
Valorisation de sédiments de dragage portuaire par voie hydrothermale : enjeux de développement et cas du Béton Aéré Autoclavé (BAA)

Lacombe Thomas^{1,2}, Becquart Frédéric^{1,2,*}, Abriak Nor Edine^{1,2}, Aouad Georges³

¹IMT Lille Douai, LGCgE-GCE, F-59508 Douai, France

²Université de Lille, F-59000 Lille, France

³Faculty of Engineering, University Of Balamand, UOB, Al Koura, Lebanon

*Correspondant : frederic.becquart@imt-lille-douai.fr

RÉSUMÉ. On relate dans cette contribution la pertinence de l'utilisation des sédiments de dragage portuaire dans la formulation de matériaux silico-calcaires expansés, curés et solidifiés par voie hydrothermale. Les Bétons Aérés Autoclavés (BAA) présentés ici, sont formulés avec une substitution totale du sable quartzueux par des sédiments de dragage portuaire. La résistance en compression maximale de 2,3 MPa a été atteinte dans un autoclave de paillasse préalablement mis sous vide. S'agissant des conditions de cure hydrothermale, le BAA est durci sous une température de 180°C et une pression de vapeur saturante de l'eau de 10 bars. La structure poreuse des macropores et des pores mesogel se rapproche de celle obtenue pour le béton cellulaire industriel.

ABSTRACT. In this contribution, we report the relevance of the use of harbour dredged sediments in the formulation of expanded silico-limestone materials, cured and solidified by the hydrothermal way. The Autoclaved Aerated Concrete (AAC) presented here, are made with an entire substitution of quartz sand with harbour dredged sediments. The higher compression strength of 2.3 MPa has been reached in a lab bench autoclave beforehand put under vacuum. For hydrothermal curing conditions, ACC is hardened under a temperature of 180°C and a saturation water vapour pressure of 10 bars. The porous structure of macropores and mesogel pores is quite similar to the one obtained for industrial cellular concrete.

MOTS-CLÉS : Sédiments de dragage portuaire, silico-calcaires expansés, hydrothermale, béton aéré autoclavé (BAA).

KEY WORDS : Harbour dredged sediments, expanded silico-limestone, hydrothermal, autoclaved aerated concrete (AAC).

1. Introduction - Contexte d'étude, enjeux et développement thématique

L'un des enjeux majeurs du XXI^{ème} siècle réside dans la préservation des matières premières granulaires naturelles non renouvelables, principalement minérales. L'extraction à faible coût des matières premières, leur transformation, ainsi que les déchets qu'ils constituent en fin de vie, posent inéluctablement la problématique de raréfaction des ressources naturelles et de l'impact environnemental. Le secteur de la construction est un grand consommateur de minéraux naturels, avec un taux de minéraux alternatifs valorisés encore trop marginal.

Ainsi la valorisation des matières premières secondaires constitue une stratégie permettant de limiter l'impact de ces activités anthropiques. En effet les sous-produits, coproduits et déchets industriels, à l'appui des recherches et des garanties d'innocuité environnementale, peuvent s'affirmer comme des matières alternatives à l'utilisation des ressources non renouvelables. Les matières premières secondaires peuvent ainsi être réinjectées dans la boucle de transformation industrielle, épargnant la consommation de ressources naturelles. Par ailleurs, cela concourt à une gestion plus optimisée des déchets.

