

SÉDIMENTS DE BAIES FLUVIALES : EXEMPLES D'UTILISATIONS POSSIBLES

JAUBERTHIE Raoul¹, MELINGE Yannick¹, RANGEARD Damien², MOLEZ Laurent²

¹ Maître de Conférences Habilité à Diriger des Recherches

² Maître de Conférences

Laboratoire Génie Civil et Génie Mécanique – EA 3913 – Institut National des Sciences Appliquées – Université Européenne de Bretagne – 35043 Rennes Cedex, France

Pour toute correspondance : raoul.jaubert@insa-rennes.fr

RESUME.

Les travaux de désensablement du Mont-Saint-Michel comme le curage du barrage de l'usine marée motrice de la Rance posent un premier problème de stockage et d'utilisation de la tange sédimentée. Mais elle n'a pas de caractéristiques géotechniques correctes et cela nécessite des traitements en vue de son utilisation.

Cette étude est basée sur une caractérisation physique et chimique de ce matériau par analyse MEB, micro analyse EDS et par diffraction X. Sont testés des traitements à la chaux et au liant hydraulique routier. Une série de tests est menée sur de la tange activée thermiquement. Un chauffage léger permet d'éliminer la matière organique. Un traitement à température plus élevée conduit à la transformation de kaolin en méta kaolin qui réagit avec la chaux ou avec le liant hydraulique par effet pouzzolanique.

Les essais mécaniques menés sur ces matériaux traités thermiquement sont prometteurs et permettent d'envisager des utilisations qui peuvent aller jusqu'à la fabrication de briques.

MOTS-CLÉS : tange, vase, valorisation, caractérisation et comportement physique et mécanique

1. INTRODUCTION

Les travaux de désensablement du Mont-Saint-Michel et la remise dans sa nature ilienne comme le désensablement de la retenue du barrage de l'usine marée motrice de la Rance posent un problème de stockage et d'utilisation de la tange sédimentée. Une première option est l'utilisation en milieu agricole : les terrains avoisinants sont essentiellement acides et ce matériau peut servir d'amendement calcaire. Une seconde option est le renforcement des digues des polders situés à proximité. Toutefois, les caractéristiques géotechniques de ce matériau ne permettent pas son utilisation directe dans ce cadre. Un traitement est nécessaire en vue de cette utilisation ou d'une utilisation nécessitant des caractéristiques mécaniques minimales par exemple en couche de forme à usage routier¹. De nombreux paramètres entrent en jeu : le temps après la mise en place², mais aussi la température qui modifie la cinétique³ ou bien certains ajouts⁴ ou minéraux contenus dans le sol⁵. Cette étude consiste dans un premier temps en une caractérisation physique et chimique du matériau. Dans un second temps, différents traitements à base de chaux ou de liant hydraulique routier sont réalisés. Enfin, la même série de tests est réalisée sur la tange traitée thermiquement. La performance des différents traitements est évaluée à partir d'essais mécaniques classiques (compression simple, flexion trois points).

2. CARACTERISATION PHYSIQUE ET CHIMIQUE

2.1. ANALYSE GRANULOMETRIQUE

La granulométrie est déterminée, à l'aide d'un granulomètre laser, sur le matériau naturel, préalablement séché à 100°C, et sur le matériau traité à l'eau oxygénée. Ce traitement ayant pour but d'éliminer la matière organique. Les résultats sont reportés sur la figure 1. Les résultats mettent en évidence pour le matériau naturel, une granulométrie relativement fine, inférieure à 100 µm, avec une fréquence maximale autour de 25 µm.

Le traitement à l'eau oxygénée conduit, d'une part, à la diminution de la fraction à 25 µm, qui correspondrait alors à la granulométrie de la matière organique et, d'autre part, à un étalement global accompagné d'une augmentation du diamètre maximal. Cet effet peut éventuellement être attribué à une floculation des particules les plus fines empêchées initialement par la présence de la matière organique.

