

Boues de dragage et boues d'épuration : Comparaison multicritère et étude de la faisabilité technique d'une filière de valorisation

Ing. R. PIERSON
ECAM – Bruxelles

Ing. J. BRONCKART
Promoteur ECAM – Bruxelles

En Belgique, deux types de boues sont en demande des nouvelles voies de valorisation : les boues de dragage et les boues de station d'épuration. L'article traité consiste en une étude comparative de ces deux types de boues afin d'en sélectionner une qui sera valorisée dans la réalisation d'un matériau de construction. Tout en recyclant un «déchet» de plus en plus abondant, une économie sur une ressource naturelle non renouvelable, à savoir l'argile, sera réalisée. Ensuite des essais sur le matériau créé ont été menés en laboratoire afin d'en déterminer les propriétés physiques et mécaniques.

Mots-clefs : brique, briqueterie, boue, boues de dragage, boues d'épuration, dragage, station d'épuration, terre cuite

In Belgium, two types of sludge are in demand new ways of valorisation: dredging sludge and sludge from wastewater treatment plants. The treated article is a comparative study of these two types of sludge in order to select one that will be valued in the production of construction material. While recycling "waste" more and more abundant, economy on a non-renewable natural resource, namely clay, will be realized. Then tests on the material created in the laboratory were conducted to determine the physical and mechanical properties.

Keywords : brick, sludge, wastewater sludge, dredge sludge, dredging, wastewater plant, terracotta

1. Introduction

Dans le monde industriel actuel, l'écologie et le recyclage ne peuvent plus être négligés. Les aspects environnementaux doivent être intégrés dans le développement de nouveaux projets. Le domaine de la construction évolue sans cesse et prend de plus en plus en compte ces notions environnementales importantes.

Cette étude résulte de l'évolution de mentalité au sein du secteur de la construction, et de la nécessité croissante de trouver une solution aux problématiques liées aux boues d'épuration et de dragage.

Ce mémoire comporte une analyse bibliographique évaluant la faisabilité de valoriser un de ces deux types de boues dans le domaine de la construction et conduit donc à une première sélection. De plus, un second choix a été opéré, et concerne le matériau dans lequel le type de boue retenue a été valorisé. Pour ce faire, une analyse des différentes possibilités a été menée, se basant sur les moyens de valorisation déjà pratiqués dans nos pays voisins.

La suite du travail consiste en la détermination de deux mélanges comportant des taux d'incorporation de boue différents, et un mélange de référence sans boue. Ces mélanges servent à la fabrication du matériau de la valorisation choisie. Des essais ont ensuite été réalisés sur ce matériau afin de déterminer les avantages et inconvénients liés à l'addition de boue dans la constitution de celui-ci.

2. Comparaison des deux types de boues

2.1. Boues d'épuration

Les boues d'épuration proviennent de l'épuration des eaux usées acheminées via un réseau d'assainissement jusqu'à une station d'épuration. Elles sont donc le produit du traitement des eaux usées domestiques, industrielles et des eaux de pluie, et sont constituées principalement de déchets industriels, agricoles et humains. La qualité d'une boue dépend de la qualité de l'eau de laquelle celle-ci provient. On peut trouver un grand nombre de polluants divers en fonction des eaux usées arrivant dans les

stations d'épuration. Entre autres, les boues sont constituées de micro-organismes (bactéries et agents pathogènes), de matières organiques non dégradées et de matières inorganiques (métaux lourds, minéraux). La proportion de ces composants peut varier sensiblement en fonction des types de pollution des eaux usées, mais en général ce sont les matières sèches et organiques qui sont les plus présentes dans les boues.

Les quantités de boues d'épurations ne cessent d'évoluer suite aux exigences européennes concernant l'assainissement des eaux usées. Les quantités de boues sortant des stations d'épuration wallonnes ont plus que doublé sur la période de 1994 à 2008.

Selon la législation en vigueur, en Wallonie, les boues d'épuration peuvent être valorisées en agriculture grâce à la réglementation définie par l'arrêté du gouvernement wallon du 12 janvier 1995.

En Belgique, il existe plusieurs moyens de valorisation des boues d'épuration qui nécessitent des traitements différents. Celles-ci peuvent être soit incinérées pour une valorisation énergétique, soit utilisées pour produire du biogaz, ou encore être épandues en agriculture. Les quantités de boues produites en Wallonie ainsi que leur répartition en fonction de la valorisation sont reprises sur la figure 1 (cfr source [1]).

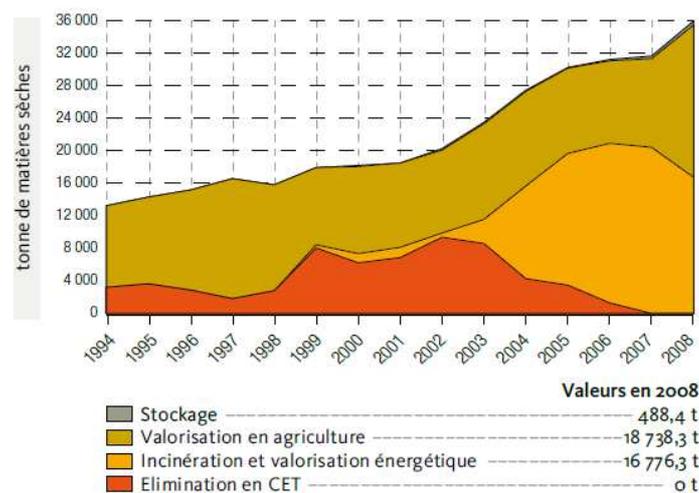


Figure 1 : Quantités de boues d'épuration produites en Wallonie

2.2. Boues de dragage

Le transport de marchandises par voie navigable est le moyen de transport le plus respectueux de l'environnement comparé au transport routier, aérien ou ferroviaire. C'est pourquoi, suite aux recommandations européennes liées au développement durable, la Wallonie a décidé de redynamiser et de valoriser ce secteur. Cependant, la Wallonie a accumulé un retard dans les travaux d'entretien de son réseau navigable. Entre 1992 et 2004, les opérations de dragage des voies navigables belges ont fortement ralenti en raison des conditions d'entreposage et de traitement des boues de dragage imposées par la réglementation.

