



Apport de l'utilisation de fibres végétales comme co-intrants en vue de la déshydratation et de la valorisation de sédiments et boues en mélange issus des canaux urbains d'Antananarivo (Madagascar)

**Andréa Wiktor GABRIEL ¹, Franck OLIVIER ¹, Quentin LE CAM ¹,
Mathys OLIVIER ¹, Daniel LEVACHER ²**

1. Ecogeos, 3 rue du Colonel Touny, 62000 Arras, France.

franck.olivier@ecogeos.fr

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

daniel.levacher@unicaen.fr

Résumé :

Le projet PRODUIR, financé par la Banque Mondiale et mis en œuvre à Antananarivo, Madagascar, concerne la gestion et la valorisation des produits de curage de canaux. Ce projet vise à étudier l'efficacité de divers co-intrants locaux dans l'amélioration du traitement des boues et sédiments extraits lors des opérations de curage. Parmi les co-intrants testés, la jacinthe d'eau (*Eichhornia crassipes*), la paille de riz (*Oryza sativa*), des herbes des montagnes locales (*graminées Sesika*) et des sciures de bois ont été identifiés comme prometteurs. Ces matériaux ont été sélectionnés pour leurs qualités déshydratantes et structurantes, ainsi que pour leur disponibilité à Antananarivo. Les essais pilotes ont démontré que l'ajout de ces co-intrants est susceptible d'améliorer significativement le ressuyage des boues, en augmentant leur perméabilité et en réduisant la teneur en eau. En particulier, la paille de riz a montré une capacité d'absorption initiale importante, suivie d'une augmentation de la perméabilité, tandis que les herbes des montagnes ont joué un rôle de structurant, facilitant la circulation de l'eau à travers les matrices. Sur le plan géomécanique, les ajouts de chaux et de fibres végétales ont augmenté la résistance mécanique des mélanges de sédiments et de boues, un aspect crucial en vue de leur réutilisation potentielle en matériaux de construction ou de remblai. Ces résultats représentent une avancée importante pour la gestion environnementale et économique des produits de curage dans les zones urbaines, tout en offrant des perspectives pour la valorisation de ces matériaux.

Mots-clés :

Boues de curage, Sédiments, Végétaux, Déshydratation, Low-tech, Madagascar.

Thème 5 – Gestion durable des zones littorales et estuariennes

1. Introduction

1.1 L'enjeu de la déshydratation des boues de curage

Les boues de curage de canaux sont des déchets solides, composés de sédiments, de matière organique et d'autres substances. Elles représentent une importante quantité de déchets, estimée à 1,5 milliard de tonnes par an dans le monde (BOULLOSA ALLARIZ, 2018). Cette production considérable de résidus pose des questions cruciales quant à leur gestion (contaminations aux ETM ou hydrocarbures, stockage, ou valorisation). Le premier frein à toute valorisation de matrices sédimentaires (sédiments curés et dragués de fleuves, barrages, ports ou lagunes) est l'élimination de l'eau contenue dans les sédiments au moment du dragage ou curage. Une teneur en eau élevée complexifie le transport initial des sédiments vers des unités de ressuyage ou de déshydratation, mais aussi la reprise des sédiments déshydratés (pelletabilité) ainsi que leur transport en centre de valorisation-traitement et leur épandage (et le cas échéant leur compactage en installation de stockage).

1.2 Des solutions inadaptées au contexte local des pays du Sud

Les solutions de traitement ne sont pas toujours adaptées au contexte local, en particulier dans les pays du Sud. Les technologies développées dans les pays du Nord, bien que performantes, sont coûteuses et techniquement complexes, ce qui les rend difficilement applicables dans les pays du Sud sans adaptations majeures : les contraintes budgétaires et de maintenance des installations représentent des défis majeurs qui rendent souvent ces technologies peu adaptées aux réalités locales (MANAP & VOULVOULIS, 2015). Paradoxalement, on observe fréquemment une tendance à l'importation sans discernement de ces technologies du Nord vers le Sud, sans analyse approfondie.

1.3 Une méthode expérimentale pour prendre en compte le contexte local

Plutôt que de fixer des protocoles prédéterminés, non adaptés au contexte local, nous avons fait le choix de développer une méthode empirique, permettant de partir des ressources disponibles localement. Elle comporte plusieurs phases distinctes :

- une phase de screening qui consiste en une caractérisation préliminaire des propriétés des boues et d'identification de co-intrants via un travail d'enquête ;
- une phase de pré-essais, au cours de laquelle les co-intrants sont testés de manière exploratoire en vue d'une sélection de ces derniers ;
- et enfin, une phase d'essais proprement dits, qui permettent de valider empiriquement les hypothèses et les modalités d'utilisation des co-intrants dans le contexte spécifique étudié.

