

# Contribution au développement de bétons agrosourcés intégrant des éco-liants à base de sédiments de dragage portuaires

Salim KOURTAA<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> IMT Nord Europe, Institut Mines-Télécom, CERI Matériaux & Procédés, F-59000 Lille, France.

<sup>2</sup> Univ. Lille, Institut Mines-Télécom ULR 4515 – LGCgE, Laboratoire Génie Civil et géo-Environnement, F-59000 Lille, France.

## RÉSUMÉ

La nouvelle réglementation environnementale (RE 2020) pour les bâtiments neufs incite à utiliser des modes constructifs qui émettent peu de gaz à effet de serre, voire qui permettent de stocker temporairement du dioxyde de carbone, comme c'est le cas des matériaux biosourcés. Les bétons à base de granulats végétaux (tels que les bétons de chanvre) présentent de plus des propriétés hygrothermiques intéressantes contribuant à optimiser la consommation d'énergie finale durant la période de fonctionnement des bâtiments. Toutefois, le liant à base de chaux, résultant d'une cuisson du calcaire à 900 °C, reste impactant sur le bilan environnemental global. Le recours à des matériaux naturels ayant des propriétés pouzzolaniques offre l'opportunité d'utiliser une faible quantité de chaux. Tenant compte de la raréfaction des ressources granulaires naturelles non renouvelables et du potentiel de la région Hauts-de-France, il est proposé d'utiliser des sédiments de dragage marins (issus du Grand Port Maritime de Dunkerque) comme ressource silico-alumineuse. Des sédiments micronisés par broyage à jet d'air à lit fluidisé et de nature minéralogique différente (quartz, limons, argiles, etc.) constituent 80% en masse d'un éco-liant qui se voit appliquer deux conditions de cure. La cinétique réactionnelle (i.e. chaux fixée) et le durcissement du liant sont suivis dans le temps. L'éco-liant retenu a ensuite été associé respectivement à de la chènevotte, des anas de lin, des granulats de colza afin de formuler des bétons agrosourcés. Les propriétés mécaniques de ces derniers ont été évaluées et confrontées à celles d'agrobétons incorporant une chaux formulée commerciale.

**Mots-clefs** Agrobétons, Chaux, Sédiments de dragage, Éco-liant, Pouzzolanique.

## I. INTRODUCTION

La transition écologique s'impose à nous, en particulier dans le secteur de la construction et du bâtiment. L'expérimentation du label E+C- : Bâtiment à énergie positive – Réduction carbone, nous oblige à revoir nos modes de construction. L'objectif est de promouvoir des bâtiments neufs économes en énergie, avec une isolation performante et dotés de systèmes de chauffage vertueux, afin de réduire leur empreinte carbone et de converger vers plus d'efficacité énergétique. La RE 2020 met l'accent sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre notamment par l'utilisation de ressources puits de carbone telles que la biomasse végétale.

L'association de granulats végétaux avec des liants minéraux, donnant lieu à ce qui est appelé communément "agrobéton", s'inspire de techniques ancestrales de construction. Les liants actuellement utilisés pour la confection des agrobétons sont des liants minéraux à base de chaux ou de ciment prompt. Ils sont utilisés tels quels ou pré-formulés (tel que le Tradical-PF70, un liant commercial utilisé pour les applications en béton de chanvre). D'autres liants de type chaux – pouzzolane ont été également utilisés pour fabriquer des agrobétons (Nozahic et al., 2012), (The Manh, 2014). Ces liants contribuent fortement à réduire l'empreinte carbone des agrobétons, car les émissions de carbone sont principalement dues à la décarbonatation du calcaire lors de la production de chaux vive (Arrigoni et al., 2017). Ainsi, l'utilisation de ce type de liant incluant une faible quantité de chaux hydratée est pertinente. Leur durcissement s'associe à la dissolution de la silice et de l'alumine présentes par attaque à l'hydroxyde de calcium.