Les chiffres les plus récents et cohérents liés à la quantification de l'envasement des voies navigables wallonnes ont été mis en évidence par une étude réalisée en 2006. Cette étude, basée sur de récentes techniques bathymétriques (utilisation de sonars multifaisceaux couplés avec des GPS de haute précision), a permis de recueillir des informations sur ± 260 km de voies navigables (et non l'entièreté du réseau wallon, soit 460 km). Il en ressort que, sur les tronçons étudiés, on dénombre pour la période 1998-2006 un passif de 5860000m^3 de sédiments. Les quantités récurrentes liées à l'entretien annuel sont estimées à 597000m^3 . Si l'on regarde à la partie non étudiée du réseau, on se rend compte que le bilan devrait être plus que doublé si tous les canaux avaient été pris en compte.

Voies d'eau	Volumes (m ³) Etude 2006
Canal Nimy-Blaton	416.140
Canal Blaton-Péronnes et Blaton-Ath	342.723
Canal du Centre à grand gabarit	152.865
Haut Escaut	201.140
Sambre	481.271
Meuse (La Plante-Lixhe + C. Haccourt-Visé)	3.369.654
Canal Albert (+ canal de Monsin)	895.397
Totaux intermédiaires	5.859.190
Canal Charleroi-Bruxelles	
Dendre	
Lys	?
Canal de l'Espierre	
Canal Pommeroeul-Condé	
Haine	

Figure 2 : Envasement des voies navigables wallonnes (cfr source [2])

En Belgique, la législation en vigueur définit deux catégories de boues, à savoir la catégorie A pour les sédiments non contaminés et la catégorie B pour ceux contaminés. Ce classement est obtenu en comparant les teneurs de certains éléments par rapport aux Teneurs Maximums Admissibles (TMA) et aux Teneurs de Sécurité (TS) représentant les valeurs admissibles en lixiviation. Dès lors, la boue est contaminée si un seul de ces éléments possède une concentration supérieure aux TMA et TS. Suivant les différents arrêtés du gouvernement wallon et arrêtés ministériels, la figure 3 (cfr source [3]) présente le principe de la classification des sédiments dragués.

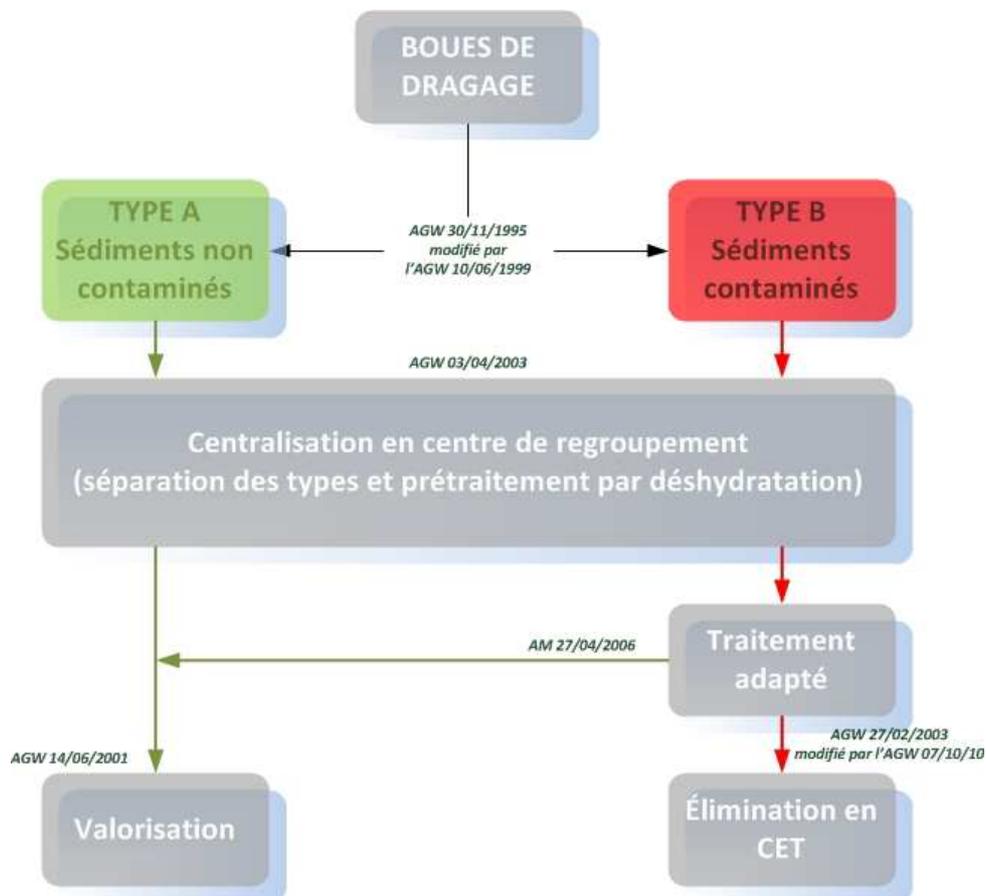


Figure 3 : Classification des sédiments de dragage en Belgique

En Belgique, les sédiments issus du dragage des voies navigables sont réutilisés (après dépollution des quantités contaminées) dans des travaux de remblai. On les emploie aussi pour le renforcement des berges, sinon elles sont stockées dans des bassins de décantation. Les déchets exogènes comme le plastique, les carcasses de véhicules, etc. sont bien sûr séparés des boues et envoyés en centre d'enfouissement technique (produits dangereux ou inertes).

