



## 34<sup>es</sup> Rencontres Universitaires du Génie Civil Liège, 24-27 mai 2016

# ÉTUDE DE VALORISATION DES SÉDIMENTS DE DRAGAGE

## ABOUT THE BENEFICIAL USE OF DREDGED SEDIMENTS IN CEMENTITIOUS MATRIX

**Mouhamadou AMAR<sup>(1)(2) (\*)</sup>, Mafoud BENZERZOUR<sup>(1)</sup>, Nor-Edine ABRIAK<sup>(1)</sup>,  
Walid MAHERZI<sup>(1)</sup>**

<sup>(1)</sup>Ecole des Mines de Douai, GCE, 764 Bd Lahure, BP 10838, 59508 Douai, France

<sup>(2)</sup>Université Lille Nord de France, LGCgE, Villeneuve d'Ascq, France

### 1. INTRODUCTION

Un sédiment est constitué par la réunion de particules plus ou moins grosses ou de matières précipitées ayant séparément fait l'objet d'un certain transport. En France, environ 50 millions de m<sup>3</sup> de sédiments marins sont dragués annuellement [1]. Ces volumes importants de sédiments doivent être gérés selon les nouvelles règles environnementales. Les sédiments peuvent être considérés comme dangereux en raison de leur haute teneur en métaux lourds, en matières organiques (acides humiques et fulviques) et les sels solubles (par exemple la directive européenne 75/442/CEE JOCE, 1975).

A l'heure du développement durable, la valorisation de matériaux est fortement encouragée (Loi de transition énergétique, 2015). En effet, les matériaux tels que les sédiments de dragage sont potentiellement utilisables comme matière première secondaire dans différentes filières du génie civil. On peut citer parmi celles-ci, la valorisation en technique routière en tant que couche de base ou couche de forme [2], la confection de granulats légers, la fabrication de briques de construction [3], la mise en place de butes paysagères, ainsi que leur utilisation en tant que matériaux de substitution du ciment et/ou du sable dans le béton [4-7]. Force est de constater d'ailleurs leur utili-

sation dans certains pays dans des ouvrages importants : Port de Rotterdam, l'île des palmiers à Dubaï, le théâtre national de Londres, ou encore l'île artificielle de Chek Lap Kok où est situé l'aéroport de Hong Kong [8].

Selon San Nicolas, la production industrielle de ciment est particulièrement polluante (1 T Clinker génère 1 T CO<sub>2</sub>), coûteuse en énergie (jusqu'à 8000 Joules / 1 T Clinker) et relativement chère (150 €/ 1 T Clinker) [10]. Dans le secteur du BTP, les besoins en granulats furent de 349 millions de tonnes en France en 2014 dont 96% sont d'origine naturelle [11]. Le chiffre d'affaire du secteur a atteint à la même période 3 664 millions d'euros et celui du béton prêt à l'emploi (BPE) à 3 770 millions d'euros [Rapport Infos ciment, 2014 et 2016]. La consommation cimentière en France s'est quant à elle élevée à près de 15,6 millions de tonnes en 2015. Ce qui représente une manne financière conséquente et un poids pour l'environnement.

A l'heure du développement durable, le besoin de trouver des solutions alternatives en vue de la préservation de l'environnement et des ressources naturelles est donc plus que nécessaire. Dans cette optique, la substitution des matériaux naturels par des matériaux valorisés se présente comme une solution vis-à-vis de cette problématique majeure.



Le but de cette étude est l'application d'un traitement thermique à des sédiments de dragage et leur valorisation dans des matrices cimentaires. On a pu établir que pour des taux de substitution de l'ordre de 10% à 20%, les matrices cimentaires à base de ce sédiment calciné, comparées à celle d'un mortier normalisé (ciment, sable, eau), présentent des caractéristiques mécaniques, physiques et chimiques au moins égales voir meilleures.

## 2. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

### 2.1. Matériaux

#### 2.1.1. Le ciment

Pour la formulation des mortiers, un ciment Portland, conforme à la norme européenne NF EN 197-1 (2012) a été employé. Il est composé de plus de 95% de clinker et moins de 5% de constituants secondaires. Le temps de début de prise est supérieur à 60 minutes. À 28 jours, la résistance à la compression simple sur des éprouvettes conformes à la norme NF EN 196-1 est supérieure à 52,5 MPa.

#### 2.1.2. Le sable

Dans la présente étude, un sable normalisé de référence CEN, de nature siliceuse, à grains arrondis et dont le diamètre du plus gros granulat est inférieur à 2 mm ( $D_{max} = 2 \text{ mm}$ ) a été utilisé. Sa teneur en silice est d'au moins 98%.

#### 2.1.3. Echantillonnage des matériaux

Les sédiments utilisés sont issus du Grand Port Autonome de Dunkerque (GPMD) situé dans le Nord de la France. Ce port drague environ 4 millions de m<sup>3</sup> de sédiments par an. Un échantillon de 500kg a été prélevé en Février 2015 dans une lagune de décantation située dans une zone adaptée. Dans le GPMD, les sédiments dragués, non immergables, sont stockés en zone aménagée. Cette zone est composée de bassins de lagune et de bassins de décantation où les sédiments sont placés initialement afin d'optimiser le séchage [12]. On appellera ici la technique de lagunage active car c'est celle qui est utilisée dans le cas présent (Figure 1). Cette technique concerne principalement les produits extraits par dragage hydraulique. À l'issue du procédé, des siccités allant jusqu'à 65% peuvent être relevées, ce qui facilite le transport et la mise en dépôt [12].

Une fois les sédiments récupérés et transportés, ils sont alors homogénéisés et séchés dans une étuve réglée à 60°C jusqu'à stabilisation de la masse. À la suite de la phase de séchage, les sédiments sont broyés avec un concasseur à mâchoire afin d'avoir un matériau granulaire homogène facile à caractériser et à utiliser dans la formulation des mortiers (Figure 2).

#### 2.1.4. Les polluants dans les sédiments

Dès l'émergence de filières de valorisation des matériaux tels que les sédiments, la problématique des contaminants en présence s'est posée. En plus du fait de leur nature fine, de la présence de matières organiques, de l'activité microbiologique, les sédiments ont tendance à emmagasiner des substances dont certaines présentent un caractère toxique prononcé :



Figure 1 : Stockage des sédiments dans le GPMD (Envisan).