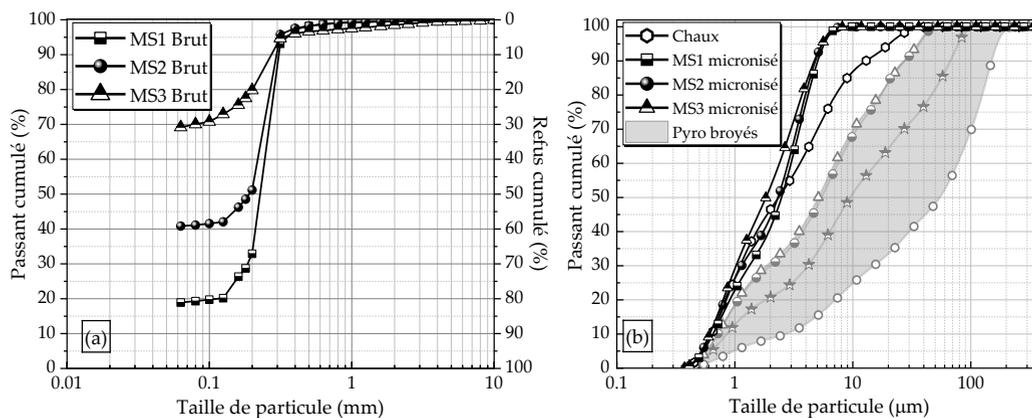
Au niveau local, le Nord de la France ne possède pas de pouzzolanes naturelles. Les sédiments de dragage, déposés sur les fonds marins des ports côtiers (e.g. le port de Dunkerque), apparaissent comme une ressource granulaire alternative stratégique, tant par leur nature (en partie minérale) que par leur abondance. Leur composition est en partie assurée par des sources terrigènes résultant de l'altération physique et chimique des roches crustales. Les principaux produits solides résultants sont le sable de quartz, les limons et les minéraux argileux. En plus des aluminosilicates, les sédiments marins peuvent contenir de la calcite. Bien que la réactivité soit généralement attribuée à la phase vitreuse des matériaux, la capacité de plusieurs composants minéraux à lier la chaux est non négligeable d'après la littérature. Certains auteurs (Bénézet & Benhassaine, 1999) ont mis en évidence une réactivité pouzzolanique du quartz pur après une micronisation et une température de durcissement de 100°C. Ainsi, ils ont défini un diamètre médian critique de 5 µm, en dessous duquel le quartz révèle une réactivité intéressante. Aussi, d'autres chercheurs ont étudié le durcissement de liants chaux – quartz ou argiles (Diamond, 1963). Sous certaines conditions de cure, l'hydroxyde de calcium était consommé et les produits de réaction étaient du C-S-H mais aussi des aluminates de calcium hydratés dans le cas des liants chaux – argiles. Ainsi, ces résultats laissent penser qu'une association chaux – sédiment pourrait conduire à un durcissement conséquent par réaction pouzzolanique.

L'objectif de la présente étude consiste à développer un éco-liant, contenant 80% en masse de sédiment micronisé, sans traitement thermique (i.e. sans calcination), pour une application dans le domaine des agrobétons. La finalité de cette recherche pionnière est de concourir à la création de nouvelles voies de valorisation à forte valeur ajoutée pour les sédiments marins, en interaction avec les éco-ressources de nature végétale. La méthodologie expérimentale de l'étude repose sur la considération de trois sédiments de compositions minéralogiques différentes. L'éco-liant finalement retenu a été ensuite associé avec trois éco-ressources végétales (chanvre, lin et colza) pour formuler des agrobétons pour lesquels les propriétés mécaniques sont évaluées et confrontées à celles d'agrobétons incorporant une chaux formulée commerciale.

