

RÉPUBLIQUE DU CAMEROUN

Paix – Travail – Patrie



DÉPARTEMENT DU GÉNIE DE
L'ENVIRONNEMENT

REPUBLIC OF CAMEROON

Peace – Work – Fatherland



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

DEPARTMENT OF CIVIL,
ARCHITECTURAL AND
ENVIRONMENTAL ENGINEERING

CARACTÉRISATION ET ÉTUDE DES POSSIBILITÉS DE
VALORISATION DES SÉDIMENTS ISSUS DU DRAGAGE DU
CHENAL D'ACCÈS DU PORT DE DOUALA-BONABÉRI

*Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de
Master in Engineering (MEng) option Génie de l'Environnement*

Rédigé par :

ABATE CRISSY MARGUERITE

Matricule : 15TP20919

Supervisé par :

Prof. TALLA André

Ingénieur/PhD

Enseignant-chercheur

Co-supervisé par :

Prof. MARIA CRISTINA LAVAGNOLO

University of Padova

Année Académique :

2019/2020



**À MES CHERS PARENTS : VOICI UN FRUIT
INDÉNIABLE DE VOTRE AMOUR, VOS
SACRIFICES ET VOS PRIÈRES**

JE VOUS DIS MERCI POUR TOUT !



REMERCIEMENTS

Toute ma reconnaissance va premièrement à l'Éternel mon Dieu, qui chaque jour m'accorde vie et santé, trésors sans lesquels ce travail n'aurait pas pu être réalisé.

Je remercie particulièrement mon encadreur principal et chef de département, **Prof. TALLA André** pour son dévouement et son abnégation sans faille tout au long de ma période de formation, pour sa bonne disposition dans l'encadrement de ce travail, la pertinence de ses remarques et sa bienveillance.

Je remercie également mon co-encadreur et chef de département de la filière du Génie de l'Environnement à l'Université de Padoue, **Prof. Maria Cristina LAVAGNOLO** pour sa disponibilité, son sens du détail et son éthique de travail inspirants.

Je remercie le Directeur de l'Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics (ENSTP), **Prof. NKENG George ELAMBO** ainsi que tous les membres de l'administration de l'ENSTP et de l'Université de Padoue en Italie, pour la qualité de la formation dispensée.

Je remercie le **Prof. ESOH ELAME** qui nous donne l'opportunité de bénéficier d'une formation internationale à travers le partenariat avec l'Université de Padoue.

Je remercie particulièrement le Directeur Général du Port Autonome de Douala, **M. Cyrus NGO'O** pour m'avoir accordé un stage dans cette prestigieuse structure. Je remercie également le personnel de la Régie Déléguée du Dragage et de la Direction du Dragages et de la Logistique Maritime au Port Autonome de Douala, notamment **M. Idriss BEYE**, Directeur Adjoint de la RDD, **M. EVINA Steve Arnold**, **M. TSIAGADIGUI Georges** et **M. ETCHIKE Rodrigue**, pour leur accueil chaleureux et leurs contributions multiformes dans la mise en œuvre de ce travail.

Je remercie mes collègues ingénieurs **TOUKO Lyse Gabrielle**, **NSATA Simone Ange** et **CHOUNNA Gergino** pour avoir accepté de relire ce travail.

Enfin, je suis reconnaissante envers tous ceux qui m'ont encouragé d'une manière ou d'une autre. Je pense à ma sœur Donna ; mes frères Stephen et Junior ; ma précieuse Léora, mes grands-parents, oncles, tantes et cousins, sans oublier Léonid, Alice, Éliane, Sophie, Christelle, Mélodie, Marie-Thérèse, Sonia, Didorelle, Murielle et toute la communauté Femmes de Foi.

À tous ces intervenants, je présente mon respect et ma gratitude.

RÉSUMÉ

Le chenal d'accès du Port de Douala-Bonabéri est régulièrement soumis à des opérations de dragage pour maintenir un tirant d'eau élevé pour la circulation sécurisée des navires qui entrent et sortent du port. Ces opérations génèrent des quantités considérables de sédiments—des ressources en matériaux potentiels—qui sont à ce jour exclusivement gérés par immersion. Ainsi, chaque année, des quantités considérables de ressources potentielles sont perdues à la mer. Malgré la volonté du Port Autonome de gérer les opérations de dragage de manière efficace, il n'existe à ce jour aucune étude scientifique pouvant permettre la valorisation effective desdits sédiments. Ainsi, l'objectif principal de ce travail était de déterminer les caractéristiques des sédiments issus du dragage du chenal d'accès du port de Douala en vue de l'étude des possibilités de leur valorisation. Spécifiquement, il s'agissait de déterminer la nature et les caractéristiques chimiques des sédiments, de proposer de débouchés de valorisation en fonction des informations obtenues et de dimensionner une filière de décantation, un prétraitement nécessaire pour la valorisation. Les analyses effectuées sur l'échantillon prélevé ont révélé la dominance de la fraction argileuse à 64,5 % suivie d'une fraction sableuse à 31,8 %, puis 2,4 % de graviers et 0,4 % de limon. Les analyses ont également révélé une forte conductivité, un pH relativement neutre, une fraction intéressante de matière sèche s'élevant à 74,4 % et une fraction de matière organique s'élevant à 10,06 %. Les sédiments sont pauvres en éléments nutritifs, l'azote et le phosphore, à 0,67 mg/l et 2,2 mg/l respectivement. Ils présentent plutôt une teneur relativement supérieure en chlorures et sulfates, à 34 mg/l et 95 mg/l respectivement. Dans l'ensemble, les sédiments peuvent être considérés comme de bonne qualité car les teneurs en substances toxiques et micropolluants organiques sont de loin inférieurs aux seuils établis par la réglementation internationale. Trois débouchés principaux pour la valorisation ont été proposés pour répondre à des besoins d'ordre spécifique. Trois autres débouchés ont été proposés pour répondre à des besoins d'ordre général. Enfin, ont été retenus pour la filière de décantation expérimentale : un volume entrant de 10 000 m³ de sédiments, deux bassins de décantation d'une surface totale de 3 300 m², deux bassins de rejet d'une surface totale de 900 m², une vitesse de sédimentation de 0,15 cm/s et un temps de sédimentation de 33 minutes pour des particules de diamètre supérieur ou égal à 15 µm.

Mots clés : *sédiments de dragage, valorisation, vases, boues argileuses, port autonome de Douala*

ABSTRACT

Dredging in the access channel to the seaport of Douala-Bonabéri is regularly required to maintain a high draft for the safe circulation of ships. This operation generates significant quantities of material or sediment, potential material resource that is unfortunately lost through systematic dumping. Despite the Port Authority's willingness to manage dredging operations efficiently and sustainably, there exist no scientific study to date that would allow for the effective valorization of said sediments. The main objective of this work was to determine the characteristics of the sediments dredged from the access channel of the Douala seaport in order to study the possibilities of their valorization. This was done through determining the nature and the chemical characteristics of the sediments, proposing reuse outlets according to the obtained characteristics and dimensioning a settling unit as a pretreatment for the sediments. The analyses carried out on the sample taken revealed a majority of clay fraction at 64.5%, followed by 31.8 % sandy fraction, 2.4% gravel and 0.4% silt. The analyses also revealed high conductivity, relatively neutral pH, an interesting dry matter fraction of 74.4% and an organic matter fraction of 10.06%. The sediments are poor in nutrient elements, nitrogen and phosphorus, 0.67 mg/l and 2.2 mg/l respectively. Instead, they are relatively rich in chlorides and sulfates, 34 mg/l and 95 mg/l respectively. Overall, the sediments can be considered good quality, as the levels of toxic substances and organic micropollutants are well below the thresholds established by international regulations. Three main outlets for recovery have been proposed to meet specific needs. Three other outlets have been proposed to meet general needs. Finally, the following were retained for the experimental settling unit: an initial volume of 10,000 m³ sediment, two settling basins with a total surface area of 3,300 m², two discharge basins with a total surface area of 900 m², a sedimentation speed of 0.15 cm/s and a settling period of 33 minutes for particles with a diameter greater than or equal to 15 µm.

Key words: *dredged sediments, dredged materials, dredging, valorization, port authority of Douala*

SOMMAIRE

DÉDICACE	i
REMERCIEMENTS	ii
RÉSUMÉ	iii
ABSTRACT	iv
SOMMAIRE	v
LISTE DES ABRÉVIATIONS	viii
LISTE DES TABLEAUX	ix
LISTE DES FIGURES	x
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE 1 : ENVIRONNEMENT DE L'ÉTUDE ET REVUE LITTÉRAIRE	4
1.1. ENVIRONNEMENT DE L'ÉTUDE	5
1.1.1. Situation géographique	5
1.1.2. Climat, hydrologie et relief.....	6
1.1.3. Végétation.....	6
1.1.4. Environnement socio-économique.....	6
1.1.5. Assainissement.....	7
1.1.6. Présentation du site de l'étude	8
1.2. REVUE LITTÉRAIRE	9
1.2.1. Dragage.....	9
1.2.2. Sédiments de dragage	10
1.2.3. Origine des sédiments	10
1.2.4. Nature et qualité des sédiments.....	11
1.2.5. Techniques de dragage.....	13
1.2.6. Types de dragage	17

1.2.7.	Gestion des sédiments dragués	17
1.2.8.	Problématique des sédiments contaminés.....	20
1.2.9.	Traitement des sédiments contaminés.....	21
1.2.10.	Valorisation des sédiments	24
1.2.11.	Déshydratation des sédiments.....	30
CHAPITRE 2 : ÉTAT DES LIEUX DU DRAGAGE AU PORT DE DOUALA-BONABÉRI		42
2.1.	ORIGINE ET NATURE DES SÉDIMENTS.....	43
2.2.	CADRE RÉGLEMENTAIRE DE LA GESTION DES SÉDIMENTS	44
2.2.1.	Conventions internationales.....	44
2.2.2.	Règlementation nationale.....	45
2.3.	DÉROULEMENT DU DRAGAGE	46
2.4.	ZONES CONCERNÉES PAR LE DRAGAGE	47
2.5.	ÉQUIPEMENTS ET MATÉRIELS DE DRAGAGE	47
2.6.	EXTRACTION DES SÉDIMENTS DANS LE CHENAL	48
2.7.	GESTION DES SÉDIMENTS ISSUS DU CHENAL.....	52
CHAPITRE 3 : APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE.....		54
3.1.	CHOIX DES PARAMÈTRES	55
3.2.	ÉCHANTILLONAGE DES SÉDIMENTS.....	56
3.2.1.	Matériel	56
3.2.2.	Méthode	57
3.3.	ANALYSES EN LABORATOIRE.....	58
3.3.1.	Analyse granulométrique	58
3.3.2.	Analyses physico-chimiques.....	61
3.4.	CHOIX DES MOYENS DE VALORISATION.....	64
3.5.	DIMENSIONNEMENT D'UNE FILIERE DE DÉCANTATION POUR LES SÉDIMENTS	65

3.5.1. Principe de fonctionnement	65
3.5.2. Bases de dimensionnement	67
CHAPITRE 4 : RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	69
4.1. RÉSULTATS DES ANALYSES SUR LES SÉDIMENTS	70
4.1.1. Analyse granulométrique par tamisage.....	70
4.1.2. Analyse granulométrique par sédimentométrie	70
4.1.3. Analyses physico-chimiques.....	72
4.2. PROPOSITIONS DE VALORISATION DES SÉDIMENTS.....	75
4.2.1. Construction d'un centre d'enfouissement technique avec sédiments intégrés.....	75
4.2.2. Fabrication de pavés à base de plastiques recyclés et sédiments.....	78
4.2.3. Construction de digues côtières à base de sédiments.....	82
4.2.4. Autres applications.....	83
4.3. DIMENSIONNEMENT DE LA FILIÈRE DE DÉCANTATION	84
CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES.....	88
LISTE DES RÉFÉRENCES	92
ANNEXES.....	99

LISTE DES ABRÉVIATIONS

DDLM : Direction du Dragage et de la Logistique Maritime

HAP : Hydrocarbure aromatique polycyclique

ISO : International Organization for Standardization

MO : Matière Organique

MS : Matière Sèche

NF : Norme Française

PAD : Port Autonome de Douala

PCB : Polychlorobiphényle

PK : Point kilométrique

RDD : Régie Déléguée du Dragage

SI : Système International (d'unités)

w : Water content (teneur en eau)

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Classement granulométrique des sédiments	12
Tableau 2 : Les contaminants majeurs des sédiments, leur source et leur toxicité (Bekari et al., 2008).....	20
Tableau 3 : Quelques méthodes de traitement des sédiments par catégorie	23
Tableau 4 : Applications de valorisation en filière béton	27
Tableau 5 : Récapitulatif des paramètres fondamentaux centrifugeuse.....	34
Tableau 6 : Récapitulatif des paramètres fondamentaux du décanteur dynamique Nemeau®	37
Tableau 7 : Récapitulatif des paramètres fondamentaux de la machine Volute	38
Tableau 8 : Récapitulatif des techniques de séchage naturel et mécanique.....	39
Tableau 9 : Paramètres retenus pour l'analyse qualitative des sédiments.....	55
Tableau 10 : Critères de choix des méthodes de valorisation des sédiments.....	64
Tableau 11 : Résultats de l'essai par tamisage des sédiments.....	70
Tableau 12 : Résultats essai sédimentométrique	71
Tableau 13 : Répartition générale des sédiments analysés	72
Tableau 14 : Résultats analyses physico-chimiques	73
Tableau 15 : Résultats paramètres chimiques en mg/kg MS	74
Tableau 16 : Types de thermoplastiques et leurs applications.....	80
Tableau 17 : Récapitulatif des propositions de valorisation des sédiments.....	84
Tableau 18 : Données d'entrée	84
Tableau 19 : Données de dimensionnement de la filière de décantation	85

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation de l'estuaire du Wouri.....	5
Figure 2 : Niveau de pollution de l'estuaire du Wouri	7
Figure 3 : Maquette du port de Douala	9
Figure 4 : Origine des sédiments dans l'environnement aquatique	10
Figure 5 : Schéma de la constitution des sédiments portuaires.....	11
Figure 6 : Diagramme triangulaire de classement des sédiments selon leur texture	12
Figure 7 : Dragage à benne preneuse	14
Figure 8 : Dragage à pelle.....	15
Figure 9 : Schéma drague à godet	15
Figure 10 : Drague aspiratrice en marche	16
Figure 11 : Drague aspiratrice à désagrégateur.....	16
Figure 12 : Rejet de surface ou rainbowing	18
Figure 13 : Rejet par conduite.....	18
Figure 14 : Rejet par clapage	19
Figure 15 : Rejet par barges	19
Figure 16 : Schéma montrant les différentes parties d'une route	26
Figure 17 : Plan de coupe affichant les couches de protection dans un casier de stockage de déchets.....	28
Figure 18 : Sac en propylène tissé pour le confinement des sédiments	29
Figure 19 : Vue extérieure du filtre presse à plateaux.....	35
Figure 20 : Exemple de fiche d'instruction de dragage	47
Figure 21 : La drague MV Vigilance	48
Figure 22 : La drague Mont Mandara	48
Figure 23 : Bouche d'aspiration de l'élinde	49
Figure 24 : Tube densité/vélocité.....	49
Figure 25 : Les informations percevables sur le Tableau de bord	50
Figure 26 : Aperçu général du Tableau de bord.....	50
Figure 27 : Refoulement des sédiments dans le puits	51
Figure 28 : Extrait d'une feuille de chargement de la drague Mont Mandara.....	52
Figure 29 : Seau noir 10 L.....	56
Figure 30 : Seau blanc transparent 10 L.....	56
Figure 31 : Puits rempli des sédiments	57

Figure 32 : Prélèvement des sédiments dans le puits à l'aide du seau.....	58
Figure 33 : Déroulement de l'essai par sédimentation	60
Figure 34 : Spectrophotomètre BIOBASE V1600.....	62
Figure 35 : Spectrophotomètre HACH DR1900.....	63
Figure 36 : Schéma montrant le fonctionnement d'un bassin de décantation	66
Figure 37 : Courbe granulométrique complète des sédiments analysés	72
Figure 38 : Coupe transversale simplifiée d'un centre d'enfouissement technique avec drainage du lixiviat et captage du biogaz.....	77
Figure 39 : Des déchets plastiques sur le fleuve Wouri	78
Figure 40 : Une route réalisée en pavés de plastiques recyclés et sables.....	81
Figure 41 : Des pavés en plastiques recyclés et sables	81
Figure 42 : Les différents composants potentiels d'une digue	83
Figure 43 : Vue globale bassin décantation et bassin de rejet.....	86
Figure 44 : Coupe longitudinale des bassins.....	87
Figure 45 : Vue de haut des bassins	87

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La voie maritime est depuis plusieurs siècles l'un des moyens de choix pour le transport des marchandises. Les navires suivent des itinéraires précis : des routes ou chenaux maritimes, pour atteindre leurs ports de destination. Selon leur localisation, on distingue : les ports maritimes (situés sur la cote d'une mer ou d'un océan), les ports fluviaux (situés sur le bord d'un fleuve ou d'une rivière) et les ports d'estuaire (situés dans un estuaire—zone de mélange entre les eaux douces et les eaux marines à l'embouchure d'un fleuve lorsqu'il se jette à la mer).

Les estuaires ont naturellement tendance à s'ensaver suite au dépôt et à l'accumulation dans l'estuaire des particules transportées par les eaux des fleuves et de la mer qui se rencontrent. Ces dépôts sédimentaires peuvent atteindre des hauteurs gênantes pour la circulation des navires. Le dragage est l'opération qui permet le curage des canaux estuariens pour soit maintenir une profondeur suffisante pour la circulation des navires, soit approfondir les canaux, soit encore pour éviter la dispersion d'une éventuelle pollution. Cette opération indispensable en milieu estuarien est réalisée à l'aide d'engins spécialisés appelés dragues qui, selon leur moyen de fonctionnement, aspirent les sédiments ou excavent le sol du plan d'eau pour ensuite les rejeter en eaux profondes ou les déposer à terre, selon le mode de gestion préalablement défini.

Chaque année, des millions de mètres cube de sédiments sont dragués du fond des plans d'eau dans différents ports du monde : les trois ports d'estuaire de France (Rouen, Nantes-Saint-Nazaire et Bordeaux) font état d'un volume moyen annuel d'environ 15 millions de tonnes (Foucher, 2005). Au port de Douala-Bonabéri, dans l'estuaire du Wouri au Cameroun et profond d'à peine 7 m, le dragage du chenal et des plans d'eau génère en moyenne 4,5 Mm³ de sédiments chaque année (Port Autonome de Douala – PAD, 2019). En comparant les volumes moyens de sédiments dragués au port entre l'année 2000 et 2015, on réalise qu'au moins 80 % de la totalité des sédiments dragués chaque année provient de l'entretien du chenal (PAD, 2019). Ces sédiments proviendraient de sources endogènes à travers le dépôt des particules en suspension, et de sources exogènes à travers l'érosion des sols ou des roches, l'apport en sédiments par les navires en circulation ou encore les rejets industriels. Aussi, ils peuvent être constitués de sables fins, de limons, de vases et d'argiles, en des proportions variables.

S'il est indispensable de recourir au dragage dans les ports d'estuaire, il est encore plus indispensable de prévoir un moyen efficace de gérer les quantités considérables de sédiments, matériaux et autre résidus générés par cette activité. Jusqu'aujourd'hui, les sédiments dragués

au port de Douala subissent deux principaux modes de gestion : la gestion à mer (par immersion) et la gestion à terre (par mise en dépôt/stockage). La gestion à mer concerne principalement les sédiments issus de l'entretien du chenal, tandis que la gestion à terre concerne principalement les sédiments issus du dragage des plans d'eau. Par conséquent, au moins 80 % des 4,5 Mm³ en moyenne dragués chaque année sont remis à la mer.

Trois observations attirent l'attention. Premièrement, la qualité des sédiments immergés et leur impact sur l'espace maritime ne sont pas maîtrisés. Ensuite, une quantité considérable de sédiments qui représentent une ressource matérielle potentielle est systématiquement perdue à chaque cycle de dragage. Enfin, la pratique régulière du dragage constitue un lourd investissement à raison d'environ 7 milliards par an depuis l'autonomisation de l'activité par le Port Autonome de Douala (PAD, 2019). La gestion à mer des sédiments rend nulle les chances de tirer un profit rentable de l'activité du dragage. Or, l'un des moyens les plus évidents de rendre cette activité rentable est la valorisation des sédiments dragués, une problématique actuelle dans le milieu portuaire. Malheureusement, il n'existe pas encore une étude scientifique pouvant permettre la valorisation efficace des sédiments.

La présente étude tente de répondre à la question : « **existe-t-il, dans une démarche de valorisation, des alternatives à la gestion à mer des sédiments dragués dans le chenal d'accès du port de Douala ?** »

La valorisation des sédiments s'inscrit dans une perspective d'économie circulaire et représente un défi d'actualité pour les acteurs du secteur portuaire. Selon le Centre de Développement des Éco-entreprises (CD2E, 2021), l'émergence et le développement de filières de valorisation des sédiments permet de répondre à de nombreux enjeux : des enjeux économiques, environnementaux et sociaux. En ce qui concerne les enjeux socio-économiques, la valorisation des sédiments permet de renforcer la compétitivité des ports maritimes et fluviaux par la diminution du coût de traitement des sédiments, de développer des filières industrielles innovantes de gestion et de valorisation des sédiments, avec création d'emploi (via les plateformes de collecte et de traitement, installations de production de nouveaux produits/matériaux), et d'anticiper les futures pénuries de matières premières en travaux publics et travaux maritimes : sables, matériaux issus de carrières en fin d'exploitation, etc.

En ce qui concerne les enjeux environnementaux, le dragage et la valorisation des sédiments permettent de renforcer la biodiversité par l'amélioration de la qualité des milieux naturels aquatiques et de préserver les ressources naturelles par la production et l'utilisation de matériaux alternatifs.

Il est important de noter qu'il n'existe pas de formule universelle pour la valorisation des sédiments de dragage car le moyen de valorisation adéquat est fonction des **propriétés du sédiment** à valoriser et du **besoin contextuel** auquel la valorisation doit répondre.

Par ailleurs, si la valorisation des sédiments de dragage permet de répondre à de nombreux enjeux, elle est souvent heurtée à de nombreux obstacles liés à la gestion des sédiments (la compétence technique, le coût économique, la réglementation) et à la nature des sédiments : la forte teneur en eau pouvant varier entre 50 et 300 % (Dia, 2013). La gestion de ce dernier paramètre est donc indispensable dans une démarche de valorisation.

L'objectif principal de ce travail est de **déterminer les caractéristiques des sédiments issus du dragage du chenal d'accès du port de Douala en vue de l'étude des possibilités de leur valorisation**. Plus spécifiquement, il s'agira de :

- Déterminer la nature et évaluer la qualité ou le niveau de contamination des sédiments dans le chenal ;
- Proposer des débouchés de valorisation pour les sédiments dragués ;
- Dimensionner une filière de décantation pour les sédiments en vue de leur valorisation.

Ce travail est organisé en quatre chapitres. Le chapitre 1 présente le cadre géographique et socio-économique de l'étude et une revue littéraire qui fournit des connaissances générales sur le dragage et les sédiments générés. Le chapitre 2 dresse l'état des lieux des opérations du dragage du chenal d'accès au port de Douala, de la planification des campagnes de dragage à l'extraction des sédiments en passant par le matériel utilisé. L'approche méthodologique adoptée pour la réalisation des analyses et des dimensionnements est présentée au chapitre 3. Enfin, le chapitre 4 présente les résultats des analyses réalisées, les propositions des débouchés de valorisation et les résultats des dimensionnements.

La Conclusion Générale présente une synthèse des travaux effectués et ouvre des perspectives qui permettront de poursuivre la recherche dans le domaine captivant qu'est la valorisation des sédiments de dragage à Douala en particulier, et au Cameroun en général.



CHAPITRE 1

**ENVIRONNEMENT DE L'ÉTUDE ET
REVUE LITTÉRAIRE**



Introduction

Ce premier chapitre apporte des connaissances générales sur l'environnement dans lequel se situe l'étude et sur les questions relatives à la gestion des sédiments issus du dragage. Il est divisé en deux parties : la première partie décrit l'environnement géographique, socioéconomique et administratif du site concerné par l'étude, tandis que la deuxième partie présente une revue littéraire sur le dragage.

1.1. ENVIRONNEMENT DE L'ÉTUDE

1.1.1. Situation géographique

La présente étude trouve son cadre dans l'estuaire du Wouri, dans la région du Littoral au Cameroun. L'estuaire du Wouri se trouve à 4°0'1" de latitude Nord et 9°37'15" de longitude Est. Il s'étend sur une superficie de 1 200 km². Il est constitué d'une vaste zone humide sur 30 km de longueur et presque 30 km de largeur. L'estuaire du Wouri, illustrée par la Figure 1, fait partie intégrante du bassin versant du Wouri qui s'étale sur 11 700 km² (Ndongo et al., 2015).

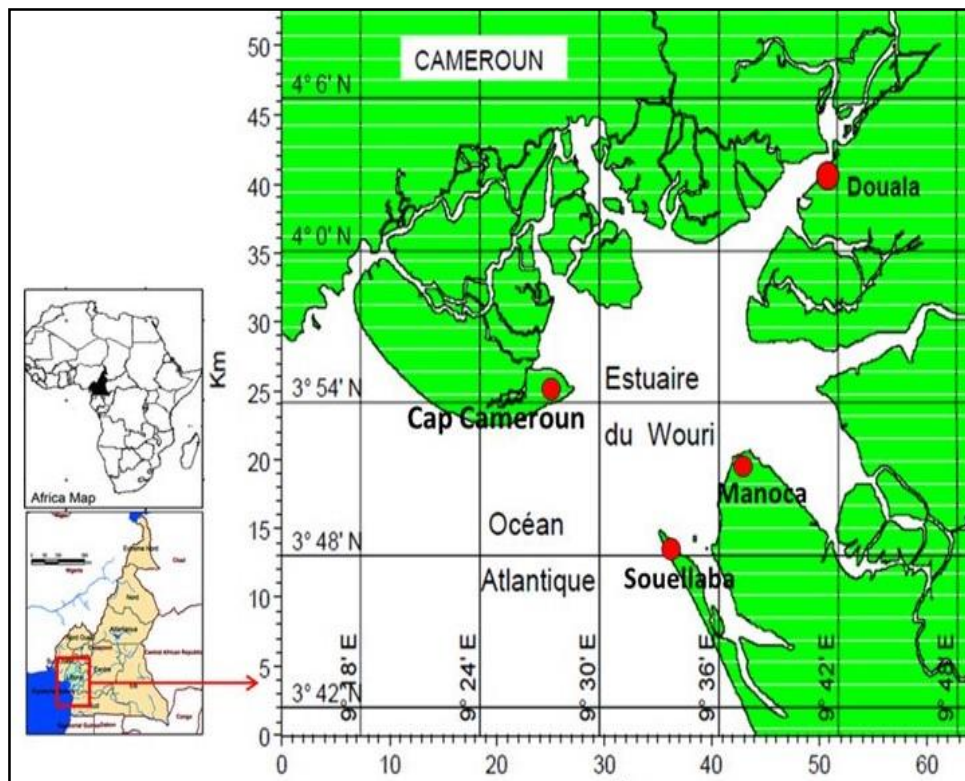


Figure 1 : Localisation de l'estuaire du Wouri (Refmar, 2019)

1.1.2. Climat, hydrologie et relief

L'estuaire du Wouri a un climat de type équatorial côtier. Il connaît deux saisons sèches entre les mois d'Octobre et de Mai, entrecoupés par deux saisons de pluies. La température moyenne dans cette zone est de 26,4 °C et la pluviométrie est globalement supérieure à 3 500 mm par an, avec des pics en Juillet et en Août. L'humidité de l'air y est constamment élevée et va de 80 % en saison sèche à 99 % en saison de pluies (Ndongo et al., 2015).

Limité au Sud par la pointe de Souellaba, et au Nord par le cap Cameroun, l'estuaire est drainé par trois fleuves côtiers : le Wouri, la Dibamba et le Mungo. La fluctuation de la marée génère un flux d'eau de 222,8 km³/jour vers le continent, qui favorise le rechargement rapide des eaux de la nappe phréatique (Ndongo et al., 2015). Une salinité de surface de 0,4‰ est commune autour de cette zone le long de l'année (Hughes, 1992).

Le relief est formé d'une succession de plaines sédimentaires et comporte trois sous-groupes de sols : ferrallitiques rouges, ferrallitiques jaunes et limoneux, ainsi que des sols hydromorphes dans les zones inondables (Ndongo et al., 2015).

1.1.3. Végétation

La végétation autour de l'estuaire du Wouri est essentiellement constituée de forêt de mangrove. Il y a environ 188 000 ha de forêt de mangroves de 20 km de profondeur sur la côte-nord et s'étend sur 35 km en amont de l'estuaire. La mangrove à *Rhizophora racemosa* représente plus de 90% des mangroves au Cameroun. Dans l'estuaire du Wouri, elle atteint jusqu'à 40 m de hauteur. La *Nypa fructicans*, une espèce exotique introduite de l'Asie du Sud-Est, s'est rapidement propagée dans l'estuaire (MINEPDED-RCM, 2017).

1.1.4. Environnement socio-économique

Le département du Wouri compte une population estimée en 2015 à 3,4 millions d'habitants (Wikipédia, 2021). Son chef-lieu se trouve à Douala, capitale économique du Cameroun. La ville de Douala est reconnue pour être le principal centre des affaires du pays. Elle abrite à elle seule 44 % des entreprises modernes au Cameroun contre 35,3 % à Yaoundé, la capitale du pays (Josy, 2021). La ville de Douala compte deux grandes surfaces allouées aux activités industrielles : la zone industrielle Douala-Bassa (ZIBA) et la zone industrielle Douala-Bonabéri (ZIBO). La ZIBA a une superficie de 150 ha et est située dans l'arrondissement de Douala III (Magzi, 2021). La ZIBO, quant à elle, a une superficie de 192 ha et s'étale le long des berges du Wouri (Magzi, 2021). Ces zones industrielles offrent des emplacements à des structures exerçant dans bon nombre de secteurs tels que l'aciérie, l'agro-alimentaire, les

brasseries, la cimenterie, la métallurgie, les plastiques, la raffinerie, les cosmétiques, la pharmaceutique, le BTP, les textiles et le bois. On retrouve également, sur le fleuve Wouri, des activités halieutiques telles que la pêche industrielle et artisanale) (Magzi, 2021). La présence d'un fleuve qui se jette sur la mer attire les industries et leur permet d'économiser sur les frais d'importation et exportation des matières premières et marchandises.