Sédiment brut



Sédiment étuvé 60 °C



Sédiment calciné 750 °C - 2h



Figure 2 : Les différents états visuels du sédiment au cours des processus de traitement.



métaux lourds, hydrocarbures polyaromatiques (HAP), les organochlorés (PCB), les organostanniques (TBT), pesticides et biocides divers [13]. Pour Mac-Farlane [14], l'origine de cette pollution est liée aux retombées d'activités industrielles, aux pollutions atmosphériques, aux ordures ménagères, etc. Baumard [15] a déjà identifié des teneurs en HAP totaux atteignant 20 mg/kg sur des sédiments portuaires d'Ajaccio. Enfin, les HAP peuvent avoir un effet éco-toxicologique et affecter les mécanismes cellulaires d'organismes vivants. Ils peuvent notamment causer des anomalies cancérogènes ou mutagènes notamment pour les mammifères. Selon Alzieu [13], on peut citer ces quelques 16 molécules (naphtalène, acénaphthylène, difluorène, phénanthrène, etc.) pouvant être présentes et qui sont déclarées toxiques par l'« Environment Protection Agency » aux États-Unis.

Les PCB sont issus des rejets urbains, des décharges de matériaux usagés et leur présence dans les sédiments de dragage est accentuée par la finesse du matériau ainsi que les matières organiques. Leur toxicité a été prouvée comme étant à l'origine de nombre d'anomalies chez des êtres vivants : hypertrophie hépatique, effets cancérogènes, chloro-acné, altération des fonctions reproductrices, etc. Des cas de mutation génique ont aussi été observés par Alzieu (1999) [13] chez le dragonnet.

Le tributylétain ou TBT est utilisé comme matière active des peintures antalissoires. Ces types de peinture sont utilisés pour protéger les navires contre la fixation d'organismes vivants sur leur coque. Ces peintures diffusent de l'ordre de 5 µg/cm<sup>2</sup>/jour du fait des opérations de stationnement et d'entretien [13]. Enfin le TBT peut avoir des impacts négatifs sur les organismes vivants marins et les hommes. On citera par exemple l'*imposex* chez les mollusques correspondant à une modification possible de leur sexualité. On peut citer également l'influence sur la calcification de certaines huîtres, les problèmes de croissance, ainsi que de reproduction des poissons.

Schneider [16] suggère que certains de ces minéraux sont cancérogènes et mutagènes. Parmi eux, le Mercure (Hg : effets sur les reins, tératogènes), le Plomb (Pb : retardement de l'intelligence), l'Arsenic (As : cancer de la peau) et le Cadmium (Cd). Dans les sédiments issus des cours d'eau vive, la fraction organique représente 2% à 10% [16]. Sa présence, confère au sédiment des propriétés spécifiques en termes de texture (la matière organique peut être sensible au toucher ou visible), de coloration (coloris noir ou gris), voire d'odeur.

## 2.2. Les méthodes de traitement

La mise en place de politiques en faveur de l'environnement passe par le développement de procédés de traitement performants. Ces procédés visent l'amélioration de propriétés spécifiques telles que des caractéristiques physico-chimiques à l'instar de la demande en eau, l'aptitude à réagir en présence de chaux (caractère pouzzolanique), la teneur en matières organiques ou en polluants, etc. Ces techniques de traitement se différencient par leur moyen de mise en œuvre, leur efficacité, les intérêts, les limites et le coût.

Marot [17] propose la typologie de techniques de traitement suivante :

- Les traitements physiques (flottation, extraction sous vide,...) utilisent les propriétés physiques telles que la gravité ou l'attraction interparticulaire.
- Les traitements chimiques : par ajout d'un oxydant chimique en vue de favoriser une réaction d'élimination (par exemple l'eau oxygénée H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>).
- Les traitements mécaniques (filtre presse, filtre sous vide,...).
- Les traitements physico-chimiques (phosphatation, acidification, déchloration, lessivage,...) : qui permettent par le mélange avec des agents chimiques ou l'envoi d'un courant électrique, d'attirer et séparer les particules polluées. Il existe par exemple le procédé Novosol® utilisant la phosphatation (stabilisation) + calcination. Cette technique est en outre une technique industrialisée. Le traitement de sédiments ayant une teneur en eau de 50% avec ce procédé coûte environ 70 €/t [7].
- Les traitements biologiques (bioremédiation, phytoremédiation, Sesatec™, bioréacteur, compostage, épandage sous serre, Rotamix™) : utilisation d'organismes vivants tels que les bactéries, champignons, algues, enzymes, etc. ; afin de précipiter la biodégradation des polluants organiques tels que les HAP ou les huiles.
- Les traitements thermiques (désorption thermique, incinération, vitrification, pyrolyse, oxydation) : procédés visant sous haute température (600°C – 1200°C), la désintégration totale ou partielle de la matière organique et l'activation.
- La stabilisation solidification consiste en l'ajout d'un liant hydraulique tel que le ciment, la chaux, les pouzzolanes, les argiles ; à basse température (110°C – 150°C) en utilisant des liants organiques.

Il existe peu d'informations relatives aux techniques de traitement citées précédemment et la plupart des techniques existantes sont réalisées à l'échelle laboratoire où l'étude technique est priorisée sur le volet économique. Cependant nous sommes présentement entraînés à conduire une inspection dans ce sens pour laquelle les premiers résultats autorisent de viser un coût de traitement thermique inférieur à 50 €/t dont 16 €/t attribuables à la calcination uniquement (soit environ 1200 à 2300 KJ/Kg). À cela s'ajoute le coût du broyage, le transport et le stockage. Également, les gaz rejettés lors du traitement thermique sont étudiés afin d'estimer l'empreinte carbone par des techniques par infrarouge.

### 2.2.1. Caractérisation physique

Concernant la caractérisation physique, la mesure de la masse volumique des matériaux a été réalisée grâce à un pycnomètre à hélium de marque MICROMETRICS AccuPyc1330. Cet essai a été effectué en conformité à la norme NF EN 1097-7. La surface spécifique BET a été déterminée conformément à la norme NF EN ISO 18757 grâce à un appareil de type MICROMERITICS Autopore IV.

La détermination de la granulométrie a été effectuée par granulométrie laser en utilisant un appareil Coulter LS12330. Cette analyse effectuée sur les sédiments de Dunkerque a mis en évidence la présence de 45% de particules dont le diamètre est inférieur à 100 µm. La mesure du taux de matières organiques a été réalisée par l'essai de calcination au four à 550°C conformément à la norme NF EN12879.



