

Étude de valorisation des sédiments de dragage.

M. AMAR¹ - M. BENZERZOUR² - N.E. ABRIAK³ - W. MAHERZI⁴

^{1,2,3,4} Ecole des Mines de Douai - Département Génie Civil et Environnemental,
941, rue Charles Bourseul, B.P. 838
59508, Douai, France

RESUME:

Plusieurs techniques de traitement ont jusqu'ici été appliquées aux sédiments en vue de l'amélioration de certaines propriétés physico-chimiques. Le traitement thermique par calcination s'est montré efficace dans l'élimination de la fraction organique ainsi que l'amélioration de propriétés de pouzzolanité. Dans cet article, il est mis en évidence l'effet du traitement thermique optimisé des sédiments marins, sur les propriétés physico-mécaniques et environnementales des mortiers. En effet, la substitution optimale d'une fraction du ciment par des sédiments calcinés à 750°C permet de maintenir, voire d'améliorer, les propriétés mécaniques de la matrice cimentaire en comparaison avec un mortier de référence normalisé. L'incorporation des sédiments calcinés jusqu'à 20% de substitution du ciment n'altère pas la durabilité du matériau, d'ailleurs à 10% de substitution du ciment, les sédiments améliorent le comportement mécanique et environnemental. D'un point de vue environnemental, les mortiers formulés contenant des sédiments calcinés sont considérés inertes au vu du référentiel des installations de stockage des déchets inertes (ISDI-France).

MOTS-CLÉS : Sédiments – Caractérisation – Calcination – Pouzzolanité – Durabilité.

ABSTRACT:

Several processing techniques have so far been applied to sediments in order to improve some physicochemical properties. The heat treatment by calcination was effective in removing the organic fraction and activates the pozzolanic properties. In this article it is shown the effect of the optimized heat treatment of marine sediments in the physico-mechanical and environmental properties of mortars. A finding is that the optimal substitution of a portion of cement by treated sediments by calcination at 750°C helps to maintain or improve the mechanical properties of the cement matrix in comparison with a standard reference mortar. The incorporation of calcined sediment up to 20% substitution of cement does not affect the durability of the material, besides 10% substitution of cement, improve mechanical and environmental behavior. From an environmental point of view and life cycle, mortars formulated containing treated sediments are considered inert with respect to the inert waste storage facilities reference (ISDI-France).

KEY WORDS: Sediment - Characterization - Calcination - Pozzolanicity - Durability.

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 m³ de sédiments marins sont dragués annuellement [AGE 00]. 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 (numéro européen de directive 75/442 / CEE JOCE, 1975). Parmi les alternatives envisagées, la valorisation en technique routière en tant que couche de fondation [CAP 15], la fabrication de briques de construction [CAP 15], mise en place de butes paysagères [ACH 13], ainsi que leur utilisation en tant qu'additions minérales au ciment pour la formulation des bétons volumineux et les éléments en bétons préfabriqués ([HOH 11] ; [BEL 11]). Force est de constater d'ailleurs leur utilisation dans certains pays dans des ouvrages importants : Port de Rotterdam, l'île des palmiers à Dubaï, théâtre national de Londres [LIM 11]. Selon S. Nicolas [NIC 12] la production industrielle du ciment est particulièrement polluante (1 T CO₂ / 1 T clinker) [ROD 13], couteuse en énergie (8000 Joules / 1 T clinker) et relativement chère (200 € / 1 T clinker). 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 plus que donc nécessaire, mais est d'ordre vital. Dans cette optique, la substitution des matériaux naturels par des matériaux valorisés se présente comme une solution du moins partielle vis-à-vis de cette problématique majeure.

Le but de cette étude porte sur un traitement thermique 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 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 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 45 minutes. A 28 jours, la résistance à la compression simple, selon la norme EN 196-1, est supérieure à 52,5 MPa.

