

Influence de la substitution d'argile par des déchets sédimentaires dans des briques en terre crue comprimée (BTCC) sur la résistance à l'abrasion

Samuel Guéret¹, Gwenaël Diélie², Frédérique Bastin¹, Tiriana Segato¹, Michel Verbanck², and Pierre D'Ans^{1,*}

¹ Université Libre de Bruxelles (ULB), Service 4MAT, 50 Av. FD Roosevelt, 1050 Bruxelles, Belgique

² Université Libre de Bruxelles (ULB), Service Traitement des Eaux et Pollution, Bld. du Triomphe, CP208, 1050 Bruxelles, Belgique

Reçu le 1 février 2019 / Accepté le 8 avril 2019

Résumé. Grands émetteurs de gaz à effet de serre à la production, les matériaux de construction issus des filières thermiques peuvent être, dans certains cas, substitués par des « éco-matériaux ». L'économie circulaire pousse de plus en plus à intégrer des déchets dans les chaînes de production. Ce travail analyse la possibilité d'intégration de déchets urbains tel que des résidus fins de boues sédimentaires de dragage (BSD) pour partiellement remplacer la terre crue dans la production de briques en terre crue comprimée (BTCC). Les BSD ont été caractérisées par diffraction des rayons X, fluorescence X et analyse thermique. La présence de métaux lourds et composés organiques polluants a été quantifiée. Des pastilles de différents teneurs en eau et compositions (mixte BSD et terres crues) ont été réalisées. Leur tenue à l'abrasion a été étudiée sur l'essai standardisé du pion-disque. Les pastilles contenant de la BSD dont les organiques ont été éliminés thermiquement, ont une faible tenue à l'abrasion. Cette performance est améliorée par l'ajout de 5 % de ciment, qui permet d'augmenter la cohésion du matériau.

Mots clés : briques de terre comprimée / boues de dragage / loi de Preston-Archard / pion-disque / recyclage

Abstract. Influence of substituting clay by sedimentary waste in compressed earth bricks on the abrasion resistance. Building materials from thermal processes are an environmental concern. They can be to some extent replaced by eco-materials like compressed earth bricks. Moreover, the current trend of circular economy pushed to incorporate waste in the value chain. In this work, we study the opportunity to incorporate finely-grained dredge sludge in compressed earth bricks. The waste is characterized via XRD, XRF and thermal analysis. The presence of heavy metals and organics is assessed. A fast testing procedure based on standardized ball-on-disk tests is used to determine the abrasion resistance of compressed earth materials of various compositions. Compressed earth partially substituted by thermally treated waste has poor abrasion resistance. A significant improvement is observed when adding 5% cement in the mixture.

Keywords: raw earth brick / dredge sludge / Archard law / pin-on-disk / recycling

1 Introduction

Matériau pourtant traditionnel, la terre crue fait l'objet d'un regain d'attention de la communauté scientifique, en tant qu' « éco-matériau de construction ». Du fait de l'absence de cuisson, elle présente l'avantage de ne pas mobiliser autant d'énergie que la terre cuite. En outre, elle possède de bonnes caractéristiques telles qu'une inertie thermique, une effusivité et une diffusivité intéressantes, pour un bâtiment plus durable. La résistance à la

compression après stabilisation lors d'études de développement et de mise en application est satisfaisante. La tenue du matériel dans le temps dans différentes situations climatiques laisse envisager un potentiel économique étendu [1].

Parmi les grandes possibilités d'utilisation du matériau de type « terre », on retiendra l'Adobe, le Pisé et la brique (ou Bloc) de terre crue comprimée (BTCC). Ce présent article s'intéresse à la BTCC. Cette dernière technique, fort proche en composition de l'Adobe (fraction sableuse dominante), implique une compaction au moyen de presses. La teneur en eau est un paramètre important de la mise en œuvre de ces matériaux [2].

* e-mail: pdans@ulb.ac.be

L'utilisation d'adjuvants dans les matériaux de terre crue est une pratique courante. La stabilisation, qu'elle soit par l'ajout de renforts bio-sourcés (fibres végétales, paille...), de chaux, de ciment ou de bitume, influence la porosité, la perméabilité et la résistance à la compression [3–5]. Certaines études [4–6] se sont focalisées plus spécifiquement sur la résistance à l'usure : cette caractéristique est essentielle pour les couches externes des murs, sujettes à l'abrasion, au frottement d'objets ou de personnes qui seraient amenées à longer le mur dans le cadre d'un usage courant.

L'incorporation de déchets, qu'ils soient de types industriels, municipaux ou agricoles, dans la synthèse de matériaux de construction est un sujet de recherche largement étudié. La plupart de ces déchets nécessitent cependant un traitement de dépollution et/ou d'amélioration des propriétés mécaniques attendues [7]. Mais c'est également le cas pour les terres si elles présentent d'éventuels polluants organiques.