Les sédiments portuaires et fluviaux apparaissent également comme une ressource alternative stratégique, tant par leur nature (essentiellement minérale) que par leur abondance. Il s'agit là d'une opportunité forte de valorisation de ces matières premières secondaires en substitution de ressources granulaires non renouvelables. D'autant plus forte que les activités de dragage portuaire et de curage des cours d'eau revêtent d'une importance économique et environnementale primordiale. La gestion des sédiments est par ailleurs confrontée à une réglementation de plus en plus stricte, ainsi qu'à la raréfaction des surfaces de dépôt à terre. La démarche nationale SEDIMATERIAUX initiée en 2009 [SED 09] a permis au travers de différents projets successifs, de mettre en évidence une certaine faisabilité de réalisation d'ouvrages à base de sédiments (route Freycinet 12 Grand Port Maritime de Dunkerque (GPMD), écomodèle paysager, blocs béton, etc.). A l'appui des études menées jusqu'ici, une conclusion majeure réside dans le fait que la viabilité technico-économique d'une filière intégrant des sédiments, est à la croisée de plusieurs facteurs prépondérants à prendre à compte : le coût économique de leurs préparations, leurs impacts économiques, énergétiques et environnementaux. D'autre part, la compatibilité des propriétés intrinsèques des sédiments avec les procédés de formulation mis en œuvre, est également une question centrale. En effet elle impactera directement sur les proportions de sédiments valorisables dans l'écoproduit fini, ainsi que sur son transfert industriel. La balance économique sera d'autant plus favorable que la proportion de sédiments valorisables est importante et que l'écoproduit présente une réelle valeur ajoutée.

Dans ce contexte, une réflexion sur ces facteurs préalablement cités a été initiée et développée par le Dr F. BECQUART [BEC 16]. L'une des conclusions fortes est la pertinence et l'intérêt de la technique de traitement et de solidification par voie hydrothermale. Cette pertinence et cet intérêt dépassent largement le seul cadre de la valorisation des sédiments. Le département Génie et Civil et Environnemental de l'IMT Lille Douai développe ainsi depuis fin 2015 un axe de recherche lié à l'élaboration de matériaux traités et solidifiés par voie hydrothermale [BEC16], et intégrant des matières premières secondaires et naturelles renouvelables. Cette technique reste peu développée en France hormis pour les matériaux silico-calcaires légers (cas des bétons cellulaires). Elle est nettement plus développée en Allemagne, en Pologne, en Russie, en Royaume-Uni, au Japon, etc. La voie hydrothermale revêt d'autant plus d'intérêt dans le cadre d'une valorisation des sédiments, que leurs propriétés intrinsèques offrent un degré de compatibilité assez favorable de par leur granulométrie, et de par leurs compositions minéralogique et chimique.

Ce résumé présente quelques résultats de développements de matériaux par voie hydrothermale, à travers l'exemple du béton aéré autoclavé à base de sédiments de dragage portuaire. Ce cas d'étude s'inscrit dans le cadre de la thèse de doctorat de T. LACOMBE (démarrage nov. 2016), cofinancé par la Région Hauts-de-France et le Fonds Européen FEDER.

2. Des sédiments de dragage portuaire GPMD au béton aéré autoclavé

2.1 Généralités sur le béton cellulaire autoclavé

Le béton cellulaire autoclavé est issu de la combinaison de deux techniques : la porogénèse et l'autoclavage. Il s'agit d'un matériau silico-calcaire poreux constitué uniquement de matière minérale, avec comme ordre de grandeur massique : sable (95% quartzueux) ~ 65% ; ciment ~ 20% ; chaux vive ~ 15% ; gypse ~ 1% ; agent d'expansion ~ 0,05%. Ces proportions varient en fonction de la masse volumique recherchée [MEM 05]. Après traitement thermique en autoclave (180°C/10 bars) pendant plusieurs heures, le matériau cellulaire évolue au fil de plusieurs réactions chimiques, menant à la formation de tobermorite. Ce minéral est un silicate de calcium hydraté (CSH) cristallisé, conférant toute sa solidité au béton cellulaire. Ce matériau est composé d'environ 80% d'air et de 20% de matières solides.

2.2 Sédiments GPMD de l'étude

Les sédiments de dragage du Grand Port Maritime de Dunkerque étudiés pour cette étude, sont des sédiments non immergeables (non inertes non dangereux). Ces derniers sont séchés, concassés et micronisés à différentes granulométries compatibles avec l'application visée. On notera S1 – S2 – S3 – S4 ces granulométries, respectivement de la plus grossière à la plus fine. La figure 1 (a) présente l'influence d'une cure hydrothermale (semblable à celle classiquement opérée lors de la fabrication du béton cellulaire), sur l'évolution de la perte au feu (PAF) à 550°C pour chacun des sédiments broyés. Cette influence est marquée par une destruction partielle (de l'ordre 3%) de la matière organique. La figure 1 (b) présente l'évolution des pertes au feu sur sédiment brut (en bleue), et sur sédiment autoclavé (en orange), en fonction de leurs surfaces spécifiques. A noter que ces surfaces augmentent après passage à l'autoclave.