Le processus de décontamination actuel est le procédé NOVOSOL. Il consiste à décontaminer les boues en deux étapes. La première est la stabilisation des contaminants minéraux (métaux lourds) en les piégeant dans des phosphates par ajout d'acide phosphorique (H₃PO₄). Cela permet de réduire considérablement leur mobilité. La seconde étape est une calcination (650°C-900°C) du produit résultant de la phosphatation des boues afin de diminuer au maximum les teneurs en matière organique. À la sortie de la seconde étape, la matière obtenue contient des résidus minéraux stabilisés et peut normalement être valorisée.

Un autre processus en cours d'étude, vise à réduire le volume de détrit B en séparant la matière en différentes fractions. Ce procédé expérimental issu du projet SOLINDUS (SOLutions INtégrées et DURables pour Sédiments et matières assimilées), mené conjointement par le CTP, la DG02, L'INISMA (BCRC) et l'ISSEP, consiste en une séparation par tamisage suivant 5 fractions granulométriques. Cette séparation granulométrique permettrait de canaliser les polluants dans la fraction fine.

100 kg				
<i>Fraction</i>	<i>Quantité</i>	<i>Composition</i>	<i>Catégorie</i>	<i>Remarque</i>
> 2mm	4 kg	matières exogènes	A	Directement valorisable
2 mm - 250 µm	6 kg	sable grossier	A	Directement valorisable
250 µm - 63 µm	38 kg	sable fin	A	Directement valorisable
63 µm - 15 µm	25 kg	limon	A	Valorisable après flottation
< 15 µm	27 kg	argile	B	Inertable ou mise en décharge après floculation/filtration

Figure 4 : Séparation granulométrique SOLINDUS

2.3. Choix de la boue et de la valorisation

Il ressort de cette comparaison qu'en termes de quantité, les boues de dragages sont surabondantes par rapport aux boues d'épuration. De plus, les boues d'épuration sont déjà bien exploitées. En Belgique, elles sont utilisées en agriculture, mais sont aussi valorisées dans des filières d'incinération et de valorisation énergétique, ce qui fait que les quantités stockées sont très faibles, ce qui n'est pas du tout le cas des sédiments de dragage.

Par ailleurs, les conséquences survenant suite aux problématiques liées à chacune de ces boues sont plus préoccupantes dans le cas des sédiments dragués. Leur présence dans les cours d'eau et voies navigables influence directement les activités liées à ceux-ci. Par exemple, le transport fluvial dont l'activité a dû être réduite sur certaines portions alors qu'elle devrait être privilégiée. Sans compter les conséquences que l'envasement des cours d'eau peut causer (inondations en cas de crues, pollution d'écosystèmes menaçant la survie de certaines espèces, etc.)

En ce qui concerne l'orientation du type de valorisation en construction pour les boues de dragage, la filière de la brique en terre cuite (brique SB plus apparentée à un bloc de terre cuite) est la plus envisageable. L'incorporation de boues de dragages dans la composition de base de ces briques ne donnerait pas de couleurs homogènes et reproductibles pour des briques utilisées en parement. C'est pour cette raison esthétique que la filière du bloc en terre cuite a été privilégiée à celle de la brique de parement.

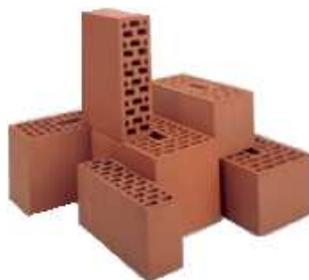


Figure 5 : Brique perforée ou bloc SB

Par ailleurs, étant donné l'abondance des sédiments dragués et l'importance de l'industrie briquetière en Belgique (demandeuse d'un bilan environnemental plus favorable), l'incorporation de boues de dragage dans

la constitution des blocs permettrait de diminuer la consommation de matières premières comme l'argile naturelle non renouvelable.

En Belgique, la production de briques perforées (bloc SB) représente la majorité des produits fabriqués par l'industrie briquetière depuis presque 30 ans. On se rend compte de l'importance de ce marché dans notre pays en regardant de plus près aux quantités produites (± 1300000 m³ en 2010, soit à peu près 65% de la production de briques, toutes catégories confondues. Cfr Source [4]).

3. Calcul des compositions des briques

3.1. Description des matières premières

Les matériaux utilisés pour la réalisation des trois mélanges sont :

- l'argile (en provenance de Barry)
- la fraction granulométrique inférieure à 250 μ m des sédiments de dragage (en provenance du canal de Nimy-Blaton) traités par le processus SOLINDUS
- du sable

Les terres utilisées à la fabrication des briques de terre cuite sont généralement constituées d'argiles ayant des proportions variables de kaolinite, illite, chlorite, quartz, matières organiques, oxydes de fer et oxydes de calcium. Ces matériaux présentent une tendance à la vitrification entre 900 et 1160°C.

Pour être utilisées dans la fabrication de brique de terre cuite, les boues de dragage doivent présenter des caractéristiques similaires à ces argiles. Elles doivent notamment avoir une certaine granulométrie et une composition chimique proche de la composition de ces argiles.

Les sédiments de dragage ainsi que l'argile présentent une granulométrie très fine. En suivant la théorie de Niesper et Winkler (traitée au point 3.2.) nous avons réalisé qu'afin d'obtenir une bonne plasticité et une bonne ouvrabilité lors de la confection des briques, il était indispensable d'ajouter du sable présentant une granulométrie plus grossière.