## II. MATÉRIAUX ET MÉTHODES

### A. Préparation des sédiments de dragage marins

Les trois sédiments marins (notés MS1 – MS2 – MS3) ont été dragués dans le Port de Dunkerque en 2019 et ont été déshydratés par lagunage actif. Ils sont classés comme non inerte non dangereux selon la réglementation en vigueur. Leurs teneurs en fines ont été déterminées par un lavage au tamis de 63  $\mu\text{m}$  et sont respectivement de 20, 40 et 70% pour MS1, MS2 et MS3 ([FIG. 1a]). Les distributions granulométriques des passants ont été obtenues par diffraction laser en voie humide. Pour les fractions sableuses, elles ont été déterminées par tamisage en voie sèche. Après séchage à 50°C, les sédiments ont été broyés à 500  $\mu\text{m}$  à l'aide d'un broyeur à percussion de type Retsch à une vitesse de 10 000 tr.min<sup>-1</sup> afin d'avoir la granulométrie d'entrée pour une micronisation par broyage au jet d'air. L'équipement a été paramétré pour microniser les sédiments à un diamètre médian ( $D_{50}$ ) proche de 2  $\mu\text{m}$ , sur la base des résultats obtenus par Lacombe (Lacombe, 2019). La [FIG. 1b] regroupe les distributions granulométriques obtenues à l'issue de ce traitement mécano-physique.



**FIGURE 1.** Distribution granulométrique (a) de la fraction sableuse (i.e. > 63  $\mu\text{m}$ ) des sédiments marins (b) des matières premières après broyage ou micronisation.

### B. Élaboration des mélanges et conditions de cures

Après micronisation, les trois sédiments marins ont été mélangés à 20% en masse de chaux hydratée (SuperCalco<sup>®</sup>97 de Carmeuse). Un test d'étalement a été utilisé pour déterminer le rapport eau sur poudre (E/P) des pâtes combinant chaque sédiment avec la chaux (Domone and Hsi-Wen, 1997). Les pâtes ont été coulées dans des moules cylindriques ( $\phi_{2,7\text{cm}}$ ,  $h_{5,4\text{cm}}$ ) sous vibration pour éviter d'emprisonner des bulles d'air qui se génèrent lors du malaxage et améliorer la compacité de la pâte. Les moules ont été introduits dans des flacons hermétiques afin de garantir les conditions endogènes (HR > 95%) à 20°C ou à 50°C.

Le liant chaux – sédiment le plus performant sur le plan mécanique a par la suite été associé aux ressources végétales (de granulats de chanvre issus de Technichanvre, de lin issu de La Linière à Dunkerque et de colza récolté en Région Hauts-de-France). La formulation des bétons agrosourcés a été reproduite en remplaçant l'éco-liant chaux – sédiment par la chaux commerciale formulée Tradical<sup>®</sup>Thermo (75% de chaux aérienne et 25% de liant hydraulique). Des éprouvettes cylindriques de dimensions ( $\phi_{9,4\text{cm}}$ ,  $h_{19\text{cm}}$ ) ont été conçues à l'aide d'un vibrocompacteur avec un rapport liant sur granulats (L/G) de 2,3 et un rapport eau sur liant (E/L) de 0,9 visant une densité à l'état frais de 850 kg.m<sup>-3</sup>. Toutes les éprouvettes de bétons agrosourcés ont été conservées dans

leurs moules à 50°C pendant 7 jours afin de les maintenir dans des conditions d'humidité saturée et garantir ainsi un durcissement minimal du liant. Elles ont été ensuite démoulées et soumises aux conditions de séchage spécifiques aux agrobétons dans une enceinte climatique réglée 23°C et 65% HR jusqu'à 60 jours.

### C. Essai de résistance à la compression

Les essais de résistance en compression longitudinale sur pâtes ont été réalisés sur les éprouvettes cylindriques avec une presse électromécanique (Instron). Une cellule de charge de 10 kN a été utilisée pour fournir une précision appropriée pour les matériaux à faible résistance avec un taux de chargement de 1,5 kN.min<sup>-1</sup>. La résistance a été testée de 3 à 180 jours. Les pâtes ont été testées avec leur degré de saturation car le séchage des pâtes provoque des fissures dues au retrait. Les mêmes équipements ont été utilisés pour les tests de résistance sur les agrobétons. Les essais ont été effectués après 60 jours avec une vitesse de déplacement imposée de 5 mm.min<sup>-1</sup>, avec trois cycles de charge – décharge appliqués à 1, 2 et 3% de déformation.