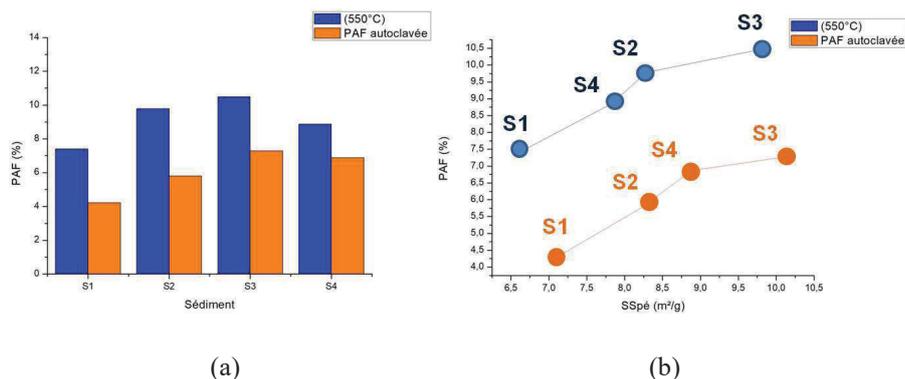


Figure 1. (a) : Evolution de la perte au feu des sédiments avant et après autoclavage (b) : Evolution des PAF des sédiments bruts et autoclavés, en fonction des surfaces spécifiques

2.3 Dosage en sédiments du béton aéré autoclavé et méthode de formulation

Le sable quartzé classiquement utilisé pour ce type d'application est intégralement substitué par les sédiments de dragage GPMD micronisés. Des sédiments au béton, la méthodologie de fabrication du BAA à base de sédiments de dragage portuaire, et toutes les considérations techniques associées et nécessaires à sa réalisation font l'objet d'un brevet en cours de dépôt par l'IMT Lille Douai.

2.4 Caractérisation physico-mécanique du béton aéré autoclavé à base de sédiments

La figure 3 (a) illustre la distribution porale (par intrusion au mercure) du BAA à base de sédiments S1, qualitativement similaire à celle pouvant être retrouvée sur le béton cellulaire classique. L'accès aux macropores millimétriques est totalement contrôlé par la porosité micrométrique des cellulaires pariétales. La figure 3 (b) présente les résistances mécaniques en compression obtenues sur les bétons formulés avec les divers sédiments, avec ou sans vide en amont de la cure hydrothermale. La résistance en compression varie globalement pour l'ensemble des cas présentés sur la gamme [1,25 MPa ; 2,3 MPa] (densité de l'ordre de 0,5), avec naturellement une influence positive du vide initial effectué. Des facteurs d'influence tels que la granulométrie et la composition chimique jouent un rôle prépondérant sur la performance mécanique du béton aéré autoclavé. La figure 4 rend compte respectivement d'une structure de béton cellulaire commercialisé (figure 4 (a)) et d'un cas de BAA avec sédiments (figure 4 (b)). Ces clichés ont été obtenus sur des cubes de 1cm d'arrête, par analyse de microtomographie aux rayons X (μ TRX). Il s'avère essentiel que les cellules soient petites, sphériques et uniformément réparties dans la masse. Le transfert des contraintes s'effectuant au travers des parois des cellules, la concentration des contraintes dans ces parois sera d'autant plus importante que les cellules sont grandes, impactant à la baisse le niveau de performance mécanique.

