

Modélisation statistique de la résistance à la compression des sédiments traités

Ishak MOGHRABI¹, Harifidy RANAIVOMANANA², Fateh BENDAHMANE³, Ouali AMIRI⁴, Daniel LEVACHER⁵

1. *Ishak.moghrabi@etu.univ-nantes.fr (Université de Nantes, IUT Saint Nazaire, 58 rue Michel Ange, 44606)*
2. *Harifidy.Ranaivomanana@univ-nantes.fr (Université de Nantes, IUT Saint Nazaire, 58 rue Michel Ange, 44606)*
3. *Fateh.Bendahmane@univ-nantes.fr (Université de Nantes, IUT Saint Nazaire, 58 rue Michel Ange, 44606)*
4. *Ouali.Amiri@univ-nantes.fr (Université de Nantes, IUT Saint Nazaire, 58 rue Michel Ange, 44606)*
5. *Daniel.levacher@unicaen.fr (Université de Caen, Laboratoire M2C, 24 rue des Tilleuls, 14000 Caen)*

RÉSUMÉ. *Les opérations de dragage des sédiments dans les voies navigables sont nécessaires pour maintenir de bonnes conditions de navigabilité. Un des « points sensibles » dans la gestion à terre des sédiments concerne le volume considérable qu'ils représentent, d'où l'étude de la possibilité de valorisation de ces sédiments vers des filières adaptées. La stabilisation des sédiments fins nécessite la plupart du temps un traitement préalable, souvent par ajout de liants hydrauliques (chaux, ciment). Malgré tout, aucune étude ne s'est réellement intéressée sur l'optimisation de ce mode de traitement par rapport aux caractéristiques physico-chimiques des sédiments, à la nature du liant mais aussi à la filière de valorisation identifiée. Nous nous intéressons donc à cet aspect dans la présente contribution. A cette fin, nous proposons une approche statistique basée sur une analyse de régression multivariée qui permet d'identifier parmi les paramètres relatifs aux caractéristiques des sédiments et au type de liant, ceux qui ont un impact significatif sur la résistance en compression. 7 paramètres sont alors identifiés : la teneur en matière organique, l'indice de plasticité, la teneur en eau et les quantités des additifs (ciment, chaux, fumée de silice, cendres volantes, sable). Les résultats de l'analyse ont mis en évidence que la teneur en matière organique, l'indice de plasticité et la teneur en eau du mélange sédiment-liant contribuent à faire baisser la résistance mécanique. En revanche, le ciment a été identifié comme le meilleur additif.*

ABSTRACT. *Dredging operations are necessary to maintain the navigability of ports and water ways. Regarding the massive quantity of sediments dredged per year, the valorization of sediments towards adapted recovery methods is necessary. The stabilization of fine sediments requires preliminary treatment, often by adding hydraulic binders (lime, cement). Any study in literature aimed to optimize the treatment process as function of raw sediment's physic-chemical characteristics and nature of binder, which is the objective of the present study. Using a statistical approach based on a multivariate linear regression analysis, the effective parameters on the mechanical resistance of treated sediments at 28 days (R_{c28}) were identified. The obtained model allows to predict R_{c28} using 7 parameters. The organic matter content, index of plasticity and water content in the mix were realized to be the most subversive factors. While cement was identified as the best mechanical strength booster of treated sediments.*

Mots-clés : *Sédiments de dragage, Stabilisation de masse, Résistance mécanique, régression linéaire multivariée, modèle statistique*

Keywords: *Dredged sediments, Mass stabilization, Mechanical resistance, Multivariate linear regression, Statistical model*

1. Introduction

Les opérations de dragage des sédiments sont nécessaires pour maintenir l'exploitation des ports et des voies navigables. En France, 24,69 millions de tonnes des sédiments (quantité à sec) ont été draguée en 2011 [CET 11]. La valorisation de ces sédiments est une alternative à l'immersion en mer et au stockage à terre. Cependant, en raison de la contamination des sédiments, la valorisation est devenue une contrainte environnementale ([JOR 10]; [MED 11]; [OJE 08]).