La littérature fournit des exemples d'incorporation de déchets dans le ciment [8,9], dans la brique cuite [10,11] ou dans les géopolymères [12]. Parfois, la présence d'adjuvants est nécessaire lors de telles incorporations. Parmi les déchets incorporés, citons les poussières de four à arc électrique, dont l'oxyde de zinc influence la vitesse de prise du ciment [8]. Citons également l'incorporation de poussières de ciment, qui permet de dépasser une résistance à la compression de 13 MPa dans des briques de ciment, ce qui est acceptable pour des murs porteurs [9].

Dans une logique de circularité, il est intéressant d'étendre cette démarche aux boues sédimentaires de dragage (BSD). Il existe peu d'études sur l'incorporation de déchets dans les BTCC. Néanmoins, signalons des recherches sur l'emploi de cendres avec des résultats encourageants [13,14] ainsi que celui de déchets de construction [15], avec parfois, la présence requise d'un liant.

Les fractions fines, de type argiles limoneuses, des BSD constituent un candidat de choix comme matière première pour la production de briques [16]. Ce travail choisit comme cas d'étude l'incorporation des fractions fines de sédiments extraits du canal traversant la Région de Bruxelles-Capitale (RBC) pour la fabrication de BTCC. Ce gisement représente 52 000 tonnes/an à environ 30 % de matière sèche. Les polluants présents sont notamment les métaux lourds [17], les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les huiles minérales (C10–C40) et, enfin, les polychlorobiphényles (PCB) [18]. Acosta et al. ont notamment mis en évidence la problématique de la gestion et de la dépollution de sédiments contenant des métaux lourds. Une répartition hétérogène des polluants selon les classes granulométriques peut être observée [19] (similaire à ce qu'ont observé Bouezmarni et Wollast [20] dans les sédiments de l'estuaire de l'Escaut). Une approche de type granulochimique dans le traitement de ce type de flux permet la récupération des fractions les plus grossières (gravier et sable) sans traitement supplémentaire.

La présente étude vise à clarifier la possibilité d'intégrer des BSD dans la fabrication de BTCC. La résistance à l'abrasion sera retenue comme critère pertinent pour des parois peu portantes de type brique de recouvrement, mais soumises à des conditions méca-

niques d'utilisation moyennement sévères, comme le contact avec des objets, des personnes ou des animaux. Ce critère permet l'utilisation de tests rapides sur des éprouvettes de taille réduite, et au besoin de réaliser de larges études sur l'influence des paramètres du procédé sur les propriétés. Le protocole de fabrication s'inspirera de celui d'une BTCC considérée comme acceptable, laquelle servira de point de comparaison.

2 Matériel et méthodes

2.1 Matériaux et caractérisation

Les BSD sont issues de la rive droite du canal de Bruxelles-Charleroi, au bassin Vergote à Bruxelles, près du pont des Armateurs (50°51'54"N, 4°21'7"E). Les prélèvements ont été réalisés à la benne-grappin Van Veen.

Des matières premières validées dans la fabrication de BTCC ont aussi été utilisées comme référence. Elles sont constituées de sable graveleux et d'argile grise originaire de la région de Mons (B). Elles ont été fournies par l'entreprise BC Materials (BCM), active dans les matériaux de construction en terre crue.

Un tamisage en voie humide est effectué afin d'identifier les granulométries des différentes fractions de l'échantillon de sédiment brut. Les ouvertures des tamis utilisés correspondent à 2 mm, 500 μm , 250 μm , 125 μm , 90 μm et 63 μm .

Une détermination du taux d'humidité des matières est réalisée au moyen d'un analyseur d'humidité doté d'une résistance chauffante (Sartorius MA35), en portant les échantillons à 160 °C jusqu'à stabilisation de la masse (observée après 10 min). La perte de masse permet de déterminer le taux d'humidité.

La mesure de la fraction organique est réalisée au moyen d'une analyse thermogravimétrique couplée à un spectromètre de masse (ATG-SM, Netzsch STA409PC-QMS403C). Elle est effectuée sous flux d'oxygène, depuis la température ambiante jusqu'à 1000 °C à une vitesse de montée en température de 10 °C/min. Les rapports masse/charge balayés par le SM sont entre autres ceux des ions potentiellement formés à partir des molécules suivantes : NH₃, H₂O, HF, CO, NO, NO₂, O₂, H₂S, HCl, CO₂ et SO₂. Une analyse thermique différentielle (ATD) est effectuée simultanément.

La fraction inorganique est caractérisée par diffraction des rayons X (DRX) et par fluorescence des rayons X (FRX). Les diffractogrammes sont acquis au moyen d'un Bruker D8Advance Eco en utilisant la raie K α du cuivre, en mode $\theta/2\theta$, à une vitesse de balayage de 1,2° 2 θ /min. L'identification des phases est réalisée au moyen de la base de données ICDD (PDF-2). La FRX est réalisée au moyen d'un Bruker S4 Pioneer sur des échantillons montés en pastilles de diamètre 4 cm, la mesure étant effectuée en utilisant un masque de 2,3 cm de diamètre.