L'essai d'absorption au bleu de méthylène (VBS) pour l'évaluation de l'argilosité a aussi été effectué selon la norme française NF P94-068. L'évaluation des limites d'Atterberg (limite de liquidité :  $W_L$  et limite de plasticité  $W_p$ ) a été conduite selon la norme NF P94-051. Ces analyses ont permis d'établir que les sédiments étudiés étaient des matériaux de classe A2 : matériaux limoneux argileux, selon la classification du guide français GTR. Les caractéristiques physiques des sédiments sont présentées au Tableau 1.

Tableau 1 : Caractéristiques physiques des sédiments bruts

Caractéristiques / Propriétés	Sédiment brut
Poids spécifique (g/cm <sup>3</sup> )	2,44
Teneur en eau (%)	80
VBS (g/100g de MS) <sup>1</sup>	2,8
Surface spécifique BET (m <sup>2</sup> /g)	10,92
Limite de liquidité $W_L$ (%)	45,3
Limite de plasticité $W_p$ (%)	29,5
Calcination 450°C (%)	9,10
Perte au feu 550°C (%)	12,80
D <sub>50</sub> (μm)	23
D <sub>90</sub> (μm)	161
Classe GTR (1992)	A2
Fraction soluble (g/Kg de MS) <sup>1</sup>	3083

## 2.2.2. Caractérisation minéralogique

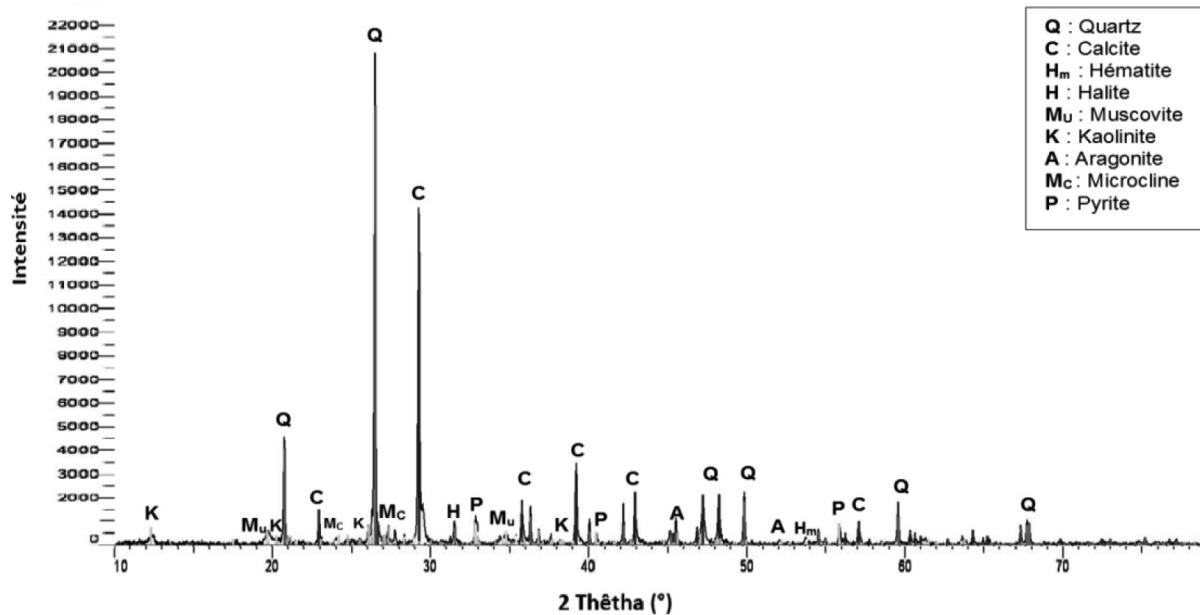
La caractérisation minéralogique des sédiments de dragage est effectuée essentiellement par analyse par diffraction aux rayons X (DRX) (Figure 3). L'essai est effectué grâce à un

appareil de type Siemens D5000 et consiste en une mesure de l'intensité et des angles de diffraction permettant d'établir une cartographie électronique des phases cristallisées en présence. Les éléments principaux en présence sont : la Calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), le Quartz ( $\text{SiO}_2$ ), l'Anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ), la Pyrite ( $\text{FeS}_2$ ). Mais aussi des éléments d'origine argileuse : la Kaolinite notamment. Pour Rodríguez [10], il semble que les sédiments fins, possédant des argiles finement cristallisées peuvent présenter une activité pouzzolanique. Dans une étude antérieure, des conclusions similaires ont été dégagées par Benezet et Benhassaine [18] qui ont montré la prépondérance de la finesse sur l'activité chimique. Pour Roux et Unikowski [19] la présence de fines argileuses en général, peut entraîner quatre sortes d'effets : effet d'écran, gonflement et retrait, activité chimique (caractère pouzzolanique) et absorption d'eau.

L'analyse chimique a consisté en la détermination de la proportion des éléments en présence par analyse par fluorescence X (Tableau 2). On note la présence majoritaire d'Oxygène (~50%), de Silice (~16,6%) et du Calcium (~15%). Ces valeurs sont proches de celles trouvées dans des études précédentes menées sur des sédiments du GPMD [20][21]. Ces résultats confortent donc les observations tirées de l'analyse par DRX.

### 2.2.3. Analyse chimique des polluants

Des essais de lixiviation sur les sédiments bruts ont été réalisés en conformité à la norme européenne NF EN 12457-2 (2002). L'analyse et l'identification des polluants minéraux sont effectuées en utilisant des techniques par plasma induit (ICP=Inductively Coupled Plasma) couplées à la spectroscopie à émission optique (OES=Optical Emission Spectroscopy). Ces tests ont permis de déterminer les proportions de



- Q : Quartz
- C : Calcite
- H<sub>m</sub> : Hématite
- H : Halite
- M<sub>u</sub> : Muscovite
- K : Kaolinite
- A : Aragonite
- M<sub>c</sub> : Microcline
- P : Pyrite

Figure 3 : Analyse minéralogique par DRX.

Tableau 2 : Concentrations des éléments chimiques majeurs dans le sédiment brut (%)

Éléments	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	Mn	Fe
Concentration (%)	51,5	1,5	1	4,4	18,7	0,1	1,4	0,5	1,4	15,0	0,2	0,1	2,9

<sup>1</sup> MS = matières sèches.