### D. Méthode d'arrêt d'hydratation

Une méthode de séchage par échange de solvant avec l'alcool isopropylique (IPA) a été utilisée. Un échantillon représentatif a été réduit en poudre pour les analyses thermogravimétriques (ATG) et immergé dans l'IPA pendant 7 jours. L'IPA a été renouvelé deux fois pour faciliter le processus de diffusion. Il a été finalement évacué par un processus de filtration sous vide et complètement éliminé par séchage sous vide, en utilisant un dessiccateur avec gel de silice et chaux hydratée.

### E. Chaux fixée

Les analyses ATG (Mettler Toledo) ont été réalisées sous atmosphère d'azote de 25°C à 950°C avec une vitesse de chauffe de 10°C.min<sup>-1</sup>. La chaux libre (CH) et le carbonate de calcium (CC) ont été quantifiés par la méthode tangentielle respectivement dans la gamme 400 – 500°C et 500 – 800°C en utilisant les équations suivantes :

$$\text{CH libre (\%)} = P_{m_{\text{CH}}} (\%) \times \frac{m(\text{CH})}{m(\text{H}_2\text{O})} \quad (1)$$

$$\text{CC (\%)} = P_{m_{\text{CC}}} (\%) \times \frac{m(\text{CC})}{m(\text{CO}_2)} \quad (2)$$

où  $P_{m_{\text{CH}}}$  et  $P_{m_{\text{CC}}}$  sont respectivement les pertes de masses dues à la déshydroxylation de la chaux (CH) et à la décarbonatation des carbonates de calcium (CC) avec une normalisation au liant anhydre,  $m$  étant la masse molaire de CH, H<sub>2</sub>O, CC et CO<sub>2</sub>.

La quantité de CH fixée par les sédiments au fil du temps (jusqu'à 180 jours de cure) a été calculée en pourcentage de CH disponible initial comme suit (Eq. 3) :

$$\text{CH fixée (\%)} = [(\text{CH}_i (\%) - \text{CH libre (\%)} - \text{CH carbonatée (\%)}) / \text{CH}_i (\%)] \times 100 \quad (3)$$

où  $\text{CH}_i (\%)$  est la quantité de chaux initialement introduite dans le mélange, la chaux carbonatée (%) étant la chaux libre ayant subi une carbonatation.

### III. RÉSULTATS ET DISCUSSION

#### A. Compositions chimiques des sédiments marins micronisés

Les compositions chimiques par fluorescence X (Fx) des sédiments micronisés sont présentées dans le TAB 1. Elles révèlent une large plage de teneurs en SiO<sub>2</sub> (34, 58 et 73% pour MS3, MS1 et MS2 respectivement). MS1 et MS2 montrent des teneurs majeures en SiO<sub>2</sub> en raison de la prédominance du sable quartzueux; de plus faibles quantités d'oxydes d'aluminium, de fer et de magnésium ont été observées. MS3 présente une plus faible teneur en SiO<sub>2</sub>, étant majoritairement de nature limono-argileux. La teneur en carbonate de calcium (CaCO<sub>3</sub>) de MS1 et MS2 est très semblable, évaluée par ATG à 19 – 20%. Le sédiment MS3 se démarque assez notablement. Il contient moins de sable et plus de calcite (quantifiée par ATG à environ 38% et également observée sur les résultats de FX via la teneur en CaO).