À titre complémentaire, et en vue d'analyser plus en avant la présence de métaux lourds dans les matières premières, des analyses par spectrométrie à plasma à couplage inductif (SPCI) doté d'un analyseur optique (Varian Vista-MPX) ont été réalisées. Pour ce faire, 1 g de sédiment a été lixivié dans de l'eau, filtré, puis à nouveau lixivié dans H₂SO₄ et dans HNO₃ concentrés (rapport

Tableau 1. Échantillons de matière comprimée : teneur en masse sèche.

Table 1. Compressed matter samples: composition in % of dry matter.

| | Échantillon 1 | Échantillon 2 | Échantillon 3 | Échantillon 4 | Échantillon 5 |
|-----------------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|--------------------|
| Sable graveleux | 50 % | | 50 % | 50 % | 50 % |
| Argile grise | 50 % | | 25 % | 25 % | 22,5 % |
| BSD | | 100 % | 25 % | | |
| BSD traitée à 1000 °C | | | | 25 % (<2 mm) | 22,5 % (<63 µm) |
| Ciment Atihl | | | | | 5 % |

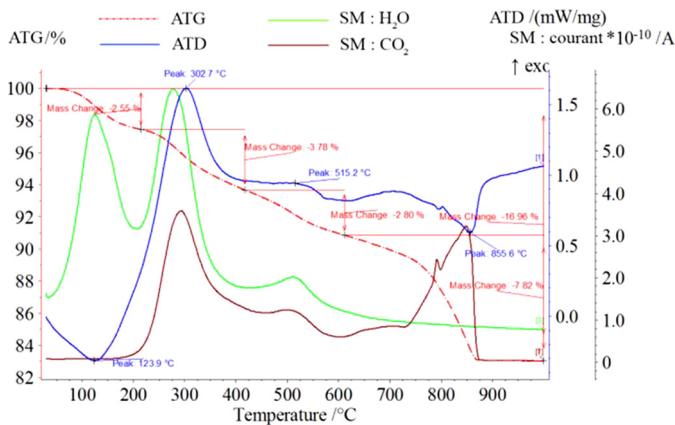


Fig. 1. Résultats de l'ATD et de l'ATG-SM avec les signaux de H₂O et de CO₂.

Fig. 1. Differential thermal analysis and thermogravimetric analysis/mass spectrometry, with the signals of H₂O and CO₂.

liquide/solide > 20). Les concentrations en une sélection de métaux ont été analysées par SPCL, en vue de déduire la fraction de métal mobilisable dans le sédiment.

2.2 Essais d'incorporation dans des BTCC

Après avoir ajusté la teneur en eau à 12 % et après contrôle à l'humidimètre, les échantillons de terre sont comprimés à l'aide d'une presse de laboratoire de façon à simuler le procédé réel de compression des BTCC. Cette presse permet de compacter des poudres. Celles-ci sont introduites dans un godet métallique et une force mesurée leur est appliquée, avec un maximum d'environ 90 000 N. Dans cette étude, une compression uni-axiale de 12 MPa est appliquée, de manière à produire des pastilles de terre comprimée de rayon 2 cm. Ces pastilles sont séchées 20 h à 110 °C.

Des pastilles de différentes compositions sont réalisées, pour étudier l'influence de l'incorporation de BSD. Les échantillons ainsi réalisés sont définis au [tableau 1](#). L'échantillon 1 correspond à la pastille de référence et

l'échantillon 2 est une pastille uniquement faite de BSD. Les échantillons 3 et 4 correspondent à une substitution partielle de la fraction argileuse par le déchet à incorporer. Dans le cas de l'échantillon 4, un traitement thermique a été réalisé, dans le but d'éliminer les matières organiques présentes.

L'échantillon 5 est un essai, dans lequel une incorporation de ciment (Atihl, CEMI 52,5 N) est réalisée pour étudier l'évolution des propriétés cohésives. Pour cet échantillon, la teneur en eau avant compression a été portée à 14 % pour tenir compte des besoins de la prise du ciment. Pour cet échantillon, la BSD a été limitée à la fraction < 63 µm dans le but de remplacer la fraction argileuse.

Si l'on considère une application de type recouvrement, le matériau ne doit pas s'effriter aux frottements. Sur base des pastilles fabriquées précédemment, des essais de tenue à l'abrasion sont donc préconisés, au moyen d'un tribomètre de type « pion-disque » standardisé [21] (CSEM, Centre suisse d'électronique et de microtechnique). Ce test est habituellement destiné à l'étude de pièces mécaniques en contact. Il est donc nécessaire d'adapter le protocole expérimental habituellement utilisé. Ce test permet une évaluation rapide de la cohésion des matériaux, sans passer par la production de briques entières.