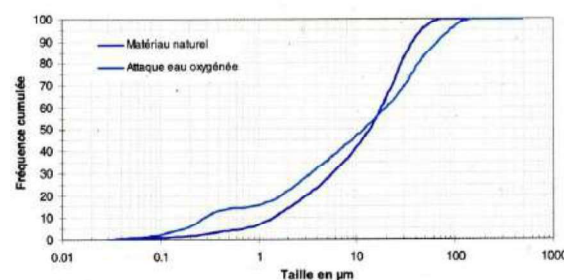
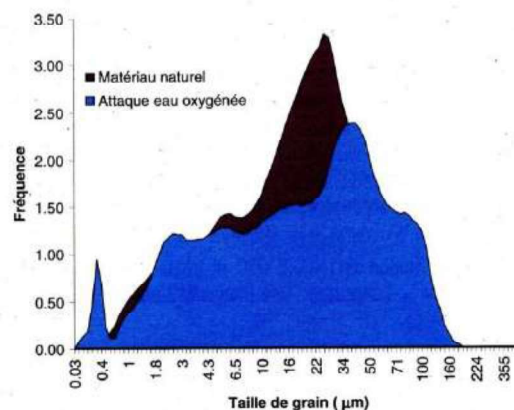


Figure 1: Granulométries du matériau naturel et traité à l'eau oxygénée.

2.2. ANALYSE MINÉRALE ET CHIMIQUE

2.2.1. Analyse par diffraction X

La composition minéralogique du matériau naturel est déterminée par diffraction X (diffractomètre Philips, enregistrement pas à pas, rayonnement $\text{K}\alpha\text{Cu}$ filtré) sur poudre. Les résultats obtenus, présentés en figure 2, mettent en évidence la présence de quartz, de calcite et de deux types d'argiles, illite et kaolinite.

Afin de confirmer la présence de kaolinite, la composition minéralogique

du matériau chauffé à 550° C (transformation du kaolin en métakaolin pour 500°C<T<550°C) est déterminée. Sur le diagramme obtenu on note effectivement la disparition du pic à $2\theta = 14\text{Å}$, correspondant à la kaolinite (figure 3).

2.2.2. Observation par microscopie électronique

Le matériau est observé au microscope électronique à balayage à effet de champs. Les photos (figure 4) indiquent la présence d'éléments minéraux (argile : photo a; quartz : photo b) ainsi qu'une fraction biogène constituée notamment de spicules et de diatomées (photos c à h), dont certains sont composés de calcite (photos g, h). Ces observations confirment l'analyse par diffraction X.

La composition chimique est déterminée par micro analyse EDS. Dans un premier temps, une analyse chimique globale est réalisée. Les résultats (figure 5, et tableau 1) corroborent l'analyse au rayon X. Les éléments Si, Al, K, Ca correspondent aux argiles, quartz et calcite. On note également la présence de Na, Cl et S en quantité non négligeable. Ces éléments peuvent correspondre à la cristallisation de sels due à l'évaporation de l'eau de mer.

Des analyses chimiques ponctuelles sont effectuées afin de valider cette dernière hypothèse.

(figures 6 et 7). Sur la photo de la figure 6 on observe des cristaux cubiques dont l'analyse chimique correspond au chlorure de calcium et au chlorure de sodium. L'analyse chimique ponctuelle réalisée à l'extérieur de ces cristaux (figure 7) montre une absence de Cl et Na, ce qui confirme la nature des cristaux et l'hypothèse d'une cristallisation de sels marins.

