnbc.com/2021/03/05/sand-shortage-the-world-is-running-out-of-a-crucial-commodity.html> (accessed 6.12.2025)

Nguyen, N.T. (2014). Evaluation non destructive des structures en béton armé – Etude de la variabilité spatiale et de la combinaison des techniques. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, Bordeaux. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.2107.7929>

Proceq (2014). Mode d'emploi Pundit®.

Summa, D., Lanzoni, M., Castaldelli, G., Fano, E.A., & Tamburini, E. (2022). Trends and opportunities of bivalve shells' waste valorization in a prospect of circular blue bioeconomy. *Resources*, 11, 48.

UNEP (2022). Use sand resources 'wisely' or risk development fallout. United Nations News. <https://news.un.org/en/story/2022/04/1116972> (accessed 6.12.2025).

Wilson, A. (2024). Recyclage des déchets de coquillages pour obtenir des matériaux cimentaires à haute performance et à faible impact sur l'environnement (coulis, mortier, béton). Thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour.