



## Les sédiments une nouvelle ressource pour les liants minéraux

Philippe DHERVILLY <sup>1</sup>, Ahlem BOUALEM <sup>2</sup>, Salim MEZAZIGH <sup>2</sup>

1. ARD Normandie Technologies, Espace Jean Monnet, 8 place de l'Europe 14200 Hérouville-Saint-Clair, France.

*contact@ardnormandie.fr*

2. Normandie Université, Unicaen, UMR 6143 CNRS - M2C, 24 rue des Tilleuls, 14000 Caen, France.

*boualemahlem17@gmail.com ; salim.mezazigh@unicaen.fr*

### Résumé :

L'utilisation des sédiments de dragage comme matériau de construction représente une approche novatrice et durable dans le domaine des géopolymères. Traditionnellement considérés comme des déchets, ces sédiments peuvent être transformés en matériaux performants grâce à des réactions de géo-polymérisation. Ce processus chimique implique la conversion de précurseurs riches en silice et alumine, présents dans les sédiments, en une matrice solide et durable sous l'action de réactifs alcalins.

Ce rapport se concentre sur l'optimisation des formulations géopolymères à base de sédiments de dragage non traités, en évaluant divers paramètres influençant la résistance mécanique des matériaux. En particulier, les rapports massiques des réactifs, les propriétés physico-chimiques des sédiments et l'ajout de coproduits tels que le métakaolin (MK) et les laitiers de hauts fourneaux granulés (GGBFS) sont examinés pour déterminer leurs effets sur la performance des géopolymères.

Les résultats obtenus démontrent non seulement la faisabilité de cette approche, mais aussi son potentiel à produire des matériaux de construction avec des résistances mécaniques compétitives par rapport aux standards de l'industrie. Cette recherche ouvre la voie à une valorisation accrue des sédiments de dragage, contribuant ainsi à la gestion durable des ressources et à l'innovation dans les matériaux de construction.

### Mots-clés :

Sédiments, Liants minéraux, Gestion de sédiments, Dragage, Géopolymère, Caractérisation de sédiments, Durabilité environnementale.

### 1. Introduction

La réduction de l'empreinte carbone des matériaux de construction et l'efficacité énergétique des bâtiments sont des enjeux majeurs face au changement climatique. Le secteur de la construction, en constante expansion, exerce une pression significative sur l'environnement, notamment par les émissions de dioxyde de carbone des cimenteries et l'utilisation intensive de ressources naturelles.

## *Thème 5 – Gestion durable des zones littorales et estuariennes*

Dans ce contexte, les sédiments issus du dragage des infrastructures maritimes et portuaires se présentent comme une source prometteuse de matériaux biosourcés. Les recherches montrent que ces sédiments peuvent être réutilisés pour produire des ciments composés, offrant une alternative viable aux matériaux traditionnels. Toutefois, la nécessité de la calcination thermique des sédiments pose des défis en termes de consommation d'énergie et de coûts.

Cette étude explore les possibilités de valorisation des sédiments marins en matériaux biosourcés pour la construction, en visant à réduire l'empreinte carbone des matériaux et à garantir l'efficacité énergétique des bâtiments. En analysant les défis et les opportunités, nous espérons contribuer à une construction plus durable et respectueuse de l'environnement.

### **2. Méthodologie pour la formulation de mélanges de liants minéraux à base de sédiments**

#### 2.1 Choix des paramètres pour les mélanges

Tout d'abord, la teneur en liants et autres ajouts est toujours exprimée par rapport à la masse sèche du sédiment ou de la fine de carrière sauf mention expresse dans la section intéressée. Ceci veut dire qu'un dosage en liant de 1g pour 100g de sédiment correspond à 1%. Puis les sédiments marins à traiter contiennent un grand volume d'eau initiale. Il est difficile d'obtenir des performances mécaniques suffisantes dans une valorisation avec des liants hydrauliques à faibles dosages. C'est pourquoi il a été nécessaire de fixer une teneur en eau pour les mélanges des sédiments marins et des liants lors de la confection des éprouvettes. Pour déterminer cette teneur en eau optimale pour les mélanges « sédiment-ciment-chaux », il faut effectuer des essais Proctor-IPI. Mais de par la littérature, on situe cette teneur en eau dans un intervalle compris entre 20-40%. Le choix du liant de base (ciment-chaux) est en fait en relation avec la teneur en eau et la teneur en matière organique des sédiments mais il a été tenu compte des conditions économiques : dosage en ciment 7% et en chaux 3%.

#### 2.2 Méthodologie pour la formulation de mélanges de liants minéraux à base de sédiments

La formulation de mélanges de liants minéraux à base de sédiments nécessite une approche méthodologique rigoureuse pour garantir des résultats optimaux. Les étapes suivantes sont généralement suivies (LIANG, 2006) :

- Analyse des propriétés des sédiments : Avant de commencer la formulation, il est essentiel de réaliser une analyse détaillée des propriétés des sédiments qui seront utilisés. Cela comprend la détermination de la composition granulométrique, de la teneur en eau, de la teneur en matière organique, ainsi que d'autres caractéristiques pertinentes. Cette analyse permet de mieux comprendre le comportement des sédiments et d'adapter la formulation en conséquence.

- Détermination des paramètres de formulation : Sur la base des données obtenues lors de l'analyse des propriétés des sédiments, ainsi que des exigences spécifiques du projet, il est nécessaire de déterminer les paramètres de formulation appropriés. Cela inclut les dosages optimaux en liants minéraux tels que le ciment et la chaux, ainsi que la quantité d'eau et d'autres additifs nécessaires pour obtenir les propriétés mécaniques et les performances souhaitées du mélange final. Les dosages optimaux peuvent varier en fonction de la composition des sédiments, de leurs caractéristiques physiques et des exigences spécifiques de l'application.
- Essais de laboratoire : Une fois les paramètres de formulation déterminés, des essais de laboratoire sont réalisés pour évaluer les performances des mélanges formulés. Les essais comprennent généralement des essais Proctor-IPI pour déterminer la teneur en eau optimale et évaluer la compacité des mélanges, ainsi que des essais de résistance mécanique pour évaluer la résistance à la compression, la résistance à la traction, le module d'élasticité, etc. Ces essais permettent de valider les paramètres de formulation et d'optimiser les performances du mélange.
- Validation sur le terrain : Une fois que les mélanges formulés ont été testés et validés en laboratoire, il est nécessaire de les tester dans des conditions réelles sur le terrain. Cela permet de vérifier la performance du mélange dans des conditions environnementales réelles et de s'assurer qu'il répond aux exigences du projet. Des tests sur le terrain peuvent également fournir des informations précieuses sur la durabilité et la résistance du mélange dans des conditions d'utilisation réelles. En suivant cette méthodologie, il est possible de formuler des mélanges de liants minéraux efficaces à base de sédiments, offrant ainsi une solution durable pour la valorisation de ces ressources précieuses.

### **3. Formulation des liants géopolymères avec les sédiments**

#### **3.1 Objectifs et méthodologie**

L'objectif principal était de déterminer les paramètres optimaux pour la formulation des géopolymères afin de maximiser la résistance mécanique. Plusieurs paramètres ont été étudiés, notamment les rapports massiques Réactifs Alcalins/Précurseurs et  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ , ainsi que la variabilité des propriétés physico-chimiques des sédiments. Les essais expérimentaux et les analyses statistiques, y compris l'analyse par plan de mélange et l'analyse en composantes principales (ACP), ont permis d'identifier les conditions optimales pour ces formulations.

#### **3.2 Résultats principaux**

Un résumé des résultats est présenté dans le tableau 1. Les résultats montrent que, bien que les échantillons à faible molarité (GSB\_0,5) présentent une prise plus rapide à jeune âge en raison de la dissolution des ions  $\text{Ca}^{2+}$ , les formulations à plus haute molarité

## Thème 5 – Gestion durable des zones littorales et estuariennes

(GSB\_2 et GSB\_4) atteignent des résistances mécaniques supérieures à long terme grâce à une meilleure dissolution des ions  $Al^{3+}$  et  $Si^{4+}$ . À 7 jours, la formulation OPC, utilisant du ciment, montre une résistance à la compression initiale plus élevée comparée aux formulations géopolymères, mais cette tendance s'inverse avec le temps, les formulations géopolymères surpassant le ciment à 28 et 90 jours.

L'ajout de coproduits améliore significativement les performances mécaniques, notamment avec GSB\_GGBFS50 atteignant 35 MPa à 28 jours, ce qui est attribué à l'accélération des réactions hydrauliques latentes du GGBFS. L'étude souligne également que des rapports massiques optimaux des réactifs alcalins et des précurseurs sont essentiels pour maximiser les résistances mécaniques, des géopolymères, identifiant un rapport  $Na_2SiO_3/NaOH$  de 1,54 et un rapport Réactifs Alcalins/Précurseurs de 0,31 comme idéaux pour les sédiments de Pauillac (MONTEIRO, 2023)

Tableau 1. Résumé de l'effet des différents paramètres sur les résistances mécaniques des liants, (MONTEIRO, 2023).

Paramètres	Résumé des effets
Moralité de la solution NaOH	Diminution de la moralité Meilleure résistance au jeune âge due à la libération des ions $Ca^{2+}$ . Dissolution des ions $Si^{4+}$ et $Al^{3+}$ faible, diminution résistance au-delà de 28 jours.
	Augmentation de la moralité Inhibition de la libération des ions $Ca^{2+}$ au jeune âge. Prise de résistance à 28 jours ralentis par E/S. Meilleure dissolution des ions $Si^{4+}$ et $Al^{3+}$ à 28 jours, augmentation résistance.
Variation des rapports R/P et $Na_2SiO_3/NaOH$	Sur les intervalles choisis, l'influence faible. Observation d'un optimum pour R/P=0.31 et $Na_2SiO_3/NaOH = 1.54$ .
Effet des propriétés des sédiments	Résistance améliorée avec augmentation argiles et diminution surface spécifique. Les teneurs en MO diminuent la résistance.
Effet de l'ajout des coproduits	Ajout à 10% Amélioration de résistances liées à $Ca^{2+}$ (OPC et GGBFS) ou $Si^{4+}$ et $Al^{3+}$ (MK). Meilleure résistance GSB comparée à OPC. Valeurs de résistance supérieure aux résultats de la littérature utilisant des sédiments sans traitement.
	Ajout à 50% MK : augmentation légère. GGBFS : augmentation majeure liée à la formation de nouveaux produits. Hypothèse de formation de produits différents selon les matrices.

### 4. Perspectives et recommandations

Dans la continuité de cette étude, plusieurs pistes de recherche émergent pour approfondir la compréhension et optimiser les performances des géopolymères à base de sédiments non traités. Tout d'abord, une analyse approfondie de la microstructure et de la

nanostructure des géopolymères permettrait de mieux appréhender les mécanismes sous-jacents, offrant ainsi des perspectives prometteuses pour comprendre l'influence spécifique des sédiments non traités. Parallèlement, la poursuite de l'optimisation des formulations est cruciale, avec un accent particulier sur l'amélioration des résistances mécaniques à long terme et l'exploration de l'impact de divers types de sédiments et de conditions de cure. De plus, une investigation approfondie du rôle du calcium dans les matrices géopolymères est nécessaire pour mieux comprendre son influence sur la formation des gels et leur stabilité. Enfin, pour concrétiser les bénéfices potentiels de ces recherches, des tests sur le terrain et des évaluations sur des prototypes à grande échelle sont essentiels pour évaluer les performances réelles des géopolymères dans des applications pratiques, notamment dans le domaine de la construction et pour la création de matériaux de construction durables. (MONTEIRO, 2023)