L'utilisation des sédiments de dragage pour la construction de routes nécessite un processus de solidification-stabilisation (S/S), une approche de traitement bien connue des sols fins par du ciment et de la chaux ([PER 77]; [CHE 04]). Un outil de pré-orientation a été développé [ANG 14] pour la valorisation des sédiments fins vers la méthode la plus adaptée *i.e.* cimentaire, l'incorporation dans le béton, matériaux routières et assimilés, en matière céramique ou usage agricole. C'est une approche qualitative permettant d'évaluer la possibilité de valoriser les sédiments vers des filières préalablement identifiées. Cependant, l'approche ne permet pas d'estimer l'efficacité de traitement utilisé ni d'estimer le comportement mécanique des sédiments, qui est l'objectif de cette étude.

Nous nous intéressons donc dans la présente étude à la possibilité d'optimiser le mode de traitement aux liants hydrauliques des sédiments, en modélisant le comportement mécanique des sédiments traités en fonction des

propriétés bruts des sédiments et le traitement appliqué. L'utilisation des sédiments traités est basée sur leur comportement mécanique (remblais, couche de forme, digue ...), et donc la résistance mécanique à 28 jours (R_{C28}) est la propriété du sédiment traité par rapport à laquelle nous allons nous référer dans notre étude. L'estimation de R_{C28} a été choisie pour bénéficier de la prépondérance des données expérimentales disponibles. En utilisant le logiciel XLSTAT, les paramètres corrélés ont été éliminés à l'aide d'un outil d'analyse en composantes principales (ACP). Et ensuite, R_{C28} a été modélisé en fonction paramètres significatifs à l'aide d'un outil de régression linéaire multivariée.

2. Données d'entrée

De nombreuses études existent dans la littérature sur la valorisation des sédiments de dragage. Cependant, une méthodologie de sélection de la base de données a été effectuée afin d'approcher le traitement à l'échelle réelle. Par exemple les prétraitements thermique et/ou chimique des sédiments sont envisageables en laboratoire mais pas *in-situ*. Par conséquent, on ne traitera dans cette étude que le cas des sédiments fins stabilisés/solidifiés sans prétraitement chimique ou thermique préalable.

Dans cette étude, nous avons pris en considération les propriétés physico-chimiques des sédiments, le traitement (nature et quantité du liant et des ajouts utilisés) et la quantité d'eau dans les mélanges sédiment-liant. **Tableau 1** montre tous les paramètres d'entrée pris en compte dans l'analyse statistique. Les additives sont représentés en pourcentage de la masse des sédiments secs, tandis que l'eau est représentée en pourcentage de la masse sèche totale de l'ensemble des constituants.

Tableau 1. Paramètres d'entrée

		Paramètres	Symbole	Gamme
Propriétés sédiments bruts	physiques	Granulométrie	D ₁₀ , D ₃₀ , D ₅₀ , D ₆₀ , D ₉₀	D ₅₀ : 7.3-86 µm
	des	Valeur Bleu de méthylène	VBS	0.7-4.3 g/100g
		Matières organiques	MO	3-24.1 %
		Limites d'Atterberg	I _p , W _L , W _P	I _p : 1-40.8
Traitement		Eau	E	10.9-45.9 %
		Chaux	CH	0-17.6 %
		Cendres volantes	CV	0-10 %
		Ciment	C	0-17.6 %
		Fumée de silice	FS	0-10 %
		Sable	S	0-34.2 %
Résistance mécanique		Résistance à 28 jours	R_{C28}	0.28-4.12 MPa

3. Méthode

Dans le cadre de la présente étude, une base de données a été établit en se basant sur les résultats de 7 études menées sur 23 sédiments traités avec différents additifs, ([ANG 14]; [BAN 16]; [LIA 12]; [LOU 15]; [MUN 15]; [SIL 10]; [WAN 13]).