**Tableau 3 : Concentration d'ions métaux lourds dans l'échantillon de sédiments bruts (mg / kg)**

		As	Ba	Cd	Cr	Cu	Mo	Ni	Pb	Sb	Se	Zn
Sédiments		0,16	0,80	0,01	0,06	0,80	0,94	0,15	0,07	0,14	0,05	0,32
Seuils ISDI 28 Octobre 2010		0,5	20	0,04	0,5	2	0,5	0,4	0,5	0,06	0,1	4
Seuils (GEODE) 14 JUIN 2000	N1	25	\	1,2	90	45	\	37	100	\	\	276
	N2	50	\	2,4	180	90	\	74	200	\	\	552

**Tableau 4 : Contaminants organiques et autres dans l'échantillon de sédiments brut (mg / kg)**

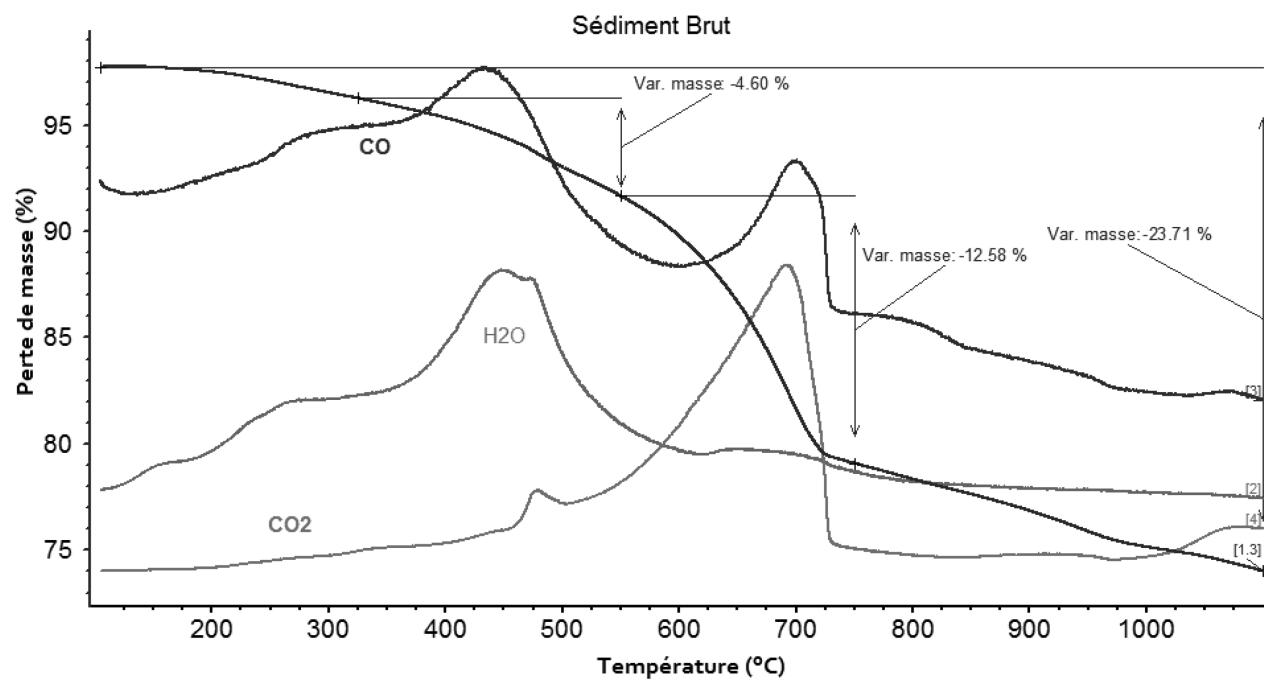
	Chlorures <sup>2</sup>	Fluorures	Sulfates <sup>3</sup>	Indice phénols	COT <sup>4</sup> (Éluâts)	FS <sup>5</sup>	COT (soluble)	BTEX	PCB	Hydro-carbures	HAP
Sédiments	12036,7	0,5	5656,7	0,01	50	3083,0	61000	0,35	0,06	1960	6,7
GEODE (2010)	800	10	1000	1	500	4000	30000	6	1	500	50

métaux lourds et de polluants relargués par les sédiments. Les résultats sont présentés dans le Tableau 3 et le Tableau 4. Les valeurs trouvées sont comparées aux valeurs limites du référentiel ISDI (Arrêté du 28 octobre 2010 relatif aux installations de stockage de déchets inertes) permettant ainsi d'estimer le degré de pollution des sédiments. Pour l'ensemble des sédiments utilisés, on note que les valeurs trouvées sont inférieures aux seuils. À l'exception du Molybdène (Mo) et de l'Antimoine (Sb) présentant des concentrations supérieures aux seuils pour le sédiment brut, tous les autres polluants sont en proportion inférieure aux valeurs du référentiel ISDI. Ce sédiment est donc qualifié de non dangereux.

#### 2.2.4. Protocole de traitement des sédiments

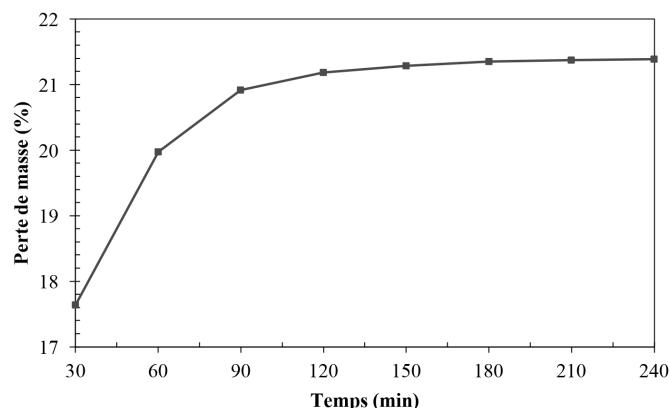
Afin d'évaluer la température optimale et la durée de calcination des sédiments, il a été procédé en deux phases :

a) La première phase consiste en une analyse par thermogravimétrie. Ceci, dans la perspective d'avoir la température adéquate de calcination qui permet la déshydroxylation des groupements -OH, c'est-à-dire la perte de l'eau de constitution des minéraux argileux et aussi la décarbonatation des carbonates ( $\text{CaCO}_3$ ) présents dans les sédiments. L'analyse thermogravimétrique (ATG) consiste en un suivi de la perte de masse en fonction de l'évolution de la température. Les résultats de l'ATG sont présentés à la Figure 4. Celle-ci met en évidence un pic de perte de masse qui correspond à un dégagement de  $\text{H}_2\text{O}$ . Cette perte de masse apparaît à partir de 380°C et continue jusqu'à 600°C. Cette perte de  $\text{H}_2\text{O}$  correspond probablement au départ de l'eau de constitution des minéraux argileux. Le dégagement de monoxyde de carbone (CO) à 410°C puis à 700°C pourrait correspondre aux réactions de combustion des matières



**Figure 4 : Résultats ATG des sédiments.**

<sup>2 3 4 5</sup> Les seuils de ces éléments peuvent être dépassés sous certaines conditions (voir Arrêté 28 Octobre 2010).