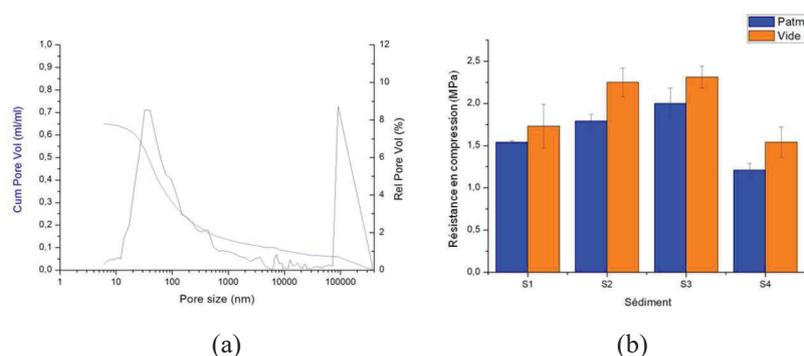


Figure 3. (a) : Signature porale du béton aérocuvé à base de sédiments (b) : Résistance en compression sur cube 4x4 cm

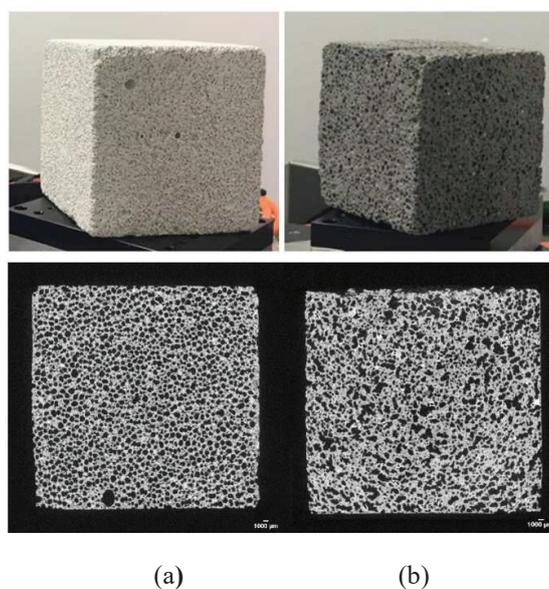


Figure 4. (a) : Coupe transverse carrée par μ TRX d'un béton cellulaire commercial 1x1 cm (b) : Coupe transverse carrée par μ TRX d'un béton aérocuvé à base de sédiments 1x1 cm

3. Conclusion

Au regard des résultats de cette étude, les sédiments de dragage portuaire apparaissent comme une ressource granulaire alternative prometteuse pour la filière béton cellulaire. Leur fort taux de valorisation ($\sim 65\%$ massique) dans un tel matériau contribue, entre autres, à une viabilité technico-économique et environnementale. Les conditions de cure hydrothermale permettent de détruire une partie de la matière organique présente dans le sédiment et assure le bon déroulement des transitions minéralogiques nécessaires à une bonne résistance mécanique. Les normes européennes imposent une résistance en compression minimale de 4 MPa pour des blocs non armés de masses volumiques de $500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. L'avancement des travaux actuels montre une résistance qui s'en rapproche (3,2 MPa), ainsi qu'un réseau de macropores mieux développé. Une co-valorisation avec d'autres granulaires propices apparaît judicieuse. Plus largement, dans le cadre du développement thématique autour de la valorisation des granulaires alternatifs par voie hydrothermale au sein de l'IMT Lille Douai, d'autres projets ont vu le jour s'agissant du domaine du silico-calcaire dense (cas du projet NEO'BLOCK - NEO'ECO DEVELOPPEMENT / IMT Lille Douai - 2018/2022).

4. Bibliographie

- [SED 09] Démarche SEDIMATERIAUX, <https://www.hauts-de-france.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/pochette-sedimateriaux.pdf>, 2009.
- [BEC 16] BECQUART F., Concourir au développement de matériaux granulaires alternatifs à base de sédiments dans des filières stratégiques de valorisation, rapport de recherche confidentiel, mai 2016, Chaire Industrielle EcoSed 2014/2018, Mines Douai.
- [MEM 05] Syndicat National Des Fabricants de Béton Cellulaire, "Mémento du béton cellulaire – Données de base pour la conception et la réalisation", Editions Eyrolles, ISBN 2-212-11647-0, 190 pages, 2005.