Cette méthodologie et ses résultats dans le cadre d'un projet de curage de canal à Madagascar sont présentés dans la suite de cet article.

2. Prélèvement et caractérisation des boues de curage des canaux d'Antananarivo

2.1 Le cas des boues du canal C3 d'Antananarivo

Cette étude visait à identifier des pistes de traitement de boues de curage de canaux adaptées au contexte local d'Antananarivo, en testant une solution innovante de déshydratation mobilisant des co-intrants végétaux. Dans le cadre du projet PRODUIR, il est prévu de réaliser des travaux de curage le long du canal C3, sur un linéaire de 13 km, d'Anosibe à la station d'Ambodimita incluant les bassins tampon d'Andavamamba et d'Anosibe ainsi que le déversoir du canal d'Andriantany dans le C3 au niveau du quartier d'Antohomadinika.

2.2 Prélèvement des boues

Les prélèvements de boues ont notamment été effectués en zone urbaine, au niveau du boulevard de la Francophonie (PK 5500) (Figure 1). La profondeur des prélèvements effectués manuellement est restée globalement assez faible (< 50 cm).

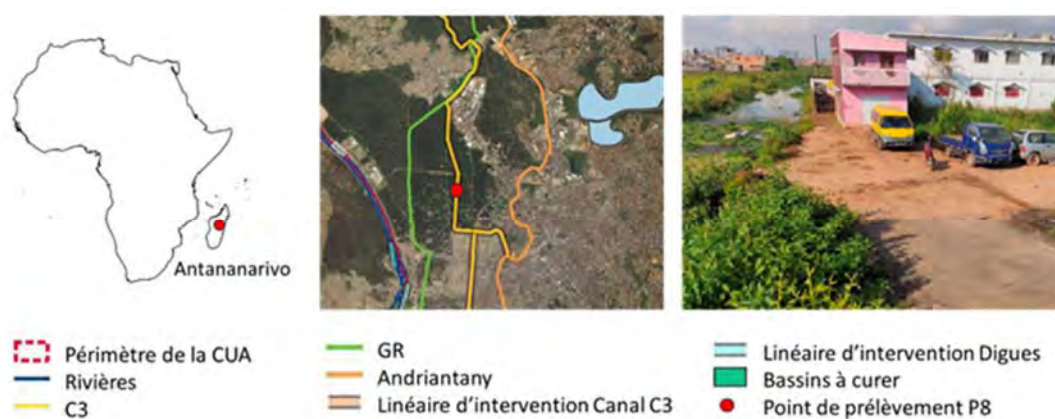


Figure 1. Emplacement du point de prélèvement n°8.

2.3 Des boues à haute teneur en eau, composées de sédiments fins et très plastiques

Les boues ont été d'abord soumises à un screening. Les analyses géotechniques ont révélé que les prélèvements sont caractérisés par des sédiments argileux et silteux, avec une présence de sable localisée. Les analyses granulométriques montrent que les boues sont composées d'éléments fins, très plastiques, peu denses une fois consolidés et très sensibles à l'eau. La forte teneur en argile peut avoir des implications pour leur comportement géotechnique, notamment en termes de déformabilité et de compressibilité. Les résultats indiquent que tous les prélèvements présentent une plasticité élevée, avec des indices de plasticité supérieurs à 35%. Cela tient à la présence de matière organique (MOT 29% MS en moyenne) mais aussi de teneurs en eau élevées, dépassant systématiquement 150%. Le Tableau 1 résume les principales caractéristiques des boues prélevées.

Thème 5 – Gestion durable des zones littorales et estuariennes

Tableau 1. Principales caractéristiques physico-chimiques des boues prélevées (point 8).

Indices	Unité	PR8
Limite de plasticité	%	79
Indice de plasticité	%	60
Teneur en eau	%	172
Matière sèche	% MBrute	29%
Poids volumique humide	kN/m ³	11,8
Poids volumique sec	kN/m ³	4,3
MOT	% MSèche	29%
COT	% MSèche	12%
COT	% MOrganique	41%

Par ailleurs, l'analyse des contaminations des boues a révélé une présence d'hydrocarbures lourds d'origine anthropique. Ces hydrocarbures sont présents au sein de la quasi-totalité des échantillons mais on remarque que les plus fortes concentrations (> 2 500 mg/kg MS) se situent en milieu urbain. Les boues présentent par ailleurs une contamination marquée en agents indicateurs de traitement (*E. coli*, *Entérocoques intestinaux*, *Bactéries coliformes*).