La régression linéaire multivariée est une approche pour modéliser une relation entre une variable dépendante scalaire et une ou plusieurs variables explicatives. L'objectif est d'estimer R_{C28} grâce à une combinaison linéaire de telle sorte que :

$$R_{C_i} = c_1 p_{1i} + c_2 p_{2i} + \dots + c_k p_{ki} + e_i \quad [1]$$

i : se réfère à une observation,

R_{C_i} : la valeur prédite de l'observation i ,

c_k : les coefficients correspondant à chaque variable,

p_{ki} : la valeur prise par le paramètre p_k à l'observation i ,

e_i : constante.

Trois étapes sont nécessaires pour réaliser cette analyse, comme le montre **Figure 1**.

3.1. Première étape : Sélection des paramètres d'entrée

Dans la première étape, les paramètres d'entrée ont été identifiés, par la suite, les valeurs liées aux paramètres ont été extraites des références mentionnées ci-dessus.

3.2. Deuxième étape : élimination des paramètres corrélés

Les paramètres linéairement corrélés devraient être éliminés avant d'effectuer l'analyse de régression en

utilisant une méthode d'exploitation de données appelée l'outil d'analyse en composantes principales (ACP). Dans l'ACP, chaque paramètre est représenté dans un espace de facteur (ou axe) et la représentation géométrique associe un vecteur pour chaque paramètre. Le tableau des corrélations aide à identifier les paramètres qui doivent être inspectés dans les plans de projection ACP (corrélation forte).

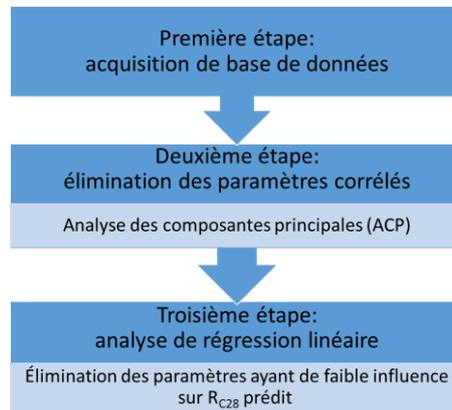


Figure 1. Les étapes suivies pour accomplir l'analyse de régression multivariée

3.3. Troisième étape : la régression linéaire multivariée

Après la première régression linéaire multivariée, l'influence maximale de chaque paramètre sur la R_{C28} prédite est calculée. Pour faciliter l'exploitation du modèle, nous avons éliminé les paramètres imposant de faible influence. Ces paramètres peuvent être éliminés en maintenant un coefficient ajusté de détermination (R^2 ajusté) et une faible erreur quadratique moyenne (RMSE) entre R_{C28} prédite et l'expérimentale.

4. Résultats et discussion

L'ACP a été réalisé avec 17 paramètres (**Tableau 1**) et 133 observations (17, 133) afin d'éliminer les paramètres corrélés (**Tableau 2**) :

- D_{10} , D_{30} , D_{50} , D_{60} et D_{90} ;
- W_L et W_P ;
- MO et W_P .

Tableau 2. Les paramètres corrélés

Paramètres	Coefficients de corrélation
$D_{10} : D_{30}$	0.865
$D_{30} : D_{50}$	0.889
$D_{50} : D_{60}$	0.977
$D_{60} : D_{90}$	0.738
$MO : W_P$	0.888
$W_L : W_P$	0.905

$$MO = 0.276 \times W_P - 2.008 \quad [2]$$

$$W_L = 1.113 \times W_P + 17.257 \quad [3]$$

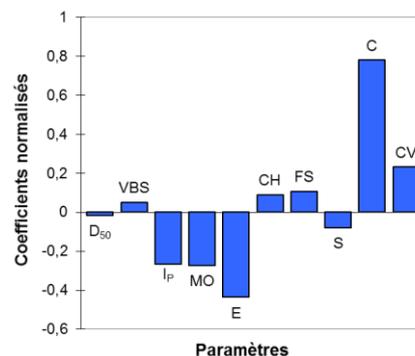


Figure 2. Les coefficients normalisés de régression 1

Les équations 2 et 3 montrent les relations linéaires entre MO et W_P ; W_L et W_P . Le diamètre médian (D_{50}) a été choisi parmi les autres diamètres pour représenter la distribution des tailles des particules. I_p a été sélectionné pour représenter la plasticité des sédiments, qui permet de garder MO et éliminer W_P et W_L .