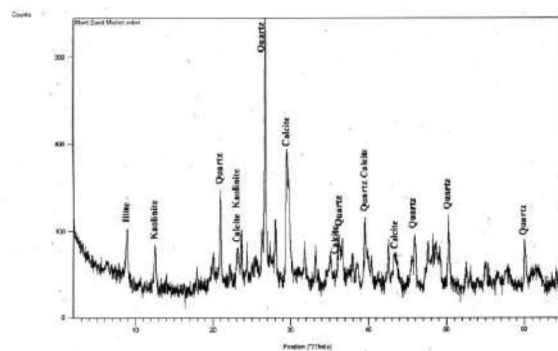


Figure 2: Diagramme de diffraction X du matériau naturel

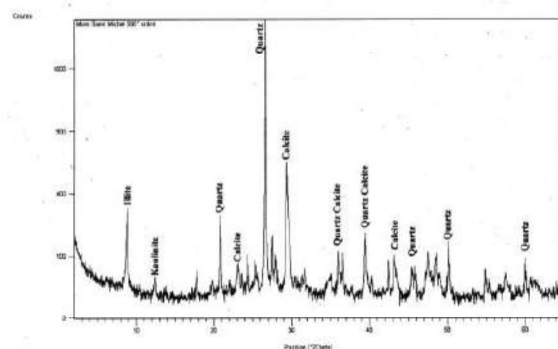


Figure 3 : Diagramme de diffraction X du matériau chauffé à 550°C.

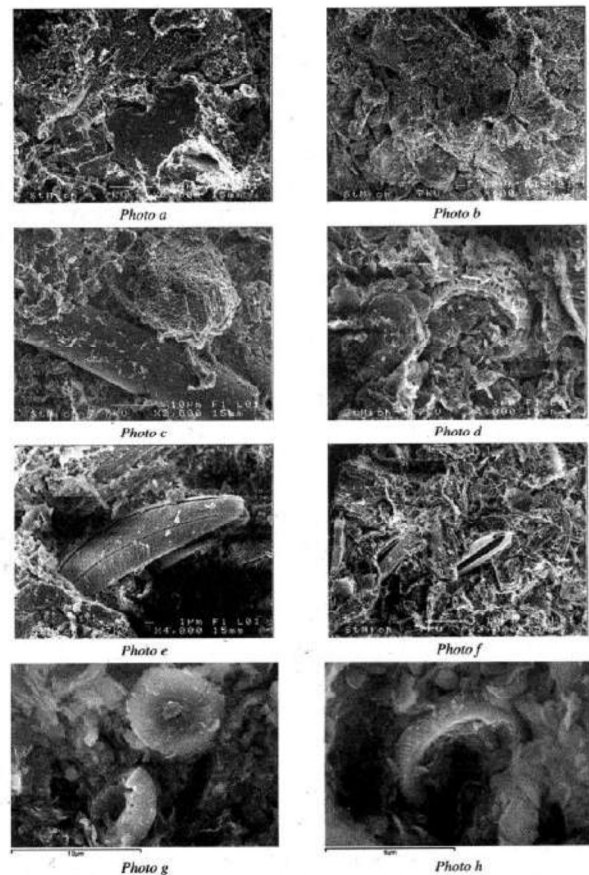


Figure 4 : Observation du matériau naturel au MEB.

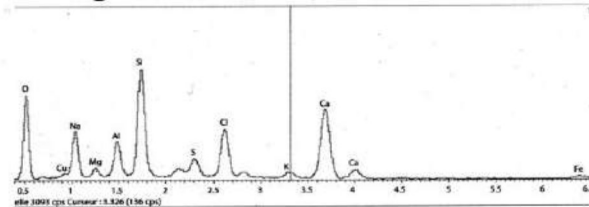


Figure 5 : Composition chimique EDS du matériau naturel (analyse globale).

Tableau 1 : Composition chimique EDS du matériau naturel (analyse globale).

Elément	%Masse	%Atomique
C	19.60	30.17
O	39.61	45.77
Na	6.14	4.93
Mg	0.86	0.65
Al	3.02	2.07
Si	9.66	6.36
S	1.70	0.98
Cl	6.00	3.13
K	0.78	0.37
Ca	10.80	4.98
Fe	1.16	0.39
Cu	0.65	0.19
Totaux	100.00	

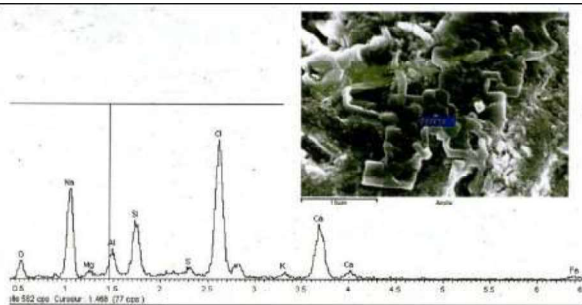


Figure 6 : Observation et composition chimique ponctuelle de cristaux cubiques dans le matériau naturel.