**Figure 5 : Evolution de la perte de masse en fonction de la durée de calcination.**

organiques présentes sous l'effet de la température. Un pic de dégagement de  $\text{CO}_2$  apparaît entre  $600^\circ\text{C}$  et  $750^\circ\text{C}$ , qui correspond principalement à la décarbonatation de la calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) [6], qui a comme origine les coquilles des espèces marines et la roche mère. D'après cette analyse la température qui permet d'avoir une calcination optimale des sédiments doit être supérieure à  $740^\circ\text{C}$ .

b) La deuxième phase a permis d'avoir la durée de calcination exacte qui assure une déshydroxylation quasi complète des argiles et une décarbonatation des carbonates respectivement. La Figure 5 présente les résultats de cette analyse. Pour cela, plusieurs échantillons de sédiments bruts ont été calcinés à une température fixée à  $750^\circ\text{C}$  à des temps différents allant jusqu'à 240 min. Un suivi de l'évolution de la perte de masse a été établi. Il apparaît qu'au bout de 2h de calcination, la perte de masse se stabilise à une valeur comprise entre 10% et 12%. Cela permet de dire que la décomposition des matières organiques, la déshydroxylation des argiles et la décarbonatation sont quasi entières. De telles conséquences ont été observées sur un traitement thermique appliqué à des argiles [9,22], mais aussi sur des sédiments [23]. De ce qui précède, le protocole de traitement choisi consiste en une calcination à une température de  $750^\circ\text{C}$  pendant 2h.

### 2.3. Formulation

La formulation du mortier témoin (MT) utilisé est conforme à la norme NF EN 196-1. Pour la préparation de celui-ci, les proportions en masse sont les suivantes : 450 gr de ciment, 1350 gr de sable normalisé et 225 gr d'eau (avec un rapport eau/ciment = 0,5) (Tableau 5).

Dans les autres formulations, une certaine proportion de la masse du ciment a été substituée par le sédiment calciné suivant les taux de 10% (MSC10), 20% (MSC20) et 30% (MSC30). Le Tableau 5 présente la composition des différentes formulations étudiées.

Le rapport E/L = eau/liant a été maintenu constant pour l'ensemble des formulations afin de ne pas induire de porosité supplémentaire dans les mortiers formulés. Le malaxage des mortiers a été réalisé conformément au protocole décrit dans la norme européenne NF EN 196-1.

## 2.4. Essais de caractérisation

### 2.4.1. Affaissement au mini cône

Afin d'évaluer la consistance des différentes formulations de mortiers en fonction du temps, des essais de mesure d'affaissement ont été réalisés. Cela a aussi permis de voir l'effet de l'ajout des sédiments à différents dosages sur l'eau disponible dans les formulations. Pour cela, un mini cône, de hauteur de 150 mm, avec un diamètre de la base de 100 mm et un diamètre au sommet de 50 mm, a été utilisé. Les mesures ont été réalisées à 0, 30, 60 et 90 minutes dans une salle climatisée ( $20^\circ\text{C}$ ). Entre chaque mesure, les mélanges ont été remis dans des sacs étanches et tenus hors du contact de l'air pour éviter toute perte d'eau due à l'évaporation.

## 2.5. Résistances mécaniques

### 2.5.1. Résistance à la compression simple et à la flexion trois points

Les mesures de résistance à la compression simple et à la flexion trois points ont été réalisées sur des éprouvettes 40x40x160mm. La détermination de la résistance a été réalisée en conformité avec la norme NF EN 196-1 ; échéances (7 ; 14 ; 28 ; 60 ; 90 jours).

### 2.5.2. Acceptabilité environnementale

Afin d'évaluer l'impact environnemental des mortiers formulés, des essais de lixiviation conformes à la norme européenne NF EN 12457-2 (2002) ont été réalisés sur des échantillons de mortiers broyés après 28 jours de cure humide. Le rapport a été fixé à 10. Le lixiviat a été analysé afin de déterminer les concentrations des métaux lourds et éléments chimiques traces.

**Tableau 5 : Composition des différentes formulations**

Mortiers	Ciment (g)	Sable (g)	Eau (g)	Sédiment (g)	Eau/Liant
MT	450	1350	225	0	0,5
MSC10	405	1350	225	45	0,5
MSC20	360	1350	225	90	0,5
MSC30	315	1350	225	135	0,5



### 3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

#### 3.1. Evolution de l'affaissement en fonction du temps

La Figure 6 présente les mesures des étalements des différents mortiers en fonction du temps, y compris le mortier MT (NF EN 196-1). Il apparaît que l'affaissement de l'ensemble des formulations diminue en fonction du temps. Il s'avère aussi que les mortiers à base de sédiments calcinés ont un comportement moins fluide que celui du mortier de référence, sachant que le rapport E/L est constant pour l'ensemble des formulations. Cette diminution est proportionnelle au taux de sédiments calcinés incorporés dans les formulations. Cela montre que l'eau est potentiellement retenue par les sédiments et que cette dernière ne participerait pas à la fluidité du mortier. Par ailleurs, l'utilisation des sédiments dans le squelette granulaire peut modifier certaines propriétés du mortier (rhéologie, résistance mécanique, durabilité, etc.) [7,24,25]. Ce comportement spécifique peut être relatif à leur nature physico-chimique. Selon Cabane [26], dans de telles structures granulaires, lors d'utilisation de liants hydrauliques, il peut se former des complexes en grumeaux constitués de fluides interstitiels riches en eau et en ions calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) et hydroxyde ( $\text{OH}^-$ ). Ce qui peut avoir des conséquences notables sur l'ouvrabilité des mortiers et sur les réactions chimiques futures.