**TABLEAU 1.** Composition chimique des sédiments micronisés (préalablement calcinés à 550°C – Perte au feu PAF) par FX

Sédiment	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	SO <sub>3</sub>	PAF
MS1	57.9	3.5	2.0	8.9	0.6	1.2	1.0	0.1	0.1	–	1.2	22.9
MS2	73.4	3.0	1.9	8.3	0.5	1.0	0.9	0.1	0.1	–	1.1	9.3
MS3	34.4	9.7	7.7	19.6	2.4	1.3	1.9	0.4	0.4	0.2	3.8	17.7

#### B. Propriétés physiques des sédiments marins micronisés

Les propriétés physiques majeures sont rapportées dans le TAB 2. Les granulométries et diamètres D<sub>50</sub> des trois sédiments micronisés sont assez similaires mais révèlent des surfaces spécifiques BET notablement différentes. Les pertes au feu à 550°C sont de 4.99, 7.06 et 16.15% en masse pour MS2, MS1 et MS3 respectivement. Les résultats obtenus s'inscrivent en cohérence et en lien avec l'influence de la composition d'un sédiment et plus spécifiquement de la matière organique. Les densités absolues sont analogues à celles retrouvées dans la littérature sur ces types de matériaux granulaires.

**TABLEAU 2.** Propriétés physico-chimiques des sédiments micronisés.

Matériaux	MS1	MS2	MS3	Chaux
D <sub>50</sub> (µm)	2.48	2.32	1.84	2.36
BET-SSA (m <sup>2</sup> .g <sup>-1</sup> )	6.90	4.54	18.91	17.66
Densité absolue	2.64	2.65	2.47	2.33
PAF – 550°C (%)	7.06	4.99	16.15	–

En relation avec ces propriétés physico-chimiques, les rapports E/P des pâtes sont indiqués dans le TAB 3. Il convient de préciser le choix de travailler à consistance égale justifiée par une demande en eau des pâtes liée de facto à la granulométrie et à la surface spécifique des poudres.

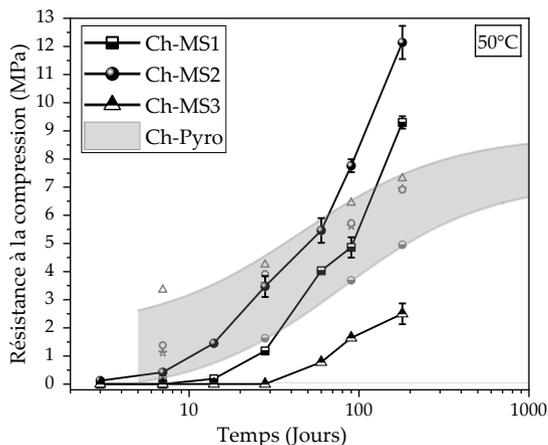
**TABLEAU 3.** Demande en eau des pâtes (Rapport E/P)

Pâtes	Ch-MS1	Ch-MS2	Ch-MS3
E/P (80 MSx + 20 chaux) %	0.70	0.73	1.10

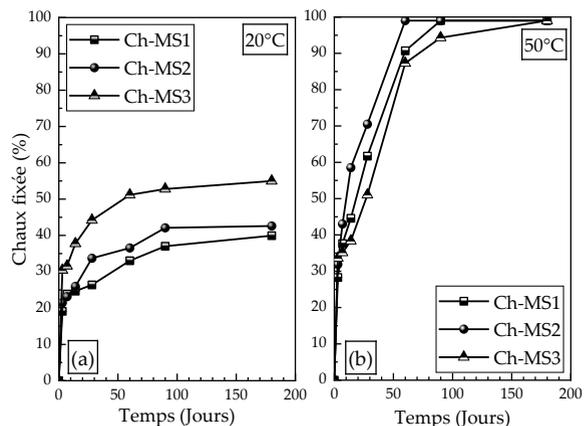
#### C. Développement de la résistance à la compression longitudinale Rc

Les résistances des éprouvettes curées à 20°C étaient très faibles : la pâte conçue avec MS2 (Ch-MS2) n'a pu présenter un durcissement initial notable qu'après 90 jours (Rc légèrement supérieure à 0.2 MPa); très peu de prise à court et moyen terme n'a été observée sur les pâtes à base de MS1 et MS3 (Ch-MS1 et Ch-MS3) (Rc < 0.2 MPa). Ces dernières ont finalement atteint des résistances comprises entre 0.1 et 0.8 MPa après 180 jours en fonction du sédiment utilisé.