Le pion utilisé est une bille en inox 420. Les tests sont réalisés à température ambiante de 22 °C. Une vitesse linéique de 20 mm/s est choisie. La charge verticale sur le disque est de 5 N et différents rayons de glissement de 5, 8, 11 et 14 mm sont proposés. Pour chaque rayon de glissement, le disque effectue 150 tours avant arrêt du tribomètre. Ainsi, la distance parcourue par la bille sur la pastille est différente pour chaque essai et peut être potentiellement corrélée aux différences de masse mesurées selon la loi de Preston-Archard (1) :

$$m = k^*PL, \quad (1)$$

où m est la perte de masse de l'échantillon (mg), mesurée ici à 0,1 mg près, k^* le coefficient d'usure (mg/N.m), P la force normale (N) et L la distance parcourue (m). Les coefficients de frottement sont également automatiquement extraits, mais sont de peu d'intérêt ici. Le « k^* » déduit ici se démarque du « k » habituellement indiqué dans la littérature, basé sur une perte de volume plutôt qu'une perte de masse.

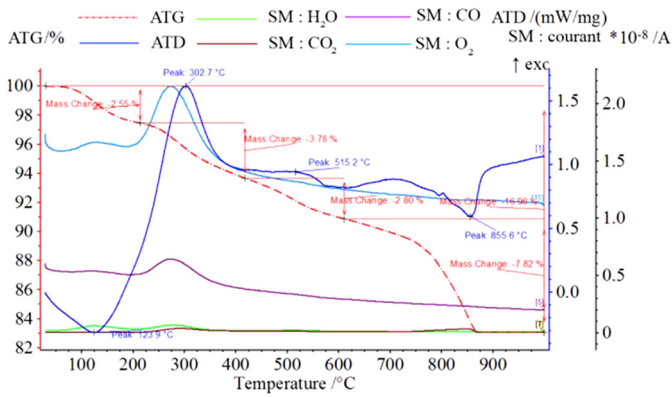


Fig. 2. Même figure avec les signaux de la SM pour O₂ et pour CO.

Fig. 2. Same as Figure 1, with the signals of O₂ and CO.

3 Résultats et discussion

Les résultats de l'ATG-SM et de l'ATD des BSD sont présentés sur les figures 1 et 2. Les courbes bleue et rouge correspondent respectivement dans chaque cas au signal ATD en mW/mg et au signal TG en % attestant des pertes de masse. Sur la figure 1, les courbes verte et brune correspondent respectivement aux signaux de l'H₂O et du CO₂. Sur la figure 2, les courbes bleu clair et mauve correspondent respectivement aux signaux de l'O₂ et du CO.

En superposant les informations de ces deux figures, il apparaît que la première perte de masse de 2,55 % correspond à une première perte d'eau. Les deuxième et troisième pertes de masse de 3,78 et 2,80 % respectivement correspondent à une combustion au vu des pics d'H₂O et de CO₂ se superposant aux mêmes instants. Il s'agit de la combustion de composés organiques. Le pic d'O₂ aux alentours de 300 °C est encore resté inexplicé. La dernière perte de masse de 7,82 % suggère à une décarbonatation au vu du pic de CO₂ en l'absence de production d'eau.

Les autres rapports masse atomique/charge testés –HCl (36); NO et NO₂ (30, 46); H₂S (34); SO₂ (64); HF (20) – ne donnent pas de mesure significative.

Les figures 3 et 4 donnent les DRX de l'ensemble des matières premières utilisées: BSD, BSD traitée thermiquement, sable graveleux et argile grise. L'annexe (Tableau A1) détaille les formules brutes des composés identifiés, ainsi que la référence de la fiche utilisée pour l'indexation. L'ensemble des échantillons est constitué d'une matrice en quartz.

Dans le cas de l'échantillon étalon (BTCC, Fig. 4), la kaolinite, la muscovite et une smectite, vraisemblablement la nontronite sont également présentes comme phases secondaires, cette dernière essentiellement dans le cas de la fraction argileuse.

Dans le cas de la BSD, des aluminosilicates sont également présents (anorthite, microcline), de même que du clinocllore, une argile qui se décompose lors du traitement thermique. Sont également présents, des

carbonates de calcium et/ou de magnésium, responsables de la décarbonatation déjà évoquée. Après traitement thermique, ils se transforment en oxydes (chaux, périclase). De la vivianite (phosphate de fer) se décompose également en hématite.

La présence mise en évidence ci-avant de composés organiques, ainsi que les métaux lourds identifiés par FRX (Tab. 2) confortent la nécessité d'une dépollution avant utilisation des flux en briqueterie. Des analyses complémentaires du sédiment, réalisées par SPCI, sont données en annexe pour une sélection de métaux (Tableau A2). Ils confirment la présence de Fe, Cu, Zn et Cr. Le signal du Pb n'est pas exploitable sur ce sédiment.

Le bilan massique indique donc un pourcentage massique de 2,55 % d'eau; 6,58 % de composés organiques; 7,58 % de CO₂ emprisonné sous la forme de carbonates. Le solde est décrit au tableau 2 et est constitué, par ordre décroissant de masse, d'oxydes de silicium (quartz majoritairement); d'oxydes d'aluminium sous la forme d'anorthite, muscovite, clinocllore, kaolinite et microcline; d'oxydes de calcium sous la forme de calcite, aragonite et dolomite et d'oxydes de fer sous la forme de vivianite et clinocllore.