Cette étude a démontré la faisabilité et l'efficacité de l'utilisation de sédiments de dragage non traités dans la formulation de géopolymères, offrant une alternative durable et performante aux matériaux de construction traditionnels. Les résultats prometteurs montrent que, malgré des temps de prise prolongés et des défis liés à la dissolution des ions, il est possible d'atteindre des résistances mécaniques significatives avec des formulations optimisées. Cela ouvre de nouvelles perspectives pour le développement de matériaux de construction innovants et respectueux de l'environnement, tout en offrant des solutions pour la valorisation des sédiments de dragage.

## 5. Conclusion

L'exploration de l'utilisation des sédiments comme ressource pour les liants minéraux ouvre de nouvelles perspectives passionnantes dans le domaine de la construction durable. Malgré les défis inhérents à l'intégration des sédiments dans les formulations de liants, notamment en termes de gestion de leur teneur en eau, de réactivité et de caractérisation, ces matériaux offrent un potentiel significatif pour diversifier les sources de matériaux de construction et réduire l'empreinte environnementale de l'industrie. Les études récentes sur l'utilisation des sédiments dans les géopolymères illustrent cette tendance émergente et soulignent l'importance d'une approche multidisciplinaire pour surmonter les obstacles techniques et promouvoir l'innovation. En développant des méthodes efficaces pour formuler des mélanges de liants minéraux à base de sédiments et en exploitant pleinement leur potentiel, nous pouvons contribuer à créer un secteur de la construction plus durable et résilient, tout en préservant nos précieuses ressources naturelles pour les générations futures.

## 6. Bibliographie consultée

SAFHI A.E.M. (2020). *Valorisation des sédiments de dragage dans des bétons autoplaçants : optimisation de la formulation et étude de la durabilité*. Thèse de doctorat, Université de Lille 1 - Université de Sherbrooke, <https://theses.hal.science/tel-03161520/>

## Thème 5 – Gestion durable des zones littorales et estuariennes

BALAGUER PASCUAL A. (2014). *Elaboration de nouveaux liants minéraux pour la formulation de bétons écologiques et durables*. Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, <https://savoirs.usherbrooke.ca/handle/11143/5414>

MONTEIRO L. (2023). *Valorisation des sédiments de Nouvelle-Aquitaine non-traités dans un composite géopolymérisé : étude mécanique, microscopique et environnementale*. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, <https://theses.hal.science/tel-04429313v1/document>

MIRAOU M. (2010). *Prétraitement et traitement des sédiments de dragage en vue d'une valorisation dans le génie civil*. Thèse de doctorat, Université de Lille 1, <https://pepite-depot.univ-lille.fr/LIBRE/EDSPI/2010/50376-2010-Miraoui.pdf>

ACHOUR R. (2013). *Valorisation et caractérisation de la durabilité d'un matériau routier et d'un béton à base de sédiments de dragage*. Thèse de doctorat Université de Lille 1 - Université de Sherbrooke, <https://docplayer.fr/768895-Valorisation-et-caracterisation-de-la-durabilite-d-un-materiau-routier-et-d-un-beton-a-base-de-sediments-de-dragage.html>

KARAM R. (2020). *Valorisation de sédiments marins non calcinés dans un liant alcali-activé à base de laitier de haut-fourneau*. Thèse de doctorat, Université de Bretagne Loire, <https://theses.hal.science/tel-03039644/>

LIANG Y. (2006). *Co-valorisation de sédiments et de sols fins par apport de liants et de fibres*. Thèse de doctorat, Université de Caen, <https://theses.hal.science/tel-00731611/document>.