3. Les co-intrants végétaux, une piste prometteuse pour un traitement low tech ?

3.1 Un potentiel de traitement grâce à des co-intrants végétaux

L'intégration de particules ou fibres végétales dans les matrices sédimentaires émerge comme une solution prometteuse pour le traitement des boues ou sols contaminés (ADAMS *et al.*, 2015; LUKIC, 2016). Elle peut également améliorer la valeur agronomique des boues et contribue à réduire l'adhésion des boues aux outils d'épandage, facilitant ainsi leur gestion. Les matrices sédimentaires enrichies de déchets végétaux peuvent donner lieu à des valorisations multiples, incluant l'épandage agronomique (FOURVEL, 2018) et la fabrication d'éco-matériaux de construction.

3.2 Enquête et identification de co-intrants disponibles localement

Une enquête de terrain a permis d'identifier un certain nombre de co-intrants potentiels, prometteurs de par leurs qualités déshydratantes ou structurantes et assez facilement disponibles à Antananarivo, parmi lesquels :

- La chaux qui est un composé minéral fortement réactif. Lorsque la chaux est appliquée aux sédiments, elle réagit avec l'eau et la matière organique présente. Cette réaction chimique élève le pH du milieu, favorisant la dégradation et la transformation de la matière organique en composés stables. La chaux est largement utilisée pour améliorer les propriétés géotechniques, comme une augmentation de la résistance

mécanique (REKIK & BOUTOUIL, 2009). L'ajout de chaux dans le traitement des sédiments contaminés a été étudié pour son potentiel à réduire la mobilité des contaminants et diminuer la volatilisation des composés organiques volatils (BARTH *et al.*, 2009). La chaux (éteinte) présente l'avantage d'être largement disponible localement.

- Les jacinthes d'eau (*Eichhornia crassipes*) sont des plantes invasives très présentes dans les canaux. Leurs propriétés physiques pourraient en faire un structurant pour le compostage. Leur composition laisse également présager un certain intérêt agronomique (SAMUEL *et al.*, 2022). Prélevées dans le canal C3, elles ont ensuite été transportées sur le site des essais pilotes et découpées à la machette.
- La paille de riz (*Oryza sativa*), disponible en grande quantité et à proximité immédiate du canal. Les fibres ont été découpées en petits tronçons de 6 à 8 cm environ.
- Les herbes des montagnes appelées localement *Sesika* peuvent désigner différentes espèces de graminées ou d'herbes, incluant *Eragrostis tef*, *Pennisetum setaceum*, *Miscanthus sinensis*, *Phragmites australis*. Elles sont commercialisées sur certains marchés de la ville en tant que ressources pour la confection de matelas.
- Enfin, des sciures de bois (grossières et fines) récupérées au sein d'un atelier de travail du bois ont également été mobilisées.

La Figure 2 présente les co-intrants végétaux identifiés.