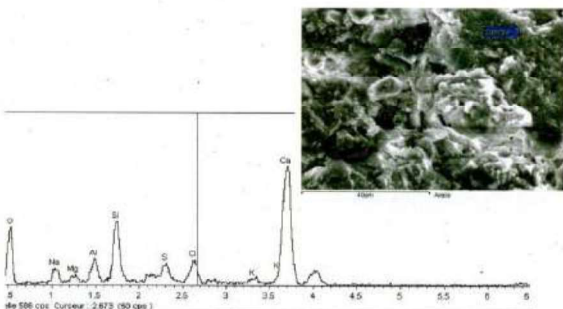


Figure 7 : Observation et composition chimique ponctuelle hors cristaux.

2.3. ANALYSE THERMIQUE

Des analyses thermiques pondérale et différentielle sont réalisées sur le matériau naturel (séché à 100°C) et sur le matériau chauffé à 550°C pendant une heure. Les diagrammes obtenus sont reportés respectivement figures 8 et 9.

Le séchage initial, systématiquement réalisé à 100°C, permet de s'affranchir de l'eau libre ou très faiblement liée. L'analyse thermique du matériau naturel (figure 8) met en évidence une réaction exothermique entre 250°C et 300°C. Ce dégagement exothermique correspondrait à la transformation de la kaolinite en méta kaolin. Ce décalage par rapport à la valeur théorique (autour de 550°C) signifierait que l'on est en présence d'un kaolin « mal cristallisé » ou comprenant des défauts au sein de son réseau cristallin. L'analyse thermique réalisée sur le matériau préalablement chauffé à 550°C ne présente plus ce dégagement exothermique (figure 9) confirmant ainsi l'hypothèse précédente.

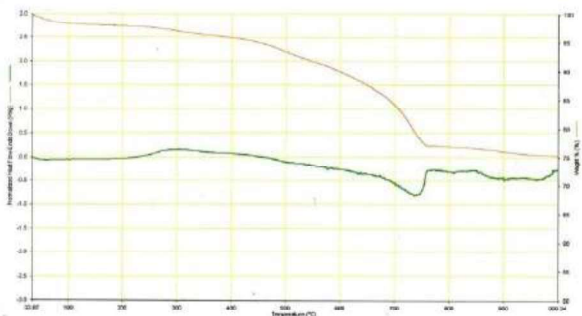


Figure 8 : Analyse thermique différentielle du matériau naturelle préalablement chauffé à 100°C.

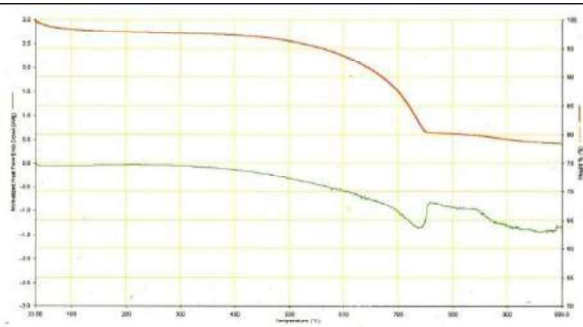


Figure 9 : Analyse thermique différentielle du matériau naturelle préalablement chauffé à 550°C.

3. PROCEDURES EXPERIMENTALES

3.1. TRAITEMENTS UTILISES

Les traitements classiques des sols, consistent généralement en l'ajout de chaux et/ou de ciments.