2.1.2 Le sable

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

2.1.3 Caractérisation des matériaux :

Les sédiments utilisés sont issus du grand port autonome de Dunkerque (GPMD) situé dans le Nord de la France. Ce port drague chaque année environ 4 millions de m^3 par an. Un échantillon de 500kg a été prélevé en Février 2015 dans une lagune de décantation située dans une zone aménagée dans le port de Dunkerque. Ces sédiments ont été homogénéisés et séchés dans une étuve réglée à 60°C jusqu'à stabilisation de la masse. A la suite de la phase de séchage, les sédiments ont été concassés dans un concasseur à mâchoire afin d'avoir un matériau granulaire facile à caractériser et à utiliser dans la formulation des mortiers.

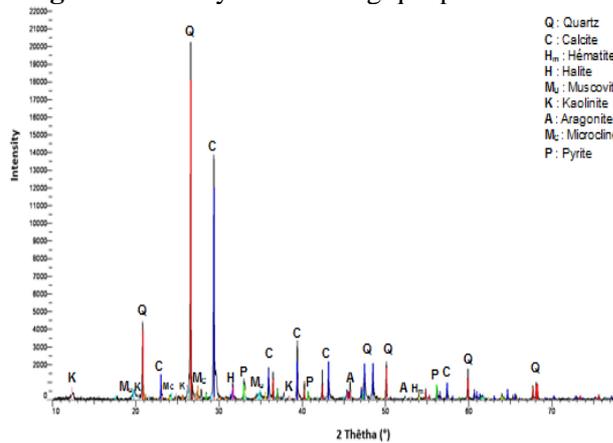
2.1.4 Caractérisation Physique

Concernant la caractérisation physique, la mesure de la masse volumique des matériaux s'est faite grâce à un pycnomètre à hélium de marque MICROMETRICS. Cet essai a été effectué en conformité à la norme NF EN 1097-7. La surface spécifique BET est déterminée conformément à la norme NF EN ISO 18757. La détermination de la granulométrie a été effectuée par granulométrie laser, d'après ces analyses les sédiments de Dunkerque présentent 45 % de passant à 100 μm . La mesure du taux de matière organique a été réalisé par l'essai de calcination à 450°C selon la norme XP P94- 047.

L'essai d'absorption au bleu de méthylène (VBS) pour l'évaluation de l'argilosité a été aussi 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) est faite selon la norme NF P94-051. Ces analyses ont permis d'établir que les sédiments de l'étude étaient des matériaux de classe A2 : matériaux limoneux argileux, selon la classification du guide français GTR.

2.1.5 Caractérisation minéralogique

La caractérisation minéralogique des sédiments de dragage est effectuée essentiellement par analyse par diffraction aux rayons X (DRX) (Figure 2.1). 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 ($CaCO_3$), le Quartz (SiO_2), l'Anhydrite ($CaSO_4$), la Pyrite (FeS_2). Mais aussi des éléments d'origine argileuse ; la Kaolinite notamment. Aussi, pour Rodríguez [ROD 13], il semble que les sédiments fins, possédant des argiles finement cristallisées, pouvaient présenter une activité pouzzolanique. Pour Roux et Unikowski [ROU 80], la présence de fines argileuses en général, peut entraîner quatre sortes d'effets : effet d'écran, gonflement et retrait, activité chimique (caractère pouzzolanique), absorption d'eau. L'analyse chimique a consisté en la détermination de la proportion des éléments en présence par analyse par fluorescence X (Tableau 2.2). On note la présence d'Oxygène (~50 %), Silice (~16.6%) et Calcium (~15 %). Ces valeurs sont proches de ceux trouvées dans des études précédentes [DUB 06] [TRA 09] menées sur des sédiments du GPMD. Ces résultats confortent donc les observations tirées de l'analyse par DRX.