1.1.5. Assainissement

L'estuaire du Wouri est formé par la confluence des fleuves Wouri, Mungo et Dibamba. Ainsi, on n'y trouve pas seulement des polluants locaux mais également des polluants provenant des régions environnantes drainées par les fleuves susmentionnés. Comme l'illustre la Figure 2, la qualité de l'eau dans l'estuaire varie selon qu'on soit en aval ou en amont. Elle est plus mauvaise près de rives ; cela témoigne de la présence de points de déversement des eaux (zones rouges). Lorsqu'on s'éloigne des rives, la qualité de l'eau va de mauvaise à modérée (zones jaunes et vertes) suivant le phénomène de diffusion.

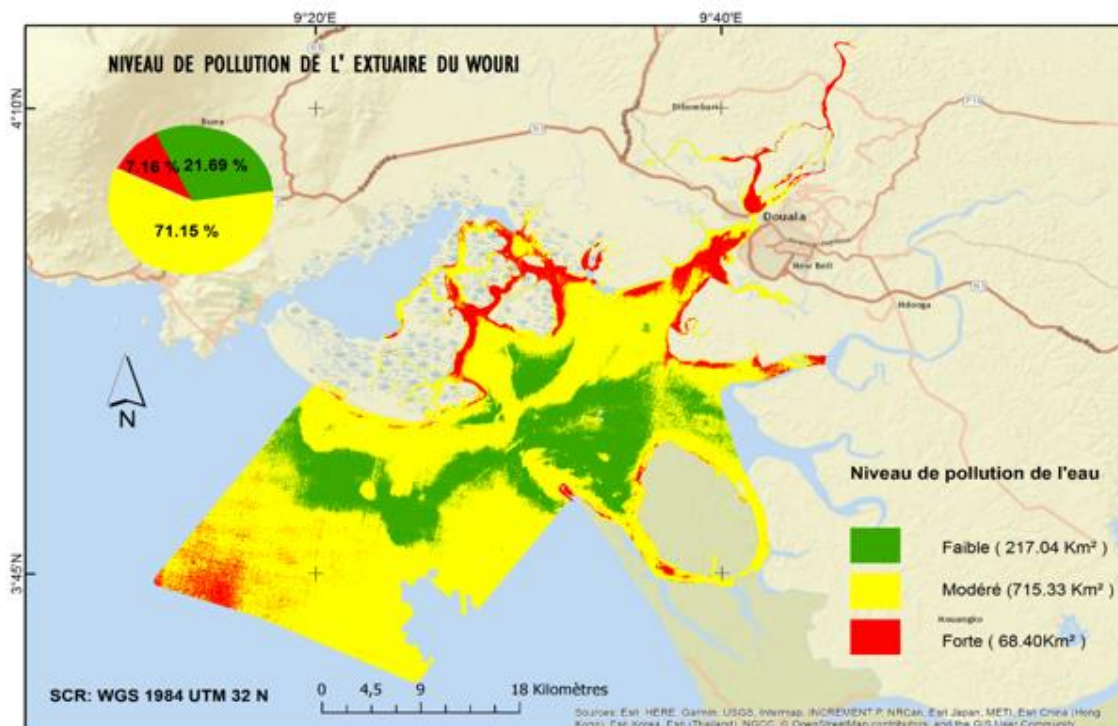


Figure 2 : Niveau de pollution de l'estuaire du Wouri (Lakdjolbe, 2018)

1.1.6. Présentation du site de l'étude

Le port d'estuaire de Douala-Bonabéri est le premier port en activité au Cameroun. C'est un port fluvial situé dans l'estuaire du Wouri au cœur du golfe de Guinée. Le port de Douala est un port de commerce et de pêche. Le port de Douala assure près de 95% du trafic portuaire national. Il se positionne ainsi comme le principal port d'Afrique centrale et dessert les pays limitrophes enclavés tels que le Tchad, la République centrafricaine et le nord du Congo (Logistique Conseil, 2007).

1.1.6.1. Administration du port de Douala

La gestion de la plateforme portuaire de Douala est assurée par le Port Autonome de Douala (PAD), une société à capital public instituée par décret N°99/130 du 15 juin 1999 portant création du PAD. Son siège social est situé à Douala.

Le PAD est placé sous la tutelle technique du Ministère en charge des affaires portuaires et sous la tutelle financière du Ministère en charge des finances. Il est administré par deux organes : le Conseil d'Administration et la Direction Générale.

Le terminal à conteneur est l'une des infrastructures les plus importantes du port de Douala. Il est actuellement géré par la Régie du Terminal à Conteneur (RTC) créée par résolution N°0685/19/CA/PAD du 06 décembre 2019, à la fin du contrat de l'ancien concessionnaire Douala International Terminal (DIT), une filiale du consortium Bolloré-APMT.

1.1.6.2. Caractéristiques du port de Douala

Le port de Douala dont une maquette est présentée dans la Figure 3, s'étend sur une superficie de 400 ha. Il a un tirant d'eau de 7 m amplifié par un marnage de 2 m, et a une capacité annuelle de trafic de 7 millions de tonnes (Logistique Conseil, 2007). Il comporte 26 quais d'accostage sur 5,5 km de long, 7 terminaux spécialisés, 15 entrepôts, 65 ha de terre-pleins, 25 km de voies ferrées et 20 km de routes bitumées (Logistique Conseil, 2007).

Le chenal d'accès au port est peu profond (7 m) et long de 50 km, est divisé en deux parties : la partie intérieure (25 km de long et 150 m de large) et la partie extérieure (25 km de long et 250 m de large). La partie intérieure du chenal part de la bouée de base du port jusqu'à la ligne naturelle séparant l'eau du fleuve et l'eau de la mer. Cette partie du chenal est soumise à un phénomène régulier de sédimentation qui impose un dragage permanent pour garder la côte de 7 m, à laquelle s'ajoutent 2 m de marnage. La partie extérieure du chenal part de la ligne

et s'ouvre sur la mer. Il y a une ligne naturelle qui sépare l'eau du fleuve de l'eau de la mer. La profondeur du chenal après cette séparation naturelle avoisine les 8,5 m.

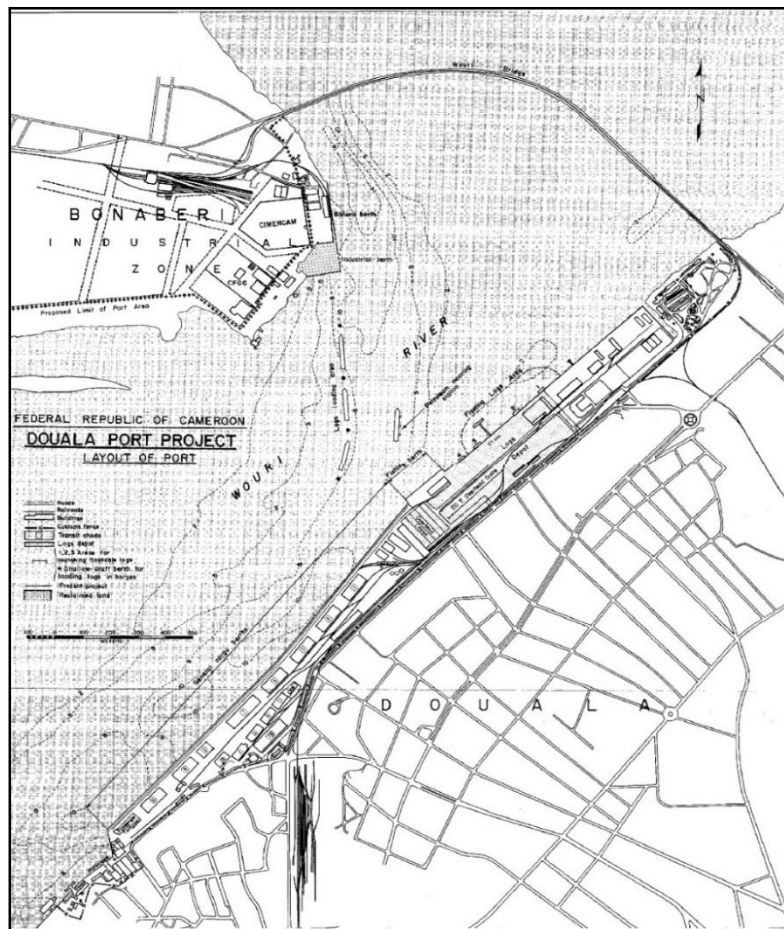


Figure 3 : Maquette du port de Douala (Osidimbea, 2021)

1.2. REVUE LITTÉRAIRE

1.2.1. Dragage

Le dragage est une activité d'excavation et une opération habituellement effectuée au moins en partie sous l'eau, dans les mers peu profondes ou des zones d'eau douce, dans le but de ramasser des sédiments du fond pour les jeter dans un endroit différent. Cette technique est souvent utilisée pour garder les voies navigables en ôtant une couche du lit de la rivière (Aquaportail, 2020).

Les sédiments et débris s'accumulent sur les plans d'eau par le processus naturel de sédimentation et peuvent atteindre des hauteurs gênantes pour les bateaux et navires.

1.2.2. Sédiments de dragage

Le dictionnaire de géologie définit les sédiments de dragage, comme un ensemble constitué d'une réunion de particules plus ou moins grossières ou de matières précipitées ayant, séparément, subi un transport (Foucault & Raoult, 1980). Une autre définition des sédiments est un matériau à la fois colmatant, plastique, rigide, compressible et imperméable, pouvant avoir en fonction de la granulométrie et de la nature des colloïdes associés, de fortes teneur en eau pouvant aller jusqu'à 300 % (Dia, 2013).

1.2.3. Origine des sédiments

Les sédiments de dragage proviennent principalement de sources endogènes et exogènes. Les sources endogènes sont liées aux activités internes au plan d'eau : le dépôt des particules en suspension et de la matière végétale/animale. Les sources exogènes, quant à elles, sont liées aux activités externes au plan d'eau : l'érosion des roches, les apports fluviaux en sédiments, les sédiments issus de rejets agricoles, industriels et domestiques, le transport de sédiments par la circulation des navires, le dépôt de particules terrestres emportées par le vent. La Figure 4 illustre les différentes sources des sédiments dans l'environnement aquatique.

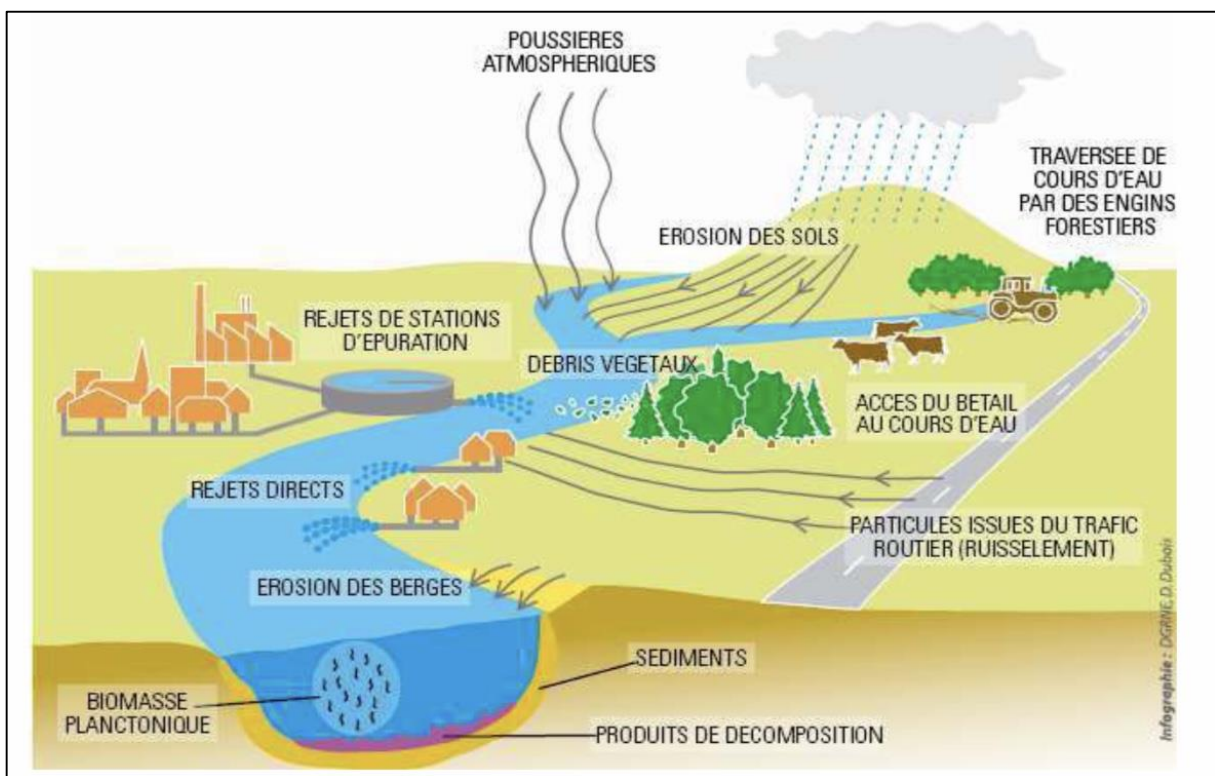


Figure 4 : Origine des sédiments dans l'environnement aquatique (Amar, 2017)

1.2.4. Nature et qualité des sédiments

Les sédiments sont constitués de quatre groupes d'éléments principaux, à savoir : la matrice minérale (quartz, feldspaths, ou carbonates), la fraction argileuse (kaolinite, illite ou smectite), la fraction organique (débris végétaux, micro-organismes, acides fulviques ou humiques) et une certaine quantité d'eau. Leur nature est définie par l'aspect physique, la granulométrie et la composition minéralogique tandis que la qualité des sédiments est définie par la composition chimique et la teneur en matières polluantes. Ces paramètres varient selon la provenance des sédiments. La Figure 5 présente un schéma illustrant la composition des sédiments portuaires en général.

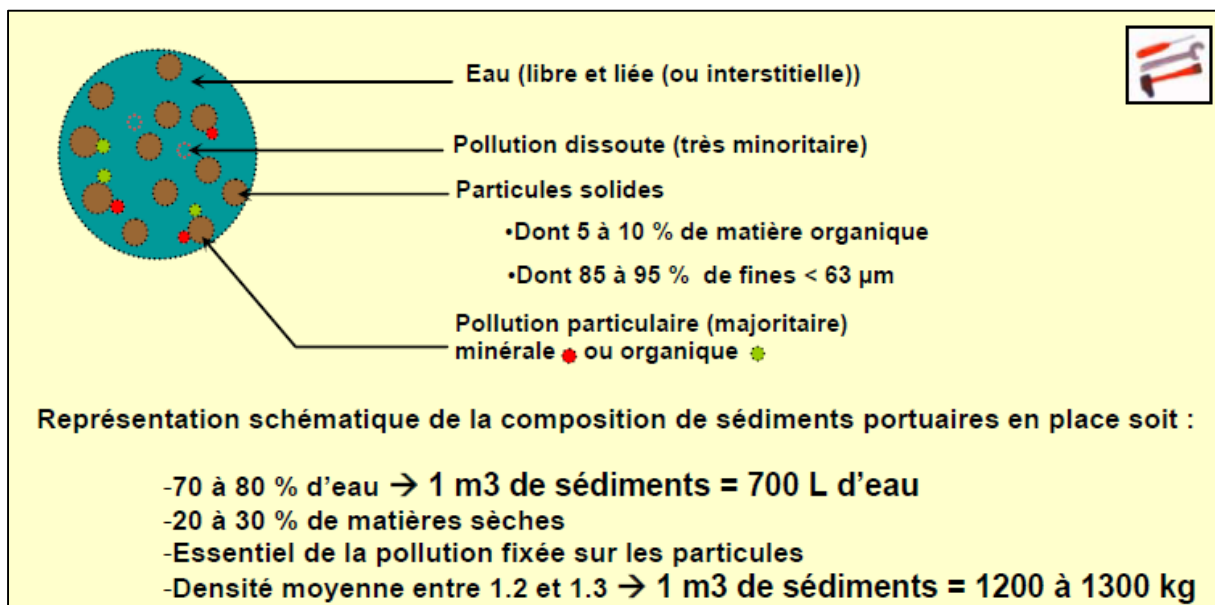


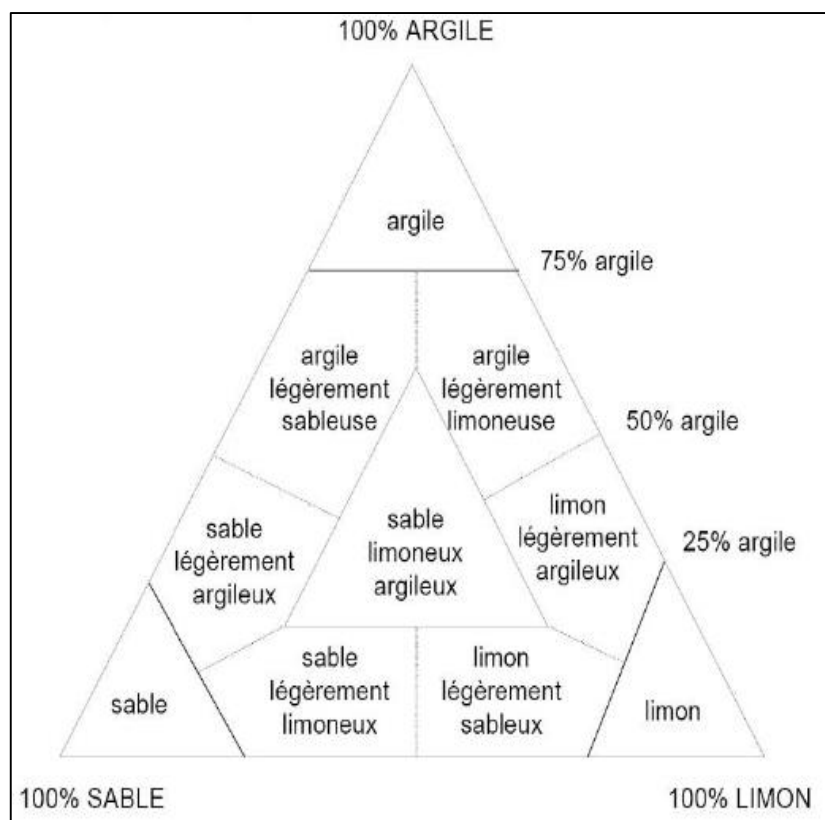
Figure 5 : Schéma de la constitution des sédiments portuaires (IDRA Environnement, 2006)

1.2.4.1. Granulométrie et texture

Les sédiments peuvent être classés en fonction de leur diamètre selon la classification présentée dans le Tableau 1. En général, les sédiments portuaires sont constitués en grande partie de particules solides dont le diamètre est égal ou inférieur à 63 µm. Les matériaux dont la taille des particules est inférieure à 2 µm sont classés selon le diagramme triangulaire des sols fins de la Figure 6.

*Tableau 1 : Classement granulométrique des sédiments
(Ramoroson, 2008)*

Taille	Dénomination
> 20 cm	Blocs
2 cm à 20 cm	Galets et cailloux
2 mm à 2 cm	Graviers
63 µm à 2 mm	Sables (grosiers et fins)
2 µm à 63 µm	Limon (silt)
< 2 µm	Vases, boues argileuses



*Figure 6 : Diagramme triangulaire de classement des sédiments
selon leur texture (Bonnet, 2000)*

1.2.4.2. Caractéristiques minéralogiques

L'analyse des minéraux présents dans les sédiments permet de mieux connaître la nature du matériau, ses différents composés et d'identifier les minéraux susceptibles d'engendrer des problèmes pour la valorisation. L'identification minéralogique s'effectue de différentes manières :

- Observation à la loupe binoculaire ;
- Diffraction aux rayons X (DRX) ;

- Fluorescence aux rayons X (FX) ;
- Microscope électronique à balayage (MEB).

Les principaux éléments constituant les sédiments sont le quartz (SiO_2), les feldspaths (K, $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) et les minéraux argileux (Bekari et al., 2010). Selon Schneider (2001), ils diffèrent selon le lieu de provenance des sédiments :

- Les blocs, les cailloux, les graviers et les sables sont des sédiments issus de l'érosion des sols ; leur nature chimique dépend essentiellement des terrains érodés ;
- Les sables sont essentiellement quartzeux (silice SiO_2) ou silicatés (mica, feldspath), souvent accompagnés de minéraux lourds (amphiboles, grenats, disthène) qui dépendent de la nature des sols érodés. On trouve aussi des sables calcaires ;
- Les particules plus fines, limons, boues et vases, sont composées de minéraux argileux d'origine terrigène, ainsi que de squelettes d'organismes d'origine endogène.

1.2.4.3. Caractéristiques physico-chimiques

L'analyse physico-chimique des sédiments permet de mieux connaître les caractéristiques physico-chimiques des sédiments : le potentiel Hydrogène (pH), la conductivité, la concentration en ions majeurs, en substances indésirables (azote, phosphore), en micropolluants organiques, en huiles, graisses et en métaux lourds. Ces substances proviennent principalement de phénomènes naturels et d'activités anthropiques.

1.2.5. Techniques de dragage

Le dragage se fait à l'aide d'engins spécialisés appelés dragues. Une drague est une machine installée sur un engin flottant permettant de curer les ports, canaux, etc. Il existe généralement trois techniques de dragage selon Planète TP (2007) : le dragage mécanique, le dragage hydraulique et le dragage pneumatique.

1.2.5.1. Le dragage mécanique

Il se réalise à l'aide d'un type de drague dit mécanique qui fonctionne soit par l'action d'un godet soit par celle d'une benne qui récupère les matériaux et les déverse dans un puits, une barque ou à terre. Cette technique est employée en général pour l'extraction des sédiments graveleux. Elle possède cependant l'inconvénient de provoquer une remise en suspension importante des sédiments dans l'eau pendant le dragage, ce qui conduit à une perte des matériaux. Le dragage mécanique est donc plus recommandé dans les endroits difficiles d'accès. Parmi les différents types de dragues mécaniques qui existent, on distingue :

- **La drague à benne preneuse** illustré par la Figure 7, se compose d'une grue montée sur un ponton immobilisé par des béquilles. Au bout du câble de levage est fixée une benne preneuse formée de deux grappins à mâchoires. La benne prend les sédiments en s'enfonçant grâce à son poids et à l'action des mâchoires, puis les reverse en ouvrant les mâchoires ;
- **La drague à godet** illustrée par la Figure 8, se compose d'un puits central où descend une chaîne à godets. La chaîne tourne, le godet le plus bas attaque le fond, se charge, remonte puis va déverser son contenu sur un tapis roulant qui l'emporte vers une barge de transport ;
- **La drague à pelle** illustrée par la Figure 9, se compose d'une pelleteuse installée sur le ponton d'un chaland.



Figure 7 : Drague à benne preneuse (Gardner, 2010)

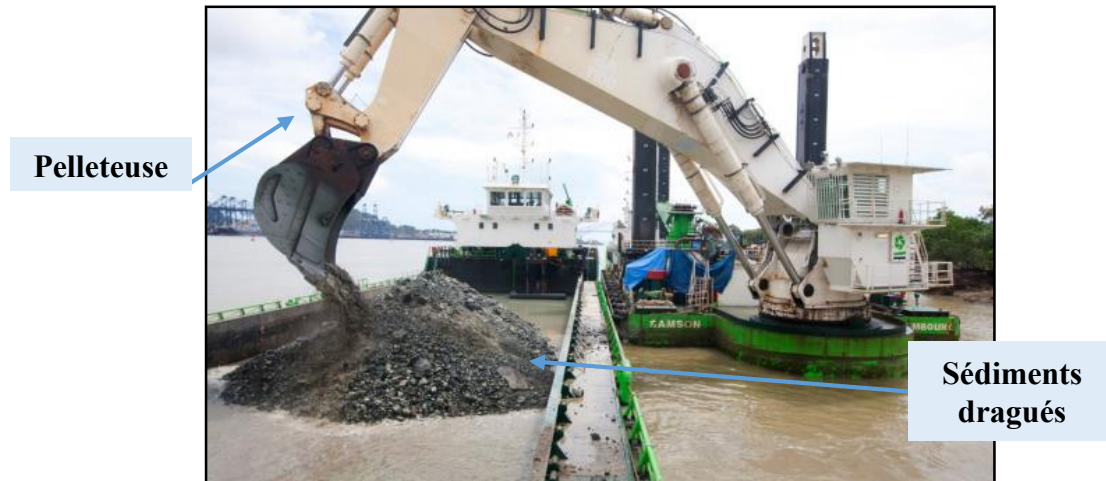


Figure 8 : Dragage à pelle (IADC, 2016)

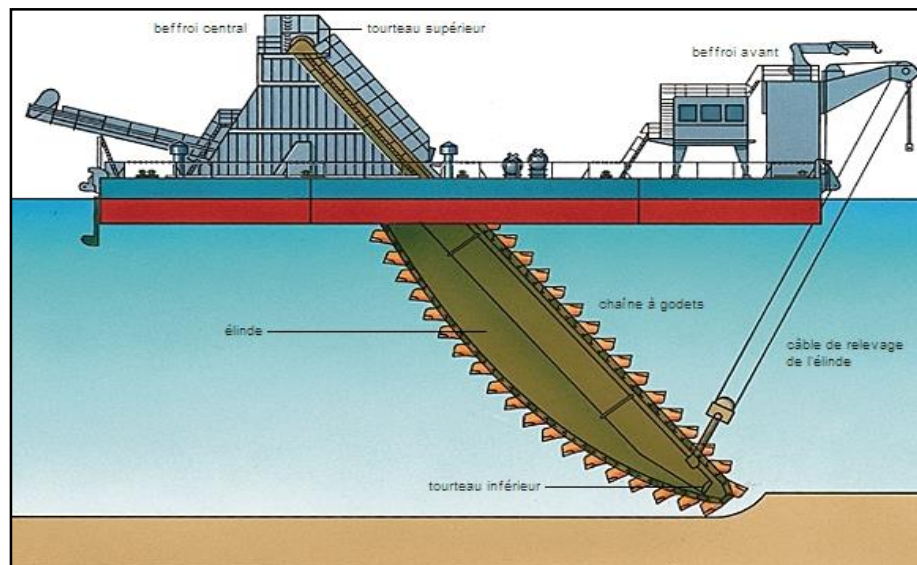


Figure 9 : Schéma drague à godet (Encyclopédie Larousse, 2021)

1.2.5.2. Le dragage hydraulique

Il est réalisé à l'aide d'un type de drague dit hydraulique qui aspire les sédiments au moyen d'une pompe centrifuge, à travers un tube à embout appelé élinde. Les sédiments aspirés sous forme de boue liquide, sont ensuite rejetés, selon les dragues, dans un puits ou un chaland, ou une zone de dépôt à terre via des conduites. Cette technique présente l'avantage de faible remise en suspension des sédiments et un rendement élevé par rapport aux autres dragues.

Parmi les types de dragues hydrauliques qui existent, Planète TP (2007) distingue :

- **La drague aspiratrice stationnaire** qui reste immobile sur le fond et rejette les sédiments dragués à terre à des zones aménagées ou sur des berges par le moyen de canalisations.
- **La drague aspiratrice en marche** qui aspire les sédiments et les stocke dans un puits à bord avant de les rejeter par une des deux méthodes plus répandues : le clapage

(ouverture de volets dans le fond des cales du navire pour rejet en pleine mer) et le refoulement par conduite à la localisation souhaitée.

- **La drague aspiratrice à désagrégateur**, qui est constituée d'un dispositif rotatif au bout de l'élinde qui permet de broyer les matériaux et faciliter ainsi leur aspiration.

Les Figures 10 et 11 illustrent respectivement une drague aspiratrice en marche et une drague aspiratrice à désagrégateur.



Tuyau aspirateur

Figure 10 : Drague aspiratrice en marche (IADC, 2014)



Disque
Désagrégateur

Figure 11 : Drague aspiratrice à désagrégateur (Nolte, 2012)

1.2.5.3. Le dragage pneumatique

Les dragues pneumatiques fonctionnent par aspiration avec un système à air comprimé. Un vide d'air est créé dans un cylindre, provoquant une arrivée de sédiments. Une fois le cylindre plein, les valves sont inversées, l'air comprimé y pénètre alors et expulse les sédiments. Cette technique de drague est généralement utilisée dans des chantiers de décontamination.

En plus des trois techniques traditionnelles ci-dessous, il existe une technique supplémentaire dite environnementale. Celle-ci est utilisée pour le curage des zones contaminées. Les dragues spécialisées pour cette tâche permettent de limiter le volume à draguer, tout en évitant la remise en suspension et la dispersion des sédiments pollués. Des boucliers ou écrans protecteurs sont ainsi employés pour isoler l'espace d'excavation. Pour éviter la remise en suspension des sédiments, les godets et pelles sont équipés d'un système étanche de fermeture. Les moyens de transport et de stockage des sédiments contaminés sont adaptés à cet exercice afin de limiter les risques de propagation de la contamination.

1.2.6. Types de dragage

Au-delà des techniques qui existent, chaque activité de dragage est menée pour servir l'un de trois objectifs selon Ramorison (2008) : l'entretien des voies navigables, l'approfondissement des canaux et l'aménagement de nouveaux espaces portuaires.

Le dragage d'entretien est une opération régulière qui vise à extraire les sédiments qui gênent la navigation. Il est pratiqué de façon quasi permanente dans les ports d'estuaires compte tenu de leur faible profondeur, et de façon saisonnière dans les ports ouverts sur la mer.