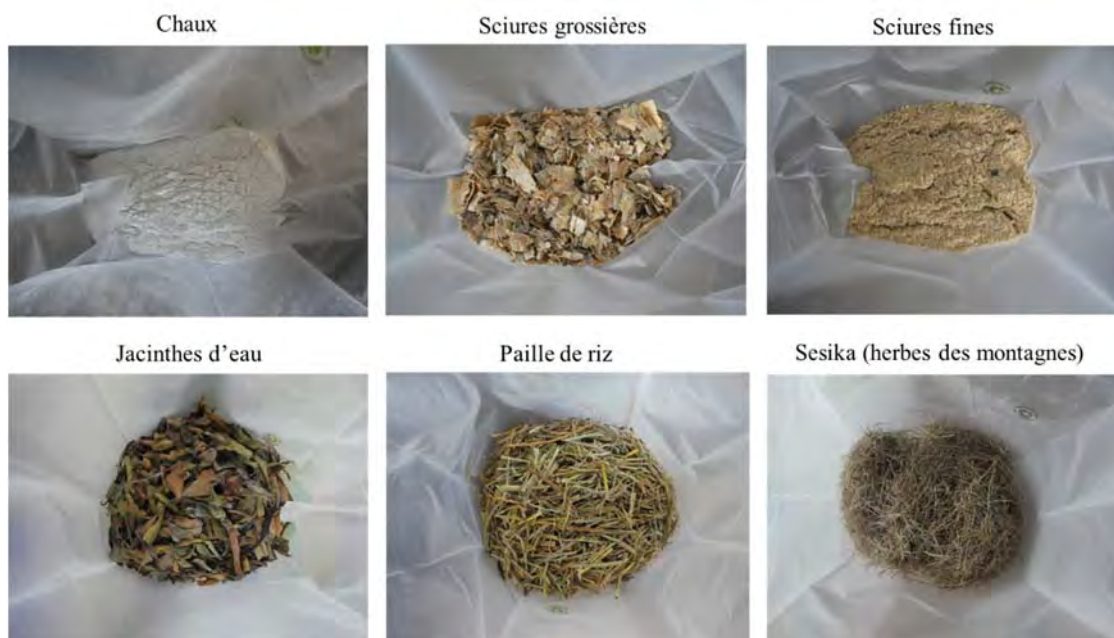


Figure 2. Planches photographiques des co-intrants mobilisés.

3.3 Des pré-essais qui ont confirmé l'intérêt de 3 fibres végétales

Les co-intrants précédents ont été testés au cours de 16 essais de déshydratation à petite échelle. Les résultats ont révélé des propriétés intéressantes. La paille de riz et les

Thème 5 – Gestion durable des zones littorales et estuariennes

jacinthes d'eau se sont distinguées par leur capacité à limiter le relargage gravitaire de l'eau constitutive des boues tout en contribuant à leur déshydratation, grâce à des phénomènes couplés d'absorption et de facilitation de l'évaporation.

L'herbe des montagnes a démontré sa capacité à drainer très efficacement l'eau interne des boues profitant du réseau de fibres pour faciliter les écoulements, un peu à l'image de réseaux karstiques (par analogie avec le sous-sol). A l'inverse, les sciures de bois ont été rejetées dans le cadre d'essais préliminaires, car elles ne permettaient pas de réduire substantiellement le relargage de l'eau, ni d'obtenir des caractéristiques mécaniques améliorées.

Sur le plan géotechnique, la paille de riz et les herbes de montagne associées aux boues du canal C3 (dosage à 5 %) ont par ailleurs démontré d'excellentes capacités autoportantes : affaissement ≤ 2 mm au cône d'Abrams après 3 jours de ressuyage (essai selon la norme NF EN 12350-8), voir Figure 3.



Figure 3. (a) Essai Slump Test (b) Echantillon de boue brute fortement affaissée après essai (c) Echantillon de boue + herbes des montagnes : affaissement quasi-nul.

4. Préparation des échantillons de boues en mélange avec les co-intrants

4.1 Ressuyage des boues et ajout de co-intrants

Les boues ont été soumises à un ressuyage primaire (≈ 2 h) le long des berges du canal C3. Après cela, elles ont été transférées dans deux bennes à déchets, puis transportées à l'aide de bennes *ampliroll* sur le site des essais pilote. Les bennes ont été déposées et maintenues légèrement inclinées pour permettre un ressuyage secondaire (≈ 48 h).

Les bennes contenant les boues ont ensuite été vidés sur des bâches au sol. Les boues ressuyées ont enfin été mélangées aux co-intrants, en suivant les proportions prévues pour chacune des cuves (cuves IBC de 1m^3 : voir Tableau 2 et Figures 4 et 5).

Pour des raisons pratiques, ce mélange s'est fait au sol pour les fibres et dans les cuves IBC pour la chaux. Une fois les mélanges obtenus, les matériaux ont été compactés par couches successives d'environ 10 cm de manière à pouvoir tasser/fouler aux pieds ces derniers et ainsi simuler au mieux les conditions réelles de mise en œuvre sur un site de confinement.

Tableau 2. Proportion massique des intrants au sein de chacune des cuves du pilote.

<i>Numéro du pilote</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
<i>Boue</i>	100	100	100	100	100	100
<i>Chaux</i>		2,5	5			2,5
<i>Herbe des montagnes</i>					5	2,5
<i>Paille de riz</i>				5		



Figure 4. Disposition des cuves C1 à C6 sous hangar.



Figure 5. (a) Mélange boue + paille de riz (b) Mélange boue + herbes des montagnes.