La première régression a été réalisée en utilisant 133 observations et 10 paramètres (10:133). Les coefficients normalisés des 10 paramètres sont affichés dans la **Figure 2**, avec R^2 ajustée 0.757 et RMSE 0.321. Trois paramètres ont eu peu d'influence sur le R_{C28} prédit : D_{50} , VBS et le sable (S). Dans la deuxième régression (7:133), ces paramètres ont été éliminés, lorsque ce test a généré approximativement le même R^2 et RMSE que la première régression. De ce fait on assure que les paramètres éliminés n'affectent pas la convergence du modèle.

5. Conclusion

En utilisant l'outil d'analyse linéaire multivarié du logiciel XLstat, la résistance à la compression des sédiments traités à 28 jours, a été modélisée. Dans cette approche, nous avons pris en compte l'effet des propriétés physiques des sédiments bruts ainsi que le type et la quantité des additifs. L'indice de plasticité, la matière organique contenue et la teneur en eau ont été identifiés comme les facteurs les plus subversifs. Ce modèle a confirmé que le traitement par le ciment développe des résistances bien supérieures à celles des autres additifs.

6. Perspectives

Concernant le modèle développé dans cette étude, d'autres paramètres n'était pas prise en compte dû à la limitation des données disponibles, telles que la salinité des sédiments, la surface spécifique des grains des sédiments et leur minéralogie. D'autres études pourraient découvrir l'influence de ces paramètres sur R_{C28} .

Autrement c'est intéressant de modéliser la révolution de la résistance mécanique des sédiments traités en fonction de temps.

Références

- [ANG 14] Anger B., Caractérisation des sédiments fins des retenues hydroélectriques en vue d'une orientation vers des filières de valorisation matière, Thèse de doctorat, Université de Normandie, 2014.
- [BAN 16] Banoune B., Melbouci B., Rosquoët F., and Langlet T., Treatment of river sediments by hydraulic binders for valorization in road construction, *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 2016, 1–13, doi:10.1007/s10064-015-0844-4.
- [CHE 04] Chew S., Kamruzzaman AHM., Lee FH., Physicochemical and Engineering Behavior of Cement Treated Clays, *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* vol 130, 2004, 696–706.
- [JOR 10] JORF, Décret n° 2010-369 du 13/04/10 modifiant la nomenclature des installations classées. *Journal Officiel de la République Française n° 87*, 2010.
- [LIA 12] Liang Y., Co-valorisation de sédiments et de sols fins par apport de liants et de fibres, Thèse de doctorat, Université de Caen, 2012.
- [LOU 15] Loudia M., Etude du comportement mécanique d'un sédiment marin traité. Rapport de stage, Université de Normandie, 2015.
- [CET 11] Cetmef, Enquête dragage 2011 - synthèse de données, 2011.
- [MED 11] MEDDE, Circulaire du 24/12/10 relative aux modalités d'application des décrets n° 2009-1341, 2010-369 et 2010-875 modifiant la nomenclature des installations classées exerçant une activité de traitement de déchets, BO du MEDDE n° 1, 2011.
- [MUN 15] Munck R., La co-valorisation de matériaux appliquée aux sédiments de dragage, Rapport de stage, Université de Normandie, 2015.
- [OJE 08] OJEU, Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council on waste and repealing certain Directives. *Journal officiel de l'Union européenne n° L 312*, 2008.
- [PER 77] Perret P., Contribution à l'étude de la stabilisation des sols fins par la chaux: étude globale du phénomène et applications, Thèse de doctorat, Institute nationale des sciences appliquées, 1977.
- [SIL 10] Silitonga E., Valorisation des sédiments marins contaminés par solidification/stabilisation à base de liants hydrauliques et de fumée de silice, Thèse de doctorat, Université de Caen, 2010.
- [WAN 13] Wang D., Abriak NE., Zentar R., Strength and deformation properties of Dunkirk marine sediments solidified with cement, lime and fly ash, *Eng. Geol.*, vol 166, 2013, 90–99.