Figure 2.1 Analyse minéralogique par DRX**Tableau 2.1** Caractéristiques physiques des sédiments bruts

Caractéristiques / Propriétés	Sédiment brut
Poids spécifique (g / cm ³)	2,48
Teneur en eau %	80
VBS (g/100g MS)	2,8
Surface spécifique BET (m ² /g)	10,92
Limite de liquidité W _L (%)	45,3
Calcination 450°C (%)	9,10
Perte au feu 550°C (%)	12,80
D50 (µm)	23
D90 (µm)	161
Classe GTR (1992)	A2
Fraction soluble (g/Kg MS)	3083

2.1.6 Analyse chimique

Des essais de lixiviation sur les sédiments bruts ont été réalisés en conformité de la norme européenne NF EN 12457-2 (2002). Ces tests ont permis de déterminer les proportions de métaux lourds et de polluants relargués par les sédiments. Les résultats sont présentés dans le Tableau 2.3. Les valeurs trouvées sont comparées aux valeurs seuils 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 valeurs seuils. A l'exception du Molybdène (Mo) et de l'Antimoine (Sb) qui présentent des concentrations supérieures aux seuils pour le sédiment brut, tous les autres polluants sont en proportion inférieures aux valeurs du référentiel ISDI. Ce sédiment est quand même qualifié de non dangereux.

Tableau 2.2 Concentrations des éléments majeurs dans le sédiment brut (%)

Éléments	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	Mn	Fe
Concentration (%)	50,1	1,1	1,5	5,1	16,6	0,2	1,8	0,9	1,5	15,0	0,3	0,1	5,5

Table 2.3 Concentration d'ions de métaux lourds de l'échantillon de sédiments brut (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	0,5	20	0,04	0,5	2	0,5	0,4	0,5	0,06	0,1	4

2.2 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:

- La première phase concerne l'analyse par thermogravimétrie afin d'avoir la température exacte 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 (CaCO₃, etc) présents dans les sédiments. L'analyse thermogravimétrie consiste en un suivi de la perte de masse en fonction de l'évolution de la température. La Figure 2.2 présente les résultats obtenus. Celle-ci met en évidence un pic de perte de masse qui correspond à un dégagement de H₂O. Cette perte de masse apparaît à partir de 380°C et continue jusqu'à 600°C. Cette perte de H₂O correspond probablement au départ de l'eau de constitution des minéraux argileux. Le dégagement de monoxyde de carbone entre les températures de 350°C et 550°C pourraient correspondre aux réactions de combustion sous l'effet de la température des matières organiques présentes dans les sédiments. Un pic de dégagement de CO₂ apparaît entre 600°C et 750°C, qui correspond principalement à la décarbonatation de la calcite (CaCO₃) [DAN 13], qui ont 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 730°C.

Figure 2.2 Analyse ATG des sédiments.

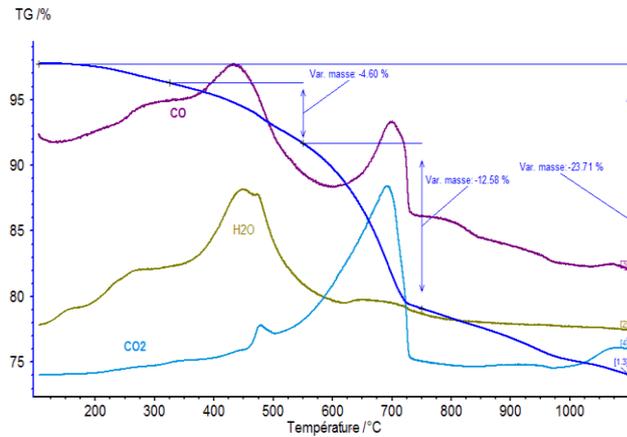
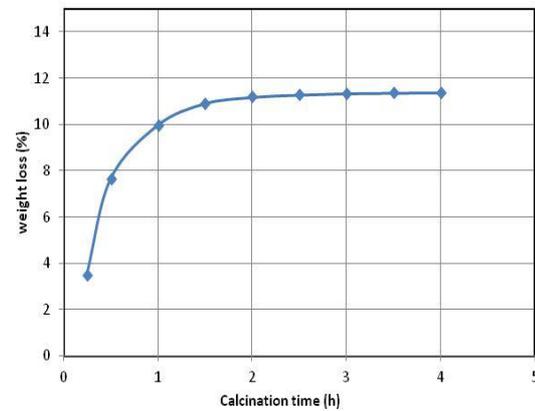


Figure 2.3 Evolution de la perte de masse en fonction de la durée de calcination.