4.2 Suivi des essais pilotes

Une fois mis en place, les mélanges de sédiments et d'intrants ont été laissés tels quels pendant 22 jours afin d'évaluer l'intensité du ressuyage naturel (ressuyage tertiaire) dans

Thème 5 – Gestion durable des zones littorales et estuariennes

les cuves. Cette phase de ressuyage a donné lieu à un suivi des tassements et des effluents relargués (Figure 6). Après 22 jours, les cuves ont été soumises à un apport d'eau régulier et le suivi du relargage des lixiviats a été poursuivi pendant 20 jours supplémentaires. La teneur en eau dans les cuves a enfin été évaluée à différentes profondeurs (à 10, 30, 50 et 70 cm de la surface). On remarque que seules les cuves C5 (boue + herbes des montagnes) et C4 (boue + paille de riz) à moindre mesure et avec un temps de latence de l'ordre de 25 jours ont donné lieu à un ressuyage gravitaire.

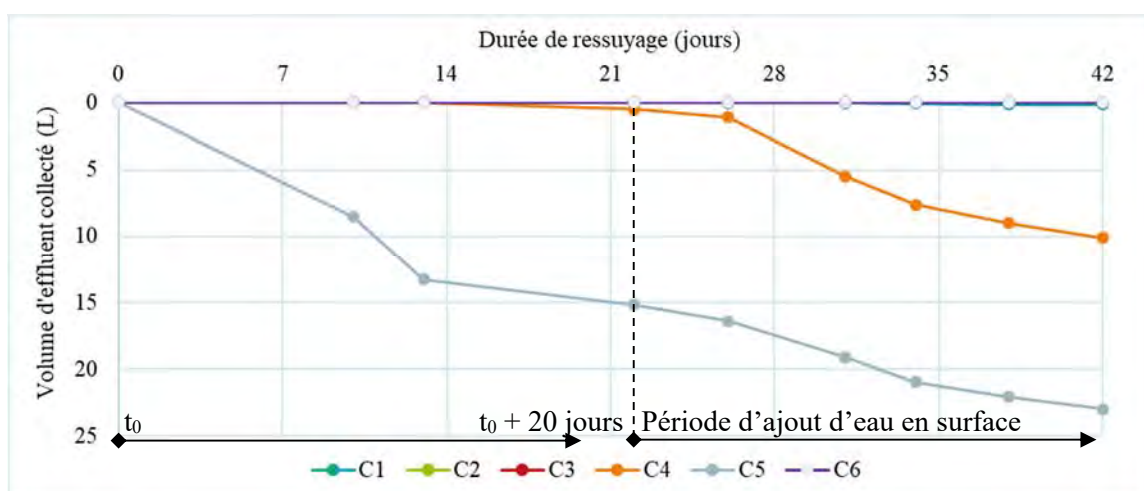


Figure 6. Suivi des rejets d'effluents dans les cuves C1 à C6.

5. Enseignements dans l'optique d'une déshydratation et d'une valorisation

5.1 L'effet des co-intrants sur la déshydratation

La Figure 7 présente l'évolution de la teneur en eau dans les cuves en fonction de la profondeur à t_0 et t_0+20 jours (voir Figure 6) à une profondeur de 10, 30, 50 et 70 cm de la surface. Au démarrage des essais, la teneur en eau varie entre 100 et 140% en fonction de la nature des échantillons en présence et la profondeur. 20 jours plus tard, la teneur en eau résiduelle est comprise entre 80 et 115%.

Le suivi de la teneur en eau dans les cuves révèle que l'apport de fibres végétales permet d'améliorer sensiblement la perméabilité des boues, ce qui accroît les effets du ressuyage et de l'évaporation en cas d'ajout d'eau. La paille de riz (cuve 4) a pour effet de favoriser l'absorption de l'eau avant de permettre leur évaporation tandis que les herbes des montagnes, plus fines et moins absorbantes, jouent uniquement un rôle de structurant facilitant la circulation gravitaire de l'eau. L'effet couplé de la chaux et de fibres végétales présente certaines spécificités. Alors que la fibre favorise une certaine perméabilité, la chaux a plus tendance à refermer et limiter les échanges d'eau. Dans la cuve cumulant les deux intrants (cuve 6), on n'observe pas d'infiltration. L'effet de la chaux est dominant sur le plan hydraulique.