L'absence de durcissement à 20°C dans un délai raisonnable indique la nécessité d'augmenter la température de cure. Les résultats Rc à 50°C marquent nettement l'influence de la température. A cet effet, la FIG 3 rapporte l'évolution de la résistance à la compression des mélanges chaux – sédiment (Ch-MS<sub>x</sub>) à 50°C. En comparaison de la cure à 20°C, il ressort clairement une évolution significative de la cinétique de prise et de durcissement après plusieurs jours et du niveau de résistance mécanique. Plus précisément pour la cure à 50°C, jusqu'à 7 jours, seule la résistance sur la pâte Ch-MS2 a pu être mesurée pour enregistrer 0.42 MPa, atteignant 1,45 MPa après 14 jours. Les premières mesures acceptables (> 1 MPa) sur les pâtes Ch-MS1 et Ch-MS3 ont été effectuées respectivement après 28 et 60 jours, et les résistances enregistrées à ces temps de cure sont inférieures à celles obtenues à 14 jours avec Ch-MS2. En effet, il est facile de voir l'effet de la température de cure. A titre de comparaison, le fuseau d'évolution des résistances à la compression sur pâtes à base de chaux et de matériaux pyroclastiques basaltiques broyés (« pouzzolanes » au sens Français du terme) conservées dans des conditions identiques est reporté en FIG 3. Au-delà de 90 jours, la résistance en compression de la pâte contenant 80% en masse de MS2 devient supérieure à celles obtenues avec les matériaux pyroclastiques. De 90 à 180 jours, les résistances des pâtes Ch-MS<sub>x</sub> ont continué à augmenter dépassant les 12 MPa pour Ch-MS2 et 9 MPa pour Ch-MS1, alors que la résistance tend à se stabiliser pour les pâtes « chaux – pouzzolane ». L'écart entre les deux cures en termes de performances mécaniques (i.e RC < 1 MPa à 20°C contre RC > 12 MPa à 50°C dans le cas de MS2) montre que l'énergie d'activation du sédiment micronisé est très élevée.



**FIGURE 3.** Développement de la résistance à la compression des pâtes à 50°C dans le temps.



**FIGURE 4.** Évolution de la chaux fixée dans le temps (a) à 20°C, (b) à 50°C.

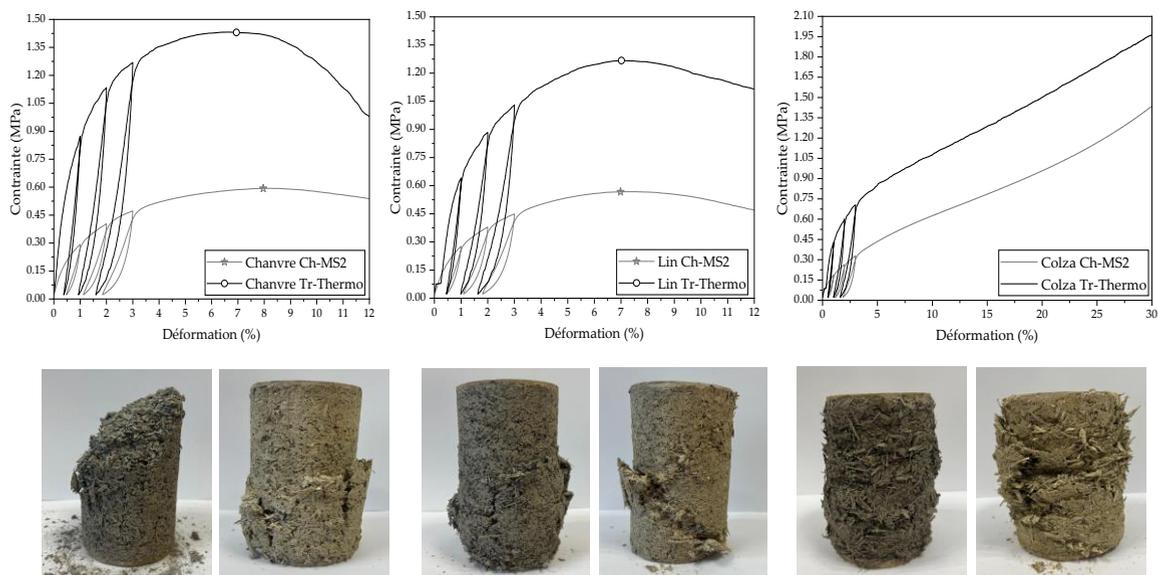
#### D. Chaux fixée (ATG)