La deuxième phase a permis d'avoir la durée de calcination exacte qui assure une déshydroxylation et une décarbonatation quasi complète des argiles et des carbonates respectivement. Pour cela, plusieurs échantillons de sédiments bruts ont été calcinés à une température fixée à 750°C à des temps différents. Un suivi de l'évolution de la perte de masse a été établi. La Figure 2.3 présente les résultats de cette analyse. Il apparaît qu'au bout de 2h de calcination des sédiments, 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 décarbonation est quasi-complète. De telles conséquences ont été observées sur un traitement thermique appliqué à des argiles [NIC 12] , [SAL 00] . De ce qui précède, le protocole de traitement choisi consiste en une calcination à une température de 750°C pendant 2h.

2.3 Formulation

La formulation témoin (MT) utilisé est conforme à la norme NF EN 196-1. Pour la formulation de celui-ci, les proportions en masse sont les suivantes : une partie de ciment, trois parties de sable normalisé CEN et une demi partie d'eau (rapport eau/ciment = 0,5) (Tableau 2.4).

Dans les autres formulations une portion du ciment a été substitué par du sédiment calciné suivant les proportions 10% (MSC10), 20% (MSC20) et 30% (MSC30), par rapport à la masse. La table 2.4 présente la composition des différentes formulations étudiées.

Tableau 2.4 Composition des différentes formulations

Mortiers	Ciment (g)	Sable (g)	Eau (g)	Sédiment (g)	E/L
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

Le rapport E/L 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 de malaxage décrit dans la norme européenne NF EN 196-1.

2.3 Essais de caractérisation

2.3.1 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 permettra aussi de voir l'effet de l'ajout des différents sédiments à différents dosage 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. Entre chaque mesure les mélanges sont remis dans des sacs et tenus hors du contact de l'air pour éviter toute perte d'eau due à l'évaporation. Les résultats sont à la Figure 3.1.

2.4 Résistances mécaniques

2.4.1 Résistances à la compression simple et à la flexion trois points

Les mesures de résistance à la compression simple et flexion trois points ont été réalisées sur des éprouvettes 40*40*160mm. La détermination de la résistance a été réalisée en conformité avec la norme EN 196-1 ; échéances (7 ; 14 ; 28 ; 60 ; 90 jours).

2.4.2 Acceptabilité environnementale

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

3 Résultats et discussion

3.1 Evolution de l'affaissement en fonction du temps.

La Figure 3.1 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 aux taux de sédiments calcinés incorporés dans les formulations. Cela montre que l'eau est potentiellement retenue par les sédiments calcinés et celle-ci 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) [ANG 14] , [BEN 09] . Ce comportement spécifique peut être relatif à sa nature physico-chimique. Selon Cabane [CAB 04] , dans de telles structures, lors d'utilisation de liants hydrauliques, il peut se former des complexes en grumeaux constitués de fluides interstitiels riches en eaux et en ions calcium (Ca^{2+}) et hydroxyde (OH⁻). Ce qui peut avoir des conséquences notables sur l'ouvrabilité des mortiers et sur les réactions chimiques futures.

Figure 3.1 Evolution de l'étalement des mortiers en fonction du temps.

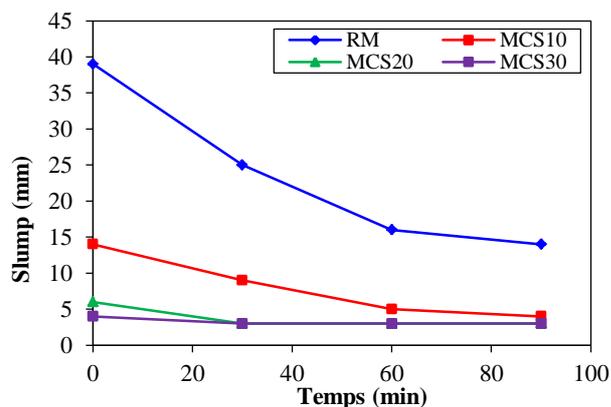
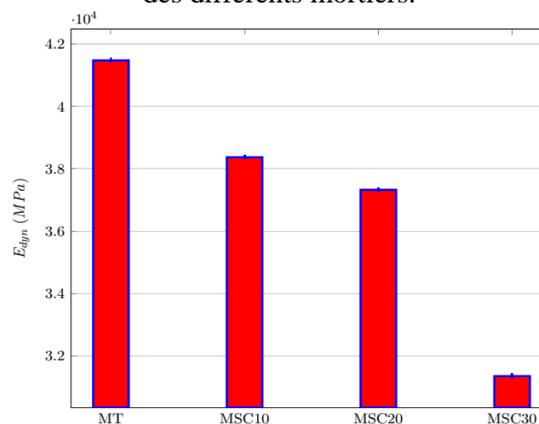