Le dragage d'approfondissement est entrepris lorsqu'il devient nécessaire d'adapter le seuil de navigation à la taille des navires. Il nécessite de déplacer d'importants volumes de sédiments et demande des moyens de dragages importants.

Le dragage en vue de l'aménagement de nouvelles aires portuaires, quant à lui, est pratiqué pour agrandir les zones portuaires afin d'en améliorer les performances opérationnelles.

1.2.7. Gestion des sédiments dragués

L'activité de dragage génère des quantités considérables de sédiments qu'il faut gérer convenablement. Le moyen de gestion des sédiments dépend de leurs caractéristiques (nature, qualité physico-chimique, quantité), du critère économique et de la réglementation en vigueur. En général, les deux modes de gestion des sédiments sont la gestion en mer et la gestion à terre.

1.2.7.1. Gestion en mer ou gestion par immersion

La gestion des sédiments en mer consiste essentiellement en l'immersion des sédiments dans une zone en milieu aquatique. Il existe plusieurs manières de réaliser cette immersion :

- **Le rejet de surface**, illustré par la Figure 12. Ici, les sédiments sont refoulés au travers la proue du navire de drague dans une zone bien définie en mer. Cette zone est généralement une zone de profondeur importante, hors du chenal de navigation. La trajectoire en forme d'arc-en-ciel a donné naissance à l'expression *Rainbowing*, pour décrire cette opération ;
- **Le rejet par conduite**, illustré par la Figure 13. Cette méthode de rejet convient aux dragues stationnaires. Les sédiments sont rejetés à travers des conduites sur les berges pour être gérés à terre ;
- **Le rejet par barges**, illustré par la Figure 14. Ici, les sédiments sont déposés dans une barge ou un chaland et acheminés vers la rive pour une gestion à terre des sédiments ;
- **Le rejet par clapage**, illustré par la Figure 15. Les navires qui possèdent un fond de cale ouvrable, s'ouvrent pour laisser passer les sédiments qui se déposent au fond du plan d'eau.



*Figure 12 : Rejet de surface ou rainbowing
(Baldock, 2010)*



*Figure 13 : Rejet par conduite (Régie autonome
de Port Camargue, 2016)*



Figure 15 : Rejet par barges (SCE/CREOCEAN, 2019)



Figure 14 : Rejet par clapage (SCE/CREOCEAN, 2019)

1.2.7.2. Gestion à terre

La gestion à terre consiste à stocker les sédiments soit de manière définitive dans un site d'enfouissement dans le cas où le sédiment est tellement pollué qu'il ne peut faire l'objet ni de clapage en mer, ni de valorisation à terre, soit de manière temporaire, le temps qu'ils éliminent l'excédent d'eau et éventuellement de sel, en vue d'une valorisation ultérieure ou d'un enfouissement (Dawid, 2017).

1.2.8. Problématique des sédiments contaminés

Dans les zones à forte activité maritime et/ou industrielle, les sédiments accumulés au fond des plans d'eau sont susceptibles de devenir, au fil du temps, des puits de stockage pour les substances polluantes déversées accidentellement ou pas. Ces substances incluent : métaux lourds, hydrocarbures (HAP, PCB, TBT), pesticides, matières organiques et autres. La bioaccumulation de ces substances peut conduire à l'atteinte des seuils toxiques et provoquer des pathologies chez les consommateurs à tous les niveaux de la chaîne alimentaire.

Les seuils de référence pour la qualité des sédiments portuaires sont établis pour chaque domaine portuaire par le service compétent. Ils sont en général inspirés des seuils réglementaires en vigueur au niveau national, continental ou mondial, tenant compte des spécificités de chaque port. Au Cameroun, il n'existe pas encore de normes établies, réglementant la gestion des sédiments marins.

Dans le Tableau 2, les contaminants majeurs fréquemment rencontrés dans les sédiments sont présentés avec leurs sources et leurs impacts.

Tableau 2 : Les contaminants majeurs des sédiments, leur source et leur toxicité (Bekari et al., 2008)

CONTAMINANT	SOURCE	IMPACT
CONTAMINANTS MÉTALLIQUES		
Arsenic (As)	Combustion du charbon ; émissions atmosphériques industrielles	Accumulé par les micro-algues, poissons, mollusques ; Toxicité sur consommateur humain non définie
Cadmium (Cd)	Emissions atmosphériques par activités métallurgiques et incinération des déchets	Bioaccumulation dans la chaîne alimentaire ; Toxique pour le consommateur humain
Chrome (Cr)	Industries métallurgiques ou chimiques ; Véhiculé par les fleuves	Anomalie du développement larvaire des bivalves
Cuivre (Cu)	Industries électriques ; Véhiculé par les fleuves ; Matière active des peintures marines antisalissure (Cu ₂ O)	Inhibition de croissance du phytoplancton
Mercure (Hg)	Incinération du charbon / des déchets ; Traitement des minerais non ferreux ; Piles et batteries	Forte bioaccumulation et danger pour le consommateur humain
Nickel (Ni)	Combustion d'énergies fossiles Production de métaux non ferreux	Anomalies de développement larvaire
Plomb (Pb)	Carburants ; Combustions de déchets	Bioaccumulation ; Anomalies de développement des bivalves

CONTAMINANT	SOURCE	IMPACT
Zinc (Zn)	Peintures anticorrosion ; Industries métallurgiques ; Combustion du charbon et du bois	Toxicité relative
CONTAMINANTS ORGANIQUES		
Polychlorobiphényles (PCB)	Transformateurs électriques, Peintures, encres, apprêts	Bio-accumulés ; Effets cancérigènes
Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	Combustion de charbon et pétroles Pertes lors du transport de ces matières	Effets cancérigène et mutagène
Tributylétain (TBT)	Relargué par les peintures antisalissure des navires de plus de 25 m, interdite pour les navires < 25 m (remplacés par peintures au Cu)	Très toxique pour les mollusques (stérilisation des femelles) à des concentrations faibles. Imposé au-delà de 1 ng/L et anomalies de la calcification de l'huître creuse au-delà de 2 ng/L

1.2.9. Traitement des sédiments contaminés

Plusieurs méthodes de traitement sont applicables aux sédiments de dragage contaminés. Le choix de la méthode appropriée de traitement dépend de la nature des sédiments, la filière d'utilisation souhaitée, la disponibilité de la compétence technique, la rentabilité économique et les exigences de la réglementation en vigueur. Selon IDRA Environnement (2006), les méthodes qui existent peuvent être regroupées en cinq grandes catégories :

- **Prétraitement** : Le prétraitement permet de préparer les sédiments dragués au(x) traitement(s) approprié(s). Il peut servir aussi à la séparation des sédiments et détritux ou leur déshydratation. Il permet de réduire le coût des traitements ultérieurs par la minimisation de la partie à mettre en dépôt et maximisation de quantité des sédiments valorisables ;
- **Traitement chimique** : sur la base d'un principe réactionnel, l'objectif est d'enlever ou de transformer la contamination chimique des sédiments de façon notamment à abaisser les teneurs en polluants et conséquemment, la dangerosité du produit ;
- **Traitement biologique** : il consiste à utiliser la capacité de certains micro-organismes à dégrader les substances organiques et les polluants : HAP, PCB, dérivés chlorés, hydrocarbures. L'efficacité de ces méthodes dépend des conditions du milieu (température, oxygène, teneurs en nutriments) et de la capacité des micro-organismes à utiliser les polluants à éliminer comme substrat pour leur propre développement ;

- **Traitement par stabilisation/immobilisation** : l'objectif est d'immobiliser les polluants des sédiments soit en les piégeant au sein de barrières actives soit en les stabilisant au sein d'une matrice en y ajoutant des liants destinés à les rendre inertes ;
- **Traitement thermique** : il vise à détruire, extraire ou immobiliser les polluants, essentiellement organiques, en utilisant la chaleur. Selon la température de traitement, les polluants peuvent être volatilisés ou détruits. Les rejets de sous-produits résiduels doivent être particulièrement surveillés.

Les eaux extraites des sédiments contaminés contiennent une partie de la contamination et doivent également faire l'objet d'un traitement avant leur éventuel rejet ou réutilisation. Les méthodes de traitement les plus utilisées et les plus efficaces sont la filtration (par lit de sables ou biologique) et la décantation forcée (par bassin, réserve ou surverse). Le Tableau 3 présente quelques méthodes de traitement dans chacune des catégories mentionnées ci-dessus, avec une brève description.

Tableau 3 : Quelques méthodes de traitement des sédiments par catégorie

CATÉGORIES	MÉTHODES	DESCRIPTION
PRÉTRAITEMENT	Déshydratation	Diminution de la teneur en eau des sédiments, par dépôt en aires d'assèchement, par évaporation, par centrifugation ou par filtration (Ramoroson, 2008)
	Séparation par densité	Utilisation de matières chimiques moussantes et de l'air permet aux particules polluantes d'adhérer à la mousse flottante, et par la suite séparer les contaminants des sédiments (Ramoroson, 2008)
	Séchage et évaporation	Séchage à l'air en étuve ventilé à une température inférieure à 40 °C (Ramoroson, 2008)
TRAITEMENT BIOLOGIQUE	Phytoextraction	Extractions des métaux lourds par des plantes accumulatrices qui doivent être détruites après l'opération (Schneider, 2001)
	Phytostabilisation	Immobilisation des métaux lourds dans le sol par des végétaux spécifiques pour empêcher la dispersion de la pollution (Schneider, 2001)
TRAITEMENT CHIMIQUE	Flottation	Technologie tirée de l'industrie minière qui concentre des contaminants inorganiques (cuivre, zinc...) et organiques (HAP, PCB) (Agostini, 2006)
	Lavage des sédiments	Extraction des polluants par dissolution à l'aide d'un réactif approprié (eau, acide ou oxydant) dans le but de « laver » les sédiments. Les polluants sont mobilisés soit transformé par la réaction chimique, mais pas détruits. Nécessite la séparation des phases (liquide/solide) et le traitement de la phase liquide (IDRA Environnement, 2006)
TRAITEMENT THERMIQUE	Désorption thermique	Grâce à la chaleur (entre 550 et 600 °C) les contaminants organiques sont volatilisés et récupérés par condensation sous forme huileuse facilement récupérable. C'est une méthode très efficace pour les PCB et HAP (Agostini, 2006)
	Incinération	Très efficace pour les matières organiques. A haute température (800-1200 °C), une partie des métaux lourds se fixe sur une structure cristalline qui se forme suite à la destruction des matières organiques, et une autre partie (Hg, Cd) se volatilise. Nécessite le traitement des fumées (Bekari et al., 2010)

	Pyrolyse	Désintégration des contaminants organiques en l'absence d'oxygène à température élevée 550-600 °C (Ramorosan, 2008)
TRAITEMENT PAR STABILISATION/ IMMOBILISATION	Stabilisation/Inertage	Stabilisation par liants (chaux ou ciment) de la matière organique, les teneurs en eau et les éléments polluants métalliques (IDRA Environnement, 2006)
	Capping ou dépôt sous-marin confiné	Recouvrement des sédiments déposés au fond de la mer par une couche de sable importante destinée à les isoler de la colonne d'eau (IDRA Environnement, 2006)
	Confinement portuaire	Emprisonnement des sédiments contaminés dans une structure de quais (IDRA Environnement, 2006)

En ce qui concerne le ou les traitements à réaliser pour la réutilisation des sédiments, trois types de valorisation peuvent être distingués :

- Sans traitement : réutilisation des sédiments in situ. Cela est le cas des rechargements de plages et dunes avec des sédiments non pollués ou la restauration de sols et/ou écosystèmes marins ;
- Traitement économique viable : élaboration des mélanges composés de sédiments dragués et des ajouts directs, tels que de la chaux, du ciment... pour la réalisation de ce traitement, les sédiments doivent contenir des niveaux admissibles de polluants. Les voies de valorisation pour ces sédiments peuvent être dans les filières routières, les remblais, le remplissage de cavités souterraines ;
- Traitement environnemental lourd : réalisation d'une série de traitements spécifiques par rapport au niveau de pollution des sédiments. Ces sédiments peuvent être réutilisés dans l'élaboration de matières cuites et matériaux à surface durcie (céramiques), de matières calcinées (clinker ou composants de ciment) ou dans le compactage et/ou stabilisation des sols (Levacher, 2017).

1.2.10. Valorisation des sédiments

La question de la valorisation des sédiments de dragage est assez récente dans le monde, mais de plus en plus posée. Ils constitueraient une ressource utile dont l'exploitation répond aux exigences de l'économie circulaire, tout en favorisant la préservation des ressources naturelles par l'usage d'un matériau alternatif. Cependant, plusieurs objections, relevées par IDRA Environnement (2006), s'opposent à cette noble démarche :

- Les sédiments possèdent une valeur ajoutée réduite du fait de leur nature et de leur structure (propriétés physiques, teneur en eau) et, conséquemment, des capacités de réemploi limitées ;
- Les solutions de valorisation proposent souvent des alternatives soit ponctuelles auxquelles la notion de pérennité de la filière ne peut être associée, soit décalées dans le temps ou en volumes par rapport au besoin immédiat d'élimination du produit ;
- Les solutions de valorisation existent mais demeurent trop lourdes à mettre en œuvre techniquement et économiquement.

Afin de limiter ces objections et optimiser les démarches de valorisation, il est important de :

- Définir les outils permettant d'améliorer la structure et la valeur ajoutée des sédiments dragués ;
- Lister et proposer des solutions en accord avec leurs caractéristiques naturelles de produits, pour limiter les coûts de transformation ;
- Associer des solutions alternatives de stockage destinées à pallier à l'absence de solutions de valorisation immédiate.

Dans la littérature, on retrouve de nombreuses thèses, articles, rapports et autres sur la valorisation des sédiments, provenant du nord de la France, de l'Afrique du Nord (Maroc, Algérie), du Québec, du Japon et également des Etats-Unis d'Amérique (Levacher & al, 2006 ; Berreville, 2007 ; Benasla, 2015 ; Ben Allal & al, 2011 ; Safhi, 2020). Les études portent principalement sur la valorisation des sédiments en construction, mais il existe trois grands domaines de valorisation : la construction, l'aménagement paysager/amélioration de l'environnement et l'agronomie.

1.2.10.1. Valorisation en Bâtiments et Travaux Publics

Dans la filière des BTP construction, les sédiments de dragage, selon leurs caractéristiques, trouvent leur utilité en technique routière, formulation du béton, travaux de remblayage, fabrication de briques en terre cuite, etc.

▪ **Filière technique routière**

Les routes sont dotées d'une structure précise : l'accotement, le sol/support, la couche de forme et la couche de surface. Les sédiments ont la possibilité d'être valorisés en sous-couche routière, le plus souvent en couches de formes (Tremblay, 1998), une couche particulière de la chaussée située entre la Partie Supérieure du Terrassement (PST) et la couche d'assise, telle qu'illustrée dans la Figure 16.

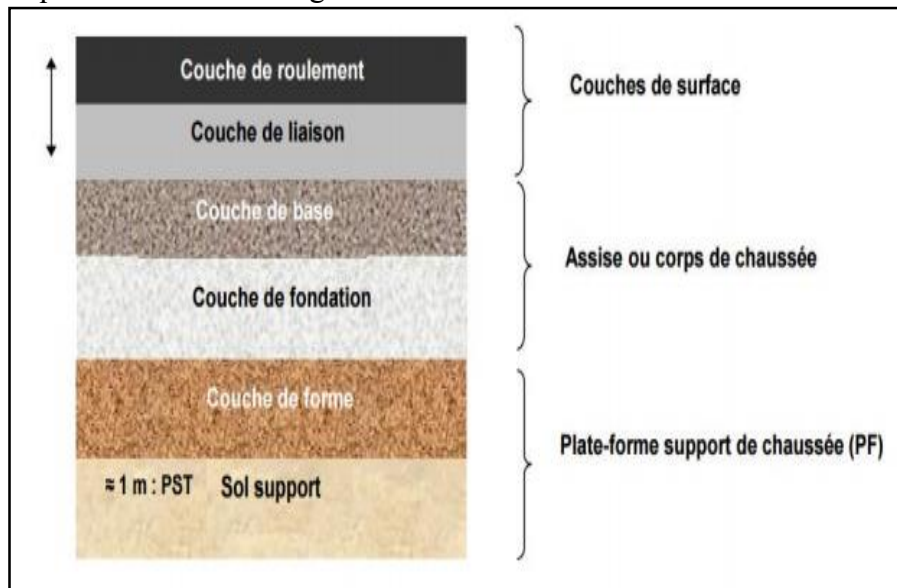


Figure 16 : Schéma montrant les différentes parties d'une route (Mamindy-Pajany, 2015)

Il est envisageable de remplacer une fraction de sable utilisée dans les matériaux routiers par des sédiments de dragage. En raison de sa disponibilité dans le port, l'utilisation du sable de dragage dans la formulation des matériaux routiers à base de sédiments fins présente une solution économique intéressante pour l'amélioration des caractéristiques mécaniques des matériaux dragués. Le mélange composé de sédiment et de sable de dragage doit ensuite être traité avec de la chaux vive et du liant hydraulique (Sédilab, 2019). Les formulations communément utilisées pour une utilisation en sous couche routière, représentent 1/3 de sédiments fins et 2/3 de sable + 6% de liant hydraulique (Tremblay, 1998).

Cependant, la couche de forme doit répondre à des caractéristiques bien déterminées. Entre autres, elle doit être résistante, de faible granulométrie, drainante et hors gel (Ooreka, 2021). Par conséquent, les sédiments sableux sont ceux qui conviennent le plus pour cette utilisation. Les sables argileux, les sables fins limoneux, les limons, etc. sont à éviter pour la couche de forme à cause de leur très faible potentiel drainant.

▪ **Filière béton**

Prometteuse pour la valorisation des sédiments, la filière béton permet d'absorber des volumes importants et de viser diverses applications. Les sédiments peuvent être incorporés dans une matrice cimentaire en remplacement du sable naturel utilisé classiquement.

A travers la démarche Sédimatériaux de SEDILAB (Sédilab, 2019), le centre de ressources français dédié à la recherche de solutions pour la valorisation des sédiments, plusieurs applications ont déjà été déclinées en béton préfabriqué, béton prêt à l'emploi, béton cellulaires et coulis telles que présentées dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Applications de valorisation en filière béton (Sédilab, 2019)

Type de béton	Application	Usage
Préfabriqué	Bloc d'encrochement béton	Renforcement de berges maritimes ou fluviales
	Matelas gabions	Lutte contre l'érosion hydraulique
	Bassins enterrés en hydrocyls	Drainage et stockage temporaire des eaux de pluies en milieu urbain
	Mobilier urbain	Bornes, bancs, jardinières...
Prêt à l'emploi	Poutres de couronnement de palplanches	Renforcement des berges
Béton cellulaire	Blocs en béton léger	Construction
Coulis autoplaçant	Comblement de cavités	Remblaiement des cavités (tranchées sur chantier lors de travaux d'assainissements)

Le taux de substitution de sable naturel pour ces applications s'élève de 20 à 30%. Pour ce type de valorisation, des essais de caractérisation particuliers doivent être réalisés :

- **La granulométrie** : un sédiment fin pourra permettre de compléter la courbe granulométrique et de limiter les espaces vides dans le béton ;
- **La teneur en chlorures** : en particulier pour les sédiments marins et surtout pour les bétons armés et précontraints ;
- **La teneur en matière organique** : ce paramètre peut modifier le temps de prise et la résistance du béton.

▪ **Filière étanchéité**

Les argiles ou minéraux argileux (définis ici comme l'ensemble des sédiments dont le diamètre des particules est inférieur à 2 µm voir Tableau 1), peuvent être utilisés dans des

installations de stockage de déchets inertes et/ou non dangereux, d'assainissement collectif ou non collectif, et tout autre projet de construction qui nécessite une imperméabilisation.

Il est envisageable de réaliser des bases imperméables avec une épaisse couche d'argiles compactées pour assurer l'étanchéité de l'installation comme l'illustre la Figure 17.

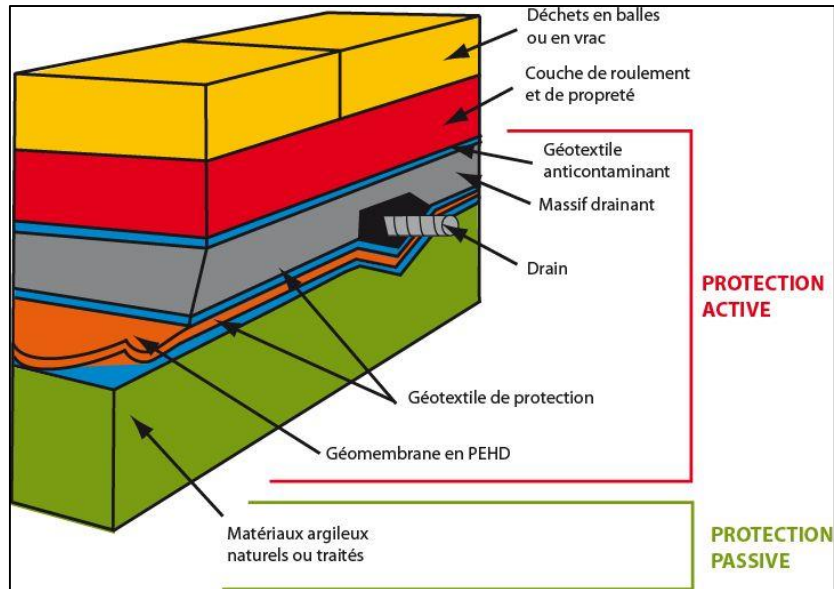


Figure 17 : Plan de coupe affichant les couches de protection dans un casier de stockage de déchets

(Source : <https://www.sietomdechalosse.fr/SIETOM-de-Chalosse/Les-ordures-menageres/Le-traitement-des-ordures-menageres-residuelles2/Le-centre-de-stockage>)

▪ **Filière matériau de remblai**

Le remblayage consiste à utiliser un matériau pour combler un creux ou élever un terrain. Tout travail qui nécessite du remblai est un débouché potentiel pour les sédiments de dragage. L'utilisation de ce matériau permet d'économiser en ressources telles que la terre végétale, généralement utilisée dans les travaux de remblai. Les sédiments dragués peuvent être utilisés secs ou humides (jusqu'à un certain degré), confinés ou non dans des géotubes ou des sacs en polypropylène tissé, pour la réalisation du remblai. Les sacs en polypropylène tissé, tel qu'illustré dans la Figure 18, présentent une alternative moins coûteuse aux géotubes. Un autre avantage est que cette solution ne nécessite pas un temps de décantation très long, et peut éviter l'étape du site de stockage (Dawid, 2017).



Figure 18 : Sac en propylène tissé pour le confinement des sédiments

(Source : <https://www.cif-factory.com/product/sac-tisse-en-polypropylene/>)

1.2.10.2. Valorisation en aménagement paysager ou amélioration de l'environnement

La valorisation des sédiments non immergeables dans la mise en œuvre des éco-modèles paysagers est également une filière intéressante de valorisation. Les éco-modèles, buttes paysagères ou encore melons permettent de créer de meilleurs aménagements urbains (Azrar, 2014).

1.2.10.3. Valorisation agricole

D'après Vernus et al. (2013), l'épandage est une technique agricole consistant à répandre divers produits sur des zones cultivées, forêts, voies ferrées, marais. L'épandage des sédiments

de dragage n'est cependant possible que si ceux-ci ne portent pas atteinte au milieu récepteur. Les sédiments sont épandus selon différentes techniques sur les parcelles agricoles sur une épaisseur de 1 à 5 cm ou plus (Le Guern et al., 2004). La connaissance de la valeur agronomique (teneur en matière organique, azote, phosphore, calcium, magnésium, potassium) est indispensable.

En général, l'épandage des sédiments sur les terres agricoles permet de diminuer l'acidité des terres, grâce à leur pH neutre à faiblement alcalin. Cette technique vient en substitution du chaulage des terres agricoles. Les sédiments riches en éléments nutritifs (azote et phosphore) constituent un engrais naturel et efficace. L'éventuelle présence considérable de calcium (débris coquilliers) confère aux produits de dragage une valeur d'amendement calcique. Dans le cas de sédiments extraits d'un milieu saumâtre ou marin, la teneur en sel est un des principaux éléments à maîtriser pour éviter tout impact au moment de l'épandage.

1.2.11. Déshydratation des sédiments

Le principal obstacle à l'application des différents moyens de valorisation présentés plus haut est la teneur en eau très élevée des sédiments. Il est donc nécessaire de procéder à leur déshydratation avant de les valoriser. Deux types de déshydratation existent, à savoir : la déshydratation (ou séchage) naturelle et la déshydratation mécanique.

1.2.11.1. Séchage naturel

Les modèles de séchage naturel usent des moyens naturels tels que l'énergie du soleil et le vent pour diminuer la teneur en eau des sédiments. Les différentes méthodes peuvent être différenciées selon la technique utilisée. Les méthodes les plus utilisées sont : le lagunage, les lits de séchage et les lits de séchage plantés.

- **Lagunage**

Avec cette méthode, les sédiments dragués sont déversés dans des cellules ou casiers de séchage, appelés aussi bassins de décantation, sur une petite profondeur de 5 mètres maximum. Ainsi la déshydratation s'opère par évaporation et vidange surnageant par pompage ou vidange gravitaire (Boullosa, 2018). Cette technique est effectuée sur un terrain imperméable ou sur une couche de protection environnementale (couche d'imperméabilisation), selon des cycles d'une année (Duan, 2008).

La déshydratation des sédiments se fait d'une part, par l'évaporation de l'eau et d'autre part par l'enlèvement de l'eau surnageant par déversoirs. L'eau surnageant est drainée (horizontalement) est envoyée vers une station de traitement par un système de tuyaux

collecteurs. Le temps de séchage est donc fortement dépendant du climat et de la siccité souhaitée. Dans les pays de climat modéré, il est autour d'une année, mais il peut être réduit grâce à différents prétraitements comme l'épaississement des sédiments dragués dans une chambre de décantation avant le remplissage des casiers.

Le produit obtenu est souvent de consistance hétérogène puisqu'en surface il peut apparaître très sec, avec une siccité moyenne environ 65% ($w = 54 \%$), et à profondeur de 20 ou 30 cm il peut rester semi-liquide avec une siccité comprise entre 20 à 25 % ($w = 400$ à 300 %), (Port Autonome du Havre, 2006).

Les avantages principaux de cette technique sont sa simple et son efficacité, il permet la déshydratation de tout type de sédiments, grand volume de sédiments traité par heure, une faible consommation énergétique et une bonne intégration paysagère, les coûts de cette procédure ne sont pas trop élevés (Duan, 2008 ; Khadraoui, 2012 ; Perroni, 2006). Par contre, le lagunage possède de nombreux inconvénients, à savoir : une grande surface au sol occupée, une forte dépendance des caractéristiques du sédiment et du climat local, un important temps de déshydratation (une année en pays au climat modéré), un mode d'opération discontinu, une qualité finale des sédiments déshydratés faible, un risque de perforation de la couche d'imperméabilisation en récupérant les boues sèches.

▪ Lits de séchage

Les lits de séchage peuvent être définis comme un système de déshydratation naturelle modulaire composé de bassins de forme généralement rectangulaires, en béton de faible profondeur (Boullosa, 2018). Les lits comportent plusieurs couches drainantes pour faciliter le drainage, l'épandage et l'entretien. Dans la partie inférieure, le massif filtrant, peut être constitué par une couche supérieure de sable épaisse de 5 à 10 cm (intervalle granulaire de 0,5 à 15 mm), par une couche intermédiaire de 10 cm d'épaisseur de gravier fin (classe granulaire 5 / 15 mm) et par une couche inférieure de 20 cm de gros graviers (classe granulaire 10 / 40 mm) reposant sur un sol imperméabilisé et nivelé (Duan, 2008). Cette dernière couche est dotée d'un système de tuyauterie avec une pente. Ces tuyaux en ciment ou en plastique permettent d'assurer le drainage de l'eau. Les dimensions des lits de séchage ainsi que leur nombre sont dépendants de la quantité de boues à traiter. Au moins deux lits sont nécessaires pour alterner les étapes de remplissage et de séchage et ainsi pouvoir améliorer la production.

Le produit obtenu est une boue très hétérogène de type pâteux en hiver et une boue plus solide en été. La siccité moyenne attendue est de 10 à 20 % ($w = 900 \%$ à 400 %) en climat humide et 30 à 40 % ($w = 233 \%$ à 150 %) en climat sec (Perroni, 2006).

Les avantages de cette méthode sont similaires à ceux du lagunage. C'est une technique simple qui permet la déshydratation de tout type de sédiments, en grand volume traité par heure avec un coût d'investissement modéré en comparaison avec d'autres ouvrages de génie civil et une faible consommation d'énergie. L'ouvrage est semi-enterré, il présente donc une intégration paysagère et un impact environnemental réduit par rapport aux systèmes mécaniques classiques (Conseil Général De Seine Et Marne, 2010). Les inconvénients les plus importants du lit de séchage concernent la grande surface occupée, une forte dépendance des caractéristiques du sédiment et du climat local, une qualité finale des sédiments déshydratés faible, des produits obtenus pâteux et hétérogènes en consistance, un temps élevé de déshydratation, un mode d'opération discontinu, un coût d'exploitation relativement élevé lié essentiellement au besoin en personnel pour l'enlèvement des boues (Duan, 2008). À cause de leur efficacité qui dépend fortement du climat, et surtout le coût de main d'œuvre et de transport, les lits de séchage sont de moins en moins utilisés.

- **Lits de séchage plantés**

Les plantes utilisées pour les lits de séchage plantés sont des roseaux *phragmites australis*, un type de plante semi-immersée le plus répandu dans les sols frais et humides avec des hauteurs variant entre 1,5 et 3 mètres et un diamètre de 10 mm (Boullosa, 2018).

Avec la méthode des lits de séchage plantés de roseaux (LSPR), ce sont les roseaux qui sont utilisés pour la déshydratation des boues ou sédiments. Ils fonctionnent selon une technique aérobie de déshydratation naturelle. La déshydratation est produite par les mécanismes de drainage et d'évapotranspiration (Molle et al., 2013).