La quantité de chaux fixée par les sédiments étudiés en pourcentage de la chaux initialement disponible est illustrée dans la [FIG. 4a] pour 20°C et la [FIG. 4b] pour 50°C. A 20°C, la proportion de chaux combinée plafonne et ne dépasse pas les 55% après 180 jours. A 50°C, cette proportion de chaux combinée est assez semblable à celle calculée à 20°C au très jeune âge (i.e. 3 jours). En revanche, une forte augmentation du taux de combinaison de la chaux est notée jusqu'à 60 ou 90 jours lorsque la température est de 50°C. La totalité de la chaux initialement présente est ainsi consommée. Ce constat met en évidence l'effet de la température sur la cinétique de réaction. Selon la littérature, la cinétique de consommation de la chaux et le taux de fixation maximal sont plus spécifiquement associés de manière respective à la surface spécifique des matériaux et à la nature et la disponibilité des phases silico-alumineuses réactives en présence. Ainsi, à 20°C, il est

intéressant de noter qu'une quantité plus importante de chaux fixée est reportée pour le sédiment présentant une surface spécifique plus élevée, à savoir le MS3 (TAB 2). A 50°C, l'effet de la surface spécifique n'est pas perceptible. De plus, la faible quantité de silice du sédiment MS3 n'apparaît pas comme étant un facteur limitant relativement à la consommation de chaux. Il n'est pas rare d'observer que la capacité de fixation de la chaux d'un matériau silico-alumineux ne conduit pas nécessairement à un durcissement réel du liant. En effet, si les sédiments ont pu globalement fixer environ 30% de la chaux initialement présente à 20°C après 28 jours de cure, cela n'entraîne pas un durcissement convenable de la pâte en raison de produits d'hydratation qui ne sont pas suffisamment développés et/ou de leur nature (en particulier leur ratio Ca/Si). Les résultats obtenus avec le sédiment MS3 amènent également à supposer la forte propension des argiles et de la matière organique à fixer les ions  $\text{Ca}^{2+}$  en solution sans pour autant que cela ne se traduise par la formation de produits d'hydratation générateurs de résistance (C-S-H).

#### E. Propriétés mécaniques des bétons agrosourcés

L'éco-liant Ch-MS2 s'est avéré être le plus performant du point de vue mécanique ; celui-ci a par conséquent été retenu pour les formulations de bétons agrosourcés. Tenant compte de l'application industrielle et de l'effet potentiellement néfaste d'une cure humide prolongée sur les matériaux biosourcés, le compromis retenu a été de maintenir la cure humide à 50°C pendant 7 jours avant de passer à une conservation à 23°C et 65%HR. En respectant les rapports E/L et L/G déterminés par tâtonnements expérimentaux lors de l'optimisation des formulations, les granulats végétaux ont été respectivement associés à l'éco-liant Ch-MS2 et à une chaux formulée (Tr-Thermo) avec les mêmes dosages rapportés à  $1 \text{ m}^3$ . Les agrobétons sont formulés pour atteindre une masse volumique apparente à l'état frais de  $850 \text{ kg.m}^{-3}$ .