Figure 3.2 Evolution du module dynamique des différents mortiers.



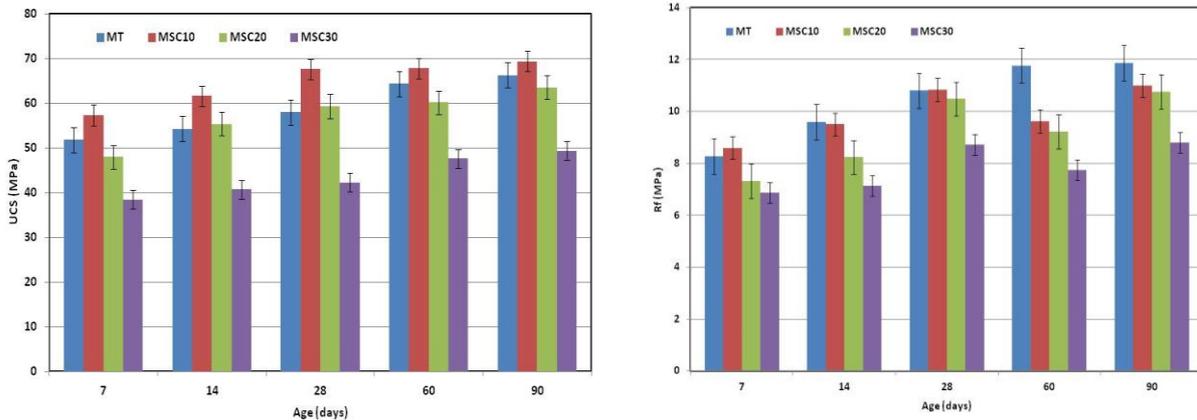
3.2 Caractérisation mécanique

La Figure 3.3 illustre les résultats des résistances mécaniques des différentes formulations de mortier. Les mortiers formulés à base de sédiments calcinés présentent un comportement mécanique pour le moins comparable au mortier témoin (MT). Les séries MSC10 et MSC20 présentent des résistances en flexion sensiblement égales au MT (Figure 3.3). Pour ce qui est des séries de mortier MSC30 on observe une baisse de résistance assez forte de l'ordre de 20% par rapport au MT. Par ailleurs, les essais de compression montrent que le MSC10 présente des résistances à la compression supérieure de 10% à 15% à 7 jours et à 28 jours respectivement, vis-à-vis du MT. Tendance qui s'est confirmé à 60 jours.

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) [BOU 14]. L'activation de certaines additions minérales a été déjà étudiée par des études précédentes [BOU 14], [GAS 15]. Pour cela, un traitement thermique peut être souvent nécessaire en vue d'améliorer les propriétés mécaniques [BEN 09], [TIR 13]. 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, faiblement cristallisée ont pu présenter une activité pouzzolanique relativement importante [ROD 13] lors de leur traitement et leur valorisation dans les matrices cimentaires.

Au vu des résultats de la Figure 3.2, le MT présenterait cependant un module dynamique comparable à celui du MSC10, mais supérieur que ceux du MSC20 et du MSC30.

Figure 3.3 Résistance mécanique en compression et en flexion 3 points.



3.2.1 Indice et coefficient d'activité

Le calcul de l'indice d'activité $i = R_o / R_p$ permet d'estimer le degré de réactivité d'une addition en tant que substitut du ciment dans un mortier ou béton. Cette grandeur est déduite des résistances en compression du MT et des mortiers à base de sédiments calcinés.