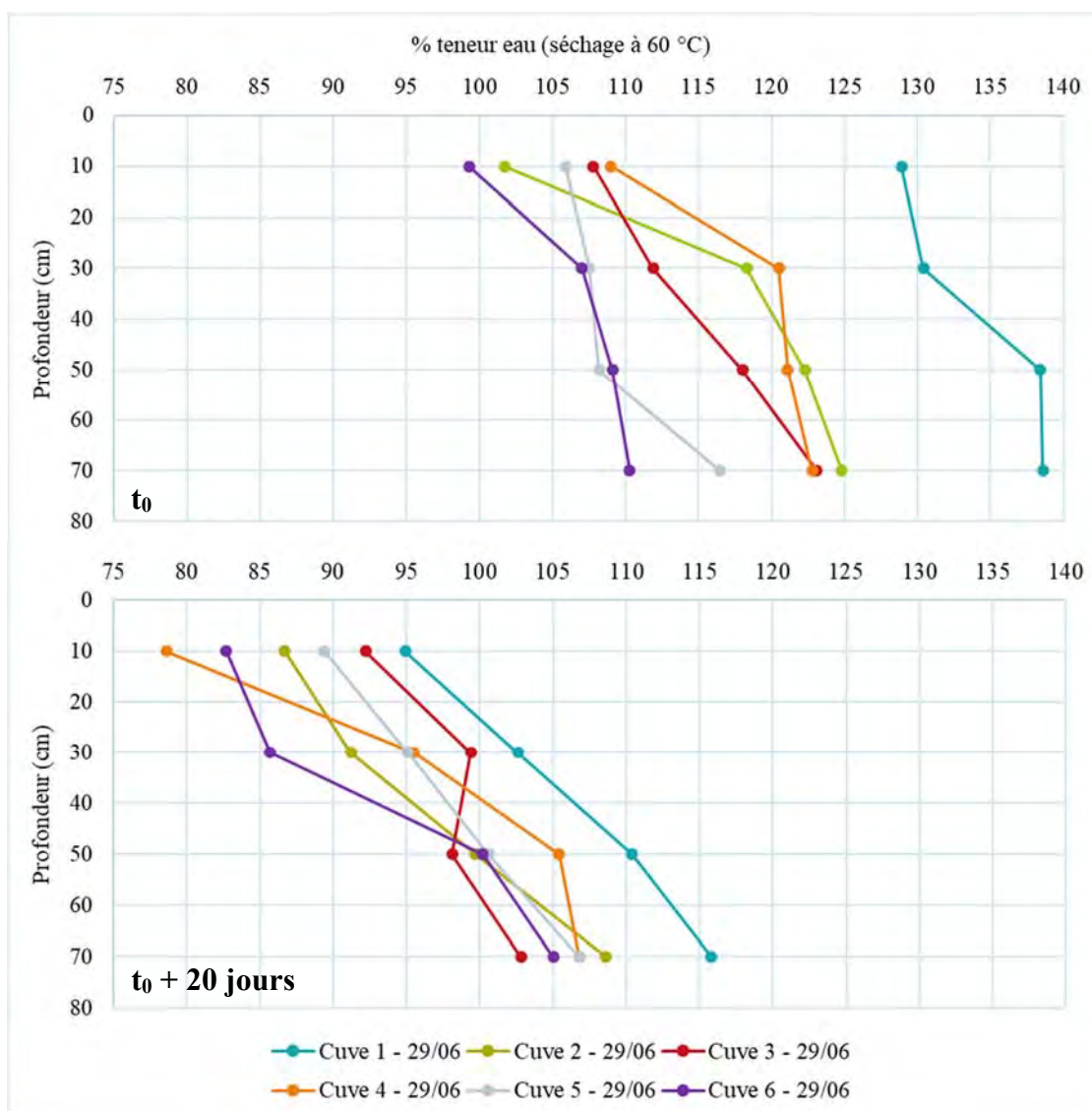


Figure 7. Evolution de la teneur en eau dans les cuves C1 à C6 entre t_0 et $t_0 + 20$ jours.

5.2 Une présence de contaminants partiellement traitée

Selon la littérature, la déshydratation naturelle « permet d'initier une phase naturelle de remédiation biologique, les bactéries contenues naturellement dans le sédiment vont, pour survivre et se développer, dégrader les polluants organiques présents, en particulier les hydrocarbures à chaînes courtes » (SEDITERRA, 2020). Dans les faits, aucun abattement n'a été observé. Pour obtenir un effet significatif, un temps de déshydratation plus important pourrait être proposé. Un co-compostage pourrait représenter une piste intéressante : ANTIZAR-LADISLAO *et al.* (2004) ont montré que le co-compostage représente une piste pour la bioremédiation de pollution aux hydrocarbures. Il a été

Thème 5 – Gestion durable des zones littorales et estuariennes

montré que le compostage des sols est bénéfique s'ils sont contaminés aux hydrocarbures aliphatiques à longues chaînes (C17-C50) (HADERLEIN, 2000).