**FIGURE 5.** Courbes contrainte/déformation et illustrations des ruptures des bétons végétaux à 60 jours de durcissement

Les essais de résistances à la compression après 60 jours de cure ont été effectués sur les éprouvettes cylindriques des trois types de bétons végétaux à base des différents liants (Ch-MS2 et Tr-Thermo) mais avec les mêmes dosages de matières premières, un même procédé de mise en œuvre et dans les mêmes conditions de cure afin de positionner les bétons à base liant chaux – sédiment par rapport à ceux fabriqués avec la chaux commerciale. Les masses volumiques sèches

des bétons résultants à base de chanvre, lin, colza étaient respectivement de l'ordre  $590 \text{ kg.m}^{-3}$  pour le Tr-Thermo et  $560 \text{ kg.m}^{-3}$  pour le Ch-MS2. La [FIG. 5] illustre d'une part la ductilité des bétons agrosourcés avec l'allongement à rupture, marqué notablement par ailleurs par l'absence de pic pour les bétons de colza. Les résistances en compression des bétons sont respectivement de l'ordre de  $0.55 \text{ MPa}$  avec le liant Ch-MS2 contre  $1.40 \text{ MPa}$  avec le liant commercial Tr-Thermo. Si les bétons végétaux de chanvre, lin et colza formulés avec l'éco-liant Ch-MS2 atteignent un niveau de performance mécanique moindre qu'avec la chaux commerciale, il n'en demeure pas moins que la résistance mécanique globale de ces mêmes bétons s'inscrit dans la gamme de valeur couramment admise typiquement en référence au béton de chanvre traditionnel.

#### IV. CONCLUSION

Cette étude expérimentale a permis de mettre en évidence l'intérêt d'un traitement mécano-physique par broyage de sédiments de dragage. Dans des conditions de cure saturée en humidité à la température de  $50^\circ\text{C}$ , l'énergie d'activation au sein du milieu réactionnel sédiment micronisé-chaux hydratée-eau est fortement influencée par la composition physico-chimique du sédiment (dont majoritairement les teneurs en quartz et matières organiques). Il ressort de l'étude la pertinence de l'interaction avec la biomasse végétale au regard des résultats expérimentaux obtenus sur les bétons de chanvre, de lin et de colza, avec un éco-liant formulé intégrant 80% en masse de sédiments marins micronisés.

#### REMERCIEMENTS

L'auteur tient à remercier la Région Hauts-de-France et le Fonds Européen de Développement Régional (FEDER) – Europe en France pour leur soutien financier.

#### RÉFÉRENCES

- Arrigoni, A., Pelosato, R., Melià, P., Ruggieri, G., Sabbadini, S., Dotelli, G., 2017. Life cycle assessment of natural building materials: the role of carbonation, mixture components and transport in the environmental impacts of hempcrete blocks. *Journal of Cleaner Production* 149, 1051–1061. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.161>
- Benezet, J.C., Benhassaine, A., 1999. Grinding and pozzolanic reactivity of quartz powders. *Powder Technology* 105, 167–171. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(99\)00133-3](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(99)00133-3)
- Diamond, S., 1963. Transformation of Clay Minerals by Calcium Hydroxide Attack. *Clays and Clay Minerals* 12, 359–379. <https://doi.org/10.1346/CCMN.1963.0120134>
- Domone, P., Hsi-Wen, C., 1997. Testing of binders for high performance concrete. *Cement and Concrete Research* 27, 1141–1147. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00107-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00107-5)
- Lacombe, T., 2020. Formulation et solidification par voie hydrothermale de charges minérales poreuses à base cimentaire : application aux matières premières secondaires, cas des sédiments de dragage portuaire. Thèse de doctorat de l'Université de Lille.
- Nozahic, V., Amziane, S., Torrent, G., Saïdi, K., De Baynast, H., 2012. Design of green concrete made of plant-derived aggregates and a pumice-lime binder. *Cement and Concrete Composites* 34, 231–241. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.09.002>
- The Manh, D., 2014. Contribution au développement de béton de chanvre préfabriqué utilisant un liant pouzzolanique innovant (Thèse de doctorat). Université de Toulouse.