#### 3.2. Caractérisation mécanique

La Figure 7 illustre les résultats des essais de résistance mécanique effectués sur les différentes formulations de mortier. Les mortiers formulés à base de sédiments calcinés présentent un comportement mécanique pour le moins comparable au mortier témoin (MT première courbe à gauche). Les séries MSC10 et MSC20 présentent des résistances en flexion sensiblement égales au MT (Figure 7 et Tableau 7). Pour ce qui est des séries de mortier MSC30 (courbe tout à droite des histogrammes), on observe une baisse de résistance assez forte de l'ordre de 20% par rapport au MT ( $R_c = 47,60 \text{ MPa}$  à 60 jours). Par ailleurs, les essais de compression montrent que le MSC10 présente des résistances supérieures de 10% à 15% à 7

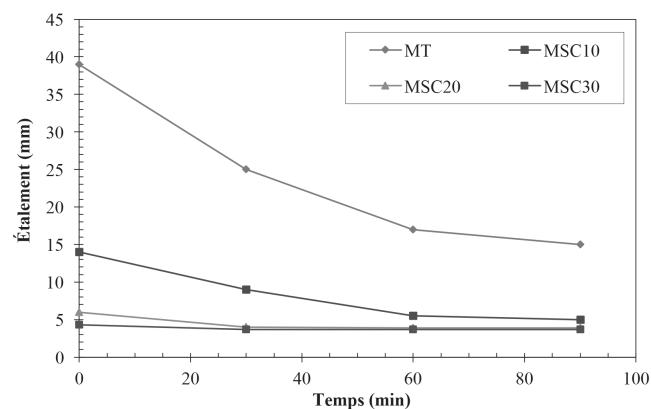


Figure 6 : Evolution de l'étalement des mortiers en fonction du temps.

jours et à 28 jours respectivement, vis-à-vis du MT. Cette tendance est confirmée à 60 jours ( $R_c = 67,80 \text{ MPa}$ ). Au vu des résultats de la Figure 8, le MT ( $E_{dyn} = 41485 \text{ MPa}$ ) présente un module dynamique comparable à celui du MSC10 ( $E_{dyn} = 38380 \text{ MPa}$ ), mais supérieur à ceux du MSC20 pour lequel  $E_{dyn} = 35456 \text{ MPa}$  et du MSC30 ( $E_{dyn} = 31356 \text{ MPa}$ ). Les sédiments calcinés introduits dans la formulation des mortiers pourraient avoir des effets physiques positifs en étant des sites de nucléation des hydrates lors de la formation du gel tobermortique (CSH) [27]. L'activation de certaines additions minérales a été déjà étudiée par des études précédentes [27,28]. Pour cela, un traitement thermique peut être souvent nécessaire en vue d'améliorer les propriétés liantes [6,25,29]. Ce qui laisserait supposer que le traitement thermique adéquat aurait permis de développer des aptitudes chimiques notables. En effet, les sédiments fins renfermant une certaine fraction argileuse, et faiblement cristallisés peuvent présenter une activité pouzzolanique relativement importante [10,23,28] lors de leur traitement et leur valorisation dans des matrices cimentaires [6].

##### 3.2.1. Indice et coefficient d'activité

Le calcul de l'indice d'activité  $i = \frac{R_p}{R_o}$  permet d'estimer le degré de réactivité d'une addition en tant que substitut du ciment dans un mortier ou béton.  $R_p$  désigne la résistance en compression du mortier substitué et  $R_o$  est la résistance du mortier témoin.

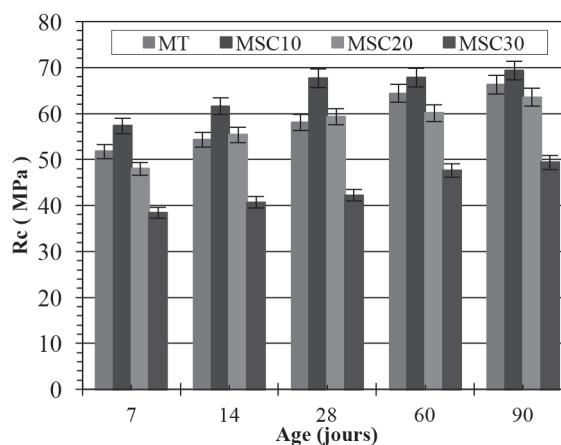
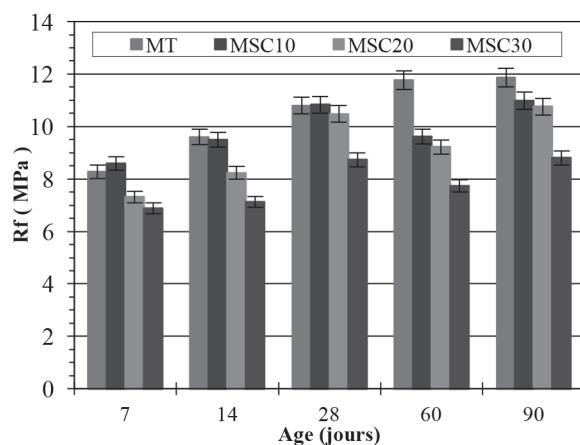


Figure 7 : Résistance mécanique en flexion 3 points (Rf) et en compression(RC).

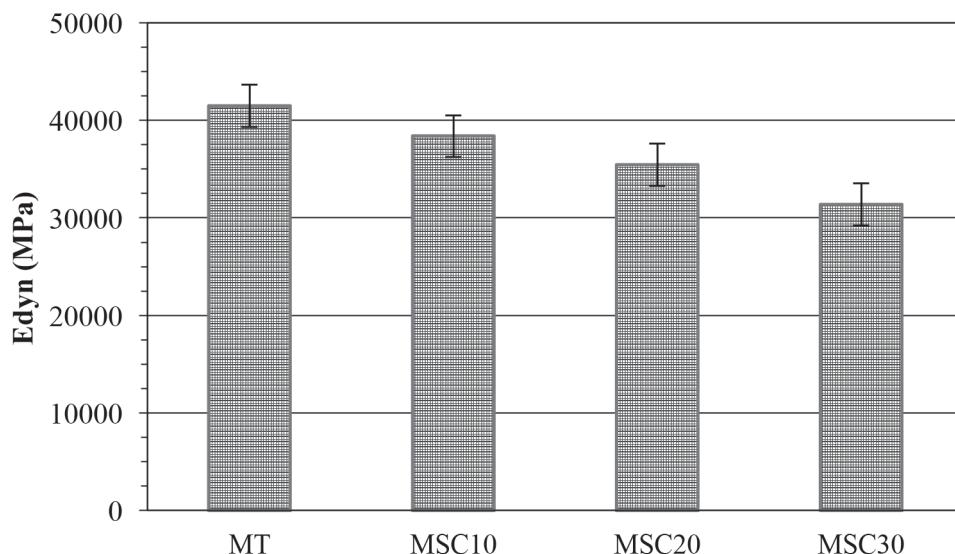


Figure 8 : Valeurs du module dynamique des différents mortiers.