3.2. Principe de calcul des trois compositions

Dans un premier temps, les compositions ont été calculées suivant la théorie du diagramme de Wiesper-Winkler. Cette théorie définit des domaines d'utilisation en fonction de trois fractions granulométriques :

- Fraction sableuse : $d > 20\mu\text{m}$
- Fraction limoneuse : $20\mu\text{m} > d > 2\mu\text{m}$
- Fraction argileuse : $2\mu\text{m} > d$

Dans le cas des briques perforées (domaine II), les restrictions imposées par ce diagramme sont : au moins 20% en poids de toute la composition sont constitués de particules plus petites que $2\mu\text{m}$. Il faut au maximum 60% de grains de dimension supérieure à $20\mu\text{m}$, et au minimum 10% pour les grains de dimensions intermédiaires (entre $2\mu\text{m}$ et $20\mu\text{m}$).

S'assurer que le mélange se situe dans le bon domaine du diagramme en fonction du produit recherché permet d'obtenir une plasticité suffisante et permet aussi d'avoir un produit assez compact après la cuisson.

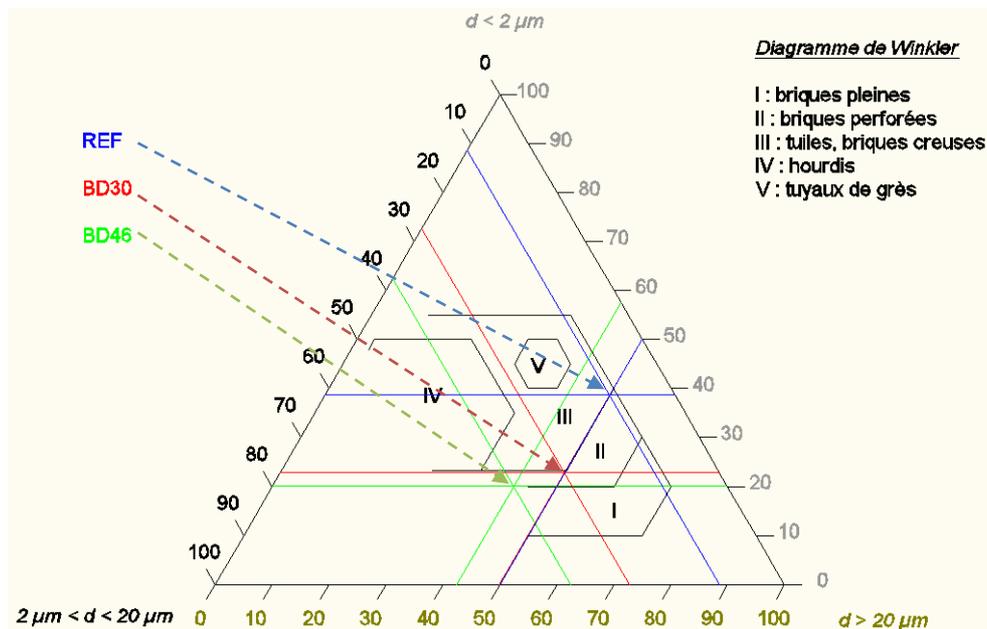


Figure 6 : Diagramme de Winkler des trois compositions

Les taux d'incorporation de matière, ainsi que la répartition liée aux fractions du diagramme de Niesper-Winkler se retrouvent dans les figures 7 et 8. Les mélanges de chacune des trois compositions sont nommés suivant le taux d'incorporation de sédiments dragués.

- REF : composition à base d'argile et de sable (référence)
- BD30 : composition à base d'argile, de sable et de boues
- BD46 : composition à base d'argile, de sable et de la quantité maximale de boues admise selon le diagramme de Niesper-Winkler

	<i>% Sédiments SOLINDUS</i>	<i>% Terre de Barry</i>	<i>% Sable siliceux</i>
REF	0	65	35
BD30	29	32	39
BD46	46	23	31

Figure 7 : Taux d'incorporation des matériaux

	<i>$d > 20\mu\text{m}$</i>	<i>$20\mu\text{m} > d > 2\mu\text{m}$</i>	<i>$2\mu\text{m} > d$</i>
REF	50	11	39
BD30	50	27	23
BD46	42	38	20

Figure 8 : Pourcentage liées aux fractions du diagramme de Niesper-Winkler

Une fois les répartitions définies théoriquement, un essai de plasticité Pfefferkorn est réalisé sur chacun des trois mélange afin d'obtenir la plasticité idéale nécessaire à la bonne ouvrabilité et la bonne compacité des mélanges lors de la réalisation des briques. Cet essai définit les quantités d'eau à ajouter à chaque mélange.

4. Réalisation des briquettes

La première étape est celle du malaxage et consiste à introduire les différents composants du mélange dans le malaxeur afin qu'il les mixe jusqu'à obtention d'un mélange homogène.



Figure 9 : Malaxage

Ensuite vient l'opération d'extrusion des briques. L'étude se faisant à l'échelle labo, les briques extrudées sont de petites dimensions (3x3x5 cm) et non de taille réelle.



Figure 10 : Extrusion des briquettes perforées

La troisième étape est le séchage et consiste à aérer les briquettes en les laissant 24 h à l'air ambiant afin que les molécules d'eau se trouvant en surface s'évaporent.

La dernière étape est la cuisson des briquettes. Une partie d'entre elles a été cuite dans un four de laboratoire (cuisson de 17 h), tandis que l'autre partie a été cuite dans un four tunnel industriel (150 m de long, cuisson de 3 jours et demi).

5. Essais réalisés

5.1. Présentation des essais

Cette rubrique a pour objectif de définir certaines propriétés de base des trois séries de briquettes réalisées, afin de comparer entre elles, les variations de résultats engendrées par l'addition de boues de dragage dans la composition.

La campagne d'essais a été établie en se basant sur la norme NBN EN 771-1 : 2006 (*Spécifications pour éléments de maçonnerie – Partie 1 : briques de terre cuite*). Cette norme définit les classes d'usage et les performances liées à ces classes. Elle permet donc d'évaluer la conformité d'un produit.