L'ajout de chaux dans les boues a montré des résultats prometteurs, en contribuant à une diminution rapide de la teneur en eau et en limitant la contamination biologique, comme le confirme la littérature existante sur l'utilisation de la chaux dans des contextes similaires (BARTH *et al.*, 2009). Toujours selon la littérature, la chaux permet de garder le sol à des pH de 9 à 11, minimisant ainsi la solubilité des métaux qui s'y trouvent (GARCIA *et al.*, 2004 cité par SILITONGA, 2012). Néanmoins, aucun effet de la chaux, ni des végétaux n'a pu être observé sur la solubilité des métaux lourds.

Par ailleurs, des analyses complémentaires ont montré que le relargage d'effluents après ajout d'intrants végétaux présente une charge organique très sensiblement plus élevée lors du ressuyage tertiaire. Les effluents issus des pilotes ayant produit des effluents liquides présentent des concentrations en métaux lourds relativement élevées.

5.3 Des caractéristiques géotechniques qui limitent une valorisation en remblais

Des essais Proctor ont été réalisés. On constate que la teneur en eau optimale en vue d'un éventuel compactage des boues est très faible, proche de 35 %, très en deçà des valeurs atteintes après prétraitement et ressuyage dans les cuves C1 à C6. De plus, on constate à l'observation de la Figure 8 que le poids volumique sec du sédiment diminue extrêmement rapidement lors du passage d'une teneur en eau de 35 % à 39 %.

Cela confirme la très forte sensibilité de ce matériau à l'eau. La présence de chaux ne change pas cette propriété mécanique. En l'absence de fibres, seule une déshydratation massive jusqu'à atteindre l'Optimum Proctor est susceptible de garantir une résistance comparable aux matériaux de remblai. Dans ces conditions, les boues conservent néanmoins une forte sensibilité à l'eau qui limite leur usage.

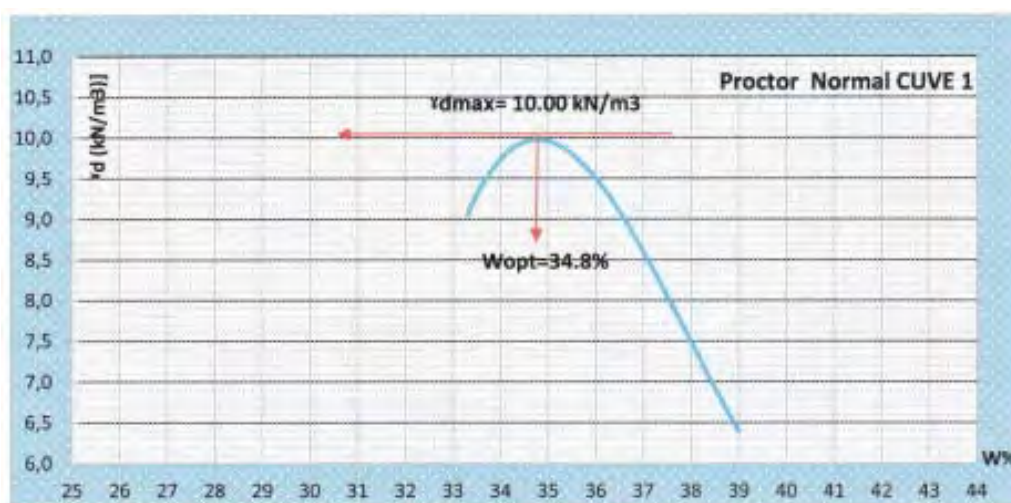


Figure 8. Courbe de l'optimum Proctor pour l'échantillon de boue issu de la cuve C1.

6. Discussion sur les limites méthodologiques de l'étude

6.1 Une forte variabilité des échantillons

Cette étude, tout en apportant des éclairages importants, se heurte à des limites méthodologiques. Nous nous sommes confrontés à une forte variabilité intrinsèque des échantillons. Celle-ci limite la possibilité de tirer des conclusions définitives, en particulier en ce qui concerne les contaminations (HAP, ETM, etc.).

6.2 Des enjeux sociaux à approfondir

Des procédés tels que la déshydratation des sédiments, nécessaire pour leur recyclage ou leur traitement par stabilisation/solidification, requièrent beaucoup d'espace et de temps (BOULLOSA ALLARIZ, 2018). Ces enjeux ont été pris en compte dans l'étude, mais n'ont pas pu être restitués ici. De plus, l'étude gagnerait à être complétée par une analyse sur la compétition d'usage de ces co-intrants, notamment des usages agricoles (en élevage) ou manufacturiers (fabrication de matelas). Il serait également utile de compléter ce travail en incluant une étude sur l'acceptabilité sociale des techniques.