La figure 5 indique que les fines (< 63 μm) constituent plus du tiers de l'échantillon des BSD. L'enjeu réside dans la faculté à dépolluer les boues et à évaluer la quantité de polluants concentrés dans ces différentes fines. Ceci n'a pas été fait dans le cadre de ce travail mais pourrait être envisagé afin d'optimiser le remplacement d'une fraction argileuse par une fraction de BSD.

La figure 6 montre l'influence du traitement thermique sur l'aspect de la BTCC obtenue. L'échantillon 4, dont la fraction de BSD a été traitée thermiquement, prend une couleur ocre, caractéristique de la formation d'hématite évoquée plus haut. Cette couleur se rapprochant de celle d'une brique cuite.

La relation linéaire entre les différences de masses mesurées et la distance relative bille/disque parcourue (Eq. (1)) n'a pas été vérifiée. Le coefficient de vitesse d'usure k ainsi que la théorie inhérente à la loi de Preston-Archard ne peuvent être envisagés complètement. L'échantillon considéré n'est pas homogène en composition chimique et en structure. Il devient dans ces conditions difficile d'avoir un processus d'usure régulier dans le temps, nécessaire pour l'application inconditionnelle de la loi citée ci-avant. Elle permettra néanmoins d'identifier des tendances fortes, les différences entre résultats pouvant atteindre deux ordres de grandeur.

Les valeurs de coefficient de vitesse d'usure relative k^* en fonction des rayons de glissement (et à teneur constante en eau de 12 %, à l'exception de l'échantillon 5 : 14 %) sont fournies au tableau 3. Ceci permettra de donner un classement des performances relatives de tenue en abrasion des différents échantillons via une analyse semi-quantitative utilisant le principe de la loi de Preston-Archard avec les restrictions énoncées ci-dessus.

L'échantillon 2 (à 100 % de BSD) est celui qui présente les meilleures réponses au test d'abrasion. Ceci peut s'expliquer par le haut pourcentage des matières à faible granulométrie présentes dans ce matériau à caractère liant. L'échantillon 3 (25 % BSD, 25 % d'argile et 50 % de sable

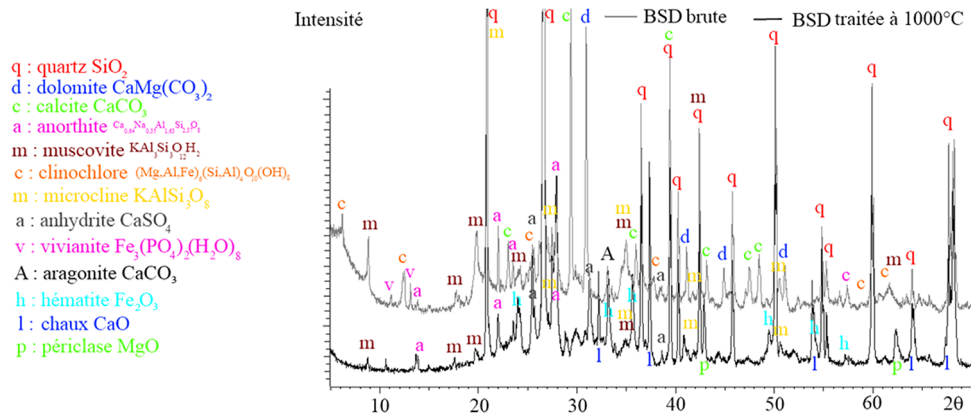


Fig. 3. DRX des BSD avant et après traitement thermique à 1000°C.

Fig. 3. X-ray diffraction of the dredge sludge before and after thermal treatment at 1000°C.

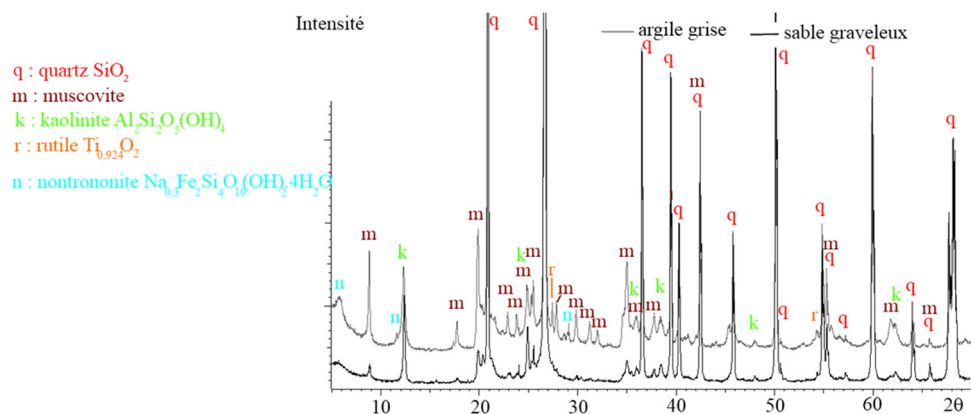


Fig. 4. DRX des fractions sableuse et argileuse de l'étalon de BTCC.