Bolomey [30] a établi en 1929 que la résistance probable d'un mortier peut être estimée comme étant :

$$R_o = K * \left[ \left( \frac{\Delta}{2350} \right)^2 * \frac{C_o}{E} \right]^{2/3} \quad (1)$$

La formule qui est couramment utilisée en est une simplification :  $R_o = K \left[ \frac{C_o}{E} - 0,5 \right]$  (2)

Dans le cadre de notre étude, pour des raisons de simplicité, on utilisera l'expression (2).

On a alors pour le mortier témoin (MT) :  $R_o = K \left[ \frac{C_o}{E} - 0,5 \right]$

Pour les mortiers substitués, on écrira :  $R_p = K \left[ \frac{C_o + \chi_{AA}}{E} - 0,5 \right]$

Sachant que :  $i = \frac{R_p}{R_o}$ , on a :

$$i = \frac{K \left[ \frac{C_o + \chi_{AA}}{E} - 0,5 \right]}{K \left[ \frac{C_o}{E} - 0,5 \right]} = \frac{\left[ \frac{C_o + \chi_{AA}}{E} - 0,5 \right]}{\left[ \frac{C_o}{E} - 0,5 \right]} \quad (3)$$

Etant donné que  $C = (1 - p) * C_o$  et  $A = p * C_o$ , on déduit alors :

$$\chi_A = 1 + \left( \frac{i - 1}{p} \right) \left[ 1 - 0,5 * \frac{E}{C_o} \right] \quad (4)$$

Les coefficients et indice d'activité trouvés sont en corrélation avec les résistances élevées constatées pour le MSC10 (Tableaux 6 et 7). Pour comparaison, il est précisé dans la norme européenne NF EN 450 que le coefficient d'activité des cendres volantes, considéré comme addition de type II c'est-à-dire à caractère pouzzolanique est de 0,85 à 28 jours. Ce qui permet de dire que ces sédiments calcinés ont une activité chimique relativement

importante car pour MSC10 et MSC20, on a respectivement un coefficient d'activité égal à 1,81 et 0,89 (Voir Tableau 6).

### 3.2.2. Acceptabilité environnementale

Du point de vue de l'impact environnemental, on évalue la présence en proportion, de composants dits polluants tels que les métaux lourds qui sont des polluants minéraux. Les concentrations trouvées sont comparées à celles issues du référentiel ISDI permettant ainsi d'estimer le degré de pollution des sédiments. L'analyse des résultats du Tableau 8 montre que les concentrations des différents mortiers formulés (à base de sédiments calcinés) restent inférieures aux seuils limites du référentiel.

Le Molybdène (Mo) et l'Antimoine (Sb) par ailleurs présents en proportion supérieure aux seuils dans les sédiments bruts, se trouvent pour chaque élément en concentration inférieure à celle prescrite dans les textes réglementaires lorsque les sédiments sont traités. On pourrait donc prétendre que les processus de traitement thermique et d'hydratation ont eu un rôle de stabilisation vis-à-vis de la majorité des métaux lourds.

## 4. CONCLUSION

Une étude sur un traitement adéquat des sédiments de dragage en vue de leur valorisation dans des matrices cimentaires a été menée. Le traitement envisagé a consisté en une calcination directe des matériaux bruts, c'est-à-dire au four à 750°C pendant 2 heures. Ce qui a permis d'améliorer certaines propriétés physico-chimiques comme la pouzzolanicité, ou l'élimination de la fraction organique et l'activation chimique.

Tableau 6 : Coefficient d'activité des mortiers à base de sédiments à 28 jours.

	Formulation	(% de sédiments)	i	X <sub>a</sub>
MSC10	10	1,109	0,5	1,815
MSC20	20	0,972	0,5	0,897
MSC30	30	0,692	0,5	0,231



Tableau 7 : Comparaison entre résistance théorique et expérimentale à 28 jours.

Calcul théorique			Résultat expérimental	
Mortiers	Flexion (MPa)	Compression (MPa)	Flexion (MPa)	Compression (MPa)
MT	9,99	53,63	10,80	58,00
MSC10	7,44	46,48	10,83	67,62
MSC20	6,95	39,33	10,48	59,30
MSC30	6,65	32,18	8,73	42,24

Tableau 8 : Analyse des éléments chimiques dans le lixiviat (E / S = 10).

Éléments (mg/kg)	MT	MSC10	MSC20	MSC30	Référentiel ISDI
As	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	0,5
Cd	0,01	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,04
Cr	0,35	0,13	0,08	0,08	0,5
Cu	< 0,06	< 0,01	< 0,01	< 0,01	2
Mo	0,04	0,04	0,05	0,06	0,5
Ni	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,4
Pb	< 0,07	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,5
Sb	0,06	< 0,04	< 0,04	< 0,04	0,06
Se	< 0,05	< 0,06	< 0,06	< 0,06	0,1
Zn	0,02	0,09	< 0,004	< 0,004	4

Les mortiers à base de ce sédiment calciné ont présenté des performances mécaniques intéressantes comparées au mortier témoin. Un mortier avec 10% de substitution du ciment par le sédiment traité a présenté une résistance à la compression à 28 jours supérieure de l'ordre de 10% à celle du mortier témoin normalisé NF EN 196-1. Cette amélioration peut être attribuée à une certaine activité chimique ou pouzzolanique de l'addition, ou dans une moindre mesure, par un effet physique par nucléation hétérogène comme constaté sur des études précédentes [25,31]. Il serait d'ailleurs pertinent de mettre en place des méthodes physique et chimiques divers d'évaluation de cette activité. Pour ce qui est de l'impact environnemental, il est à noter que les principaux polluants présentent des proportions inférieures aux valeurs du référentiel ISDI. Il serait donc intéressant d'évaluer leur impact spécifique. L'étude exhaustive de la durabilité n'est pas effectuée dans cet article. Elle devra faire également l'objet d'une autre étude détaillée.