5.2. Essai de gélivité : facteur GC

Cet essai a pour but de déterminer la caractéristique liée à la résistance au gel d'éléments de maçonneries. La méthode consiste à déterminer l'évolution du taux d'absorption d'eau relative par capillarité en fonction du temps, et d'en déduire l'indice de résistance au gel appelé facteur Gc. L'échantillonnage comporte 6 briquettes de chaque série.

Pour chaque éprouvette, un tableau est réalisé, dans lequel est inscrit la masse de l'échantillon en fonction du temps (m_t). Cela permet de définir l'absorption par capillarité (E_{ct}) au temps t en pourcent de la masse avant absorption (m_0). Pour ce faire, on utilise la relation suivante :

$$E_{ct} = \frac{m_t - m_0}{m_0} * 100 [\%]$$

Ensuite, l'absorption sous vide est déterminée (sur le même échantillon de briquettes utilisé précédemment pour l'absorption d'eau par capillarité, après séchage à l'étuve). Contrairement à l'absorption d'eau par capillarité, l'absorption d'eau sous vide n'est exprimée qu'une seule fois pour chaque éprouvette. Sa valeur est déterminée en fonction de la masse sèche avant absorption (m_1) et sa masse après 24h d'immersion (m_2). L'absorption sous vide (E_v) est donc exprimée en pourcent de la masse avant absorption.

$$E_v = \frac{m_2 - m_1}{m_1} * 100 [\%]$$

Une fois ces deux valeurs définies, le taux d'absorption relative au temps t (S_t) de chaque éprouvette peut être calculé. Cette nouvelle valeur se définit par la relation suivante :

$$S_t = \frac{E_{ct}}{E_v} * 100 [\%]$$

Ensuite un graphique est réalisé pour chaque briquette, reprenant le taux d'absorption relative au temps t en fonction de la racine carrée du temps exprimé en minutes. Ce graphique donne l'allure de 2 droites. Il est dès lors possible de calculer la valeur du facteur G_c représentant la résistance au gel. Au plus la valeur du facteur G_c est petite (négative), au plus le matériau est résistant au gel. Pour des briques, la formule utilisée est la suivante.

$$G_c = -14,53 - (0,309 * \alpha) + (0,203 * S)$$

où:

- α =coefficient angulaire de la première droite du graphique
- S =taux d'absorption relative au point d'intersection des deux droites

5.3. Masse volumique apparente sèche et absolue sèche

La masse volumique apparente sèche est le rapport entre la masse sèche du matériau et son volume brut, ou apparent (incluant les vides). La masse volumique absolue sèche est égale au rapport entre la masse sèche du matériau et son volume net (ne comprenant ni les vides ni les perforations). Il est intéressant de calculer cette valeur lorsque le matériau est poreux, ce qui est notre cas. Cet essai s'est réalisé sur les mêmes éprouvettes que celles de l'essai de gélivité (facteur G_c) et donc l'échantillonnage comporte 6 briquettes de chaque série.

Dans un premier temps, les volumes net et brut de chaque éprouvette sont déterminés. Cela permet d'obtenir le pourcentage des perforations de chaque éprouvette. Ensuite les masses volumiques peuvent être trouvées grâce à la masse sèche et aux volumes net et brut des éprouvettes. Le volume net sera égal au rapport de la différence entre la masse à l'air libre (m_{au}) et la masse immergée (m_{wu}), sur la masse volumique de l'eau (ρ_w).

$$V_{nu} = \frac{m_{au} - m_{wu}}{\rho_w} [mm^3]$$

Ensuite on peut calculer le volume brut (V_{gu}) de chaque éprouvette en multipliant leur longueur (l_u) par leur hauteur (h_u) et par leur largeur (w_u).

$$V_{gu} = l_u * h_u * w_u [mm^3]$$

Le volume des perforations est la différence entre volume brut et volume net.

$$V_{vu} = V_{gu} - V_{nu} [mm^3]$$

Une fois ces volumes déterminés, il est possible de calculer les masses volumiques apparente et absolue sèches. Pour ce calcul, dans un premier temps, la masse sèche ($m_{dry,u}$) de chaque éprouvette est déterminée et exprimée en grammes. Ensuite, la masse volumique absolue (ρ_{nu}) est calculée par la relation suivante. Elle est affectée du facteur 10^6 pour exprimer directement la masse volumique absolue en kilogrammes par mètre cube.

$$\rho_{nu} = \frac{m_{dry,u}}{V_{nu}} * 10^6 [kg/m^3]$$

Le calcul de la masse volumique apparente sèche se fait par la relation suivante et tient compte de la masse sèche et du volume brut des éprouvettes.

$$\rho_{gu} = \frac{m_{dry,u}}{V_{gu}} * 10^6 [kg/m^3]$$

5.4. Résistance à la compression

Dans le cas de cette étude, l'objectif de cet essai de compression est de déterminer la perte de résistance liée à l'addition de boues de dragage dans la composition des briques. Les briquettes ont été soumises à l'action d'une presse afin de déterminer la résistance de celles-ci dans leur sens de pose.

L'échantillonnage comporte 6 briquettes de chaque série. Les dimensions de celles-ci permettent de déterminer la surface brute soumise à la charge. La charge maximum appliquée permet d'obtenir la contrainte maximum et donc la résistance à la compression des éprouvettes.

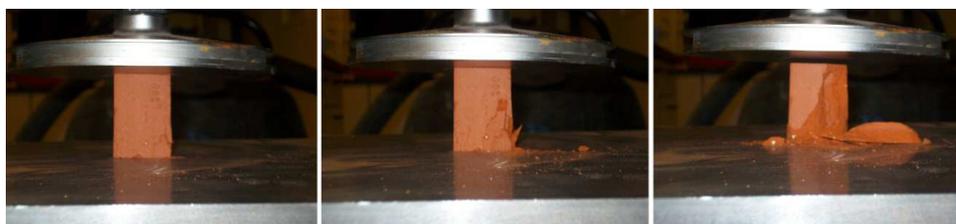


Figure 11 : Essai de résistance à la compression

5.5. Sels solubles actifs

L'utilisation envisagée des blocs est prévue pour l'intérieur. Cependant ils peuvent être soumis à l'humidité avant ou pendant leur mise en œuvre. Une teneur importante en sels solubles actifs engendrerait dès lors un risque d'apparition d'efflorescences, inesthétiques et rendant la mise en œuvre des finitions (plafonnage) problématiques (adhérence du matériau sur les blocs).