Fig. 4. X-ray diffraction of the reference sand and clay used for the raw earth brick.

Tableau 2. Analyse en % massique des sédiments bruts par FRX, intégrant les données obtenues pour la TG en ce qui concerne la fraction organique et les carbonates.

Table 2. XRF (mass %) of raw sediments, accounting for the data from thermo-gravimetry for organics and carbonates.

| | | | | | | | |
|-------------------------|-------|------------------------|------|-------------------------|------|--|------|
| SiO_2 | 49,74 | P_2O_5 | 1,31 | Cl | 0,06 | SrO | 0,01 |
| Al_2O_3 | 11,29 | SO_3 | 0,76 | BaO | 0,06 | | |
| CaO | 9,58 | TiO_2 | 0,59 | Cr_2O_3 | 0,03 | Déduits de la TG : | |
| Fe_2O_3 | 4,94 | Na_2O | 0,56 | ZrO_2 | 0,02 | H_2O | 2,55 |
| MgO | 1,92 | ZnO | 0,19 | PbO | 0,02 | CO_2 (sous forme de carbonates) | 7,82 |
| K_2O | 1,84 | MnO | 0,11 | CuO | 0,02 | Organiques | 6,58 |

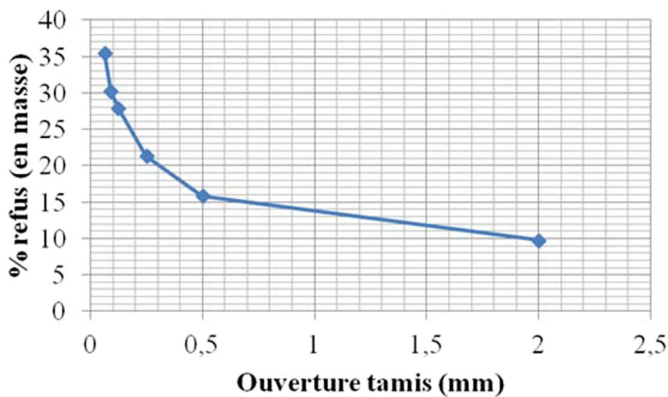
graveleux) présente de bons résultats comparativement à l'échantillon 1 (hormis pour le rayon de glissement de 5 mm).

L'échantillon 4 donne des résultats médiocres : les sillons creusés sont si larges que les essais à 11 et 5 mm de rayons de glissement (*) sont irréalisables faute de place suffisante laissée par les essais à 8 et à 14 mm. La

disparition des composés organiques suite au traitement thermique a fortement modifié les performances mécaniques du matériau en termes de porosité, résistance en compression et résistance à l'abrasion. L'échantillon 5, dans lequel du ciment a été incorporé, présente une amélioration notable par rapport à l'échantillon 4 mais une forte variabilité. Néanmoins, ceci montre le rôle positif

Tableau 3. Résultats des tests tribométriques sur les pastilles de BTCC à diverses compositions en BSD.**Table 3.** Results of tribometric tests on compressed earth samples with various compositions.

| Rayon de glissement (mm) | Échantillon 1- Coefficient k* (mg/N.m) | Échantillon 2- Coefficient k* (mg/N.m) | Échantillon 3- Coefficient k* (mg/N.m) | Échantillon 4- Coefficient k* (mg/N.m) | Échantillon 5- Coefficient k* (mg/N.m) |
|--------------------------|--|--|--|--|--|
| 5 | 0,11 | 0,093 | 1,08 | Non-réalisé* | 0,93 |
| 8 | 0,16 | 0,12 | 0,16 | 6,25 | 0,57 |
| 11 | 0,30 | 0,064 | 0,21 | Non-réalisé* | 1,80 |
| 14 | 0,85 | 0,045 | 0,35 | 15,69 | 0,87 |

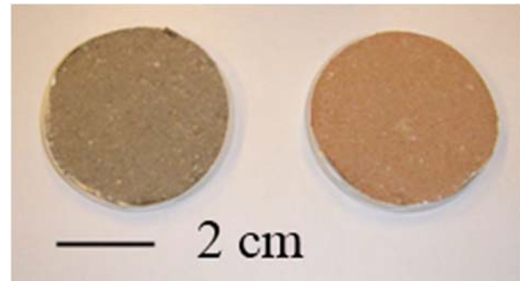
**Fig. 5.** Résultats de l'analyse granulométrique en voie humide sur l'échantillon de sédiments bruts. Masse de l'échantillon : 251 g.**Fig. 5.** Grain size distribution (wet conditions) of the raw sediment. Total sample mass: 251 g.

du ciment sur les propriétés cohésives de ce matériau recyclé, grâce à sa pouzzolanité. Le fait d'avoir limité la granulométrie de la BSD a également permis de remplacer de façon plus fidèle une partie de la fraction argileuse du matériau de référence

4 Conclusion

Cette étude avait pour objectif d'analyser l'intégration de BSD d'origine urbaine dans la synthèse de BTCC. Les BSD telle que réceptionnées contiennent ~6,5% massiques de matière organique ainsi que des métaux lourds dont le Zn, le Cr, le Fe et le Cu, l'analyse réalisée n'ayant pas vocation à déceler les traces les plus faibles. Les composés organiques sont éliminables par traitement thermique. La fraction < 63 μm (assimilables à de l'argile en terme de granulométrie) contient du quartz et d'autres aluminosilicates.