J. Bolomey [BOL 35] a établi en 1929 que la résistance probable d'un mortier peut être estimée

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

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

Dans le cadre de notre étude, pour des raisons de simplicité, on utilisera l'expression [2]:

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

$$\text{Pour les mortiers substitués, on écrira : } R_p = K'' \left[\frac{C+\chi_A A}{E} - 0,5\right]$$

$$\text{Sachant que : } i = \frac{R_o}{R_p}, \text{ on a, } i = \frac{K'' \left[\frac{C_o+\chi_A A}{E} - 0,5\right]}{K'' \left[\frac{C_o}{E} - 0,5\right]} = \frac{\left[\frac{C+\chi_A A}{E} - 0,5\right]}{\left[\frac{C_o}{E} - 0,5\right]} \quad [3]$$

Etant donné que $C = (1 - p)C_o$ et $A = pC_o$, on déduit de (3) l'expression :

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

- Δ = la masse volumique (Kg/m³) du béton.
- C_o = la masse (Kg) de ciment dans le mortier de référence.
- C = la masse (Kg) de ciment dans le mortier substitué.
- E = la masse d'eau effective (Kg).
- K'' = coefficient fonction de la qualité du liant et du durcissement
- p = taux de substitution (%).
- χ_A = coefficient d'activité.

Les coefficients et indice d'activité trouvés sont en corrélation avec les résistances élevées constatées. En effet, le coefficient d'activité reste positif et atteint presque la valeur de 2 (soit 1.81) pour les mortiers avec 10% de sédiments calcinés. 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 χ_A égal à 1.81 et 0.89 (Voir Tableau 3.1).

Tableau 3.1 Coefficient d'activité des mortiers à base de sédiments à 28 jours

	p (%)	i	E/C	χ_A
MCS10	10	1,109	0,5	1,815
MCS20	20	0,972	0,5	0,897
MCS30	30	0,692	0,5	0,231

Tableau 3.2 Comparaison avec la résistance théorique et expérimentale à 28 jours

	Calcul théorique :		Résultat expérimental	
	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

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 ceux issues 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. Dans le tableau ci-dessous, sont repris les résultats comparatifs. L'analyse des résultats du Tableau 3.4 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) présents en proportion supérieures aux seuils dans les sédiments bruts, se trouvent désormais inférieures à celle-ci lorsque traité. On pourrait donc prétendre que le processus d'hydratation a eut un rôle de stabilisation des métaux lourds.

Tableau 3.3 Analyse des éléments chimiques dans le lixiviat (L / S = 10)

Eléments (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

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 permet d'améliorer certaines propriétés physico-chimiques comme la pouzzolanité, ou l'élimination de la fraction organique et l'activation chimique.

Les mortiers à base de ce sédiment calciné ont présenté des performances mécaniques remarquables 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 supérieur 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 à moindre mesure, par un effet physique par nucléation hétérogène comme constaté sur des études précédentes [BEN 09] , [CYR 05] .

Il serait d'ailleurs pertinent de mettre en place des méthodes chimiques d'évaluation de cette activité. Pour ce qui est de l'impact environnemental, il est à noter que tous les polluants sont en proportion inférieurs aux valeurs du référentiel ISDI. Il serait d'ailleurs intéressant d'évaluer leur impact spécifique. L'étude exhaustive de la durabilité n'est pas effectuée dans cet article. Elle pourra faire l'objet d'une autre étude détaillée.