Cet essai, mené sur un échantillon de 2 briquettes par série, vise à déterminer les quantités d'ions magnésium, sodium, potassium, calcium, et les sulfates, solubles pouvant être libérés sous certaines conditions. Ces teneurs doivent être déclarées par le fabricant sur base de catégories définies par la norme NBN EN 771-1 : 2006 (*Briques de terre cuite*) se retrouvant dans le tableau suivant.

Catégorie	Pourcentage total en masse inférieur ou égal à	
	$Na^+ + K^+$	Mg^{2+}
S0	Pas d'exigence	Pas d'exigence
S1	0,17	0,08
S2	0,06	0,03

Figure 12 : Teneur en fonction des classes d'exposition

- **S0** = Exposition nulle, maçonnerie complètement sèche. L'utilisation prévue du produit prévoit une protection entière contre la pénétration de l'eau (épaisse couche d'enduit approprié, bardage, paroi intérieure en mur double, murs intérieurs).
- **S1** = Exposition normale aux intempéries pour lesquelles la maçonnerie est protégée par la conception même du bâtiment.
- **S2** = Exposition élevée. Risque de saturation prolongée possible.

5.6. Porométrie au mercure

L'objectif de cette manipulation est de déterminer la porosité totale ainsi que le diamètre du pore moyen des éprouvettes de chaque série. Ces informations permettent de se rendre compte de la qualité du matériau en termes d'absorption d'eau et donc de confirmer les résultats obtenus lors de l'essai de gélimité. La porométrie au mercure est une méthode de laboratoire utile aussi pour comprendre certaines caractéristiques du matériau et établir des liens avec sa durabilité.

La mesure de la distribution des pores est réalisée à l'aide d'un porosimètre au mercure. Son fonctionnement consiste à remplir les pores du matériau étudié par du mercure sous pression. Le mercure est un fluide non mouillant (inversement à l'eau), et donc ne pénètre pas spontanément dans la porosité. Cette propriété du mercure permet de contrôler l'injection grâce à la pression. En augmentant la pression, le mercure peut pénétrer dans les pores de plus petite dimension. Donc le champ des diamètres des pores est proportionnel à la pression obtenue dans le système. Lorsque la pression devient grande à tel point que tous les pores sont remplis de mercure, la quantité de mercure dans l'éprouvette indique le volume total des pores. Les diamètres des pores sont établis par la relation suivante.

$$d = \frac{\sigma * \cos\theta}{p}$$

Où :

- d = diamètre des pores [m]
- σ = tension superficielle liquide-air [N/m]
- θ = angle de contact liquide-solide
- p = pression [Pa]

Pour réaliser cet essai, des petits prismes dont les dimensions sont (1,5x1x1 cm) ont été prélevés au bord et au centre de la section de chacune des briquettes.

Le volume des pores dans chaque morceau d'éprouvette est indiqué comme porosité ouverte cumulée (P) exprimée en %. Cette valeur est déterminée par la relation suivante.

$$P = \frac{V_{Hg}}{M} * \rho_s * 100 [\%]$$

Où :

- P = porosité ouverte cumulée [%]
- V_{Hg} = volume de mercure ayant pénétré dans le morceau d'éprouvette [m³]
- M = masse du morceau d'éprouvette [kg]
- ρ_s = masse volumique apparente du morceau d'éprouvette [kg/m³]

5.7. Analyse microscopique

Cette analyse a été réalisée au moyen de deux microscopes permettant chacun d'agrandir à des échelles différentes. Le premier appareil est un microscope optique permettant de récolter les images directement sur un écran grâce à une caméra haute résolution. Le second appareil est un microscope SEM (Scanning Electron Microscopy, ou MEB Microscopie Électronique à Balayage). La technique utilisée par ce microscope est capable de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon en utilisant le principe des interactions électrons-matière. Cette méthode consiste en un faisceau d'électrons balayant la surface de l'échantillon à analyser qui, en réponse, réémet certaines particules.

Microscope optique

L'utilisation de ces microscopes nécessite de réaliser des sections polies. C'est-à-dire que des sections ont été découpées dans les éprouvettes, et ont été ensuite imprégnées d'une résine fluorescente, puis ont été polies. Cela permet de faire ressortir les vides (pores, fissures internes, défauts, etc.).

Sur les images suivantes, les vides correspondent à la résine fluorescente.