La tenue en abrasion des BTCC formées de BSD seules et des BTCC dans lesquelles la BSD non traitée a été incorporée fournissent des résultats satisfaisants en abrasion, la fraction organique servant de liant. Néanmoins, ces matériaux restent lourdement pollués et ne sont pas acceptables tels quels.

**Fig. 6.** Photographie des échantillons 3 (gauche) et 4 (droite).**Fig. 6.** Samples 3 (left) and 4 (right).

Les performances en abrasion se dégradent d'un facteur ~10² lorsque la BSD est traitée thermiquement, les organiques ne jouant plus leur rôle de liant. Cette perte de performance est en grande partie atténuée lorsqu'un liant hydraulique, en l'occurrence du ciment, est ajouté à hauteur de 5% massique au mélange, tout en limitant la BSD à sa fraction la plus fine. Ces résultats constituent une preuve de concept du recyclage des BSD urbaines. Ils encouragent à étudier l'incorporation de liants dans les BTCC obtenues, en vue d'améliorer leur cohésion, sans passer par des matières issues entièrement de procédés thermiques.

Comme suite à cette preuve de concept, il conviendrait d'étudier l'incorporation d'autres BDD dans les matériaux de construction, voire d'autres sédiments, sachant que l'origine géographique conditionne la présence en polluants, spécialement les métaux lourds. À ce titre, ce travail constitue la première étape d'un projet plus large incluant les aspects géospatiaux ainsi que la mise en œuvre, selon les cas, de stratégies de dépollution préalable : bioremédiation, lixiviation, méthodes électrochimiques...

Remerciements. Les auteurs remercient Nicolas Coeckelberghs, de BC Materials, pour la fourniture gracieuse des matériaux de référence et pour de nombreux renseignements sur les pratiques de terrain. Ils remercient le Prof. Yves De Smet pour l'octroi d'un financement interne à la Faculté (Bourse d'Initiation à la Recherche), Julien Schneider pour des mesures granulométriques et l'extraction de sédiments, ainsi qu'Omar El Bantli pour les mesures par SPCI.

Annexe

Tableau A1. Composés identifiés dans les analyses par DRX.

| Nom | Formule brute | Numéro de la fiche |
|--------------|--|--------------------|
| Quartz | SiO ₂ | PDF 00-046-1045 |
| Muscovite | KAl ₃ Si ₃ O ₁₂ H ₂ | PDF 01-084-1302 |
| Dolomite | CaMg(CO ₃) ₂ | PDF 00-036-0426 |
| Anhydrite | CaSO ₄ | PDF 00-037-1496 |
| Anorthite | Ca _{0,64} Na _{0,35} Al _{1,63} Si _{2,37} O ₈ | PDF 01-083-1371 |
| Microcline | KAlSi ₃ O ₈ | PDF 01-019-0932 |
| Chlinochlore | (Al,Mg,Fe) ₆ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈ | PDF 00-046-1323 |
| Calcite | CaCO ₃ | PDF 01-071-3699 |
| Aragonite | CaCO ₃ | PDF 00-041-1475 |
| Chaux | CaO | PDF 00-037-1497 |
| Périclase | MgO | PDF 00-045-0946 |
| Vivianite | Fe ₃ (PO ₄) ₂ (H ₂ O) ₈ | PDF 01-079-1928 |
| Hématite | Fe ₂ O ₃ | PDF 00-033-0664 |
| Kaolinite | Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄ | PDF 00-060-0345 |
| Rutile | Ti _{0,924} O ₂ | PDF 01-089-0555 |
| Nontronite | Na ₃ Fe ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·4H ₂ O | PDF 00-029-1497 |

Dans le [tableau A1](#), sont repris les composés indexés en DRX, avec le numéro de la fiche DRX utilisée dans la base de données.

Tableau A2. Teneurs en métaux mobilisables dans les sédiments. Source pour la norme d'assainissement : 29 mars 2018. Arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale déterminant les normes d'intervention et les normes d'assainissement.

| Métal | Cr | Cu | Fe | Zn |
|--------------------------------|----|----|------|-----|
| Teneur mobilisable (mg/kg) | 36 | 41 | 1235 | 169 |
| Norme d'assainissement (mg/kg) | 91 | 72 | – | 200 |

Le [tableau A2](#) donne la teneur en quelques métaux lourds mobilisables par lixiviation, contenus dans le sédiment. Il s'agit des teneurs extractibles par l'eau et deux acides forts. Ces valeurs sont déduites de la somme des concentrations obtenues par SPCI. Des essais complémentaires sont requis pour Pb (signal non exploitable) et Hg (norme admissible réduite).