Les couches des LSPR sont constituées d'une granulométrie croissante depuis la surface vers la profondeur du filtre. Il peut être composé en couche supérieure de gros sable de 5 à 10 cm d'épaisseur (intervalle granulaire de 0,2 mm à 0,4 mm et un coefficient d'uniformité $Cu \leq 5$), puis une couche intermédiaire de gravier fin épaisse de 20 cm à 30 cm (granulométrie comprise entre 2/4 mm et 3/6 mm). En deçà, une couche de transition épaisse de 10 cm avec une granulométrie comprise entre le d_{15} et $5 \cdot d_{85}$ de la granulométrie qui constitue la couche supérieure, et par une couche inférieure de 15 cm de gros graviers (granulométrie comprise entre 15/30 mm et 30/60 mm) reposant sur un sol imperméabilisé et nivelé.

Les avantages proposés par cette méthode sont les mêmes que ceux des lits de séchage classiques, en ajoutant les avantages suivants : les boues obtenues ne présentent pas d'odeur générée si les lits fonctionnent correctement et elles peuvent être valorisées directement en

épandage agricole. Les inconvénients qui se présentent par rapport aux lits de séchage classiques sont : des nuisances olfactives difficiles à contenir en cas de dysfonctionnement, des opérations de curage ponctuelles et régulières mais qui nécessitent une intervention extérieure comme une pelle mécanique. L'inconvénient majeur réside dans le besoin d'une montée en charge progressive de l'alimentation pouvant nécessiter la mise en œuvre d'un moyen de déshydratation complémentaire à la mise en service des lits. Cette méthode s'apparente à un mode d'opération discontinu (Molle et al., 2013).

1.2.11.2. Déshydratation mécanique

La déshydratation mécanique est une alternative intéressante pour pallier aux multiples inconvénients présentés par le séchage naturel : la forte dépendance de l'effectivité du séchage au climat local, la longue période de déshydratation requise, les grandes surfaces requises et l'obtention de produits pâteux et hétérogènes avec de faibles quantités d'eau déshydratée, entre autres. L'atout le plus important de la déshydratation mécanisée repose sur le système ou le procédé de travail envisagé.

Deux systèmes ou procédés de travail peuvent être différenciés : un système de travail discontinu où la machine doit être arrêtée après chaque cycle de déshydratation et un système de travail continu où la machine est capable de fonctionner de manière autonome toute la journée. Quelques méthodes de déshydratation mécanique sont présentées par la suite.

- **Centrifugeuse**

La centrifugeuse est un outil de déshydratation qui permet de déshydrater des boues de différentes natures et siccités par centrifugation utilisant la force centrifuge pour provoquer la décantation accélérée des sédiments contenus dans les boues. Il travaille selon un système discontinu. Les produits issus du procédé sont d'une part, une partie liquide (eau surnageant) qui fait l'objet d'un traitement postérieur et d'autre part une partie solide (boue déshydratée).

La procédure d'utilisation de ce type de machine est relativement simple : les boues à traiter, additionnées de polymères flocculants, sont introduites dans un rotor cylindro-conique horizontal composé d'un bol et d'une vis convoyeuse qui tournent à haute vitesse dans le même sens. Les sédiments sont déposés sur les parois internes du bol, grâce à la force centrifuge, ils sont transportés vers la sortie par la vis. En même temps, l'eau extraite des boues est collectée au centre du bol et évacuée par un déversoir à l'extrémité opposée. L'efficacité de cette méthode de déshydratation est variable selon la qualité des sédiments, le réglage de l'alimentation de la machine (débit de l'eau de dilution, débit de la pompe à sédiments et débit de la pompe doseuse

de flocculant) et le réglage des vitesses de rotation de la machine (vitesse relative et vitesse du bol), (Perroni, 2006).

Les principaux avantages de cette technique sont un rendement volumique élevé, un système de travail continu et automatisé, une surface occupée réduite. Elle présente une souplesse d'exploitation puisqu'elle permet la déshydratation de boues de différentes natures et siccités et des nuisances faibles avec absence d'odeurs et de bruit. Les inconvénients des centrifugeuses sont multiples avec d'importants coûts d'investissement et d'exploitation liés à une forte consommation d'électricité, une consommation de polymères flocculants élevée et une détérioration prématurée des parois internes avec la présence de sable dans les sédiments et un faible débit par unité de traitement. Les paramètres fondamentaux d'une centrifugeuse sont présentés dans le Tableau 5.

Tableau 5 : Récapitulatif des paramètres fondamentaux centrifugeuse (Perroni, 2006)

Caractéristiques	Valeur
Débit de boue en entrée (m ³ /h)	3 – 20
Quantité de boue déshydratée (kg MS/h)	400
Siccité moyenne attendue (%)	≈ 20
Teneur en eau (%)	400
Surface pour installation (m ²)	90
Coût moyen d'opération (FCFA/Tonnes MS)	9 829 à 13 106 (15 – 20 €)
Mobilité	Possible
Système de travail	Discontinu

▪ **Filtre presse à plateaux**

Le filtre presse à plateaux est une machine de déshydratation mécanique de boues composé de plateaux recouverts de toiles filtrantes, disposés parallèlement les uns contre les autres par les vérins hydrauliques en constituant des espaces serrés, à travers lesquels les boues à filtrer, introduites sous pression, sont contraintes de passer. Cette machine présente une opération de déshydratation simple, dans laquelle, l'eau des sédiments traverse les filtres et est collectée soit par une canalisation en bout de filtre ou soit par des robinets sur chaque plateau. Les sédiments sont accumulés entre les toiles, et sont recueillis à la fin de chaque cycle par écartement successif des plateaux. Les cycles sont composés de ces phases successives : remplissage des sédiments à traiter, filtration, dépose et collecte des sédiments et de l'eau et finalement lavage des toiles. La durée de chaque cycle est fonction de la nature des sédiments,

de l'efficacité de l'alimentation et du conditionnement. Ce type de filtre presse possède en général une pression de filtration maximale de 5 MPa. Les siccités obtenues vont jusqu'à 65% ($w = 53,80\%$) (Port Autonome du Havre, 2006).

Le filtre presse à plateaux a de nombreux avantages : c'est un système en continu en apparence et automatisé, d'une efficacité élevée, avec une procédure plus rapide que la déshydratation naturelle. C'est un système souple quant à l'exploitation pour des sédiments de différentes natures, avec des possibilités de déplacement de la machine, et n'a pas besoin de polymères floculants additionnels. Par contre, cette technique compte aussi des inconvénients : c'est un système de travail continu mais nécessitant des arrêts multiples. Il présente d'importants coûts d'investissement et d'exploitation causés par la main d'œuvre élevée et la forte consommation d'électricité. Le filtre presse à plateau est illustré dans la Figure 19.

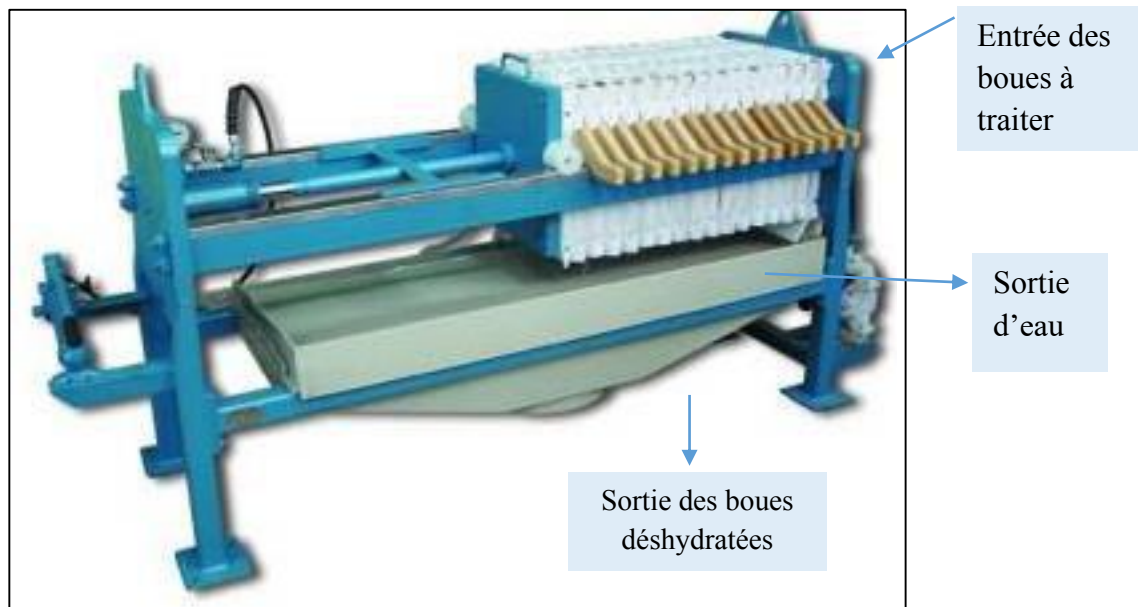


Figure 19 : Vue extérieure du filtre presse à plateaux

(Source : www.nrbombas.no.comunidades.net/filtroprensa)

Il existe encore d'autres types de filtre presse tels que le filtre presse à bandes, à membrane et le filtre presse à vis.

▪ Les machines de système continu

Les machines fonctionnant selon un système continu qui existent potentiellement en ce moment sont le système Hydrosplit®, Nemeau®, Volute® et sa version améliorée KDS®. Hydrosplit® et Nemeau® faisaient partie du programme de recherche et développement COVASED (CO-VALorisation de SEDiments).

La machine **Hydrosplit®** consiste en une série d'hydrocyclones qui combinent les forces de centrifugation et de gravité afin de séparer les fractions graveleuses et sablonneuses réutilisables de la fraction de boue polluée. Il a été développé en 2010 par la société VALGO. Elle a la possibilité de trier des sédiments d'une manière continue avec un nombre réduit de travailleurs en poste, la capacité de mouvement, la surface nécessaire d'installation faible et son efficacité élevée, sont quelques avantages proposés par le système Hydrosplit®. Le système Hydrosplit® ne propose pas un grand nombre d'inconvénients. Cependant, elle ne permet pas la séparation de particules très fines qu'il faudra transporter par la suite.

Le **décanteur dynamique Nemeau®** est un outil de déshydratation composé de trois containers aux gabarits routiers et ferroviaires, facilement transportables, permettant l'accès à de multiples chantiers (Mancioppi et al., 2012). Le premier container comprend l'opération de dosage en flocculants, le deuxième container permet la séparation des fractions fines et grossières, des sédiments et le troisième container est utilisé comme aire de stockage pour assurer le fonctionnement correct du Nemeau®. Ce procédé a été développé par la société SEDIGATE (SEDiments Gestion À Terre).

Cette machine permet de séparer les fractions liquides et solides, présentes dans les boues argileuses en quelques minutes grâce à la technologie utilisée. La boue est introduite dans le premier container à travers une conduite dans laquelle les polymères flocculants sont injectés en trois points après la préparation de polymères. Ensuite, ce mélange est conduit par un écoulement à grande vitesse sur une grille où commencent le premier tamisage dynamique et l'évacuation des particules grossières. Les particules restantes continuent en suspension et sont éliminées par décantation. Ces particules sont collectées au fond de la cuve où un mécanisme de vis sans fin les comprime et transporte vers une sortie. Au final, elles sont récoltées dans un bac (Bertrand, 2010). Les paramètres fondamentaux du décanteur dynamique Nemeau® sont présentés dans le Tableau 6.

Cette méthode propose de nombreux atouts : la possibilité de fonctionnement en continu, une faible consommation d'énergie, une main d'œuvre réduite, des coûts d'exploitation peu élevés, un grand volume de sédiments traités, une efficacité élevée. L'ensemble a la possibilité de se déplacer et la surface nécessaire pour son implantation est faible (Bertrand, 2010 ; Bertrand et al., 2012 ; Dhervilly, 2010 ; Levacher & Dhervilly, 2010). L'inconvénient que présente cette technique est l'utilisation de polymères flocculants, dont la nature et le dosage doivent être ajustés.

Tableau 6 : Récapitulatif des paramètres fondamentaux du décanteur dynamique Nemeau® (Bertrand et al., 2012 ; Dhervilly, 2013)

Caractéristiques	Valeur
Débit maximal de sédiments traités (m ³ /h)	450
Siccité moyenne attendue (%)	≈ 40 – 50
Teneur en eau (%)	100 à 150
Nombre d'opérateurs par machine	2
Facteur de réduction des volumes traités	≈ 10
Coûts d'exploitation (FCFA/m ³)	≈ 7 863 (12€)
Consommation énergétique pour un débit de 30 kg MS/h (kW/h)	0,8
Débit de boue d'entrée (m ³ /h)	200 – 500
Débit de boue en sortie (m ³ /h)	20 – 50
Consommation (kW/m ³)	≈ 0,25
Surface pour installation (m ²)	27,2 – 168
Turbidité de l'eau en sortie (mg/l)	<100 à 150
Système de travail	Continu
Mobilité	Possible

La **machine de déshydratation Volute®** est une presse composée d'une vis qui tourne à une vitesse constante à l'intérieur d'une succession de nombreux anneaux fixes et mobiles et d'entretoises. Elle permet de déshydrater les boues d'une manière continue grâce à la combinaison de l'effet de cisaillement provoqué par les anneaux et la boue, de la force de compression liée à la forme tronconique du tambour, du principe de gravitation et de la filtration possible grâce aux espaces existants entre les anneaux.

Les boues sont introduites dans une chambre d'alimentation de la machine, où les polymères flocculants sont injectés. Ensuite, cette mixture est transportée par la vis au sein du tambour. Les espaces entre les hélices rétrécissent au fur et à mesure en provoquant une diminution progressive du volume de la boue grâce à l'évacuation de l'eau par le cisaillement boue-anneaux et par gravité. La forme tronconique du tambour provoque une diminution du volume de la boue par compression et la combinaison de ces principes permet d'obtenir, d'une part, un produit final avec une teneur d'eau de 81% ou moins (siccité ≈ 55%), pouvant être récupéré à l'aide d'un réservoir pour sa future valorisation et d'autre part, une quantité d'eau qui est stockée dans le collecteur d'eau. Les paramètres fondamentaux de la machine de

déshydratation Volute® sont présentés dans le Tableau 7, ainsi que les caractéristiques de deux modèles Volute® « ES-101ST » et « ES-303ST ». Ils permettent de faire une comparaison des différents types de machines qui utilisent la technologie Volute®.

Tableau 7 : Récapitulatif des paramètres fondamentaux de la machine Volute (AMCON & Levacher, 2015)

Caractéristiques	Valeur	
Concentration (mg/l)	2000	
Siccité moyenne attendue (%)	≈ 55	
Teneur en eau (%)	81	
Nombre d'opérateurs par machine	2	
Facteur de réduction des volumes traités	≈ 12 – 20	
Consommation énergétique pour un débit de 30 kg MS/h (kW/h)	0,8	
Consommation d'eau au cours du lavage par aspersion pour un débit de 30 kg MS/h (m ³ /h)	0,04	
Système de travail	Continu	
Niveau de bruit	63 dB (très faible)	
Séchage à faible concentration	Possible	
Mobilité	Possible	
Réservoir d'épaississement et réservoir de stockage	Pas nécessaire	
Type de sols fins à traiter	Boues non sableuses	
Modèle	ES-101ST	ES-303ST
Débit de boues activées en excès de la cuve d'oxydation 2000 – 4000 mg/L (m ³ /h)	3	90
Débit de séparation des boues par flottation 6000 - 35000 mg/L (m ³ /h)	5	135
Surface pour l'installation (m ²)	5	135
Puissance électrique (kW)	0,2	1,95

Les avantages de la machine Volute sont nombreux. Elle permet un système de travail continu, elle permet d'économiser en espaces grâce à sa conception compacte et l'absence de stockage, elle ne présente pas trop de pièces soumises à usure pour la maintenance, elle permet d'économiser de l'eau (elle utilise jusqu'à 62,5 fois moins d'eau qu'une centrifugeuse et 115 fois moins qu'un filtre presse à bandes) et le bruit produit à chaque cycle de déshydratation est

réduit (jusqu'à 1,3 fois moins qu'une centrifugeuse et 1,13 fois moins qu'un filtre presse à bandes) (Boullosa, 2018).

Les inconvénients de cette machine sont la présence des flocculants utilisés au sein des sédiments déshydratés qui peuvent poser des problèmes lors de la valorisation et la configuration fermée du tambour qui rend difficile le suivi l'évolution de la masse des sédiments à l'intérieur de la vis et peut provoquer des problèmes techniques en cas de blocage (Boullosa, 2018).

Le séchage naturel des sédiments est la technique de déshydratation la plus économique du point de vue énergétique. Il permet de déshydrater en discontinu tout type de sédiments en grandes quantités et d'obtenir des teneurs en eau finales faibles. Néanmoins, le séchage naturel présente une forte dépendance des conditions climatiques locales, en empêchant ainsi de déshydrater les sédiments dans des zones à fortes précipitations. En outre, cette technique n'offre pas la possibilité de mouvement. En revanche, la déshydratation mécanique permet de déshydrater les sédiments en continu et en discontinu. La procédure de déshydratation mécanique est indépendante du climat. Le produit final présente des teneurs en eau faibles. La durée de déshydratation est réduite par rapport au séchage naturel. Un bref résumé des techniques de séchage naturel et de déshydratation mécanique sont présentés dans le Tableau 8.

Tableau 8 : Récapitulatif des techniques de séchage naturel et mécanique (Levacher, 2015)

Technique	Système	Type de sols fins	Consommation énergétique	Volume traité m3/h	Mobilité	Teneur en eau
Lagunage	Continu	Tout type de sédiments	Nulle à faible	Elevé	Pas possible	Faible et fonction de temps
Lits de séchage	Discontinu	Tout type de sédiments	Nulle à faible	Elevé	Pas possible	Faible et fonction de temps
LSPR	Discontinu	Tout type de sédiments	Nulle à faible	Elevé	Pas possible	Faible et fonction de temps
Centrifugeuse	Discontinu	Tout type de sédiments	Très élevée	Très faible	Possible	Faible

Filtre presse à plateaux	Discontinu	Tout type de sédiments	Elevée	Faible	Possible	Moyenne
Filtre presse à membrane	Discontinu	Tout type de sédiments	Elevée	Faible	Possible	Faible
Filtre presse à vis	Pseudo-continu	Sols fins non fibreux peu sableux	Peu élevée	Faible	Possible	Faible
Filtre presse à bandes	Pseudo-continu	Tout type de sédiments	Elevée	Faible	Possible	Moyenne
Nemeau®	Continu	Sédiments peu organiques, non fibreux	Faible	Très élevée	Possible	Moyenne
Volute®	Continu	Boues non sableuses	Peu élevée	Faible à moyenne	Possible	Faible à moyenne
Hydrosplit®	Continu	Tout type de sédiments	Elevée	Faible à moyenne	Possible	Faible

Conclusion

Le présent chapitre avait pour but d'apporter des connaissances générales sur le cadre géographique et socio-économique de la présente étude. Le port de Douala-Bonabéri se situe dans l'estuaire du Wouri, dans la région littorale du Cameroun. Il est soumis à un climat de type équatorial côtier une température moyenne de 26,4 °C dans l'année. Selon (Ndongo et al., 2015), le relief est formé d'une succession de plaines sédimentaires et comporte trois sous-groupes de sols : ferrallitiques rouges, ferrallitiques jaunes et limoneux, ainsi que des sols hydromorphes dans les zones inondables. Une étude menée par Lakdjolbe en 2018 révélait que le niveau de pollution des eaux de l'estuaire est faible sur 217 km², modéré sur 715 km² et plus forte sur 68 km², près des berges du fleuve.

Le port de Douala s'étend sur une superficie de 400 ha. Son chenal d'accès est profond de 7 m amplifiés par un marnage de 2 m. Il fait 50 km de long (25 km en intérieur et 25 km en extérieur). La partie intérieure du chenal est celle concernée par les travaux de dragage. Le port est géré par le PAD, société à capital public institué par décret présidentiel en juin 1999, placée

sous la tutelle technique du Ministère des Transports et la tutelle financière du Ministère des Finances.

Une revue littéraire a également été présentée, fournissant des informations générales sur le dragage, les différents objectifs de l'opération et les techniques d'application. La nature, l'origine et les questions relatives à la gestion des sédiments dragués, le traitement des sédiments contaminés et les types de valorisation existantes. Les trois domaines majeurs de valorisation retrouvés dans la littérature : la construction, l'aménagement paysager et l'agronomie, ont été présentés et donnent des idées intéressantes quant aux possibilités de valorisation des sédiments dragués au port de Douala. La valorisation est cependant difficile tant que les sédiments sont dans leur état naturel avec leur forte teneur en eau. Plusieurs techniques de déshydratation de type naturel et mécanique ont ainsi été présentées, à la fin du chapitre.



CHAPITRE 2

ÉTAT DES LIEUX DU DRAGAGE AU PORT DE DOUALA-BONABÉRI



Introduction

La situation géographique du port de Douala, le long d'un fleuve côtier, contribue fortement à l'accumulation continue de boue de mangrove et de sédiments sur le plan d'eau. La capacité du port à continuellement accueillir les grands navires dépend directement de la profondeur de son chenal d'accès. Ainsi, pour ce port à faible profondeur qui ambitionne de demeurer le pôle de référence dans le Golfe de Guinée, l'activité de dragage est indispensable.

De 1999 à 2018, l'activité de dragage du port de Douala était gérée et menée par des opérateurs privés étrangers tels que *China Harbour Engineering Company (CHEC)* et *JAN de NUL (Belgique)*, à travers des contrats de concession. Ce mode de gestion entraînait chaque année des dépenses exorbitantes pour le PAD. En effet, sur les 15 dernières années de concession du dragage du port de Douala, le coût s'élevait à 156,3 milliards de FCFA (soit environ 10,4 milliards par an) (PAD, 2019). Pour limiter ces dépenses et optimiser l'activité de dragage du port, le conseil d'administration du PAD a adopté en 2018, des résolutions visant à autonomiser l'activité de dragage. Cette autonomisation devrait permettre au PAD de mieux maîtriser l'activité de dragage, réduire les coûts et renforcer les performances opérationnelles du port de Douala-Bonabéri.

L'autonomisation du dragage a conduit à la création d'une Régie Déléguée du Dragage (RDD) désormais responsable de la gestion des opérations de dragage au port de Douala, en qualité de Maître d'Œuvre. En parallèle avec la RDD, la Direction du Dragage et de la Logistique Maritime (DDLML) assure le suivi et l'évaluation desdites opérations en qualité de Maître d'Ouvrage.

Ce second chapitre décrit l'activité de dragage telle que pratiquée actuellement au port de Douala.

2.1. ORIGINE ET NATURE DES SÉDIMENTS

Selon le Netherlands Economic Institute (1993) dans son étude sur la protection environnementale du port de Douala, du chenal d'accès et des eaux côtières, l'estuaire du Wouri s'est formé au centre d'une dépression du bassin de Douala. Ce creux topographique se serait progressivement comblé d'alluvions (débris sédimentaires) provenant de la mer et du fleuve Wouri. Le patron de sédimentation et d'érosion dans l'estuaire varie en fonction des marées, des courants et des débits d'eau douce. Un autre facteur déterminant est l'existence d'un point de convergence de deux contre-courants littoraux et équatoriaux (devant la côte camerounaise ; l'un partant de l'Afrique occidentale et l'autre de l'Afrique méridionale). Cette convergence

limite la vitesse des courants littoraux ; les sédiments fluviatiles et la quantité considérable d'argile, de sable, et de limons charriés par les courants, ont donc tendance à s'accumuler dans l'estuaire. Les particules en suspension le restent tant que l'agitation des eaux est élevée ; le sable et le limon se déposent à cause de la diminution de la vitesse du courant et de l'agitation résultant.

Le fleuve Mungo, qui charrie les sédiments de la zone marécageuse volcanique sujette à l'érosion, charrie la plus grande partie des sédiments directement vers l'estuaire. Ainsi, les apports fluviaux de sédiments dans l'estuaire atteindraient 1 million de tonnes par an, dont 70 % en saison des pluies. Sur le fond, on trouve des vases fluides pouvant atteindre près de 1 m d'épaisseur.

En plus des phénomènes naturels, les sédiments proviennent encore du dépôt et la décomposition de la matière végétale/e aquatique, le ruissellement des effluents et l'érosion des sols, les rejets agricoles, industriels et domestiques.

La nature des sédiments dragués au port de Douala varie selon le milieu dans lequel le dragage est effectué. Dans le chenal d'accès, les sédiments sont principalement des vases sablonneuses tandis qu'au niveau des pieds de quai les sédiments sont principalement des sables. L'on peut également retrouver, au niveau des pieds de quai, des déchets solides tels que des marchandises échouées de navires et autres produits jetés à l'eau.

2.2. CADRE RÉGLEMENTAIRE DE LA GESTION DES SÉDIMENTS

Les opérations de dragage de sédiments et leur gestion en mer ou à terre sont encadrées par des dispositions réglementaires adoptées au niveau international, dans le cadre de conventions internationales, et au niveau national, par des lois et textes réglementaires promulguées et décrétés par l'autorité camerounaise.

2.2.1. Conventions internationales

De nombreuses conventions internationales encadrent les activités de dragage et la gestion des sédiments qui sont extraits. Elles visent plus ou moins directement les activités de dragage et d'immersion. Les conventions engagent les états signataires à respecter certaines dispositions. L'application concrète de mesures se traduit généralement par des réglementations à l'échelle communautaire (entre plusieurs pays d'une même zone géographique) et nationale.

2.2.1.1. Convention des Nations Unies sur le droit de la mer

La Convention des Nations Unies sur le droit de la mer a été adoptée en 1982. Elle définit un régime de droit global pour les océans et les mers de la planète et établit les règles détaillées touchant toutes les utilisations des océans et l'accès à leurs ressources. Elle rassemble en un seul instrument les règles traditionnelles relatives aux utilisations des océans et, dans le même temps, introduit de nouveaux concepts et régimes juridiques et tient compte des préoccupations nouvelles. La Convention fournit également un cadre permettant d'élaborer plus avant certains domaines spécifiques du droit de la mer. La République du Cameroun est une partie signataire à cette convention depuis le 19 novembre 1985 (Nations Unies, 1994).

2.2.1.2. Convention MARPOL 73/78

La Convention MARPOL 73/78 est une convention sur la prévention des pollutions par les navires et pour la protection du milieu marin contre les infractions aux réglementations relatives aux rejets illicites (précisés dans la convention). Elle complète la Convention des Nations Unies (UNCLOS) sur le droit de la mer dans son domaine. Les pays membres agissant en qualité d'Etat du pavillon, d'Etat du port ou d'Etat riverain doivent, en vertu de l'article 6, coopérer et mettre en œuvre les dispositions de la convention pour la surveillance de l'environnement et la détection des infractions. La République du Cameroun est une partie signataire à cette convention depuis le 23 juillet 2008 (Ecolex, 2001).

2.2.2. Règlementation nationale

Les textes Camerounais ne prévoient, pour le moment, aucune réglementation relative à la gestion des sédiments marins, autant à l'échelle nationale qu'à l'échelle internationale. Cependant, il existe des lois, des décrets et autres textes qui servent d'appui et de guides généraux aux projets de dragage sur l'ensemble du territoire. Il s'agit de :

- La Loi n°2000/02 du 17 avril 2000 relative aux espaces maritimes de la République du Cameroun ;
- La Loi n°96/12 du 05 août 1996 portant loi-cadre relative à la gestion de l'environnement ;
- Le Décret n°2019/034 du 24 janvier 2019 portant réorganisation du Port Autonome de Douala ;
- Le Décret n°2011/2585/PM du 23 août 2011 fixant la liste des substances nocives ou dangereuses et le régime de leur rejet dans les eaux continentales ;

- Le Décret N°2001/165/PM du 08 mai 2001 précisant les modalités de protection des eaux de surface et des eaux souterraines contre la pollution.

Il est indispensable d'établir des règlements spécifiques sur les questions du dragage et de la gestion des sédiments de dragage sur l'ensemble du territoire camerounais.

2.3. DÉROULEMENT DU DRAGAGE

Des études d'hydrosédimentation et un sondage bathymétrique du chenal d'accès au port de Douala, ont permis de définir la moyenne d'engraissement du chenal et ainsi de programmer la fréquence du dragage du chenal en fonction des comportements du cycle de sédimentation. Naturellement, le cycle de sédimentation varie en fonction des saisons (le climat). Suivant les résultats obtenus de ces études, deux campagnes de dragage par an ont été définies. Les deux campagnes se déroulent pendant une période de trois à quatre mois, séparées d'une période d'arrêt qui dure deux à trois mois.

Chaque campagne de dragage est cependant obligatoirement précédée par une instruction officielle de dragage, donnée par la RDD. La fiche d'instruction de dragage comporte des informations précises telles que : la période prévue de dragage, l'équipement (la rague) à utiliser pour l'exécution du dragage, la zone à draguer, la nature estimée des matériaux à draguer et la zone de clapage (voir Figure 20).

PORT AUTONOME DE DOUALA (P.A.D.)
DIRECTION GÉNÉRALE
DIRECTION DU DRAGAGE ET DE LA LOGISTIQUE MARITIME
DEPARTEMENT DU DRAGAGE

REPUBLIC OF CAMEROON
Peace - Work - Fatherland
PORT AUTHORITY OF DOUALA (P.A.D.)
HEAD OFFICE
DIRECTORATE OF DREDGING AND MARITIME LOGISTICS
DREDGING DEPARTMENT

FICHE D'INSTRUCTION DE DRAGAGE

TRAVAUX DE DRAGAGE D'ENTRETIEN DU CHENAL D'ACCÈS AU PORT DE DOUALA

Période : du 15 janvier au 15 février 2021
Dragage : MONT MANDARA

Au regard des plans de sondages bathymétriques effectués les 10 et 11 janvier 2021, les travaux de dragage seront orientés pour cette période, dans la partie du chenal située entre le PK13+500 et le PK21+000 à raison de 100% sur 120 m de largeur.

Nature des matériaux à draguer : +/- Vase sablonneuse.