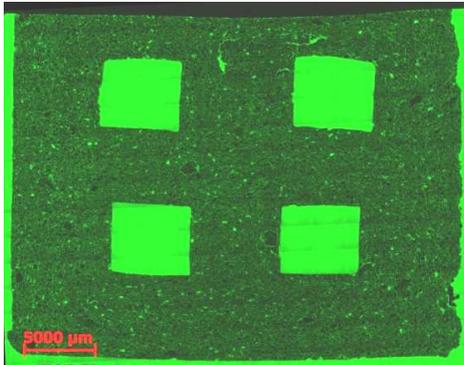


Figure 13 : REF

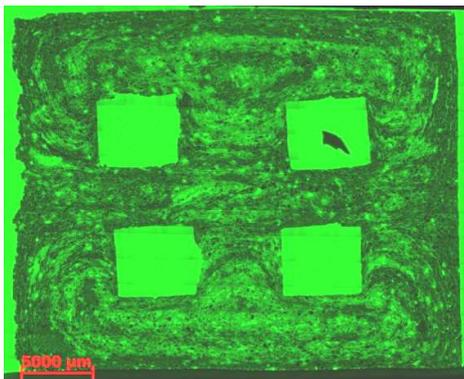


Figure 14 : BD30

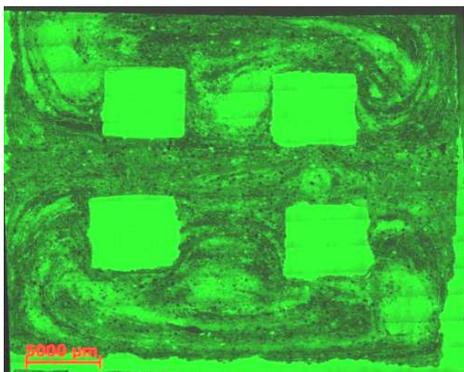


Figure 15 : BD46

Les images nous montrent que la répartition du matériau est homogène pour ce qui concerne les briquettes de la série REF, tandis que l'inverse est observé sur les briquettes des séries comprenant des boues de dragage (BD30 et BD46). On peut remarquer aussi qu'il y a plus de zones fluorescentes, c'est-à-dire des vides, dans les briquettes des séries BD30 et BD46 que dans celles de la série REF.

La répartition non homogène des constituants des mélanges contenant des boues de dragage pourrait être due à un malaxage insuffisant des constituants. Il se pourrait aussi que les faibles quantités mélangées n'aient pas permis que le malaxage s'effectue dans les conditions optimales.

Sur les briquettes contenant des boues, les zones de matières plus claires et plus prononcées pourraient être des nodules de boue mal intégrée à la masse argileuse étant donné que ces zones comportent plus de pores. Ces nodules pourraient être présents à cause d'un malaxage insuffisant des composants. Si ces taches avaient été du sable, on aurait remarqué leur présence aussi sur les sections des briquettes de la série REF.

Microscope SEM

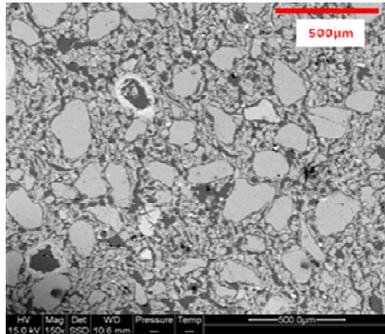


Figure 16 : REF

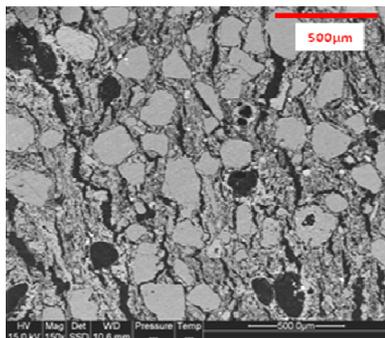


Figure 17 : BD30

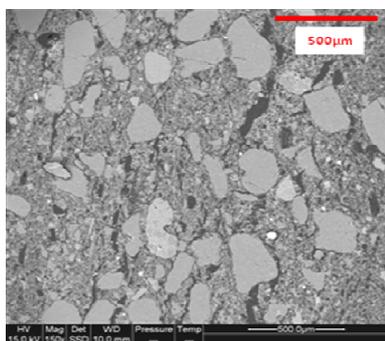


Figure 18 : BD46

Ces images sont ponctuelles et ne sont donc pas représentatives de ce qui se passe dans l'entièreté de la section, c'est pourquoi une analyse au microscope numérique a été effectuée auparavant.

On constate quelques gros vides (taches noires) sur les images provenant des séries contenant des boues de dragages. Ces vides pourraient être des fissures internes apparues lors de la cuisson, mais ils pourraient être aussi le résultat de la désintégration de la matière organique lors de la cuisson.

Ces images nous montrent aussi que la taille des pores est plus importante pour la série REF. En effet, on distingue beaucoup de pores de tailles infimes (points gris foncé) dans la structure des briquettes des séries BD30 et BD46, que l'on n'observe pas sur les briquettes de la série REF. Cette observation pourrait être directement liée à la granulométrie des matériaux utilisés pour fabriquer ces briquettes.

Sur les trois séries de briquettes, on remarque l'importance du nombre de grains blanc de grosse taille. Ce sont des granulats de quartz provenant probablement du sable introduit dans chacune des compositions.

6. Synthèse des résultats obtenus

		<i>unité</i>	<i>REF</i>	<i>BD30</i>	<i>BD46</i>
Composition					
	<i>Argile</i>	[%masse]	70	33	23
	<i>Boue de dragage</i>	[%masse]	0	35	52
	<i>Sable</i>	[%masse]	30	32	25
Propriétés physiques					
	<i>Pourcentage de vides-porosité Hg (ISO/AWI 15901-1)</i>	[%vol]	17	34	39
	<i>Masse volumique apparente sèche (NBN EN 772-13 : 2000)</i>	[Kg/m ³]	1600	1420	1300
	<i>Masse volumique absolue sèche (NBN EN 772-12 : 2000)</i>	[Kg/m ³]	1870	1650	1530
Propriété mécanique					
<i>Résistance à la compression (NBN EN 772-1 : 2000)</i>	Four labo	[N/mm ²]	19	7	8
	Four industriel	[N/mm ²]	15	10	9
	Module de Young	[N/mm ²]	11700	6000	7700
Critères de durabilité					
	<i>Facteur Gc (NBN B 27-010 : 1983)</i>		-6	-3	-2,5
<i>Teneur en sels solubles actifs (NBN EN 772 : 2002)</i>	K	10 ⁻⁴ [%masse]	9	24	36
	Na	10 ⁻⁴ [%masse]	7	8	12
	Ca	10 ⁻⁴ [%masse]	1585	1632	2225
	Mg	10 ⁻⁴ [%masse]	2	2	1

7. Conclusion

Les résultats de la campagne d'essais nous prouvent que la porosité du matériau va augmenter considérablement lorsque des boues de dragage sont introduites dans la composition. Cette augmentation de porosité s'accompagne de changements de propriétés importants.