References

1. Techniques de l'Ingénieur – TBA 1520V1, Les qualités du matériau terre, Techniques de l'Ingénieur, Techniques du Bâtiment : l'enveloppe du bâtiment, Université Libre de Bruxelles, France, 2005
2. Techniques de l'Ingénieur – TBA 1530V1, La construction et l'architecture de terre, Techniques de l'Ingénieur, Techniques du Bâtiment : l'enveloppe du bâtiment, Université Libre de Bruxelles, France, 2005
3. Techniques de l'Ingénieur – TBA 1510V1, Construction en terre : l'amélioration par la stabilisation, Techniques de l'Ingénieur, Techniques du Bâtiment : l'enveloppe du bâtiment, Université Libre de Bruxelles, France, 2005
4. S. Ouattara, M.O. Boffoue, A.A. Assande, C.H. Kouakou, K. C. Kouadio, E. Emeruwa, PASRES Influence du ciment Portland sur les caractéristiques mécaniques et physiques d'un composite argile-sciure de bois utilisé comme Bloc de Terre Comprimée (BTC), *Matériaux & Techniques* **105**, 203 (2017)
5. A. Simons, A. Laborel-Préneron, A. Bertron, J.E. Aubert, C. Magniont, C. Roux, C. Roques, Development of bio-based earth products for healthy and sustainable buildings: characterization of microbiological, mechanical and hygrothermal properties, *Matériaux & Techniques* **103**, 206 (2015)
6. S. Kumar, S. Singh, S.C. Mishra, Processing and characterization of fly-ash Compacts, *Mater. Today: Proc.* **5**, 3396 (2018)
7. A. Murmu, A. Patel, Towards sustainable bricks production: An overview, *Constr. Build. Mater.* **165**, 112 (2018)
8. F. Brehm, C. Moraes, R. Modolo, A. Vilela, D. DalMolin, Oxide zinc addition in cement paste aiming electric arc furnace dust (EAFD) recycling, *Constr. Build. Mater.* **139**, 172 (2017)
9. M. El-Attar, D. Sadek, A. Salah, Recycling of high volumes of cement kiln dust in bricks industry, *J. Clean. Prod.* **143**, 506 (2017)
10. A. Mohajerani, A. Kadir, L. Larobina, A practical proposal for solving the world's cigarette butt problem: Recycling in fired clay bricks, *Waste Manag.* **52**, 228 (2016)
11. V. Karayannis, Development of extruded and fired bricks with steel industry byproduct towards circular economy, *J. Build. Eng.* **7**, 382 (2016)
12. S. Amin, S. El-Sherbiny, A. Abo El-Magd, A. Belal, M. Abadir, Fabrication of geopolymer bricks using ceramic dust waste, *Constr. Build. Mater.* **157**, 610 (2017)
13. S.S. Raj, A. Sharma, K. Anand, Performance appraisal of coal ash stabilized rammed earth, *J. Build. Eng.* **18**, 51 (2018)

14. C.-S. Shon, D. Saylak, D. Zollinger, Potential use of stockpiled circulating fluidized bed combustion ashes in manufacturing compressed earth bricks, *Constr. Build. Mater.* **23**, 2062 (2009)
15. C. Jayasinghe, W. Fonsaka, Y. Abeygunawardhene, Load bearing properties of composite masonry constructed with recycled building demolition waste and cement stabilized rammed earth, *Constr. Build. Mater.* **102**, 471 (2016)
16. K. Hamer, V. Karius, Brick production with dredged harbour sediments. An industrial-scale experiment, *Waste Manag.* **22**, 521 (2002)
17. V. Cappuyns, R. Swennen, Sediment characterization during oxidation and ripening and evaluation of its potential reuse, *Environ. Technol.* **30**, 785 (2009)
18. C. Schaar, J. De Villers, Production et gestion des boues et sédiments en région de Bruxelles-Capitale, *Bruxelles Environnement, Département déchets et observatoire des données de l'environnement*, Bruxelles, 2012
19. J.A. Acosta, A. Faz, K. Kalbitz, B. Jansen, S. Martínez-Martínez, Partitioning of heavy metals over different chemical fraction in street dust of Murcia (Spain) as a basis for risk assessment, *J. Geochem. Explor.* **144**, 298 (2014)
20. M. Bouezmarni, R. Wollast, Geochemical composition of sediments in the Scheldt estuary with emphasis on trace metals, *Hydrobiologia* **540**, 155 (2005)
21. ASTM G99-17, Standard test method for wear testing with a Pin-on-Disk Apparatus, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, available at www.astm.org

Citation de l'article : Samuel Guéret, Gwenaél Diélie, Frédérique Bastin, Tiriana Segato, Michel Verbanck, Pierre D'Ans, Influence de la substitution d'argile par des déchets sédimentaires dans des briques en terre crue comprimée (BTCC) sur la résistance à l'abraisson, *Matériaux & Techniques* **107**, 302 (2019)