ZONE	Derniers sondages 210 et 33 kHz			Axe			Remarques
	Pk						
AVAL	24						Production : • PK13+500 et le PK21+000 à raison de 100% sur 120 m de largeur
	23						
	22						
	19 21	X+	X+	X+			
	15 20 14	X+	X+	X+			
	17 19	X+	X+	X+			
MILIEU	18 16	X+	X+	X+			
	19 17	X+	X+	X+			
	16 16	X+	X+	X+			
	21 15	X+	X+	X+			
	14 20	X+	X+	X+			
	23 13 22	X+	X+	X+			
AMONT	12 24						
	25 11						
	10 28						
	27 9 28						
	29 8 30						
	31 7 32						
	33 6 34						
	5 38						
	4						

X+ = Zones à Draguer Zone de Clapage :
Bouée Coordonnées UTM₃₂ (X= 559464 E. / Y= 429230 N)
Géo (Lat. 3° 52' 56.71" N / Long. 9° 32' 03.64" E.) Douala, le

Pour la Régie Déléguée du Dragage
Pour le Port Autonome de Douala

Figure 20 : Exemple de fiche d'instruction de dragage

2.4. ZONES CONCERNÉES PAR LE DRAGAGE

Au port de Douala, les zones concernées par le dragage sont :

- Le chenal d'accès au port ;
- Les divers plans d'eau ;
- Les pieds de quai ;
- Les darses du fleuve Wouri.

La présente étude se limite aux sédiments issus du dragage du chenal d'accès du port.

2.5. ÉQUIPEMENTS ET MATÉRIELS DE DRAGAGE

Le PAD dispose de deux catégories d'équipements pour la réalisation effective et efficace du dragage du port. Il s'agit, d'une part, des engins flottants spécialement conçus pour les différents types de dragage et, d'autre part, des engins terrestres destinés aux travaux d'aménagement des sites de refoulement des sédiments de dragage. Comme engins flottants, il y a :

- **La drague MV VIGILANCE** : C'est une drague aspiratrice stationnaire destinée aux travaux de dragage des plans d'eau, des quais et des darses. Elle a une capacité de refoulement de 800 m³/h sur une distance d'environ 2 km (Figure 21) ;

- **La drague MONT MANDARA** : C'est une drague aspiratrice en marche destinée aux travaux de dragage du chenal d'accès. Elle a un puits de stockage d'une capacité de 3000 m³. Elle est également équipée d'une élinde de 70 cm de diamètre pour l'aspiration des sédiments jusqu'à 25 m de profondeur (Figure 22) ;
- **La drague CHANTAL BIYA** : C'est une drague polyvalente à godet (sans chaîne). Elle est équipée d'un puits d'une capacité de 630 m³, d'une grue à câble munie d'un godet de 1 m³ à son extrémité ;
- **Le navire DMC Patriote** : C'est un navire de type Delta MultiCraft destiné à assister les dragues pendant les opérations de dragage ;
- **La vedette hydrographique HYDRO** : C'est une vedette de sondage hydrographique équipé d'un mono faisceau bi-fréquence pour les levées bathymétriques dans le chenal d'accès au Port de Douala.

Comme engins terrestres, il y a :

- **Le bulldozer D10** : destiné à étaler les produits de dragage dans les sites de refoulement ;
- **Une grue** : d'une capacité de 45 tonnes dédiée aux opérations de manutention des charges dans les chantiers de dragage.



Figure 21 : La drague MV Vigilance



Figure 22 : La drague Mont Mandara

2.6. EXTRACTION DES SÉDIMENTS DANS LE CHENAL

La méthode d'extraction des sédiments est fonction du type de drague utilisé, qui lui-même dépend de la nature de la zone à draguer. Ainsi, la méthode varie selon qu'on se place au niveau des pieds de quai, au niveau des plans d'eau ou au niveau du chenal d'accès.

Le dragage du chenal d'accès est fait avec la drague aspiratrice en marche Mont Mandara. La drague est conduite par le commandant/maître dragueur jusqu'au lieu de dragage défini par la fiche d'instruction de dragage. Arrivé au lieu de dragage, le Mont Mandara est soit mis à l'arrêt, soit ralenti. L'élinde est étendue et, sous l'action de pompes de dragage situées dans la partie basse du navire, les sédiments sont aspirés par la bouche de l'élinde (Figure 23) et refoulés dans le puits de 3000 m³ à bord.

Quittant le fond de mer pour le puits de stockage, les sédiments passent par un tube orange et bleu (Figure 24) doté d'un capteur de densité/vélocité. Ce capteur détermine à temps réel la variation de densité des matériaux dragués et la vitesse à laquelle les matériaux sont aspirés. Ces valeurs sont transmises directement sur le Tableau de bord du maître dragueur qui dirige l'opération. Le ratio de densité/vélocité permet de savoir à tout moment la nature du matériau dragué. Une faible densité (qui varie légèrement autour de la valeur de densité de l'eau de mer $\approx 1023 \text{ kg/m}^3$) et une vitesse élevée indiquent généralement que le matériau aspiré est principalement constitué d'eau. Par contre, une densité plus élevée et une vitesse plus lente indiquent que le matériau aspiré est principalement constitué de sédiment. Comme l'illustre la Figure 25, le Tableau de bord affiche en (1) la vitesse d'aspiration en m/s, le débit de production en m³/h et la densité du matériau en t/m³. En (2) il affiche la profondeur de l'élinde dans l'eau en temps réel. En fonction de ces informations, le maître dragueur ajuste la position de l'élinde en augmentant sa profondeur à l'aide des manettes situées sur le Tableau de bord (Figure 26).



Figure 23 : Bouche d'aspiration de l'élinde

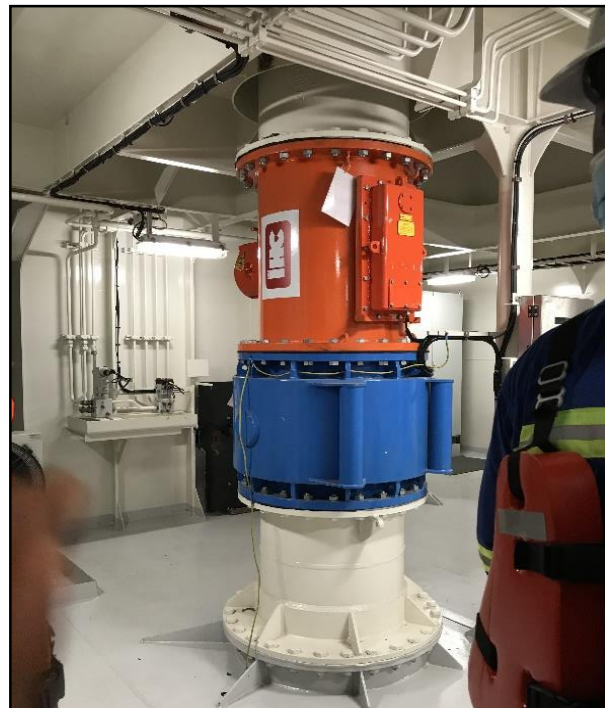


Figure 24 : Tube densité/vélocité

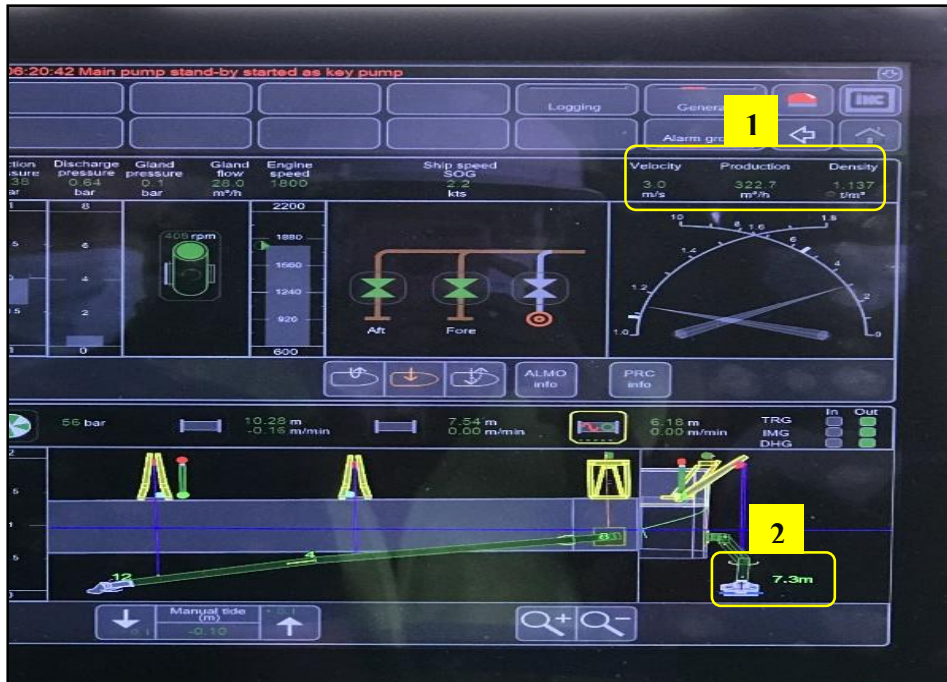


Figure 25 : Les informations percevables sur le Tableau de bord



Figure 26 : Aperçu général du Tableau de bord

Quand le puits (illustré par la Figure 27) est plus ou moins rempli, le maître dragueur arrête l'extraction des sédiments, et fait remonter l'élinde à l'aide des mannettes. Le puits dispose d'un équipement appelé *over flow* qui fait sortir l'excédent d'eau du puits.

La drague est ensuite conduite à la zone de clapage pour le rejet de la totalité des sédiments dragués via l'ouverture du fond de cale. La zone de clapage est en général une zone de forte profondeur appelée fosse du Cameroun. A la fin du clapage, le navire est reconduit vers

la zone de dragage pour un nouvel épisode de dragage. Le dragage (et le clapage) des sédiments est répété durant toute la période définie par la fiche d'instruction de dragage. Lorsqu'on a effectué un épisode d'extraction et un épisode de clapage, on dit que l'on a effectué un cycle de dragage. Selon les instructions données par la RDD et les objectifs fixés par le maître dragueur, il peut se faire plusieurs cycles de dragage par jour durant toute la durée de la période de dragage.



Figure 27 : Refoulement des sédiments dans le puits

Pour chaque cycle de dragage, les informations suivantes sont notées dans une feuille de chargement :

Avant dragage,


- Les tirants d'eau du navire Avant/Milieu/Arrière (en m) ;
- Le déplacement de début du navire (en tonnes) ;
- La charge du navire avant dragage (en tonnes).

Après dragage,

- Les tirants d'eau du navire Avant/Milieu/Arrière (en m) ;

- Le déplacement de fin du navire (en tonnes) ;
- La charge du navire après dragage (en tonnes) ;
- Le volume des matériaux dragués (en m³) ;
- Les tirants d'air Avant et Arrière du puits de stockage (en m).

En parcourant l'historique des volumes dragués dans le chenal, on constate qu'environ 3,2 Mm³ de sédiments étaient dragués par année soit en moyenne 1,6 Mm³ par campagne de dragage ou 3500 à 6000 m³ par jour (PAD, 2019), sous les concessionnaires étrangers. Ces valeurs sont très peu comparables aux volumes obtenus récemment, où environ 3000 m³ de sédiments sont dragués par cycle comme l'illustre l'extrait de feuille de chargement dans la Figure 28.



FEUILLE DE CHARGEMENT DE LA DRAGUE MONT MANDARA/DREDGER MONT MANDARA

Semaine/Week du/for: 29/04/21 au/at: 07/06/21 Date/date...

N°	AVANT DRAGAGE/BEFORE DREDGING						APRES CHARGEMENT/AFTER DREDGING						CLAPAGE/				
	H, début/start time	TEAV/draft fore	TEM/draft mean	TEAR/draft aft	Navire à vide/Emp ty SHIP	Dpt, début/displacement (t)	Charge AV dr / load bef dredging	H, fin / end time	AV / draft fore	TEM / draft mean	TEAR / draft aft	Dpt, Fin Drag / displacement aft dredging (t)	charge apres drag (t)	Vol av dragage (m3)/ load aft dredging	TA Bd (AV et AR)	TA Td (AV et AR)	Dpt, Av clap/Di placement bef dumping
2089		2.83	2.21	1.60	2087	2036		5.17	5.00	6.84	5147		2922	0.70	0.70	5147	
210		3.93	2.29	1.65	2087	2098											

Figure 28 : Extrait d'une feuille de chargement de la drague Mont Mandara

2.7. GESTION DES SÉDIMENTS ISSUS DU CHENAL

Les sédiments issus du chenal sont soumis à un mode de gestion par immersion. Après le dragage, le rejet des sédiments se fait principalement par clapage en haute mer, dans une zone appelée « fosse du Cameroun. »

Conclusion

L'objectif de ce chapitre était de présenter l'activité de dragage telle qu'elle est pratiquée au port de Douala-Bonabéri, spécifiquement pour l'entretien du chenal d'accès. Le PAD a entrepris en l'an 2018, l'autonomisation de l'activité de dragage dans le but de mieux maîtriser, réduire les coûts exorbitants de l'opération et améliorer les performances opérationnelles du port. Désormais, le dragage est géré localement par la RDD. La DDLM

assure le suivi et l'évaluation générale des activités. On observe que l'activité est très organisée, car elle suit une procédure bien définie, depuis sa planification jusqu'à sa réalisation. Le port possède des équipements de pointe et d'un personnel compétent pour la réalisation et le suivi de l'activité.

Le cadre réglementaire de la gestion des sédiments a également été défini. Au niveau international, la République du Cameroun est partie signataire à deux grandes conventions : la convention des Nations Unies sur le droit de la mer et la convention MARPOL. Au niveau national, la gestion des sédiments est encadrée par plusieurs lois et décrets d'application généraux. Cependant, aucune réglementation spécifique à la gestion des sédiments marins n'a encore été établie. Une telle réglementation qui fixe les directives nationales en termes de dragage et de gestion des sédiments dragués selon le contexte local, permettrait une pratique optimale des activités de dragage au Cameroun.



CHAPITRE 3

APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE



Introduction

Ce chapitre présente l'approche méthodologique adoptée quant à la caractérisation des sédiments, le choix des moyens de valorisation ainsi que le dimensionnement d'une filière de décantation des sédiments en vue de leur valorisation. Ce chapitre est ainsi divisé en trois parties.

3.1. CHOIX DES PARAMÈTRES

Pour cette étude, l'objectif des analyses est de déterminer la nature et la qualité des sédiments. Ces deux paramètres sont essentiels car ils permettent de déterminer la méthode adéquate pour la gestion éventuelle des sédiments : ils influencent le choix du moyen de collecte, de stockage, de transport, d'élimination ou de valorisation des sédiments. Ainsi, les paramètres retenus pour les analyses réalisées sont regroupés en deux grandes catégories telles qu'illustrées dans le Tableau 9.

Tableau 9 : Paramètres retenus pour l'analyse qualitative des sédiments

	Catégorie	Paramètre
Paramètres Nature	Granulométrie	-
	Naturels	Densité
		Matières sèches (MS)
		Potentiel Hydrogène (pH)
		Fraction de matières organiques
		Conductivité
		Aluminium (Al)
		Chlorures (Cl)
Paramètres Qualité	Indésirables	Sulfates (SO ₄)
		Azote Kjeldhal (N)
		Phosphore (P)
		Phosphates (PO ₄)
		Fer (Fe)
		Zinc (Zn)
		Cuivre (Cu)
	Toxiques	Silice (Si)
		Cadmium (Cd)
		Chrome (Cr)
		Mercure (Hg)

		Plomb (Pb)
	Micropolluants organiques	Huiles et graisses
		Hydrocarbures totaux (HAP + PCB)

3.2. ÉCHANTILLONNAGE DES SÉDIMENTS

3.2.1. Matériel

Le matériel utilisé pour prélever les sédiments est présenté ci-dessous :

- Un seau noir de 10 L (Figure 29) ;
- Un seau transparent de 10 L avec couvercle et pelle (Figure 30) ;



Figure 29 : Seau noir 10 L

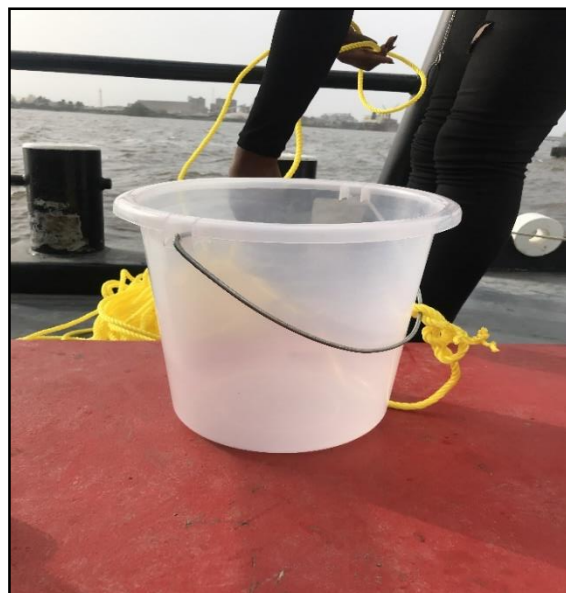


Figure 30 : Seau blanc transparent 10 L

3.2.2. Méthode

Le travail de terrain a consisté en un voyage en mer avec une équipe d'ingénieurs de suivi de la Direction du Dragage et de la Logistique Maritime (DDL) et la RDD lors d'une mission d'évaluation des opérations de dragage le long du chenal d'accès. Le navire d'assistance au dragage DMC Patriote a été emprunté pour quitter le quai et rejoindre la drague aspiratrice en marche Mont Mandara au point kilométrique PK11, le point de référence PK0 correspondant au pont sur le Wouri.

Après avoir rejoint le Mont Mandara et être montés à bord, le navire de drague a été conduit par le commandant jusqu'à la zone à draguer située entre PK18 et PK20. Arrivés à destination, le maître dragueur dans la cabine de pilotage a entamé la première partie du cycle de dragage (aspiration des sédiments), contrôlant les opérations à partir du Tableau de bord. Les sédiments ont été aspirés par une élinde et stockés dans le puits de 3000 m³ à bord du navire de drague (voir Figure 31).



Figure 31 : Puits rempli des sédiments

À la fin de ce demi-cycle de dragage, un volume de 7,5 L de sédiments a été prélevé. Le prélèvement a été réalisé directement dans le puits du navire (Figure 32). Les 7,5 L de sédiments prélevés ont ensuite été transférés dans un seau blanc transparent avec couvercle. Ce dernier a été ensuite fermé et transporté au laboratoire pour analyses.



Figure 32 : Prélèvement des sédiments dans le puits à l'aide du seau

3.3. ANALYSES EN LABORATOIRE

Les sédiments prélevés ont été séparés en deux quantités ; 1,5 L pour l'analyse granulométrique et le reste (6 L) pour les analyses physico-chimiques.

3.3.1. Analyse granulométrique

Deux types d'essais ont été réalisés afin de déterminer la granulométrie des sédiments : l'analyse granulométrique par tamisage et l'analyse granulométrique par sédimentation. L'analyse granulométrique par tamisage, réalisée selon la norme NF P94-056, a permis de déterminer la distribution de la taille des particules des sols de dimension inférieure à 100 mm. L'essai par tamisage consiste à diviser et à séparer un matériau en plusieurs classes granulaires

de dimension décroissantes au moyen d'une série de tamis. Les dimensions de mailles et le nombre des tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision requise. Les masses de particules retenues sur les différents tamis sont rapportées à la masse initiale de matériau pour obtenir le pourcentage des refus cumulés selon la formule.

$$\% \text{ Refus cumulés} = \frac{\text{Masse refus cumulés (g)}}{\text{Masse totale sèche (g)}} \quad (1)$$

Le pourcentage du tamisât est ensuite obtenu grâce à l'expression :

$$\% \text{ Tamisât} = 100 - \% \text{ Refus cumulés} \quad (2)$$

Etant donné que les sédiments de dragage sont très fins, une grande partie du matériau passe au travers le tamis de 0,08 mm d'ouverture. Un essai granulométrique par sédimentation est donc réalisé en plus, selon la norme NF P94-057, afin d'obtenir des résultats plus précis sur la granulométrie des particules dans le tamisât.

Cet essai utilise le fait que dans un milieu liquide au repos, la vitesse de décantation des grains fins à très fins est fonction de leur dimension. Par convention, cette loi est appliquée aux éléments d'un sol pour déterminer des diamètres équivalents de particules. La loi de Stokes, donnée par l'équation (3), donne, dans le cas de grains sphériques de même masse volumique, la relation entre le diamètre des grains D et leur vitesse de sédimentation v en cm/s. Par cet essai, il est possible de déterminer la distribution pondérale de la taille des particules des sols de dimension inférieure à 80 μm .

$$v = \frac{g(\gamma_s - \gamma_w)}{18\eta} D^2 \quad (3)$$

Avec :

γ_s = poids volumique en g/cm^3

γ_w = poids volumique du liquide (l'eau) en g/cm^3

g = accélération de la pesanteur en cm/s^2

D = diamètre de la particule en cm

η = viscosité dynamique en poises (ou $\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s})$)

Avant la réalisation de ces essais, les sédiments sont lavés, puis séchés dans une étuve thermo-régulée à 105 °C pendant 24 h. Un matériau solide sec est obtenu.

Les particules inférieures à 80 μm sont mises en suspension dans de l'eau additionnée d'un défloculant, le métaphosphate de sodium PMnO_4 . Au moyen d'un densimètre, l'évolution

de la masse volumique de la solution et la profondeur d'immersion de l'appareil sont mesurées à plusieurs intervalles de temps pendant 24 heures. Cette étape est illustrée dans la Figure 33. Ainsi, pour chaque série de lecture, le diamètre équivalent D des plus grosses particules non sédimentées et le pourcentage pondéral Q d'éléments inférieurs ou égaux à D contenus dans la suspension sont calculés selon les formules (4) et (5).

$$D = \sqrt{\frac{18\eta H}{g(\gamma_s - \gamma_w)t}}$$

$$Q (\%) = \frac{V\gamma_s\gamma_w}{gP(\gamma_s - \gamma_w)}(r - 1)$$

Avec, en unités SI :

H/t = vitesse des particules se trouvant à la profondeur H

D = diamètre des grains encore en suspension

H = la profondeur de la chute des grains

γ_w = poids volumique de l'eau

r = densité de la suspension

g = accélération de la pesanteur

V = volume de la suspension

η = viscosité dynamique

t = temps

γ_s = poids volumique des grains solides

P = poids du sol sec dans la suspension



Figure 33 : Déroulement de l'essai par sédimentation

3.3.2. Analyses physico-chimiques

Les analyses physico-chimiques ont été réalisées dans le but de déterminer la qualité des sédiments en évaluant leur degré de contamination, si elle existe. En fonction du paramètre à déterminer, différents outils et méthodes ont été utilisés.

Les 6 L de sédiments à analyser ont subi un traitement préalable aux analyses physico-chimiques retenus pour déterminer les paramètres mentionnés plus haut. Ce traitement avait pour but la minéralisation totale de la matière solide sèche, en guise de préparation aux analyses par spectrophotométrie atomique. Pour obtenir la matière solide sèche, les sédiments ont été insérés dans des récipients appropriés et séchés dans une étuve thermo-régulée à 105 °C pendant 24 h. Les blocs de sédiments (matière solide sèche) obtenus ont été délicatement écrasés, afin d'en faciliter la procédure de minéralisation.

Les matières solides séchées sont minéralisées en bombe fermée par un mélange d'acide nitrique, d'acide chlorhydrique et d'acide fluorhydrique à environ 120 °C pendant 180 minutes. Cette attaque acide est totale et le minéralisat liquide obtenu est analysé pour sa teneur en métaux, par absorption atomique avec ou sans flamme. La précision de cette méthode, sa reproductibilité (de l'ordre de 7 %) et sa facilité de mise en œuvre en font une méthode de choix pour l'étude de faibles quantités d'échantillons, comme les matières en suspension rencontrées dans les zones côtières (Chiffolleau & Truquet, 1994). Après la minéralisation des sédiments, les différents paramètres ont été analysés selon les méthodes suivantes :

- **Détermination de la densité**

Un volume V [m^3] de l'échantillon a été prélevé à l'aide d'un bécher, et la masse M [g] de ce volume a été mesurée sur une balance. La densité ρ [g/m^3] des sédiments a été déterminée en calculant le rapport suivant :

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (6)$$

- **Détermination de la teneur en matière sèche (MS)**

Un volume de l'échantillon a été prélevé et pesé à l'aide d'une balance. La valeur de la masse initiale M_1 [g] a été relevée. Ensuite, le bécher a été mis à l'étuve à 105 °C pendant 2 h. Enfin, la masse finale M_2 [g] a été mesurée et relevée. La teneur en matière sèche, exprimée en pourcentage, a été obtenue en appliquant la formule suivante :

$$\% MS = \frac{M_2}{M_1} \times 100 \quad (7)$$

▪ **Détermination de la fraction de matière organique (MO)**

Un volume de l'échantillon a été prélevé et pesé à l'aide d'une balance. La valeur de la masse initiale M_1 [g] a été relevée. Le bécher a été mis à l'étuve à 105 °C pendant 2 h. La masse M_2 [g] du bécher a été mesurée et relevée. Le produit obtenu a ensuite été carbonisé à 40 °C pendant 1 h et le bécher a été pesé une troisième fois pour obtenir la masse M_3 [g] de la matière minérale obtenue. La fraction de matière organique, exprimée en pourcentage, s'obtient grâce à la formule suivante :

$$\%MO = \frac{M_2 - M_3}{M_1} \times 100 \quad (8)$$

▪ **Détermination des paramètres chimiques**

Les teneurs en chlorures (Cl), sulfates (SO₄), azote kjeldahl (NTK), phosphore (P) et phosphates (PO₄) ont été déterminés à l'aide d'un spectrophotomètre de marque Biobase® modèle V1600. Il s'agit d'un appareil digital d'analyse chimique, capable d'effectuer bon nombre de tests grâce à une multitude des méthodes d'analyses préprogrammées. Il donne des résultats rapides et précis, à condition que la procédure d'analyse soit bien suivie et que les réactifs correspondant à chaque analyse soient correctement utilisés.

Pour chaque analyse, une quantité du (ou des) réactif(s) correspondant(s) est mélangée avec un volume de l'échantillon à analyser. Ce mélange est inséré dans la cuve échantillon du photomètre. Le programme d'analyse est ensuite sélectionné parmi les programmes préinstallés, et lancé. Les résultats sont présentés sur l'afficheur en mg/l ou µg/l. La Figure 34 illustre le spectrophotomètre utilisé dans le cadre de ce travail.

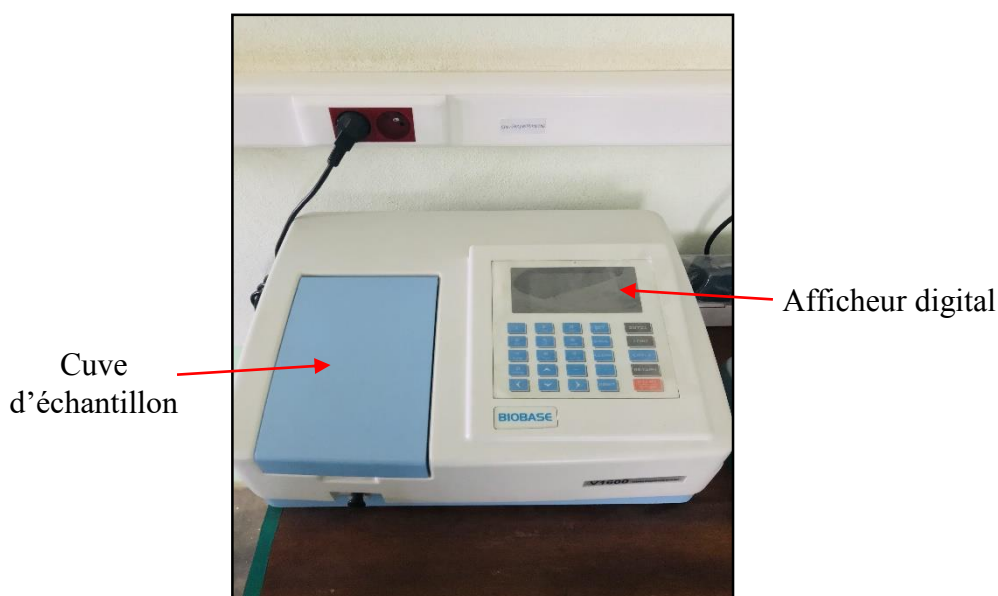


Figure 34 : Spectrophotomètre BIOBASE V1600

▪ **Détermination de la teneur en métaux lourds et autres minéraux**

Les teneurs en aluminium (Al), fer total (Fe), zinc (Zn), cuivre (Cu), silice (SiO₂), chrome total (Cr), plomb (Pb), mercure (Hg) et cadmium (Cd) ont été déterminés à l'aide d'un spectrophotomètre de marque Hach® modèle DR1900. Il s'agit d'un spectrophotomètre portable, idéal pour les travaux de terrain. Il intègre le plus grand nombre de méthodes préprogrammées, avec une précision qui va jusqu'à 800 nm. Il permet également de créer des méthodes personnalisées. Son mode de fonctionnement est similaire à celui du spectrophotomètre de marque Biobase® présenté plus haut, mais les procédures d'analyse varient d'un paramètre à un autre. La Figure 35 montre l'appareil utilisé dans le cadre de ces travaux.