5 Références bibliographiques

- [AGE 00] AGENCE DE L'EAU ARTOIS-PICARDIE, « Methode de gestion er de réutilisation des sédiments pollués », p. 1-126, 2000.
- [DUB 09] V. DUBOIS, N. E. ABRIAK, R. ZENTAR, ET G. BALLIVY, « The use of marine sediments as a pavement base material », *Waste Manag.*, vol. 29, n° 2, p. 774-782, 2009.
- [CAP 15] V. CAPPUNYS, V. DEWEIRT, ET S. ROUSSEAU, « Dredged sediments as a resource for brick production: Possibilities and barriers from a consumers' perspective », *Waste Manag.*, vol. 38, p. 372-380, 2015.
- [ACH 13] R. ACHOUR, « Valorisation et Caractérisation de la Durabilité d'un Matériau Routier et d'un Béton à Base de Sédiments de Dragage », 2013.
- [HOH 11] H. OH, J. LEE, N. BANTHIA, ET S. TALUKDAR, « An Experimental Study of the Physicochemical Properties of a Cement Matrix Containing Dredged Materials », *Mater. Sci. Appl.*, vol. 02, n° 07, p. 847-857, 2011.
- [BEL 11] N. BELAS, S. AGGOUN, A. BENAÏSSA, ET A. KHEIRBEK, « Valorisation des déchets naturels dans l'élaboration des nouveaux bétons et matériaux de construction . Abstract », p. 1-6, 2011.
- [LIM 11] J. LIMEIRA, M. ETXEBERRIA, L. AGULLÓ, ET D. MOLINA, « Mechanical and durability properties of concrete made with dredged marine sand », *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, n° 11, p. 4165-4174, 2011.
- [NIC 12] S. Nicolas, « Approche performantielle des bétons avec métakaolins obtenus par calcination flash », 2012.
- [ROD 13] O. RODRÍGUEZ, L. KACIMI, A. LÓPEZ-DELGADO, M. FRÍAS, ET A. GUERRERO, « Characterization of Algerian reservoir sludges for use as active additions in cement: New pozzolans for eco-cement manufacture », *Constr. Build. Mater.*, vol. 40, p. 275-279, 2013.
- [ROU 80] L. ROUX, « Mise en évidence de l'influence des fines argileuses dans les granulats à béton », p. 101-108, 1980.
- [DUB 06] V. DUBOIS, « Etude du comportement physico-mécanique et caractérisation environnementale des sédiments marins – Valorisation en technique routière. », *Univ. d'Artois*, 2006.
- [TRA 09] N. T. TRAN, « Valorisation de sédiments marins et fluviaux en technique routière », Université d'Artois, 2009.
- [DAN 13] T. A. DANG, S. KAMALI-BERNARD, ET W. A. PRINCE, « Design of new blended cement based on marine dredged sediment », *Constr. Build. Mater.*, vol. 41, p. 602-611, 2013.
- [SAL 00] S. SALVADOR ET O. PONS, « Semi-mobile flash dryer/calciner unit to manufacture pozzolana from raw clay soils - application to soil stabilisation », *Constr. Build. Mater.*, vol. 14, n° 2, p. 109-117, 2000.
- [ANG 14] B. ANGER, I. MOULIN, E. PERIN, F. THERY, ET D. LEVACHER, « Utilisation de sédiments fins de barrage dans la fabrication de mortiers », *XIIIèmes JNGCGC, Dunkerque*, p. 953-960, 2014.
- [BEN 09] M. BENKADDOUR, F. KAZI AOUAL, ET A. SEMCHA, « Durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et de pouzzolane artificielle », *Rev. Nat. Technol.*, n° 1, p. 63-73, 2009.
- [CAB 04] 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.
- [BOU 14] 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. », vol. 5, n° 2, p. 605-614, 2014.
- [GAS 15] A. L. G. GASTALDINI, M. F. HENGEN, M. C. C. GASTALDINI, F. D. DO AMARAL, M. B. ANTOLINI, ET T. COLETTI, « The use of water treatment plant sludge ash as a mineral addition », *Constr. Build. Mater.*, vol. 94, p. 513-520, 2015.
- [TIR 13] A. TIRONI, M. A. TREZZA, A. N. SCIAN, ET E. F. IRASSAR, « Assessment of pozzolanic activity of different calcined clays », *Cem. Concr. Compos.*, vol. 37, p. 319-327, mars 2013.
- [BOL 35] J. BOLOMEY, « Granulation et prévision de la résistance probable des bétons », *Travaux*, vol. 19, n° 30, p. 228-232, 1935.
- [CYR 05] M. CYR, P. LAWRENCE, ET E. RINGOT, « Mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical effects of inert materials on short-term hydration », *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, n° 4, p. 719-730, 2005.