Dans le cadre de cette étude, on se propose d'étudier l'efficacité de deux types de traitement : l'un à la chaux, l'autre au liant hydraulique (liant routier Rolac 645).

L'analyse de la composition minérale et chimique a mis en évidence la présence de kaolin au sein du matériau. Il est alors intéressant d'envisager un traitement thermique afin de transformer le kaolin en méta kaolin et ainsi d'augmenter la réactivité du matériau vis-à-vis des liants utilisés. Compte tenu des résultats de l'analyse thermique, trois traitements thermiques sont envisagés : l'état de référence (séchage à 100°C), un chauffage à 300°C pendant une heure et un chauffage à 550°C pendant une heure.

Toutefois, l'analyse chimique a également montré la présence de sels (sulfates et chlorures) pouvant contrecarrer l'efficacité des traitements.

3.2. FABRICATION DES EPROUVETTES

3.2.1. Traitement à la chaux

Pour les trois traitements thermiques utilisés, les mélanges sont réalisés avec de la chaux vive dans un rapport de masse chaux/tangue de 10%. L'eau est ajustée pour obtenir une rhéologie permettant une mise en oeuvre par compaction dans les moules 4x4x16. Les rapports massiques obtenus sont 65,4% de tangue, 6,5% de chaux et 28,1% d'eau.

Les éprouvettes sont conservées à 20°C et à 100% d'humidité relative pendant 7 jours. Elles sont ensuite stockées à 20°C et à un taux d'humidité relative de 50% jusqu'à stabilisation de la masse.

3.2.2. Traitement au liant routier

Pour les trois traitements thermiques utilisés, les mélanges sont réalisés avec un liant hydraulique routier « Rolac 645 » dans un rapport de masse liant/tangue de 10%. Comme précédemment, l'eau est ajustée pour obtenir une rhéologie permettant une mise en oeuvre par compaction dans les moules 4x4x16. Les rapports massiques obtenus sont 67,8% de tangue, 6,8% de liant et 25,4% d'eau.

De nouveau, les éprouvettes sont conservées à 20°C et à 100% d'humidité relative pendant 7 jours. Elles sont ensuite stockées à 20°C et à un taux d'humidité relative de 50% jusqu'à stabilisation de la masse.

4. CARACTERISATIONS MECANQUES

Après stabilisation de leur masse, les éprouvettes sont systématiquement testées en compression simple et en flexion. L'ensemble des résultats des essais en terme de résistance à la compression simple f_c et de résistance à la traction par flexion σ_r est reporté dans le tableau 2 et sur les figures 10 et 11.

On remarque que, comme attendu, le traitement au liant hydraulique permet d'obtenir de meilleures performances que le traitement à la chaux. Malgré tout, les valeurs de la résistance à la compression minimales obtenues pour les deux traitements (2,35MPa pour le traitement à la chaux, après séchage à 100°C et 5,03 MPa pour le traitement au liant après séchage à 100°C) restent supérieures à la valeur minimale généralement admise pour les sols traités (de l'ordre de 1 MPa).

On note également que le traitement thermique à 300°C ne permet pas d'obtenir une amélioration des caractéristiques mécaniques. Par contre, pour les deux traitements, une nette amélioration de la résistance à la compression est observée après un traitement thermique à 550°C. On peut penser que le traitement à 300°C pendant une heure ne permet pas, tel qu'espéré, la transformation du kaolin en méta kaolin.

Concernant les résistances à la traction par flexion, on observe, dans le cas du matériau traité à la chaux, une diminution de la valeur obtenue après un traitement thermique à 550°C. Cette observation peut être expliquée par l'apparition de fissuration lors du séchage de l'éprouvette à laquelle serait très sensible l'essai de flexion. Cette fissuration est probablement due à un excès d'eau dans le mélange. L'évaporation de cette eau excédentaire provoque un retrait important et une fissuration de l'éprouvette.

Tableau 2 : Résistances mécaniques à la compression et à la traction (par flexion).