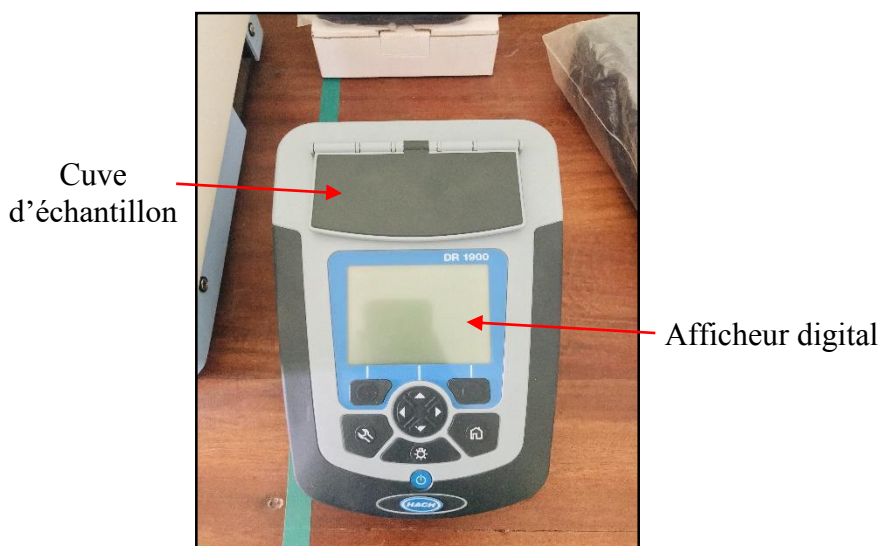


Figure 35 : Spectrophotomètre HACH DR1900

▪ **Détermination de la teneur en huiles et graisses**

La teneur en huiles et graisses des sédiments a été déterminée par la méthode gravimétrique. Il s'agit d'une méthode qui permet de mesurer des concentrations en huiles et graisses totales ou minérales supérieures à 3 mg/l dans les effluents traités. Les huiles et graisses sont extraites de l'échantillon avec de l'hexane par agitation continue pendant au moins 16 heures et une deuxième agitation d'au moins 60 minutes. La phase organique est séparée, puis asséchée avec du sulfate de sodium et évaporée. Les substances extraites (huiles et graisses) sont ensuite dosées par gravimétrie, une méthode d'analyse qui utilise la masse. Elle peut permettre de trouver soit la nature d'un composé (par la quantité de l'un de ses ions), soit la quantité d'une substance dans un mélange (Wikiversity, 2021).

▪ **Détermination de la teneur en hydrocarbures totaux**

La teneur en hydrocarbures totaux (HAP et PCB) des sédiments a été déterminée par la méthode chromatographie en phase gazeuse avec détection par spectrométrie de masse, selon la norme ISO 28540 : 2011. C'est une méthode pour le dosage d'hydrocarbures présents dans l'eau potable et les eaux souterraines à des concentrations massiques supérieures à 0,005 µg/l et présents dans les eaux de surface à des concentrations massiques supérieures à 0,01 µg/l, pour chaque composé individuel.

3.4. CHOIX DES MOYENS DE VALORISATION

La valorisation effective des sédiments de dragage, bien qu'étant une démarche noble, peut rencontrer plusieurs types d'obstacles : des obstacles techniques (compétences et/ou équipements limitées), des obstacles économiques (les coûts de traitement des sédiments contaminés ou non), des obstacles environnementales (liées à une mauvaise qualité physico-chimique des sédiments) ou des obstacles réglementaires (quand celle-ci considère les sédiments marins comme des déchets et n'autorise pas la valorisation). Afin de réduire la portée de ces obstacles, trois critères généraux, présentés en détail dans le Tableau 10, ont été établis pour faciliter le choix des possibles moyens de valorisation.

Tableau 10 : Critères de choix des méthodes de valorisation des sédiments

Critère		Question d'évaluation
Critère technique	Technique de valorisation	Est-ce que la méthode de valorisation est accessible sur le plan technique (compétence technique, disponibilité des équipements nécessaires...) ?
Critère social	Pertinence dans le contexte local	Est-ce que la méthode de valorisation apporte une solution à un problème concret dans l'environnement de l'étude ou permet l'amélioration des conditions de vie des populations ?
Critère environnemental	Impacts sur l'environnement	Est-ce que la méthode de valorisation contribue à améliorer l'environnement ?

L'application de ces critères devrait permettre de faire des choix réalistes pour la valorisation des sédiments de dragage du port de Douala. Le critère économique n'a pas été retenu dans cette étude car en fonction du moyen de valorisation, des études supplémentaires permettant de déterminer les paramètres de dimensionnement nécessaires à la mise en œuvre, sont à réaliser. Les résultats de ces études permettront de faire une estimation correcte des coûts et ainsi, d'évaluer la pertinence économique du moyen de valorisation.

Avant de procéder, toutefois, à la valorisation des sédiments, il convient de stocker ces derniers et d'éliminer les excédents d'eau aspirés lors de l'opération. Cette procédure sera alors suivie de la déshydratation proprement dite des sédiments, dans le but d'augmenter la siccité (ou de réduire la teneur en eau) des sédiments. Un bassin de décantation est donc dimensionné pour recevoir le mélange (sédiments + eau) dragué et séparer la fraction liquide des fractions solides. La décantation a l'avantage de permettre le tri granulométrique des sédiments.

3.5. DIMENSIONNEMENT D'UNE UNITÉ DE DÉCANTATION POUR LES SÉDIMENTS

3.5.1. Principe de fonctionnement

Le prétraitement des sédiments par décantation consiste à déposer à terre, dans des bassins spécialement aménagés, les sédiments dragués dans le but de séparer au maximum les phases solides et liquides issues de l'extraction et de la dilution des sédiments lors du dragage par aspiration. En effet, les dragages hydrauliques permettent l'aspiration des sédiments en même temps que d'importants volumes d'eau, qui assurent la fluidité des produits aspirés. Les bassins peuvent être étanchéifiés si le niveau de contamination des déblais ou la sensibilité des eaux souterraines le justifient.

La décantation se fait généralement en trois phases : la phase de remplissage, la phase d'égouttage et le rejet des eaux décantées. Un flocculant peut également être utilisé pour accélérer et améliorer la décantation des particules fines avant le rejet. La floculation est généralement nécessaire dans le cas d'une concentration en suspension trop élevée et dans le cas d'une qualité médiocre des sédiments susceptibles de contaminer le milieu récepteur. L'ajout du flocculant permet également la destruction de la matière organique et la stabilisation des éléments polluants (IDRA Environnement, 2016). A la fin de la décantation, les sédiments sont emmenés vers les voies de stockage ou de valorisation.

3.5.1.1. Phase de remplissage

Le remplissage du bassin est assuré par refoulement du mélange (vase + eau) à partir du puits de la drague aspiratrice. Ce principe de transport des sédiments dragués correspond parfaitement à la nature des matériaux à draguer qui présentent une forte teneur en eau.

3.5.1.2. Phase d'égouttage

C'est la phase de décantation à proprement parler. Les sédiments reposent dans le bassin pendant un temps de séjour défini selon la taille des particules à sédimenter. Une distribution granulométrique décroissante s'opère sur le bassin de l'amont vers l'aval. Il est généralement effectué des séries de retournement et d'aération des sédiments dans le bassin par des engins adaptés, pour en améliorer le séchage.

3.5.1.3. Rejet des eaux décantées

Les eaux décantées sont recueillies dans des lagunes ou bassins de gestion des eaux. De manière régulière, des analyses sont réalisées sur l'eau pour veiller au respect des normes de rejet établies localement.

La Figure 36 présente la coupe longitudinale d'un système de décantation aménagé dans un seul bassin. Les différentes phases de la décantation se déroulent dans les compartiments séparés de barrières perméables. Ici, un compartiment pour remplissage (zone d'arrivée), deux compartiments pour l'égouttage (première et deuxième chambres) et un compartiment pour le recueil des eaux (zone de sortie). Cette type de bassin est plus adapté pour les particules de type limon, sables et graviers car le temps de rétention est court (AFB, 2018).

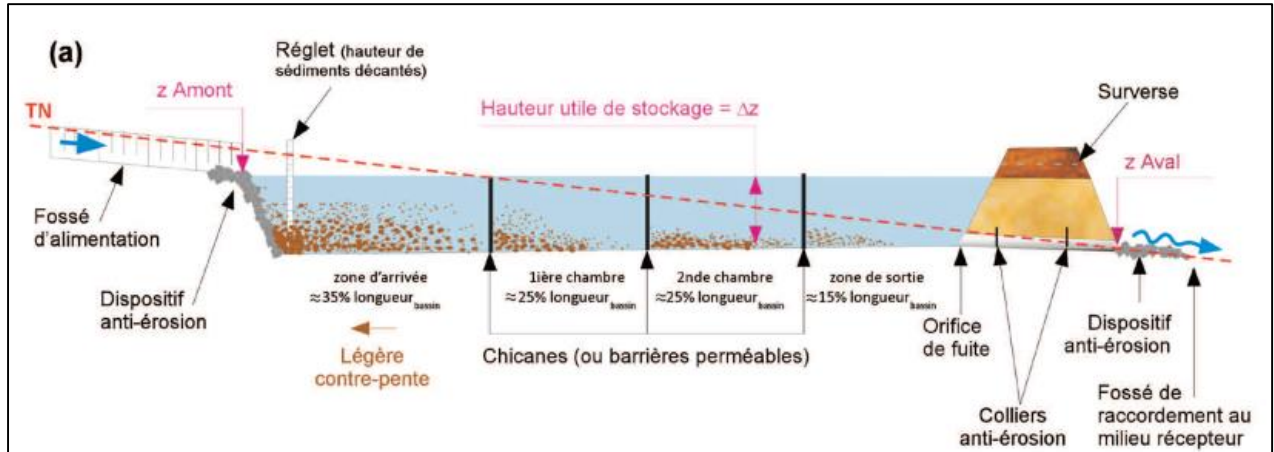


Figure 36 : Schéma montrant le fonctionnement d'un bassin de décantation (AFB, 2018)

Pour les sédiments du port de Douala, il est proposé une filière de décantation sur deux bassins. Le premier bassin pour le remplissage et l'égouttage des sédiments, et le deuxième bassin pour le rejet des eaux décantées. Les eaux vont du premier bassin au deuxième à travers des tuyaux PVC de 20 cm de diamètre avec vannes d'arrêt d'eau pour contrôler la circulation des eaux. Les vannes sont fermées pendant tout le temps de la décantation, puis ouvertes à la fin de celle-ci. Le deuxième bassin est constitué d'un système filtrant par lit granulaire pour limiter que d'éventuels éléments polluants ne soient rejetés dans le milieu récepteur. Les tuyaux

de sortie du bassin de décantation situés aux deux extrêmes sont raccordés chacun à des tuyaux de 10 cm de diamètre, espacés de 5 m. Ces derniers sont perforés sur toute leur longueur pour permettre la répartition uniforme des eaux décantées sur la surface du dispositif filtrant. La base du bassin de rejet est conçue avec une pente de façon à faire converger les eaux filtrées vers un tuyau de sortie en PVC pour leur acheminement vers le milieu récepteur.

3.5.2. Bases de dimensionnement

Les dimensions des bassins décrits plus haut sont présentées ici pour un volume expérimental de sédiments/eau à valoriser de 10 000 m³.

3.5.2.1. Volume d'entrée

Le volume d'entrée V correspond au mélange sédiments/eau extraits par la drague aspiratrice à être retenu dans le bassin de décantation (remplissage + égouttage). Il est fixé ici à 10 000 m³.

3.5.2.2. Taille minimale des particules

Le bassin de décantation est conçu pour retenir les particules avec un diamètre minimal D_{\min} de 15 μm (à partir de la classe granulométrique des vases et boues argileuses en montant).

3.5.2.3. Vitesse de sédimentation

La vitesse de sédimentation v des particules dans le bassin de décantation est obtenue à l'aide de la loi de Stokes exprimée dans l'équation (3).

3.5.2.4. Hauteur du bassin de décantation

La hauteur h_{dec} du bassin de décantation est fixée à 3 m.

3.5.2.5. Temps de sédimentation

Le temps de sédimentation t dans le bassin de décantation est obtenu en opérant un rapport entre la hauteur du bassin h_{dec} et la vitesse de sédimentation des particules dans le bassin v , selon l'équation (10).

$$t = \frac{h}{v} \quad (10)$$

3.5.2.6. Surface du bassin de décantation

La surface S du bassin est donnée par l'équation (11). Il est fonction du volume du bassin et sa hauteur. Quand la surface est très grande, il est possible de réaliser plus d'un bassin de décantation dont la somme des surfaces égale la surface dimensionnée S .

$$S = \frac{V}{h} \quad (11)$$

3.5.2.7. Volume du bassin de rejet

Le volume de ce bassin V_{rejet} est fixé à 1 350 m³. Ce bassin dispose d'un lit granulaire constitué de bas en haut d'une couche de graviers de 5/15, de graviers de 10/14, de sables grossiers et de terre végétale pour couverture.

3.5.2.8. Hauteur du bassin de rejet

La hauteur h_{rejet} de ce bassin est également fixée à 3 m.

3.5.2.9. Surface du bassin de rejet

La surface du bassin S_{rejet} est donnée par l'équation (12). Il est fonction du volume du bassin et sa hauteur.

$$S_{\text{rejet}} = \frac{V_{\text{rejet}}}{h_{\text{rejet}}} \quad (12)$$

Après la décantation, les sédiments peuvent être retirés du bassin à l'aide de bulldozer et camions bennes, pour être acheminés vers une unité de traitement par stabilisation (avec liants hydrauliques) ou par déshydratation (préférentiellement mécanique) en vue de leur valorisation.

Conclusion

Dans ce chapitre, l'approche méthodologique utilisée pour la caractérisation des sédiments, la proposition des débouchés de valorisation et le dimensionnement d'une filière de décantation ont été présentés. Neuf paramètres de nature et treize paramètres de qualités ont été retenus pour la caractérisation des sédiments.

Trois critères ont été retenus pour orienter le choix des possibilités de valorisation des sédiments : le critère technique, le critère social et le critère environnemental. Le critère économique n'a pas été retenu car nécessitant la réalisation d'études supplémentaires pour une estimation correcte des coûts. L'application de ces critères permet de limiter la portée des obstacles qui se dressent contre les démarches de valorisation des sédiments de dragage en général. Enfin, la méthodologie de dimensionnement d'une unité de décantation a été présentée.



CHAPITRE 4

RÉSULTATS ET DISCUSSION



Introduction

L'objectif de cette étude était de déterminer les caractéristiques des sédiments de dragage issus du port de Douala-Bonabéri, en vue de leur valorisation. Pour atteindre cet objectif, des analyses granulométriques et physico-chimiques ont été réalisées. Des moyens possibles de valorisation ont ensuite été évalués au travers de trois critères pour en évaluer la pertinence. Enfin, une filière de décantation a été dimensionnée pour éliminer l'excès d'eau dans les sédiments, avant leur réutilisation effective. Ce chapitre est divisé en trois parties, présentant ainsi les résultats de chaque activité susmentionnée.

4.1. RÉSULTATS DES ANALYSES SUR LES SÉDIMENTS

Il s'agit ici des résultats des analyses granulométriques (par tamisage et par sédimentométrie) et des analyses physico-chimiques (pH, conductivité, teneur en éléments/composés chimiques, teneur en métaux lourds et hydrocarbures).

4.1.1. Analyse granulométrique par tamisage

Masse totale du matériau sec = 635 g

Le Tableau 11 présente les résultats de l'essai par tamisage.

Tableau 11 : Résultats de l'essai par tamisage des sédiments

Ouverture des tamis (mm)	Poids des refus (g)	% Refus cumulés	% Tamisât
5	0,0	0,0	-
2	15,3	2,4	97,6
1	38,6	6,1	93,9
0,5	100,1	15,8	84,2
0,315	132,4	20,9	79,1
0,16	191,1	30,1	69,9
0,08	215,5	33,9	66,1

On observe que le plus petit tamis, ayant une ouverture de 0,08 mm (ou 80 µm) laisse passer plus de la moitié du matériau (66,1 %). Ce qui confirme le besoin d'une analyse granulométrique par sédimentométrie pour obtenir la distribution pondérale de cette fraction du tamisât.

4.1.2. Analyse granulométrique par sédimentométrie

L'essai par sédimentométrie a été réalisé à 25 °C sur 40 g de matériau, prélevés sur le tamisât du précédant essai. Les deux résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 12.

Tableau 12 : Résultats essai sédimentométrique

Temps (en min)	Lecture, R	Facteur correction, c	Lecture corrigée, R _c	Profondeur densimètre, H _t	Diamètre équivalent D (en µm)	% des particules < D
0,25	1,015	0,034	1,049	63,01	100	66,1
0,50	1,013	0,034	1,047	63,04	70	66,0
1	1,011	0,034	1,045	62,97	50	65,8
2	1,010	0,034	1,044	63,07	36	65,8
5	1,009	0,034	1,043	62,99	23	65,7
10	1,008	0,034	1,042	63,05	16	65,7
20	1,007	0,034	1,041	63,02	11	65,6
40	1,005	0,034	1,039	63,04	8	65,5
80	1,005	0,034	1,039	62,95	5,5	65,4
120	1,004	0,034	1,038	63,01	4,6	65,4
240	1,004	0,034	1,0376	63,03	1,6	65,4
1440	1,003	0,020	1,023	63,05	1,35	64,5

Les différentes lectures du densimètre R correspondent à la masse volumique de la solution à l'instant t. Ces lectures sont corrigées par un facteur de correction c qui comprend les corrections liées aux variations de température. Le diamètre équivalent D et le pourcentage des particules avec diamètre inférieur à D sont calculés à chaque temps t.

Les résultats révèlent que **65,4 % des particules sont de diamètre inférieur à 1,6 µm. Ainsi, 65,4 % des particules appartiennent à la classe vases et boues argileuses (D < 2 µm)** selon la classification du Tableau 1. Il est ainsi possible de déterminer la répartition générale des sédiments analysés et de remarquer que les sédiments sont constitués à 31,8 % de sables fins et à 65,4 % de vases ou boues argileuses tel que l'illustre le Tableau 13.

Tableau 13 : Répartition générale des sédiments analysés

Taille	Dénomination	% de sédiments
> 20 cm	Blocs	0
2 cm à 20 cm	Galets et cailloux	0
2 mm à 2 cm	Graviers	2,4
63 μm à 2 mm	Sables	31,8
2 μm à 63 μm	Limon (silt)	0,4
< 2 μm	Vases, boues argileuses	65,4
TOTAL		100

Avec les résultats de l'essai par sédimentométrie, la courbe granulométrique des sédiments analysés peut être complétée. Cette courbe est illustrée dans la Figure 37.

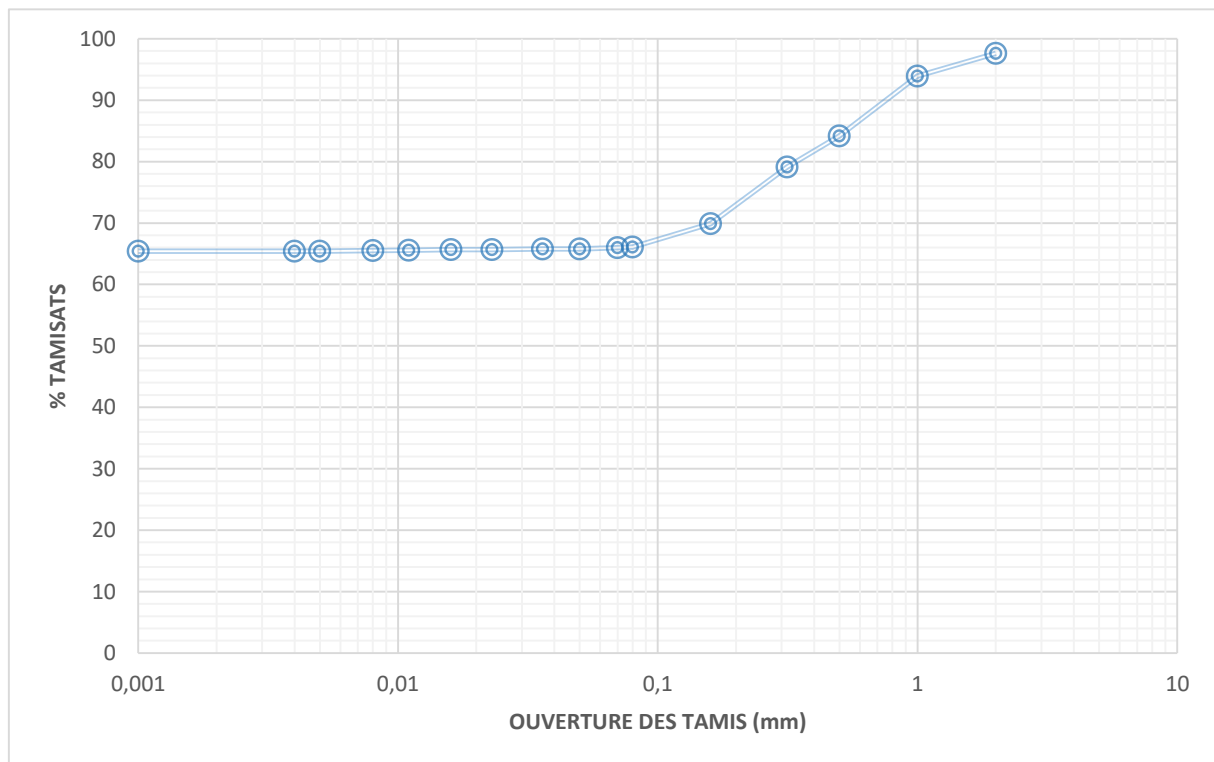


Figure 37 : Courbe granulométrique complète des sédiments analysés

4.1.3. Analyses physico-chimiques

Les résultats des analyses physico-chimiques des sédiments sont présentés dans le Tableau 14.

Tableau 14 : Résultats analyses physico-chimiques

Paramètre	Résultat	Unité
pH	7,42	-
Conductivité	6800	μS/cm à 20 °C μm/cm à 25 °C
Matières sèches (MS)	74,41	% MS
Fraction de matière organique	4,3	mg/l
% Matières organiques (MO)	10,06	% MO
Densité	1121	Kg/m ³
Aluminium (Al)	0,11	mg/l
Chlorures (Cl)	34	mg/l
Sulfates (SO ₄)	95	mg/l
Azote Kjeldahl (NTK)	0,658	mg/l
Phosphore (P)	0,6	mg/l
Phosphates (PO ₄)	1,6	mg/l
Fer (Fe)	2,15	mg/l
Silice (Si)	8	mg/l
Zinc (Zn)	0,32	mg/l
Cuivre (Cu)	< 0,004	mg/l
Cadmium (Cd)	0,045	mg/l
Chrome (Cr)	< 0,001	mg/l
Mercure (Hg)	0,01	mg/l
Plomb (Pb)	0,2	mg/l
Huiles et graisses	1,35	mg/l
Hydrocarbures totaux (HAP et PCB)	0,015	mg/l

Pour une meilleure appréciation des données, le Tableau 15 présente, pour les sédiments analysés, les résultats de paramètres chimiques en mg/kg de matières sèches (MS).

Tableau 15 : Résultats paramètres chimiques en mg/kg MS

Paramètre	Résultat
Aluminium (Al)	0,098
Chlorures (Cl)	30,33
Sulfates (SO ₄)	84,75
Azote Kjeldahl (NTK)	0,587
Phosphore (P)	0,535
Phosphates (PO ₄)	1,427
Fer (Fe)	1,918
Silice (Si)	7,136
Zinc (Zn)	0,285
Cuivre (Cu)	< 0,004
Cadmium (Cd)	0,04
Chrome (Cr)	< 0,001
Mercure (Hg)	0,009
Plomb (Pb)	0,178
Huiles et graisses	1,204
Hydrocarbures totaux (HAP et PCB)	0,013

En ce qui concerne les paramètres naturels des sédiments analysés, le pH neutre à légèrement basique (7,4) indique la qualité relativement bonne des sédiments. La conductivité électrique est assez élevée. Cette valeur témoigne de la richesse des sédiments en sels minéraux. C'est une caractéristique connue des minéraux argileux. Une analyse chimique complète incluant les teneurs en calcium, magnésium et bicarbonate, entre autres, permettrait de déterminer quels sont les ions majeurs et mineurs présents dans ces sédiments. Après le séchage à l'étuve des sédiments, on obtient un pourcentage de matières sèches de 74,4 %, une quantité intéressante dans la perspective de réutilisation des sédiments.

Par ailleurs, une étude a révélé que la couche superficielle du sol estuarien du Wouri est constituée de vases d'argile dont la composition minérale est dominée par la kaolinite (Lafond, 1965). Cette argile est imperméable à l'eau et particulièrement faible en porosité, contrairement aux argiles dites « gonflantes ».

On remarque une teneur non-négligeable en matière organique (MO). La présence en MO, même en faible proportions, est susceptible d'affecter les caractéristiques physiques et chimiques des sédiments, ainsi que leur comportement mécanique. L'étude de (Hamouche &

Zentar, 2016) a montré que la masse volumique absolue des sédiments baisse avec l'augmentation de teneur en MO. La même étude montre que la présence des MO augmente l'argilosité (caractère argileux d'un sol) du sédiment, par une augmentation de sa plasticité. Thiyyakkandi & Annex (2011) ont également démontré que la MO renforce les complexes argilo-humiques. Dans une optique de valorisation, il convient donc de tenir compte de cet aspect dans le choix de la méthode de prétraitement/traitement et la voie de valorisation des sédiments.

En ce qui concerne les paramètres chimiques, on remarque dans les sédiments une teneur particulièrement importante en chlorures (34 mg/l) et en sulfates (95 mg/l), témoins de la salinité du milieu dans lequel les sédiments se trouvent. Ce sont également des paramètres à prendre sérieusement en compte dans la conception des procédés de valorisation.

On note une assez faible teneur en azote et en phosphore totale de 0,67 mg/l et 2,2 mg/l respectivement. Les sédiments contiennent également une faible portion de silice (8 mg/l).

Dans l'ensemble, les sédiments peuvent être considérés comme de bonne qualité. Les teneurs en métaux lourds, en substances toxiques et en micropolluants organiques (c'est-à-dire les hydrocarbures) sont de loin inférieures aux seuils établis par la réglementation française, à défaut d'une réglementation camerounaise (voir Annexe I).

4.2. PROPOSITIONS DE VALORISATION DES SÉDIMENTS

Les analyses effectuées sur les sédiments ont permis de déterminer la nature des sédiments et d'en apprécier la qualité. Ces sédiments très faiblement contaminés n'ont, à priori, pas besoin de subir un traitement de décontamination quelconque, avant d'être réutilisés. Néanmoins, c'est la filière de valorisation ou finalité prévue pour les sédiments qui détermine la pertinence d'un traitement.

Les critères établis dans le chapitre 3 (Tableau 10) ont permis de faire une sélection de trois moyens de valorisation répartis dans les catégories suivantes : construction, assainissement et aménagement/amélioration de l'environnement.

4.2.1. Construction d'un centre d'enfouissement technique avec sédiments intégrés

4.2.1.1. Contexte et justification

Un Centre d'Enfouissement Technique (C.E.T.) peut être défini comme une installation spéciale destinée à accueillir les déchets ultimes, ceux dont les caractéristiques ne permettent

pas le recyclage ou la valorisation énergétique, afin de contrôler leur impact sur l'environnement. Il existe quatre classes de C.E.T. (intradef.be) :

- C.E.T. classe I : pour déchets industriels dangereux, non toxiques ;
- C.E.T. classe II : pour déchets industriels non toxiques, non dangereux et assimilés et pour les déchets ménagers et assimilés ;
- C.E.T. classe III : pour déchets inertes ;
- C.E.T. classe IV : pour déchets industriels non toxiques destinés à l'usage exclusif du producteur de déchets.

En 2002, la CUD estimait la production de déchets ménagers dans la ville de Douala entre 1200 et 1800 T/jour (Loe, 2002). En prenant la plus petite estimation (1200 T), cette production s'élevait à 438 000 T/an. Pourtant, à cause des insuffisances budgétaires, la commune parvient à faire collecter et mettre en décharge moins de 600 T/jour (Loe, 2002).

En 2018, la production des déchets s'élevait à 2500 T/jour (Jeune Afrique, 2019) et pourtant, le taux de collecte demeure de loin inférieure au taux de production.

Dans cette ville qui abrite près de 4 millions d'habitants, les déchets collectés sont acheminés vers la seule décharge située à PK10. Cette décharge de plus de 50 années d'existence a atteint son point de saturation, l'a déclaré le directeur de l'agence régionale HYSACAM pour le Littoral (Ymele, 2017) est complètement saturé. Pourtant elle continue d'être utilisée, au grand désarroi des populations environnantes qui subissent les nuisances olfactives et la dégradation de la qualité de l'eau du chenal Massoumbou à Japoma, souillée par la digestion des déchets.

L'urgence de la construction d'un nouveau site d'installation d'un C.E.T de type II n'est plus à démontrer. La particularité du C.E.T., face à une simple décharge est qu'il est construit et aménagé pour limiter tout impact négatif sur l'environnement : le lixiviat produit est drainé et traité avant d'être rejeté dans le milieu récepteur ; le biogaz issu de la digestion anaérobie de la matière organique est capté, traité si besoin et valorisé pour produire de l'énergie ; et surtout, l'étanchéité de l'installation est assurée par la pose de plusieurs couches imperméables.

La ville de Douala est connue pour être bâtie sur un bassin sédimentaire de formations sablo-argileuses très perméables (Ngueukam, 2002). Son faible relief (5 à 40 mètres) implique la superficialité de la nappe phréatique. Par conséquent, une installation comme le C.E.T. II se doit d'être parfaitement étanche pour limiter tout risque de contamination.

Pour un sol relativement perméable, la barrière de sécurité active est normalement constituée, du bas vers le haut par :

- Des matériaux naturels (argile compactée) de 50 cm d'épaisseur ;
- Un géotextile de 200 g/m² ;
- Une géomembrane de 2 mm, surmontée d'une couche de drainage.

La barrière de sécurité active offre un débouché potentiel pour les sédiments de dragage, naturellement argileux et peu perméables. Les sédiments peuvent être intégrés dans le mélange d'argiles pour la formulation d'un composite d'argile d'une meilleure performance en termes de perméabilité. Le matériau composite créé serait ensuite étalé à la base de l'installation et compacté à l'aide d'un engin de compactage.

Le C.E.T. peut s'étendre sur de nombreux hectares ; ainsi, une bonne quantité de sédiments peut être valorisée par ce moyen. La Figure 38 présente la coupe transversale d'un C.E.T. simplifié de classe II pour déchets ménagers.