## 5. BIBLIOGRAPHIE

- [1] Agence de l'eau Artois-Picardie, Méthode de gestion et de réutilisation des sédiments pollués, (2000) 1–126.
- [2] V. Dubois, N.E. Abriak, R. Zentar, G. Ballivy, The use of marine sediments as a pavement base material,
- [3] V. Cappuyns, V. Deweirt, S. Rousseau, Dredged sediments as a resource for brick production: Possibilities and barriers from a consumers' perspective, *Waste Manag.* 38 (2015) 372–380. doi:10.1016/j.wasman.2014.12.025.
- [4] H. Oh, J. Lee, N. Banthia, S. Talukdar, An Experimental Study of the Physicochemical Properties of a Cement Matrix Containing Dredged Materials, *Mater. Sci. Appl.* 2 (2011) 847–857. doi:10.4236/msa.2011.27115.
- [5] N. Belas, S. Aggoun, A. Benaissa, A. Kheirbek, Valorisation des déchets naturels dans l'élaboration des nouveaux bétons et matériaux de construction., (2011) 1–6.
- [6] T.A. Dang, S. Kamali-Bernard, W.A. Prince, Design of new blended cement based on marine dredged sediment, *Constr. Build. Mater.* 41 (2013) 602–611. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.11.088.
- [7] E. Rozière, M. Samara, A. Loukili, D. Damidot, Valorisation of sediments in self-consolidating concrete: Mix-design and microstructure, *Constr. Build. Mater.* 81 (2015) 1–10. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.01.080.
- [8] J. Limeira, M. Etxeberria, L. Agulló, D. Molina, Mechanical and durability properties of concrete made with dredged marine sand, *Constr. Build. Mater.* 25 (2011) 4165–4174. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.04.053.

*Waste Manag.* 29 (2009) 774–782. doi:10.1016/j.wasman.2008.05.004.



- [9] S. Nicolas, Approche performantielle des bétons avec métakaolins obtenus par calcination flash, 2012.
- [10] O. Rodríguez, L. Kacimi, a. López-Delgado, M. Frías, a. Guerrero, Characterization of Algerian reservoir sludges for use as active additions in cement: New pozzolans for eco-cement manufacture, *Constr. Build. Mater.* 40 (2013) 275–279. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.10.016.
- [11] Union nationale des industries de carrières et matériaux de construction, UNICEM, Rapport et statistiques sur les granulats. Rapport technique, 2013., UNICEM. (2013).
- [12] Agence de l'eau Artois-Picardie, Méthodes de gestion et de réutilisation des sédiments pollués: inventaire détaillé technique et financier des méthodes de curage, de traitement et des usages possibles: logiciel d'aide à la décision pour la gestion des sédiments, (2001).
- [13] C. Alzieu, Dragages et environnement marin, dredging and marine environment : state of the art, Rapp. IFREMER. (1999) 223. doi:<http://archimer.ifremer.fr/doc/1999/rapport-1040.pdf>.
- [14] F. Mac Farlane, Méthodologie de gestion des matériaux de dragage maritime: application au Port de Dunkerque, Université d'Artois, 2004. <http://www.theses.fr/2004ART00203>.
- [15] P. Baumard, Biogéochimie des composés aromatiques dans l'environnement marin, (1997).
- [16] G. Schneider, Boues de curage des cours d'eau., Le Courr. L'environnement l'INRA. 43 (2001) p-146–147.
- [17] F. Marot, Caractérisation et traitement de sédiments de dragage contenant des polluants métalliques, Éditions BRGM, 1998.
- [18] J.C. Benezet, A. Benhassaine, The influence of particle size on the pozzolanic reactivity of quartz powder, *Powder Technol.* 103 (1999) 26–29. doi:10.1016/S0032-5910(99)00010-8.
- [19] L. Roux, Z. Unikowski, Mise en évidence de l'influence des fines argileuses dans les granulats à béton, Ed. LCPC. (1980) 101–108.
- [20] V. Dubois, Etude du comportement physico-mécanique et caractérisation environnementale des sédiments marins – Valorisation en technique routière, Thesis, University of Artois, 2006.
- [21] N.T. Tran, Valorisation de sédiments marins et fluviaux en technique routière, Thesis, University of Artois, 2009.
- [22] S. Salvador, O. Pons, Semi-mobile flash dryer/calciner unit to manufacture pozzolana from raw clay soils - application to soil stabilisation, *Constr. Build. Mater.* 14 (2000) 109–117. doi:10.1016/S0950-0618(00)00005-2.
- [23] D.H. Nguyen, N. Sebaibi, M. Boutouil, L. Leleyter, F. Baraud, A modified method for the design of pervious concrete mix, *Constr. Build. Mater.* 73 (2014) 271–282. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.09.088.
- [24] B. Anger, I. Moulin, E. Perin, F. Thery, D. Levacher, Utilisation de sédiments fins de barrage dans la fabrication de mortiers, XIIIèmes JNGCGC, Dunkerque. (2014) 953–960. doi:10.5150/jngcgc.2014.105.
- [25] M. Benkaddour, F. Kazi Aoual, A. Semcha, Durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et de pouzzolane artificielle, *Rev. Nat. Tecnol.* (2009) 63–73.
- [26] N. Cabane, Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques : Contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation, (2004).
- [27] A. Bouamrane, D.C. Elouazzani, L.T. Barna, K. Mansouri, Valorisation des boues de papeterie comme matières premières secondaires dans les mortiers de ciment Portland., 5 (2014) pp 605–614.
- [28] A.L.G. Gastaldini, M.F. Hengen, M.C.C. Gastaldini, F.D. do Amaral, M.B. Antolini, T. Coletto, The use of water treatment plant sludge ash as a mineral addition, *Constr. Build. Mater.* 94 (2015) 513–520. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.07.038.
- [29] A. Tironi, M.A. Trezza, A.N. Scian, E.F. Irassar, Assessment of pozzolanic activity of different calcined clays, *Cem. Concr. Compos.* 37 (2013) 319–327. doi:10.1016/j.cemconcomp.2013.01.002.
- [30] J. Bolomey, Granulation et prévision de la résistance probable des bétons, *Travaux.* 19 (1935) 228–232.
- [31] M. Cyr, P. Lawrence, E. Ringot, Mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical effects of inert materials on short-term hydration, *Cem. Concr. Res.* 35 (2005) 719–730. doi:10.1016/j.cemconres.2004.05.030.