Traitement	Résistance à la compression f_c (Mpa)	Résistance à la traction σ_r (Mpa)
100°C	2,35	0,71
300°C	1,60	0,61
550°C	12,34	0,25
100°C	5,03	0,85
300°C	4,93	0,90
550°C	14,57	2,19

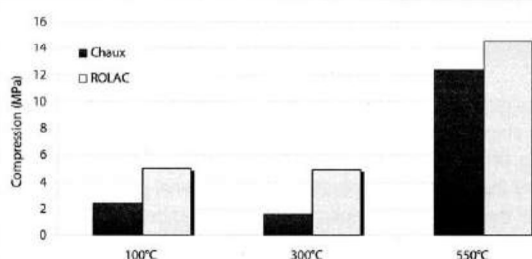


Figure 10 : Résistances à la compression simple.

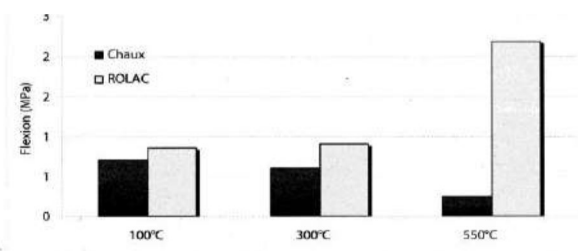


Figure 11 : Résistances à la traction par flexion simple.

5. CONCLUSIONS

L'analyse des vases du Mont St Michel a permis de définir la composition chimique et minéralogique de ce matériau. Les éléments minéraux composant le matériau sont principalement du quartz, de la calcite, de l'illite et de la kaolinite. Toutefois il a été relevé la présence de sels (chlorures, sulfates) provenant probablement de l'évaporation de l'eau de mer.

Dans un second temps, une analyse thermique différentielle a permis de mettre en évidence la possibilité de transformation du kaolin en méta kaolin (augmentation de la réactivité vis-à-vis de la chaux) à une température inférieure à la température théorique admise pour cette réaction (300°C au lieu de 550°C).

Deux traitements, l'un à la chaux, l'autre au liant hydraulique routier, ont alors été testés sur le matériau préalablement chauffé à trois températures différentes : 100°C (simple séchage du matériau), 300°C (élimination de la matière organique + transformation du kaolin en méta kaolin) et 550°C (température habituelle de traitement pour transformé le kaolin en méta kaolin).

La performance des différents traitements a été évaluée à partir d'essais de compression simple et de flexion. On obtient systématiquement, des valeurs de résistance largement supérieures à celles habituellement admises dans le cas de sols traités. Cette gamme de résistance (5 à 15 MPa) permet d'envisager la fabrication d'éléments plus résistants tels que des briques par exemple. Le dosage en liant pourra donc être ajusté selon l'utilisation envisagée.

Des essais complémentaires sont nécessaires afin d'ajuster la teneur en eau des mélanges, d'étudier l'influence de l'énergie de compactage, la durabilité des éléments fabriqués, ...

6. BIBLIOGRAPHIE

- ¹M. Kergoet, Exemple d'étude de traitement pour déterminer l'emploi d'un sol en couche de forme.
- ²Source: Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n 231, March/April, 2001, p 19-24
- ³ M. Rao, Sudhakar (Department of Civil Engineering, Indian Institute of Science); P. Shivananda, Role of curing temperature in progress of lime-soil reactions. Source: Geotechnical and Geological Engineering, v 23, n 1, February, 2005, p 79-85
- ⁴J. N. Jha, (Civil Engineering Department, Guru Nanak Dev Engineering College); K. S. Gill, Effect of rice husk ash on lime stabilization of soil Source: Journal of the Institution of Engineers (India): Civil Engineering Division, v 87, n NOV., Nov 28, 2006, p 33-39
- ⁵P. V. Sivapullaiah, (Department of Civil Engineering, Indian Institute of Science); A. Sridharan, ; H. N. Ramesh, Effect of sulphate on the shear strength of lime-treated kaolinitic soil. Source: Ground Improvement, v 10, n 1, January, 2006, p 23-30