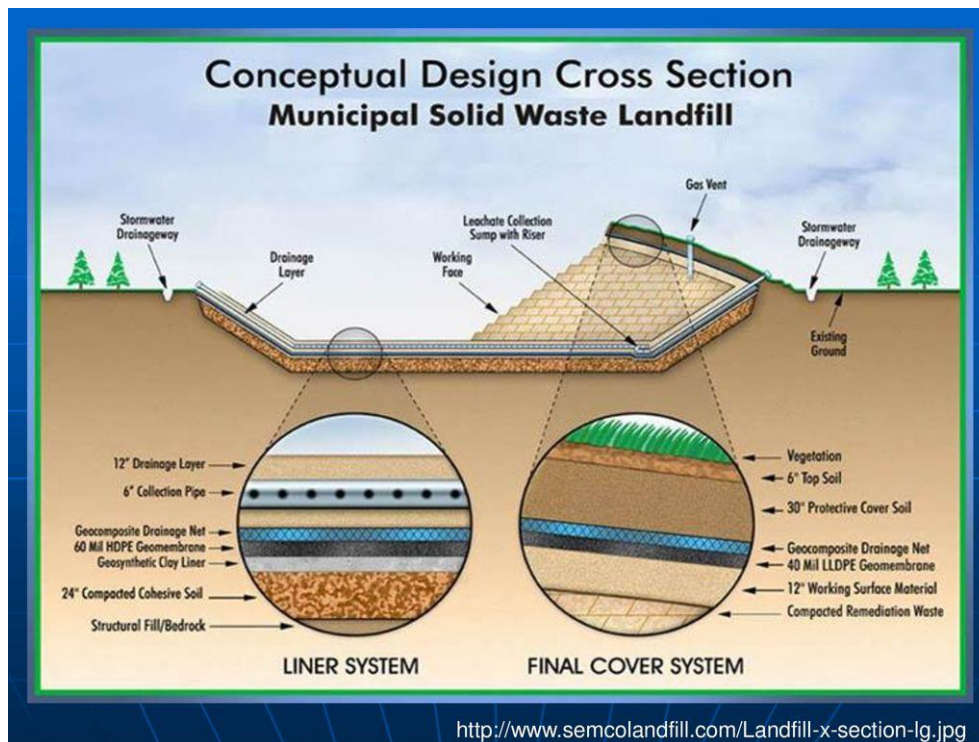


Figure 38 : Coupe transversale simplifiée d'un centre d'enfouissement technique avec drainage du lixiviat et captage du biogaz (Straka, 2019)

4.2.1.2. Évaluation des critères

A la question : est-ce que la méthode de valorisation est accessible sur le plan technique, on peut répondre par l'affirmative. La compétence technique dans le domaine de la construction de C.E.T. est très disponible au Cameroun avec la multitude d'ingénieurs civil et des ingénieurs du génie de l'environnement formés dans la conception chaque année dans les écoles agréées,

bien que cette compétence reste souvent théorique. Les matériaux et équipements nécessaires à la mise en œuvre sont également assez facilement accessibles. Il s'agit de matériaux tels que les argiles, les géomembranes ou géotextiles, les tuyaux de drainage et les granulats. Les équipements tels que les engins de terrassement, de compactage, les camions benne ainsi que la manœuvre humaine sont également disponibles. En outre, l'utilisation des sédiments dans la construction de C.E.T. répond favorablement au critère technique.

Cette solution est un grand pas vers une meilleure gestion des déchets dans la ville de Douala ; les installations de captage du biogaz et du lixiviat pour traitement et valorisation, empêchent les émissions polluantes dans l'environnement (les eaux sous-terraines et l'atmosphère) répondant ainsi favorablement aux critères social et environnemental.

4.2.2. Fabrication de pavés à base de plastiques recyclés et sédiments

4.2.2.1. Contexte et justificatif

Selon l'actuel ministre de l'Environnement, de la protection de la nature et du développement durable (Tchouakak, 2018), le Cameroun produit 6 millions de tonnes de déchets tous les ans, dont 600 000 tonnes de plastique. Ces déchets plastiques essentiellement non-biodégradables sont généralement des sacs d'emballage, des bouteilles, des objets en plastique, etc. Dans les villes, l'accumulation des déchets plastiques dans les cours d'eau, les lits de drainage, et même dans les dépôts sauvages est une source de frustration constante.



Figure 39 : Des déchets plastiques sur le fleuve Wouri (Camerounweb, 2019)

Dans la ville de Douala par exemple, l'obstruction des lits de drainage et des cours d'eau par les déchets en général et les déchets plastiques en particulier, est l'une des principales causes des nombreux cas d'inondations. La Figure 39 présente une partie du fleuve obstruée par les déchets plastiques.

Les conséquences de la récurrence de ce phénomène sont, entre autres, la diminution de la capacité d'exploitation des cours d'eau par les populations, la prolifération des bêtes et insectes indésirables attirés par l'insalubrité de l'environnement, et l'augmentation des taux de maladies notamment hydriques.

Face à ce constat alarmant, le gouvernement camerounais, à travers l'arrêté du ministère de l'Environnement, de la Protection de la nature et du Développement durable le 24 octobre 2014, a interdit l'utilisation des emballages plastiques non-biodégradables de moins de 60 microns. Malheureusement, aucune alternative à l'utilisation de ces emballages n'a été préalablement définie. Ainsi, cette interdiction peine à être respectée dans l'ensemble du territoire. En attendant la définition et l'industrialisation d'une alternative aux emballages plastiques non-biodégradables, le concept 3R : Réduire – Réutiliser – Recycler, est la meilleure stratégie applicable aux déchets en général, et aux déchets plastiques en particulier.

Plusieurs projets de recyclage de plastique sont développés au Cameroun, parmi lesquels la fabrication des tuiles et pavés dits écologiques, à base de matières plastiques et de sables. Des structures telles que BOCOM Recycling et la Fondation Cœur d'Afrique sont connues pour leurs travaux remarquables dans le domaine.

Dans la même lancée, il est possible de fabriquer des pavés à base de plastiques recyclés et sédiments de dragage, soit en substituant complètement la fraction des sables par son équivalent en sédiments, soit en créant une formulation intégrant les matières plastiques broyées et fondues, les sables et les sédiments.

Les matières plastiques concernées par cette application sont les plastiques de type thermoplastiques. Ce sont des plastiques qui ramollissent sous l'effet de la chaleur. Ils deviennent souples, malléables et durcissent à nouveau lorsque la température baisse. Comme cette transformation est réversible, ces matières conservent leurs propriétés et sont facilement recyclables. Les types thermoplastiques plus couramment rencontrés sont présentés dans le Tableau 16.

Tableau 16 : Types de thermoplastiques et leurs applications

Types de plastiques	Description	Exemples d'utilisation
PEBD (Polyéthylène basse densité)	Réalisation de toutes formes souples	Emballages (sachets, films, sacs poubelles), jouets souples, films BTP, câbles
PEHD (Polyéthylène haute densité)	Réalisation de formes semi-rigides. Bonne tenue au froid et bonne résistance aux produits chimiques	Tubes de gros et petits diamètres, poubelles urbaines, réservoir d'essence automobile, bidons
PP (Polypropylène)	Réalisation de tous types de formes semi-rigides avec une bonne tenue à chaud (110 °C – 130 °C). Bonne résistance à la flexion	Mobilier de jardin, pièces d'électroménager soumises à la chaleur, climatiseurs automobiles
PET (Polyéthylène téréphtalate)	Thermoplastique transparent aux excellentes propriétés mécaniques	Bouteilles d'eau, barquettes allant au four à micro-ondes, emballages cosmétiques
PVC (Polychlorure de vinyle)	Excellente résistance à l'abrasion. Bonne résistance chimique aux acides, bases alcools et huiles	Tubes, tuyaux et raccords BTP, cartes bancaires, revêtement de sol, chaussures
PS (Polystyrène)	Thermoplastique transparent et amorphe permettant de réaliser des pièces à l'aspect brillant, aux formes précises. Peu résistant aux chocs	Vaisselle jetable, stylos à billes, emballage produits laitiers

Les thermoplastiques collectés, sont triés, lavés et broyés avant de passer au four pour être fondus. Lorsqu'ils sont suffisamment fondus et que la texture est relativement homogène, les sédiments sont incorporés selon la formulation choisie et mélangés pendant quelques minutes supplémentaires. La pâte obtenue est versée dans des moules et laissée refroidir. Le produit final, illustré par les Figures 40 et 41, est un matériau solide, imperméable et écologique pouvant être utilisé pour revêtir les chaussées des voies secondaires particulièrement sujettes à la poussière ou être utilisé comme pavement dans les maisons d'habitation, les écoles, etc. Il peut être peint au besoin, pour plus d'esthétique.

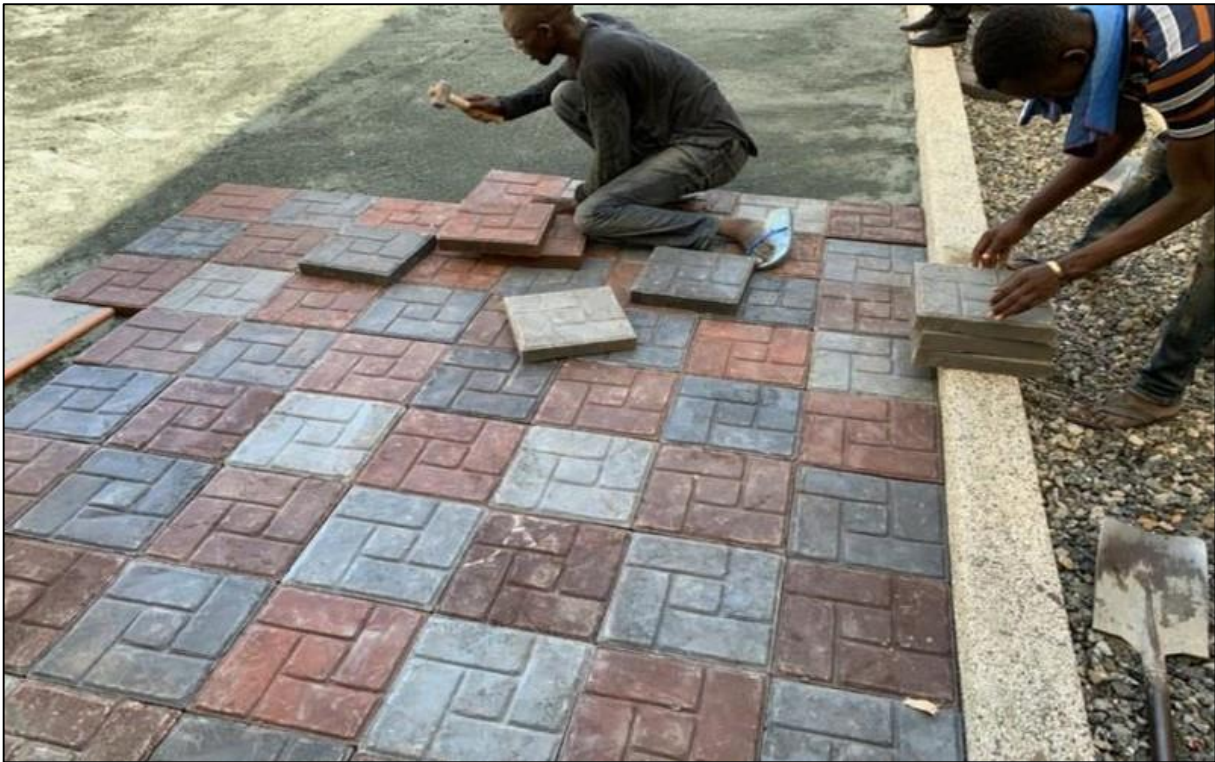


Figure 40 : Une route réalisée en pavés de plastiques recyclés et sables (Vivafrik, 2019)



Figure 41 : Des pavés en plastiques recyclés et sables (Kaze AFP, 2016)

4.2.2.2. Evaluation des critères

Cette méthode de valorisation est peu favorable au critère technique en ce que la collecte, le tri, le broyage, la fonte des plastiques et le mélange plastique-sable sont des opérations peu maîtrisées. La fabrication de matériau de qualité nécessite également l'acquisition d'équipements de pointe qui ne sont pas forcément disponibles sur le marché camerounais. Néanmoins, cette méthode est très favorable sur le plan social car il contribue à résoudre le problème des déchets plastiques tout en améliorant les conditions de vie des populations. Un point positif pour l'environnement. L'acquisition de matériau de qualité tel qu'une machine à fondre le plastique et les sédiments utilisée notamment à BOCOM Recycling, implique également une réduction par un meilleur contrôle des émissions des gaz toxiques et cancérigènes pour l'être humain, comparé à la fonte artisanale des matières plastiques en plein air : un autre point positif pour l'environnement.

4.2.3. Construction de digues côtières à base de sédiments

4.2.3.1. Contexte et justificatif

Une étude (Matanda, 2002) a révélé que le littoral kribien est soumis à l'épreuve difficile de l'érosion côtière, des inondations et des vents violents. Une autre étude fait état de la même situation un peu plus au sud du littoral camerounais (Fongzossie et al., 2018) sur la bande côtière de Kribi-Campo. Pareil à Cap Cameroun tel que démontré par Mbevo (2019). Ces événements affectent une population vulnérable, ne disposant pas de moyens idoines pour y faire face. L'érosion côtière, les inondations et les fortes précipitations les obligent ainsi à reculer vers l'intérieur, à émigrer ou renforcer en permanence la résistance de leur maison. Au-delà des impacts environnementaux et sociaux de ces érosions côtières, une étude évaluant la valeur économique d'une partie des mangroves du littoral camerounais estimait leur valeur à 200 million FCFA / ha / an (Ajonina et al., 2014). Par conséquent, une perte de 1162,25 ha équivaldrait à une perte monétaire de l'ordre de 232 450 000 FCFA / ha / an (422 637 \$).

La construction de digues le long des côtes affectées paraît comme une des solutions envisageables pour pallier à ces problèmes. Les digues retiendront la force des eaux et ainsi réduiront la vitesse d'érosion du littoral et limiteront les cas d'inondations. Une digue est un ouvrage construit ou aménagé en vue de prévenir des inondations et les submersions. Elle est généralement en surélévation par rapport à son environnement, et peut être constituée de matériaux divers tels que le limon, le gravier, la terre, le béton et l'argile, selon la disponibilité des ressources locales. La Figure 42 présente les différents composants potentiels d'une digue.

Les sédiments de dragage peuvent être utilisés comme matériau de remblai dans la réalisation de ces digues. Leur caractère argileux fait également d'eux un matériau de choix dans la constitution du noyau étanche de la digue. Il s'agira d'étaler les sédiments couche par couche et de les compacter pour la réalisation du noyau.

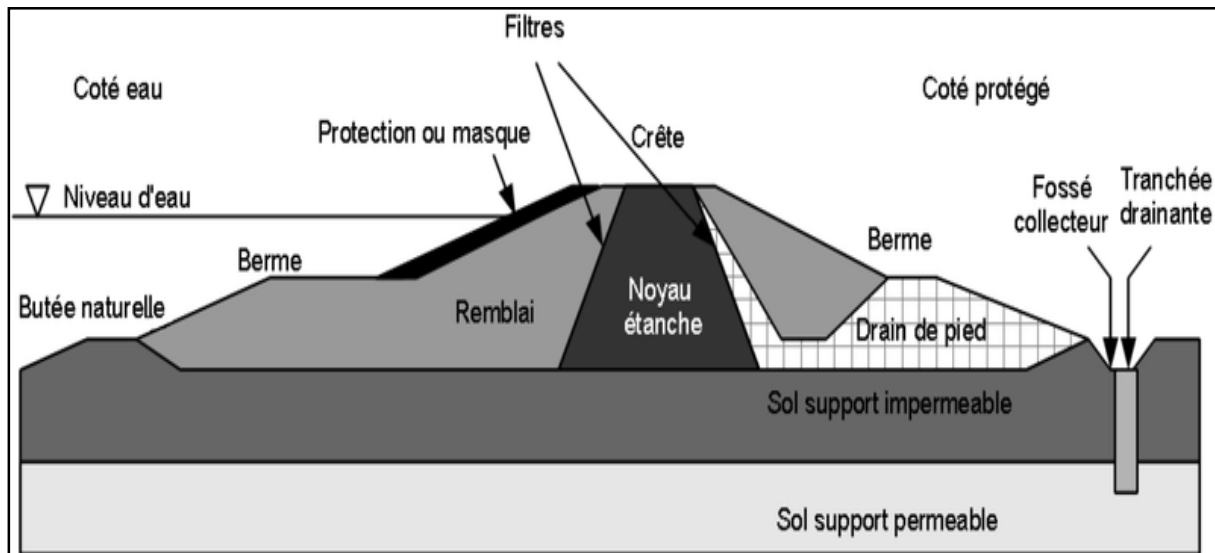


Figure 42 : Les différents composants potentiels d'une digue (ILH, 2013)

4.2.3.2. Évaluation des critères

Cette méthode de valorisation est favorable sur le plan technique car la construction de digue est une compétence plus ou moins maîtrisée dans le monde de l'ingénierie au Cameroun. Les matériaux (granulats) et équipements (bulldozer, engins de compactage, camions benne...) nécessaires à sa réalisation sont accessibles.

Sur le plan social, elle permettrait de résoudre un problème que rencontrent les populations côtières en limitant les risques de pertes humaines et matérielles pendant les temps de marée haute.

Sur le plan environnemental, elle contribue à la préservation des ressources végétales, notamment les mangroves qui ont en plus une valeur économique élevée.

4.2.4. Autres applications

Les sédiments peuvent également être utilisés dans les applications suivantes :

- Tous travaux de remblayage sur le site du port de Douala et dans la ville ;
- Étanchéité des installations d'assainissement autres que les sites d'enfouissement techniques. Ceci permettrait de prévenir la contamination de la nappe phréatique superficielle de la ville de Douala (Ngueukam, 2002) et ainsi contribuer à la préservation de la qualité des eaux souterraines et la santé des populations qui les consomment.

- Fond de fouilles des canalisations souterraines d’approvisionnement/évacuation des eaux.

Le Tableau 17 récapitule les méthodes de valorisation proposées et leur évaluation quant aux critères définis.

Tableau 17 : Récapitulatif des propositions de valorisation des sédiments

Catégorie	Solution de valorisation	Critère technique	Critère social	Critère environnemental
Assainissement	Construction d’un centre d’enfouissement technique avec sédiments intégrés	Favorable	Très favorable	Très favorable
Construction	Fabrication de pavés de construction à base de plastique recyclé et sédiments dragué	Peu favorable	Très favorable	Très favorable
Aménagement de l’environnement	Construction de digues côtières contre l’érosion et les inondations de la côte Kribienne	Favorable	Favorable	Favorable

4.3. DIMENSIONNEMENT DE LA FILIÈRE DE DÉCANTATION

Le Tableau 18 présente les données d’entrée utilisées pour les calculs et le Tableau 19 présente les valeurs obtenues des calculs de dimensionnement du bassin de décantation des sédiments dragués.

Tableau 18 : Données d'entrée

Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur
V	10 000 m ³	g	98,7 cm/s ²
V _{rejet}	1 350 m ³	D _{min}	15 µm
γ _s	1121 g/cm ³	h	3 m
γ _w	1000 g/cm ³	h _{rejet}	3 m
η	0,000981 Pa·s ¹		

¹ Valeur de la viscosité dynamique de l’eau de mer à 24 °C (International Towing Tank Conference)

Tableau 19 : Données de dimensionnement de la filière de décantation

Paramètre	Equation	Bassin de décantation	Bassin de rejet
Volume d'entrée V (m ³)	-	10 000	1 350
Taille min. des particules D _{min} (µm)	-	15	-
Vitesse de sédimentation (cm/s)	(3)	0,152	-
Temps de sédimentation (s)	(10)	1 973,68	-
Temps de sédimentation (min)		32,89	-
Surface totale (m ²)	(11), (12)	3 333	900
Nombre de bassins		2	2
Surface unitaire		1 666,5 (≈ 1670)	450
Longueur bassin (m)		50	30
Largeur bassin (m)		33,3 (≈34)	15

Compte tenu de la superficie requise pour la décantation, deux bassins de 1670 m² chacun sont recommandés. Les deux bassins sont disposés en parallèle suivant la longueur. Les eaux sortant de chaque bassin de décantation sont acheminées vers un bassin de rejet de 450 m² à travers un système de tuyaux. Les Figures 43, 44 et 45 présentent respectivement la vue d'ensemble d'un des deux bassins de décantation et son bassin de rejet, la coupe longitudinale des bassins et la vue de haut, dessinées sur le logiciel AutoCAD 2020.

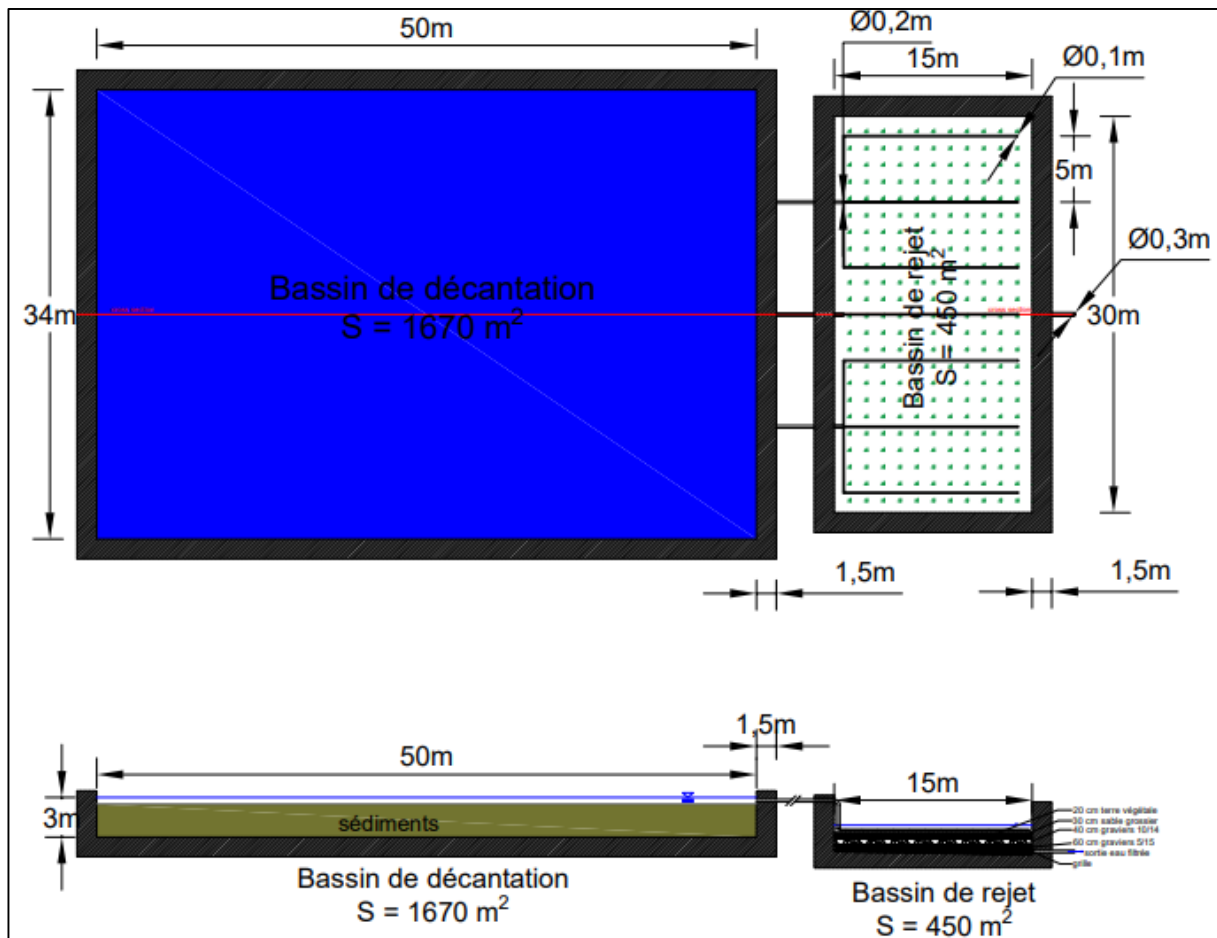


Figure 43 : Vue globale bassin décantation et bassin de rejet

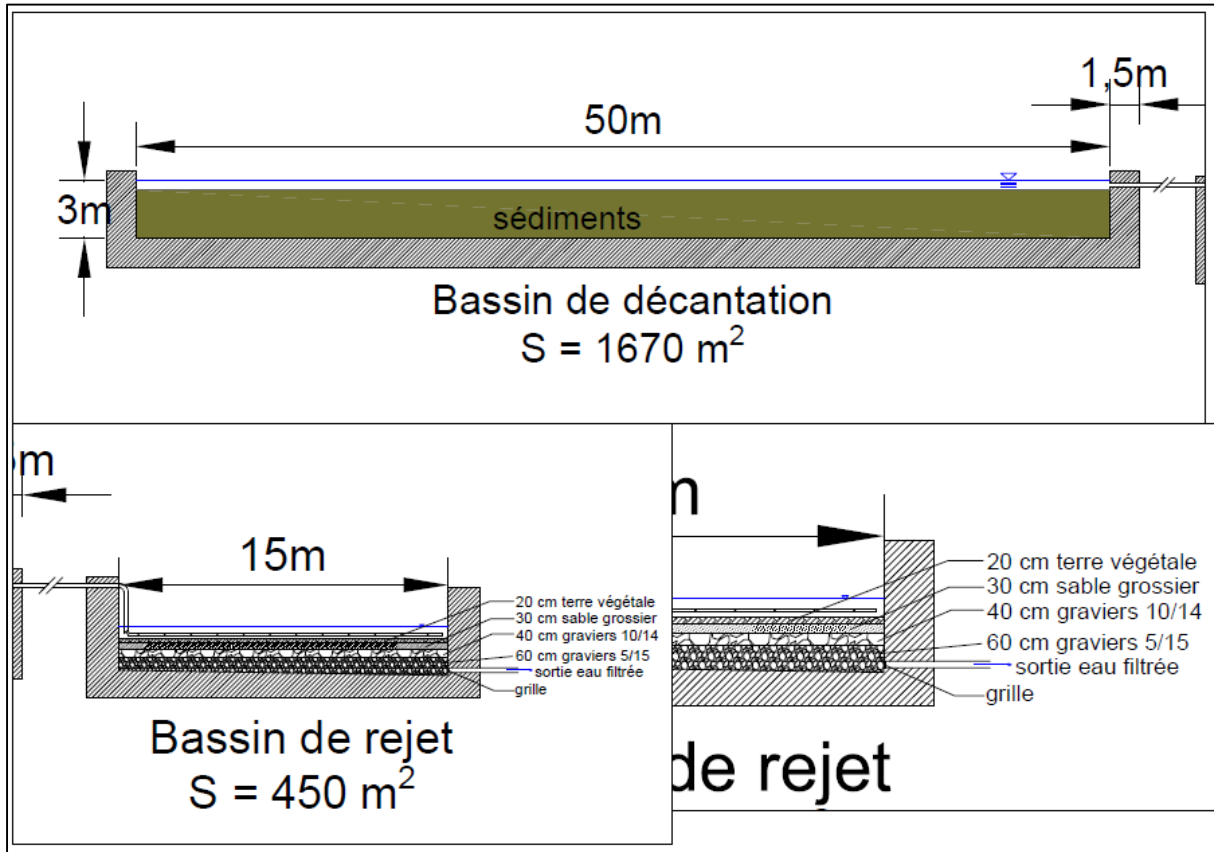


Figure 44 : Coupe longitudinale des bassins

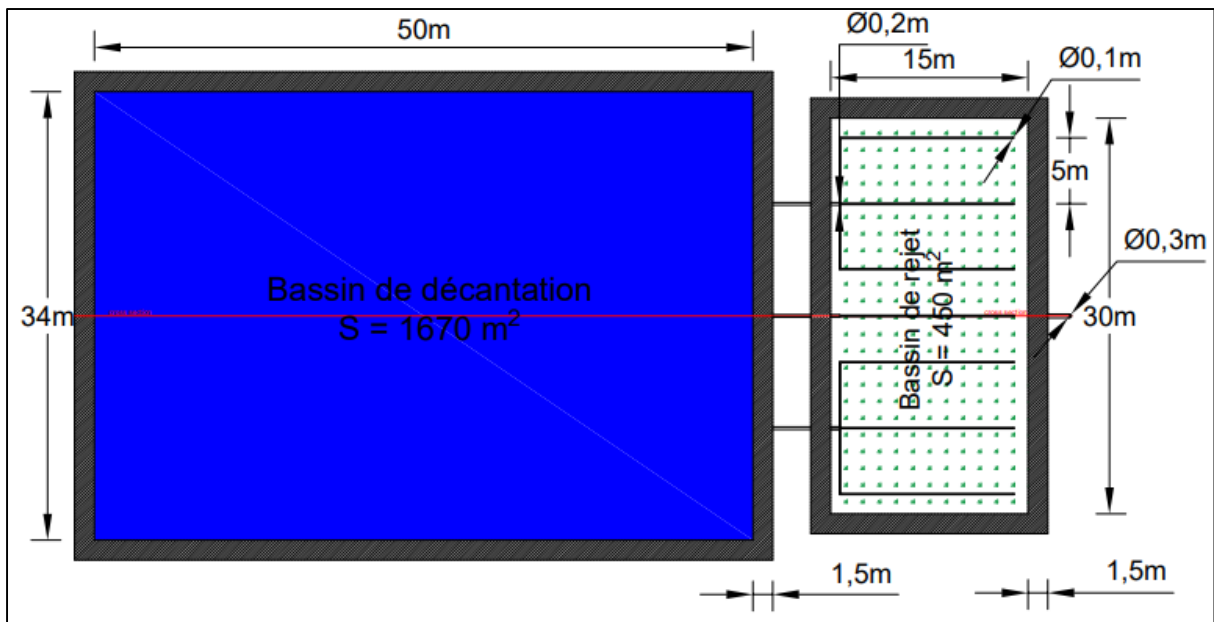


Figure 45 : Vue de haut des bassins

Recommandations

Pour améliorer l'activité du dragage et favoriser la valorisation des sédiments dans les ports Camerounais en général et celui de Douala en particulier, il est recommandé :

- A l'Agence des Normes et de la Qualité (ANOR), d'établir une réglementation nationale fixant les dispositions générales et spécifiques sur les questions du dragage et de la gestion des sédiments de dragage sur l'ensemble du territoire camerounais. Cela permettrait une meilleure pratique et un meilleur suivi de l'activité du dragage dans l'espace portuaire camerounais ;
- Au Port Autonome de Douala, de mettre sur pieds une équipe de recherche pour la réalisation des études scientifiques, techniques et économiques approfondies sur les sédiments et leur gestion ;
- Au Port Autonome de Douala, de mettre sur pieds au moment adapté, une usine de traitement et de conditionnement des sédiments dragués et décantés. Il faciliterait ainsi l'utilisation ultérieure des sédiments, sur le domaine portuaire et/ou ailleurs ;
- Au Port Autonome de Douala, d'assurer la formation de personnes compétentes aux techniques de gestion (collecte, stockage, transport, traitement, conditionnement) des sédiments de dragage pour assurer la qualité des manœuvres et la disponibilité de la compétence technique ;
- A la Régie Déléguée du Dragage, d'assurer l'évaluation régulière, au moins une fois chaque année, de la qualité physico-chimique des sédiments. Ceci permettra de mieux observer la ressource et identifier d'éventuels changements dans la nature de celle-ci.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Le dragage est une opération indispensable au port peu profond de Douala-Bonabéri. Il est particulièrement nécessaire de draguer le chenal d'accès afin d'y maintenir une profondeur minimale de 7 m qui permettra la circulation aisée des navires et bateaux entrants et sortants du port. Chaque année, les activités de dragage génèrent des quantités considérables de sédiments. Au port de Douala-Bonabéri, cette quantité s'élève en moyenne à 4,5 MT de sédiments par an, majoritairement gérés à mer, c'est-à-dire par rejet direct en zone de grande profondeur—la fosse du Cameroun.