Certains changements sont bénéfiques. Les masses volumiques apparente et absolue sèches diminuent, ce qui veut dire que les blocs pouvant être fabriqués avec une composition comprenant des boues de dragage seront allégés.

Étant donné l'augmentation de la porosité, les vides seront plus présents et donc, en plus d'être allégé, le matériau aura un meilleur comportement d'isolant thermique. En effet, au plus il y a de vide, au plus la conductivité thermique du matériau sera faible et donc au plus le matériau sera thermiquement intéressant.

La porosité offre un avantage supplémentaire en termes d'adhérence du plâtre ou du mortier sur les blocs. En effet, en augmentant la porosité du matériau, l'adhérence du plafonnage sur le mur, ou du mortier entre les blocs, sera améliorée.

Il est intéressant de mentionner que les polluants présents dans les fractions fines des boues, à savoir les métaux lourds, ne s'échappent pas des blocs une fois ceux-ci cuits. En effet, on a remarqué des variations infimes de rejet de métaux lourds des briquettes contenant des boues par rapport à la série de référence n'en contenant pas. Cela nous a permis de mettre en évidence le fait que ces métaux lourds sont majoritairement piégés dans la structure céramique des briquettes pendant la cuisson. L'utilisation de blocs en céramique contenant des boues ne pose donc pas de problème pour la réalisation de parois comportant une protection (bardage, enduit, parement, murs doubles,...). Le risque de rejet, même si les proportions sont infimes, réside dans la partie du mur se trouvant en contact avec le sol.

Ces avantages s'accompagnent aussi de points négatifs. En analysant les résultats de résistance à la compression, on s'est aperçu que l'augmentation de 1% de porosité, liée à l'addition de boues de dragage dans le matériau, fait chuter la résistance de presque 2% pour des briquettes cuites en four industriel (3% pour celles cuites en four de labo). Cependant l'échantillonnage de l'essai de résistance à la compression ne comporte pas un nombre suffisant de briquettes pour obtenir des valeurs du même ordre de grandeur au sein même de chaque série.

Nous avons observé que l'ajout de boue faisait augmenter la porosité du matériau, et ce, sous la forme de pores de petites dimensions. Cela fait que la quantité de pores sera très élevée étant donné leur taille. Cela affecte négativement la résistance au gel du matériau, étant donné que le facteur G_c augmente lorsqu'on additionne des boues à la composition. De ce fait, l'utilisation de ce type de blocs ne peut être envisagée sans protection.

On a découvert, suite à l'analyse microscopique, que les mélanges contenant des boues ne sont pas assez homogènes, ce qui n'est pas vraiment parfait pour l'obtention des caractéristiques idéales étant donné l'existence de

zones de points faibles. Ce sont ces zones faibles qui conditionnent principalement les caractéristiques mécaniques.

Ces résultats sont dans l'ensemble positifs. Cependant, une optimisation des taux d'incorporation des différents composants pourrait être étudiée. Cela permettrait de minimiser les points négatifs concernant les propriétés des briquettes réalisées avec des mélanges incorporant des boues de dragage. De plus, les essais réalisés pourraient être menés sur des échantillonnages plus vastes afin de confirmer les valeurs obtenues.

8. Sources

- [1] PORTAIL ENVIRONNEMENT WALLONIE. *Production annuelle des boues de stations d'épuration urbaines ou mixtes*.
Adresse URL : <http://environnement.wallonie.be/data/boues/index.htm>
- [2] COUR DES COMPTES. « 21^{ème} cahier d'observations adressé par la Cour des comptes au parlement wallon, Fascicule 1^{er} ». *Cahiers d'observations annuels* [en ligne], session 2009-2010, 145 pages (pages consultées : p 62-65).
Adresse URL : <http://www.ccrek.be/FR/PublicationsRegionWallone.htm>
- [3] GOUVERNEMENT WALLON. « Gestion des matières enlevées du lit et des berges des cours et plans d'eau du fait de travaux de dragage ou de curage ». Arrêté du Gouvernement Wallon, AGW 30/11/1995 modifié par l'AGW du 27/06/1996, par l'AGW du 10/06/1999, par l'AGW du 04/07/2002, par l'AGW du 27/02/2003 et par l'AGW du 03/04/2003.
- [4] FÉDÉRATION BELGE DE LA BRIQUE. « Production de briques en Belgique », *Rapport de l'industrie briquetière belge en 2010*, chapitre : Production totale [p.2].
Adresse URL : <http://www.baksteen.be/notreorganisation.html>
- [5] NBN EN 771-1 : 2006 (*Spécifications pour éléments de maçonnerie – Partie 1 : briques de terre cuite*)
- [6] NBN B 27-010 : 1983 (*Gélimité-Capacité d'absorption d'eau par capillarité*)

- [7] NBN B 24-213 : 1976 (*Absorption d'eau sous vide*)
- [8] NBN EN 772-13 : 2000 (*Détermination de la masse volumique absolue sèche et de la masse volumique apparente sèche des éléments de maçonnerie*)
- [9] NBN EN 772-3 : 1998 (*Détermination du volume net et du pourcentage des vides des éléments de maçonnerie en terre cuite par pesée hydrostatique*)
- [10] NBN EN 772-1 : 2000 (*Détermination de la résistance à la compression*)
- [11] Norme NBN EN 772-5 : 2002 (*Détermination de la teneur en sels solubles actifs des éléments de maçonnerie en terre cuite*)
- [12] NBN EN 1744-1 : 2010 (*Essais pour déterminer les propriétés chimiques des granulats*)
- [13] ISO/AWI 15901-1 (*Distribution du volume des pores par porométrie au mercure*)