6.2 Des enjeux environnementaux à intégrer dans une analyse systémique

Si la co-valorisation des boues et intrants s'inscrit dans une démarche d'économie circulaire, l'impact environnemental n'a pas été approfondi en tant que tel. Or, les liants utilisés dans ces techniques, comme la chaux, ont une empreinte carbone élevée, bien que ceux issus de sous-produits industriels soient moins impactants. Le dragage de canaux présente également des enjeux de préservation des écosystèmes, qui n'ont pas été étudiés ici.

7. Conclusion : Vers une meilleure prise en compte du contexte et des externalités

Notre étude a permis de montrer l'intérêt de l'utilisation de co-intrants notamment végétaux dans le traitement de boues de curage dans le contexte spécifique d'Antananarivo (Madagascar). Ces résultats ne sont pas nécessairement transposables à d'autres situations, en raison de la variabilité des boues et des intrants disponibles. Notre démarche encourage de réinterroger les moyens mis en œuvre dans chaque contexte particulier. Plutôt que de s'appuyer sur des solutions techniques préétablies, elle invite à construire des stratégies en partant des intrants locaux et des conditions spécifiques à chaque contexte. Ce changement d'approche implique une modification des modalités d'accompagnement, pour mieux répondre aux réalités et besoins locaux. Parmi les enjeux à prendre en charge, notons la prégnance d'un biais des acteurs en faveur des solutions technologiques, au détriment de solutions low-tech, incluant la déshydratation naturelle ou le compostage. Il est important de sensibiliser les parties prenantes de ne pas rejeter de principe ces dernières solutions, qui peuvent s'avérer intéressantes en fonction du contexte social, économique et écologique, et de s'appuyer sur des analyses systémiques.

8. Références bibliographiques

- ADAMS G.O., FUFUYIN P.T., OKORO S.E., Ehinomen I.(2015). *Bioremediation, biostimulation and bioaugmentation: A Review*, International Journal of Environmental Bioremediation & Biodegradation, Vol. 3, No. 1, pp. 28-39,
- ANTIZAR-LADISLAO B., LOPEZ-REAL J., BECK A. (2004). *Bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH)-contaminated waste using composting approaches*, Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 34(3), pp. 249–289. <https://doi.org/10.1080/10643380490434119>
- BARTH E., REPONEN T., SUCCOP P. (2009). *Evaluation of bioaerosol components, generation factors, and airborne transport associated with lime treatment of contaminated sediment*, Journal of the Air & Waste Management Association, 59, pp. 540–552. <https://doi.org/10.3155/1047-3289.59.5.540>
- BOULLOSA ALLARIZ B. (2018). *Déshydratation naturelle et mécanisée de sédiments : étude des processus mis en jeu et applications*. Thèse de doctorat, Université de Caen Normandie. <https://theses.hal.science/tel-02292209>
- FOURVEL G. (2018). *Valorisation agronomique des sédiments fins de retenues hydroélectriques en construction d'Anthroposols fertiles*,
- GARCIA M.A., CHIMENOS J.M., FERNANDEZ A.I., MIRAILLES L., SEGARRA M., ESPEILL F. (2004). Low-grade MgO used stabilize heavy metals in highly contaminated soils. *Chemosphere*, 56, 481-491.
- HADERLEIN (2000). *Potentiel de minéralisation des hydrocarbures aliphatiques et HAP par compostage d'un sol contaminé*. https://publications.polymtl.ca/8867/1/2000_haderlein.pdf
- LUKIC B. (2016). *Composting of organic waste for enhanced bioremediation of PAHs contaminated soils*. Thèse de doctorat, Université Paris-Est. <https://theses.hal.science/tel-01735701>
- MANAP N., VOULVOULIS N. (2015). *Environmental management for dredging sediments – The requirement of developing nations*, Journal of Environmental Management, 147, pp. 338–348. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.09.024>
- REKIK B., BOUTOUIL M. (2009). *Geotechnical properties of dredged marine sediments treated at high water/cement ratio*, Geo-Marine Letters, 29, pp. 171–179. <https://doi.org/10.1007/S00367-009-0134-X>
- SAMUEL P.R., DA S. *et al.* (2022). *Water hyacinth composting as a waste management strategy : a systematic review*, <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/252974>
- SEDITERRA (2020). *Lignes directrices pour le traitement durable des sédiments de dragage dans l'aire Marittimo*,
- SILITONGA E. (2012). *Valorisation des sédiments marins contaminés par solidification/stabilisation à base de liants hydrauliques et de fumée de silice*.