L'objectif de ce travail était de déterminer les caractéristiques des sédiments issus du dragage du chenal d'accès du port de Douala, en vue de l'étude des possibilités de leur valorisation les sédiments. Il s'agissait spécifiquement de :

- Déterminer la nature et évaluer la qualité ou le niveau de contamination des sédiments dans le chenal ;
- Proposer des débouchés de valorisation pour les sédiments dragués ;
- Dimensionner un bassin de décantation pour les sédiments dragués.

Pour atteindre ces objectifs, la recherche documentaire nous a permis de faire un choix des paramètres constitué de neuf paramètres d'évaluation de la nature des sédiments et treize paramètres d'évaluation de la qualité des sédiments. Une descente sur le terrain a ensuite été réalisée dans le but de prélever les sédiments à analyser. C'est au cœur de l'estuaire du Wouri, à bord de la drague aspiratrice en marche « Mont Mandara » que le prélèvement a été fait. Le « Mont Mandara » est équipé d'un puits intégré d'une capacité de stockage de 3000 m³. 7 L de sédiments ont ainsi été prélevés dans ce puits et emmenés en laboratoire pour analyses. En ce qui concerne les propositions de valorisation, trois critères ont servi de base pour le choix des méthodes de valorisation à savoir le critère technique, le critère social et le critère environnemental. Les démarches de valorisation des sédiments font face principalement à la forte teneur en eau des sédiments lorsqu'ils sont extraits de l'eau. Il convient absolument de séparer la fraction solide de la fraction liquide par une décantation d'abord, et d'une déshydratation ensuite. C'est dans cette logique qu'une filière de décantation des sédiments constituée de trois bassins a été dimensionnée dans ce travail.

Les résultats d'analyses obtenus ont montré une dominance de la fraction argileuse dans les sédiments (65,4 %), suivie d'une fraction sableuse (31,8 %). Ce qui implique une texture de vase légèrement sableuse. Le pH relativement neutre des sédiments indique la qualité relativement bonne des sédiments. On note de faibles teneurs en substances toxiques et en

micropolluants organiques. On note également de faibles teneurs en éléments nutritifs (azote et phosphore total). Les sédiments analysés présentent une teneur relativement élevée en chlorures (34 mg/l) et en sulfates (95 mg/l). Ils contiennent également 10,06 % de matière organique, une quantité non-négligeable. Il a également été déterminé que le pourcentage de matière sèche des sédiments s'élève à pratiquement 75 %.

Ainsi, il est confirmé que les sédiments sont majoritairement de nature argileuse et peuvent être considérés comme de bonne qualité chimique, contrairement aux ports des pays industrialisés qui font généralement face à des sédiments fortement contaminés. L'immersion des sédiments du port de Douala ne poserait donc à priori aucun problème du point de vue qualité. Néanmoins, il est possible de tirer profit de ce matériau dans de diverses applications telles que le renforcement de l'étanchéité des centres d'enfouissement technique, la fabrication des pavés écologiques, la construction de digues de protection contre l'inondation et l'érosion côtières, ainsi que la création de terre-plein, les travaux de remblayage la réalisation de fond de fouilles, pour le site portuaire et ailleurs. De plus, les sédiments peuvent être déshydratés et conditionnés pour être revendus sur le marché de la construction. Il est donc possible de répondre par l'affirmative à la question de départ, à savoir : « **existe-t-il, dans une démarche de valorisation, des alternatives à la gestion à mer des sédiments dragués dans le chenal d'accès du port de Douala ?** », avec des exemples concrets de débouchés possibles.

En dernier lieu, une filière de décantation a été dimensionnée comme un moyen de surmonter l'obstacle de la forte teneur en eau des sédiments. La décantation permettrait une première élimination de l'excédent d'eau contenu dans les sédiments avant la déshydratation selon le moyen de valorisation choisi. Pour un volume de sédiments expérimental de 10,000 m³ et une taille minimum de particules à 15 µm, il a été obtenu deux bassins de décantation d'une surface totale de 3300 m² et deux bassins de rejet d'une surface totale de 900 m². La vitesse de sédimentation a été évaluée à 0,15 cm/s pour un temps total de sédimentation d'environ 33 minutes.

Cette étude est un pas significatif dans le domaine de la recherche des moyens de valorisation des sédiments de dragage issus du port de Douala pour améliorer la rentabilité et la pérennité de l'activité du dragage dans ce port de référence en Afrique Central, qui depuis janvier 2020, a décidé d'autonomiser, à travers la création de la Régie Déléguée du Dragage (RDD), l'activité du dragage. Une pratique efficace du dragage et une gestion durable des sédiments générés contribueraient donc positivement à renforcer la compétitivité et l'attractivité de Port de Douala.

Pour pousser plus loin la recherche dans ce vaste domaine, sont suggérés les perspectives suivantes :

- La caractérisation physique, chimique et minéralogique des sédiments en amont et en aval du chenal, afin de déterminer le profil global des sédiments, tenant compte de l'analyse de teneur en Tributylétain (TBT) contenu dans les peintures antifouling/antisalissure des coques de navires ;
- L'étude de faisabilité d'un bassin unique drainant pour la décantation des sédiments ;
- L'étude de faisabilité technique et économique pour chaque proposition de valorisation pour déterminer et évaluer la pertinence économique de celles-ci ;
- Le dimensionnement de la collecte des sédiments : la procédure générale, le choix du lieu de stockage des sédiments, la trajectoire de transport des sédiments, les équipements nécessaires, la fréquence, etc.

LISTE DES RÉFÉRENCES

Références bibliographiques

- Agostini, F. (2006). *Inertage et valorisation des sédiments de dragage marins*. [Thèse de doctorat, Université des Sciences et Techniques de Lille]. Tel.archives-ouvertes.fr. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00119833/document/>
- Amar, M. (2017). *Traitement des sédiments de dragage pour une valorisation dans les matrices cimentaires*. [Thèse de doctorat, Ecole doctorale sciences pour l'ingénieur]. Thèses.fr. <https://pepite-depot.univ-lille.fr/LIBRE/EDSPI/2017/50376-2017-Amar.pdf/>
- Azrar, H. (2014). *Contribution à la valorisation des sédiments de dragage portuaire : technique routière, béton et granulats artificiels*. [Thèse de doctorat, Ecole des Mines Douai & Université de Lille 1]. Thèses.fr. <https://pepite-depot.univ-lille.fr/LIBRE/EDSPI/2014/50376-2014-Azrar.pdf/>
- Bekari, M., Elgazzar, A. & Majdoub, T. (2010). *Outils d'aménagement des ports : Gestion Globale Des Sédiments Marins*. [Etude bibliographique, Ecoles des Mines Douai]. ENSM-Douai.fr. <http://cdoc.ensm-douai.fr/EBs/EB-Bekari-Elgazzar-Majdoub.pdf/>
- Ben Allal, L., Ammari, M., Frar, I., Azmani, A. & Belmokhtar, N. (2011) Caractérisation et valorisation des sédiments de dragage des ports de Tanger et Larache (Maroc). *Revue Paralia*, 4, 5.1-5.13. <https://www.paralia.fr/editions/index.php/revue/article/view/65/>
- Benasla, M. (2015). *Caractérisation de la vase de dragage du barrage de l'Oued Fodda et valorisation en tant que matériau de construction*. [Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf]. Univ-usto.fr. https://www.univ-usto.dz/images/coursenligne/these_benasla_mohamed.pdf/
- Berreille, C. (2007). *Etude des possibilités des sédiments sableux de dragage d'entretien de l'estuaire du Port Autonome de Rouen*. [Rapport de stage, Université de Rouen]. Haropaports.com. https://www.haropaports.com/sites/default/files/media/downloads/etude_des_possibilites_de_valorisation_des_sediments_sableux_du_dragage_dentretien_de_lestuaire_du_port_autonome_de_rouen_0.pdf/
- Bertrand, M. (2010). *Optimisation de l'injection d'un flocculant dans un décanteur dynamique*. [Rapport de Master 1, Université de Normandie]
- Boullosa, B. (2018). *Déshydratation naturelle et mécanisée de sédiments : étude des processus mis en jeu et applications*. [Thèse de doctorat, Université de Caen Normandie]. Thèses.fr. <https://www.theses.fr/2018NORMC285.pdf/>

- Brakni, S. (2008). *Première approche vers une valorisation de granulats à base de sédiments de dragage portuaire : application en génie côtier*. [Thèse de doctorat, Université d'Artois]. Thèses.fr. <http://www.theses.fr/2008ARTO0201/>
- Chiffolleau, J-F. & Truquet, I. (1994). *Nouvelle méthode de dosage de quelques métaux – traces dans les sédiments et les matières en suspension*. Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00140/25119/23228.pdf>
- Dawid, B. (2017). *La faisabilité de la valorisation des sédiments de dragage de l'estuaire de la Vilaine, une démarche territoriale*. [Thèse professionnelle de Master, Ecole des Métiers de l'Environnement]. Eptb-vilaine.fr. https://www.eptb-vilaine.fr/_BDU/20171221134553_Rapport-Valorisation-Vases-2017_VF.pdf
- Dhervilly, P. (2013, 3-7 juin). *The NEMEAU® process*. [Le processus NEMEAU®]. [Présentation orale]. Wodcon XX-Congress and Exhibition: The Art of Dredging, Bruxelles.
- Dia, M. (2013). *Traitement et valorisation de sédiments de dragage phosphatés en technique routière*. [Thèse de doctorat, Mines Douai & Université d'Artois]. Thèses.fr. <http://www.theses.fr/2013ARTO0206/abes/>
- Duan, Z. (2008). *Caractérisation, stabilisation et solidification de sédiments fins marins*. [Thèse de doctorat, Université de Normandie]. Thèses.fr. <http://www.theses.fr/2008CAEN2018/>
- Fongnzossie, E., Sonwa, D., Kemueze, V. & Mengelt, C. (2018). Assessing climate change vulnerability and local adaptation strategies in adjacent communities of the Kribi-Campo coastal ecosystems, South Cameroon. *Urban Climate*, 24, 1037-1051. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221209551730113X/>
- Foucault, A. & Raoult, J. F. (1980). *Dictionnaire de géologie*. Paris : Editions Mason
- Foucher, J. (2005). *Valorisation des déblais sableux de dragage portuaire en France Métropolitaine*. [Rapport de stage, Ecole nationale des travaux publics de l'Etat]. Ifremer.fr. https://www.ifremer.fr/gm/content/download/88460/1091737/file/2005_06_RapFoucher.pdf
- Hamouche, F. & Zentar, R. (2016). Influence des matières organiques sur les propriétés physiques des sédiments de dragage. *Academic journal of Civil Engineering*, 34(1), 908-914. <https://doi.org/10.26168/ajce.34.1.110/>

- Hughes, R. (1992). *A directory of African wetlands* [Répertoire des zones humides africaines] International Union for Conservation of Nature. <https://books.google.ca/books?id=VLjafEXa3gMC&pg=PA466#v=twopage&q&f=false/>
- IDRA Environnement. (2006). *Schéma directeur du traitement des vases portuaires*. Département de la Gironde du Conseil d'Arcachon. <https://www.bassindarcachon.com/>
- IDRA Environnement. (2016). *Centre de traitement des sédiments de La Repentie* : Résumé non-technique. Port Atlantique La Rochelle. <https://www.charente-maritime.gouv.fr/content/download/23862/164164/file/Document%20n%20b03%20-%20R%20c3%a9sum%20c3%a9%20non%20technique.pdf>
- Khadraoui, S. (2012). *Séchage naturel de sédiments*. [Rapport de Master 1, Université de Normandie].
- Lafond, L. (1965). Présence de Quaternaire ancien dans la basse vallée du Wouri (Cameroun). *Quaternaire*, 2(1), 85-98. https://www.persee.fr/doc/quate_0004-5500_1965_num_2_1
- Le Guern, C., Conil, P., Clozel, B., Albrecht, M., Levacher, D., Proulhac, C., Schwartz, C. & Baticle, P. (2004). *Aide à la gestion alternative au rejet en mer des sédiments contaminés provenant du dragage de sites portuaires : Rapport final*. Bureau de recherches géologiques et minières, République Française. <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-53470-FR.pdf>
- Levacher, D. & Dhervilly, P. (2010, 22-25 juin). *Déshydratation mécanisée in situ de sédiments fraîchement dragués ou mis en dépôts : le projet SEDIGATE® I*. [Conférence]. XIèmes Journées Nationales Génie Côtier–Génie Civil, Olonne. DOI : 10.5150/jngcgc.2010.093-L
- Levacher, D., Colin, D., Perroni, A., Duan, Z. & Sun, L. (2006, 12-14 septembre). *Recyclage et valorisation de sédiments fins de dragage à usage de matériaux routiers*. [Conférence]. IXème Journées Nationales Génie Civil–Génie Côtier, Brest. DOI : 10.5150/jngcgc.2006.058-L
- Maher, A., Douglas, S., Jafari, F. & Pecchioli, J. (2013). *The Processing and Beneficial Use of Fine-Grained Dredged Material: A Manual for Engineers* [Traitement et valorisation des sédiments de dragage fins : Manuel pour ingénieurs]. Rutgers. https://clui-n.org/download/contaminantfocus/sediments/Sediment-PDM_FINAL_2013.pdf
- Mancioppi, L., Dhervilly, P. & Levacher, D. (2012, 12-14 juin). *Décanteur dynamique NEMEAU®450 et valorisation de matériaux fins*. [Conférence]. XIIème Journées Nationales Génie Côtier–Génie Civil, Cherbourg. DOI : 10.5150/jngcgc.2012.117-M

- Massamba, R. (2017). *La production des pavés à partir de matériaux plastiques et granulats recyclés*. [Mémoire de Master, Université de Kinshasa]. Congovirtuel.com. https://www.congovirtuel.com/page_rapport_travaux/page_memoire_massamba.php/
- Matanda, S. (2002). *Observatoire des risques naturels au Cameroun. Relation pluies-inondation et plan ORSEC : le cas des villes côtières de Kribi, Douala et Limbe*. [Mémoire de Master, Université de Paris 12 Créteil-France & Université de Yaoundé 1]. https://www.memoireonline.com/04/15/9059/m_Observatoire-des-risques-naturels-au-cameroun-relation-pluies-inondation-et-plan-orsec--le-cas-des0.html/
- Mbevo, F.P. (2017, 15-17 novembre). *Vulnérabilité et adaptation des populations de cap Cameroun aux risques naturels*. [Conférence] Construire la ville portuaire de demain en Afrique Atlantique, Kribi. ISBN 978-2-37687-271-9
- Ministère de l'Environnement, de la Protection de la nature et du Développement Durable. (2017). Atlas des mangroves du Cameroun. MINEPDED-RCM. <https://www.cbd.int/doc/c/7ded/af6d/1475deac74f6891a6781dc62/soiws-2018-01-atlas-fr.pdf/>
- Molle, P., Vincent, J., Troesch, S. & Malamaire, G. (2013). *Les lits de séchage de boues plantés de roseaux pour le traitement des boues et des matières de vidange. Guide de dimensionnement et de gestion*. Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture. https://professionnels.ofb.fr/sites/default/files/pdf/2013_046.pdf/
- Netherlands Economic Institute. (1993). *Etude de protection environnementale du port de Douala, du chenal d'accès et des eaux côtières*. Banque Mondiale. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/459341468222576338/pdf/E28030EA0v10P000Box0361519B0PUBLIC0.pdf>
- Ndongo, B., Mbouendeu, S.L., Tirmou, A.A., Njila, R.N. & Dalle, J.D.M. (2015). Tendances pluviométriques et impact de la marée sur le drainage en zone d'estuaire : cas du Wouri au Cameroun. *Afrique Science*, 11(2), 173-175. <https://www.ajol.info/index.php/afsci/article/download/118486/108019/>
- Ngueukam, V. (2002). *La population de Douala au Cameroun et la qualité de l'eau de boisson*. Programme solidarité eau. https://www.pseau.org/outils/lettre/article.php?lett_article_lettre_id=435/

- Perroni, A.C. (2006). *Gestion des sédiments de dragage : Inventaire des méthodes de prétraitement et application aux matériaux du Port Autonome du Havre en vue de leur valorisation*. [Rapport de Master 2, Université de Normandie].
- Port Autonome de Douala. (2019). *Présentation du projet d'autonomisation du dragage au port de Douala*. Division de l'Analyse, de la Prospective et de la Coopération, Port Autonome Douala.
- Ramoroson, J. (2008). *Calcination des sédiments de dragage contaminés. Études des propriétés physico-chimiques*. [Thèse de doctorat, Ecole doctorale de Chimie de Lyon]. Thèses.insa-lyon.fr. <http://theses.insa-lyon.fr/publication/2008ISAL0010/these.pdf/>
- Safhi, A. (2020). *Valorisation des sédiments de dragage dans des bétons auto-plaçants : optimisation de la formulation et étude de la durabilité*. [Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Lille Douai & Université de Sherbrooke]. Tel.archives-ouvertes.fr. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03161520/document/>
- Thiyyakandi, S. & Annex, S. (2011). Effect of organic content on geotechnical properties of Kuttanad clay [Effet de la teneur en matières organiques sur les propriétés géotechniques de l'argile de Kuttanad]. *Electronic journal of Geotechnical Engineering*, 16, 1653-1663. <https://research.nu.edu.kz/en/publications/effect-of-organic-content-content-on-geotechnical-properties-of-kuttanad/>
- Tremblay, H. (1998). *Amélioration mécanique et prédiction de la compressibilité des sols fins au Québec*. [Thèse de doctorat, Université de Laval]. Uval.ca. <http://hdl.handle.net/20.500.11794/41889/>

Références sitographiques

- Aquaportail. (2020, 02 juin). *Dragage : définition, explications*. Aquaportail. Consulté le 25 mars 2020 sur <https://www.aquaportail.com/definition-6235-dragage.html>
- Centre de Déploiement de l'Eco-transition dans les Entreprises et les territoires. (2021) *Valorisation des sédiments*. CD2E. Consulté le 19 juillet 2021 sur <https://cd2e.com/domaines-dexpertise/economie-circulaire/valorisation-des-sediments/>
- Dosage gravimétrique. (2021, 25 février). Dans *Wikiversity*. https://fr.wikiversity.org/wiki/Dosage_gravim%C3%A9trique/
- Dunkerque Promotion. (2018). *Dunkerque port et la valorisation des sédiments non immergeables*. Dunkerque Promotion. Consulté le 26 juillet 2021 sur

- <https://www.dunkerquepromotion.org/2018/07/dunkerque-port-valorisation-sediments-non-immergeables>
- Ecolex. (2001). *International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL) - Annex V (Optional): Garbage*. Ecolex: the gateway for environmental law. Consulté le 23 juillet 2021 sur <https://www.ecolex.org/details/treaty/international-convention-for-the-prevention-of-pollution-from-ships-marpol-annex-v-optional-garbage-tre-000989/>
- Josy. (2006). *Entreprises modernes : 34 700 sociétés recensées*. Cameroun Tribune. Consulté le 24 mai 2021 sur <https://www.cameroun-tribune.cm/article.html/39189/fr.html/entreprises-modernes-34-700-societes>
- Logistique Conseil. (2007). *Présentation sommaire des ports autonomes et infrastructures portuaires du Cameroun*. Logistique Conseil. Consulté le 21 mars 2021 sur <http://www.logistiqueconseil.org/Articles/Transport-maritime/Ports-autonomes-cameroun.htm>
- Magzi. (2021). *Zone industrielle de Douala-Bassa*. Mission d'aménagement et de gestion des zones industrielles. Consulté le 21 mars 2021 sur <http://www.magzicameroun.com/index.php/fr/zone-com/historique-du-csbc>
- Magzi. (2021). *Zone industrielle de Douala-Bonabéri*. Mission d'aménagement et de gestion des zones industrielles. Consulté le 21 mars 2021 sur <http://www.magzicameroun.com/index.php/fr/zone-com/arretes-de-creation>
- National Ocean and Atmospheric Administration. (2021). *What is dredging?* National Ocean and Atmospheric Administration. Consulté le 5 avril 2021 sur <https://oceanservice.noaa.gov/facts/dredging.html/>
- Nations Unies. (1994). *Convention des Nations Unies sur le droit de la mer (avec annexes, acte final et procès-verbaux de rectification de l'acte final en date des 3 mars 1986 et 26 juillet 1993) Conclue à Montego Bay le 10 décembre 1982*. Nations Unies. Consulté le 23 juillet 2021 sur https://www.un.org/Depts/los/convention_agreements/texts/unclos/unclos_f.pdf
- Ooreka. (2021). *Couche de forme*. Ooreka Maison. Consulté le 23 juillet 2021 sur <https://amenagement-de-jardin.staging.ooreka.fr/astuce/voir/747359/couche-de-forme>
- Planète TP. (2007). *Autres formes de dragage*. Planète-TP. Consulté le 6 avril 2021 sur <http://www.planete-tp.com/autres-formes-de-dragage-a346.html/>

- Planète TP. (2007). *Dragues hydrauliques*. Planète-TP. Consulté le 5 avril 2021 sur <http://www.planete-tp.com/dragues-hydrauliques-a343.html/>
- Planète TP. (2007). *Dragues mécaniques*. Planète-TP. Consulté le 5 avril 2021 sur <http://www.planete-tp.com/dragues-mecaniques-a345.html/>
- Schneider, G. (2001). *Le curage des sédiments des cours d'eau*. Le Courrier de l'Environnement de l'INRA. Consulté le 24 avril sur <http://www7.inra.fr/dpenv/curage.htm#r41/>
- Sedilab. (2019). *Béton*. SEDILAB. Consulté le 26 juillet 2021 sur <https://www.sedilab.com/beton/>
- Tchouakak, A. (2018). Cameroun : Les petits pas de la gestion des déchets plastiques. SciDevNet. Consulté le 2 avril 2021 sur <https://www.scidev.net/afrique-sub-saharienne/features/cameroun-gestion-dechets/>
- Wouri (département). (2021, 20 mars). Dans *Wikipédia*. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Wouri_\(département\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Wouri_(département))

ANNEXES

ANNEXE I : NIVEAUX DE RÉFÉRENCES QUALITÉ POUR LES SÉDIMENTS MARINS, ESTUARIENS OU FLUVIAUX TELS QU'ÉTABLIS PAR LE CODE DE L'ENVIRONNEMENT FRANÇAIS

L'arrêté du 9 août 2006 complété par les arrêtés du 23 décembre 2009 et du 8 février 2013 définit un référentiel de qualité pour la caractérisation physico-chimique des sédiments marins ou estuariens. Ce référentiel établit pour un ensemble de contaminants, des seuils de classification N1 et N2 permettant de mieux apprécier l'incidence que peut avoir la remobilisation des matériaux considérés. Ces niveaux ne sont pas des seuils visant à autoriser ou à interdire de fait l'immersion de sédiments. Ils constituent des points de repère permettant à la fois de statuer sur le régime administratif de l'opération (déclaration ou autorisation) et d'apprécier l'incidence que peut avoir l'opération projetée, et donc d'orienter une opération soit vers l'immersion des sédiments, soit vers leur gestion à terre (voir les Tableaux A-1 et A-2).

- Au-dessous du niveau N1, l'impact potentiel est en principe jugé d'emblée neutre ou négligeable, les teneurs étant « normales » ou comparables au bruit de fond environnemental ;
- Entre le niveau N1 et le niveau N2, une investigation complémentaire peut s'avérer nécessaire en fonction du projet considéré et du degré de dépassement du niveau N1 ;
- Au-delà du niveau N2, une investigation complémentaire est généralement nécessaire car des indices notables laissent présager un impact potentiel négatif de l'opération.

NB : Il est à noter que ces seuils peuvent être révisés et actualisés, et que de nouvelles substances pourront être couvertes dans le futur. Il est donc nécessaire de se référer aux derniers arrêtés en vigueur.

(Source : Rédaction des études d'impact d'opérations de dragage et d'immersion en milieu estuarien et marin : Annexe technique réglementaire, GEODE² avec la collaboration du MEDDE³, août 2014)

² GEODE = Groupe d'études et d'observations sur le dragage et l'environnement

³ MEDDE = Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (République Française)


Tableau A-1 : Niveaux relatifs aux éléments traces (en mg/kg de sédiment sec analysé sur la fraction < 2 mm)

Éléments traces	N1	N2
Arsenic	25	50
Cadmium	1,2	2,4
Chrome	90	180
Cuivre	45	90
Mercure	0,4	0,8
Nickel	37	74
Plomb	100	200
Zinc	276	552

Tableau A-2 : Niveaux relatifs aux éléments et composés traces en mg/kg de sédiment sec analysé sur la fraction < 2 mm

Paramètres	Niveau S1
Arsenic	30
Cadmium	2
Chrome	150
Cuivre	100
Mercure	1
Nickel	50
Plomb	100
Zinc	300
PCB totaux	0,680
HAP totaux	22,800

ANNEXE II : FICHE DES RÉSULTATS DES ANALYSES PHYSICO-CIMIQUES
RÉALISÉS AU LABORATOIRE LEAUCLEAN, YAOUNDÉ



LABORATOIRE D'ANALYSES

LABORATOIRE LEAUCLEAN

Laboratoire agréé par ARRETE MINISTERIEL N°AR/00439/A/MINIMIDT/SG/DI/SDRI/SEC/MM du 17 juin 2019

Analyses des eaux
Analyses de l'air & des sols
Traitement de la pollution
Etude - Conseil - Formation

infos@laboratoireleauclean.com
www.laboratoireleauclean.com

658 23 21 06 - 676 49 77 71 - 655 22 35 26

RCCM – RC/YAO/2016/A/145

N° contribuable – P058812415062T

N° 0426 /2021/LALC/CSP Yaoundé, le 10 AVR 2021

BULLETIN D'ANALYSE

NATURE DE L'ECHANTILLON : SEDIMENT	LOCALISATION : WOUIRI
PRELEVE LE : 01/04/2021	DEMANDEUR : ABATE CHRISSY
PAR : CLIENT	LOCALITE : DOUALA
N° ECHANTILLON : LCAPC426	ANALYSE LE : 02/04/2021


PARAMETRE	METHODE ANALYSE	RESULTAT	UNITE
PHYSICOCHIMIE			
NATURELS			
pH	ISO 10523:2008	7,42	-
Conductivité	ISO7888:1995	6800	uS/cm à 20°C uS/cm à 25°C
Matières sèches (MS)	ISO 2920 : 2004	74,41	%MS
Fraction de matières organiques	Rodier	4,3	mg/l
Densité	ISO 7980 : 1986	1121	Kg/m ³
Aluminium	ISO 10566: 1994	0,11	mg/l Al
Chlorure	ISO7888:1995	34	mg/l Cl
Sulfates	ISO 6777 : 1984	95	mg/l SO ₄
INDESIRABLES			
Azote Kjeldahl	ISO 5663 : 1984	0,658	mg/l NTK
Fer	ISO 6332 : 1988	2,15	mg/l Fe
Phosphore	ISO 6878 : 2004	0,6	mg/l P
Silice	ISO 6382 : 1981	8	mg/l SiO ₂
Zinc	ISO 11045 : 1998	0,32	mg/l Zn
Phosphates	ISO 15681-2 : 2003	1,6	mg/l PO ₄
Cuivre	ISO 15181-2 : 2007	< 0,004	mg/l Cu
TOXIQUES			
Cadmium	ISO 5961 : 1994	0,045	mg/l Cd
Chrome	ISO 18412 : 2005	< 0,001	mg/l Cr
Mercure	ISO/TS 15923 : 2017	0,01	mg/l Hg
Plomb	ISO 8288 : 1986	0,2	mg/l Pb
MICROPOLLUANTS ORGANIQUES			
Huiles et graisses	ISO 8068 : 2006	1,35	mg/l
Hydrocarbures totaux	ISO 28540 : 2011	0,015	mg/l

APPRECIATION : Forte minéralisation. Teneur élevée en fer. Proportion de matière sèche élevée.

CONCLUSION : Les sédiments analysés présentent une bonne densité et, suivant sa composition en paramètres toxiques, ils appartiennent à une classe de qualité bonne.

Situé à la nouvelle route Nsiméyong.
en face de la Chefserie Elono Bloc 6 à 200 mètres de la chapelle Nsiméyong
sur la route allant de la chapelle au carrefour olympique.

ils nous font confiance:



Membre de:

