

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر وتهيئة الساحل

Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement
du Littoral

*Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat
en Sciences de la Mer*

Option : Gestion et Protection du Littoral

Thème :

Valorisation des sédiments de dragage dans le génie civil

Présenté par :

❖ DJAOU Taoues

❖ BOUKHADRA Chaima

Soutenu le 10/07/2024 devant le membre de jury suivant :

M ^{me r} FEZAA N.	Professeur (ENSSMAL)	Présidente
M ^{me} ABDEDDAIM H.	Maître de Conférences B (ENSSMAL)	Examinatrice
M ^r MEZOUAR K.	Maître de Conférences A (ENSSMAL)	Promoteur

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire de fin d'études.

Tout d'abord, nous adressons nos remerciements les plus sincères aux membres du jury pour avoir accepté d'examiner notre travail. Votre expertise et vos critiques constructives sont grandement appréciées et ont permis d'enrichir notre réflexion.

Nous remercions particulièrement notre promoteur, M. MEZOUAR, pour son encadrement, sa disponibilité et ses conseils éclairés tout au long de ce projet. Son soutien et son expertise ont été essentiels à la réalisation de ce mémoire

Nos remerciements vont également à tous les professeurs et chercheurs du laboratoire pour leur aide précieuse et leur soutien technique. Votre collaboration et vos orientations ont été d'une grande aide dans la réalisation de nos analyses.

Enfin, nous exprimons notre profonde reconnaissance à nos familles pour leur soutien moral et matériel constants. Leur encouragement et leur patience ont été une source de motivation tout au long de notre parcours académique.

Merci à tous.

Listes des figures

Chapitre 01 :

Figure 01 : Origine des sédiments dans l'environnement aquatique (Amar, 2017)

Figure 02 : Classification des sédiments dans le diagramme de Kiel-Rankine

Figure 03 : Les catégories de l'eau dans le sédiment

Figure 04 : Schéma de la composition simplifiée d'un sédiment portuaire (IDRA Environnement, 2006)

Chapitre 02 :

Figure 05 : Carte de la baie de Zemmouri + une carte du port (Google Earth, 2024)

Figure 06 : un plan de masse du port de Zemmouri

Figure 07 : La passe d'entrée

Figure 08 : Bassin du port

Figure 09 : Quai

Figure 10 : Photo représentant la grue utilisée pour le prélèvement

Figure 11 : Carte de la baie de Bou Ismail + une carte du port de Sidi Fredj (Google Earth, 2024)

Figure 12 : Carte des bassins du Port de Sidi Fredj (BOUYACOUB; DJILALI, 2021)

Figure 13 : La partie quai du port de Sidi Fredj

Figure 14 : Coordonnées GPS prises dans le bassin du port de Sidi Fredj

Figure 15 : Bassin du port de Sidi Fredj

Figure 16 : Passe d'entrée du port de Sidi Fredj

Figure 17 : Photo de la benne

Chapitre 03 :

Figure 18 : Balance

Figure 19 : Série de tamis AFNOR

Figure 20 : Calcimètre de Bernard

Figure 21 : Erlenmeyer + HCl

Figures 22 : Résultats de l'équivalent de sable

Figure 23 : Balance de précision

Figure 24 : Four à moufle

Figure 25 : Conductivimètre

Figure 26 : Eau distillée & sédiment

Figure 27 : pH-mètre

Figure 28 : Dispositif de dosage

Figures 29 : Les tâches de bleu de méthylène sur le papier filtre

Figures 30 : La boîte de cisaillement 10/10 cm et le bâti de chargement

Figure 31 : Œdomètre

Figure 32 : Préparation des godets pour les mettre au four

Figure 33 : Mortier en porcelaine

Figure 34 : Godets en téflon

Figure 35 : Spectrophotomètre

Figure 36 : Four a moufle

Figure 37 : Lyophilisateur

Chapitre 04 :

Figure 38 : Courbe granulométrique de l'échantillon 01, 02 et 03 (Port de Zemmouri)

Figure 39 : Courbe granulométrique de l'échantillon 01, 02 (Port de Sidi Fredj)

Figure 40 : Courbe intrinsèque de Contrainte tangentielle τ en fonction de la contrainte normale σ

Chapitre 05 :

Figure 40 : Méthodologie adoptée pour la valorisation des sédiments (DIA, 2013)

Figure 41 : Courbe montrant l'évolution du Ph en fonction du dosage en ciment

Figure 42 : Courbe montrant l'évolution De la conductivité électrique en fonction du dosage en ciment

Figure 43 : Exemple d'éprouvette après démoulages (DIA, 2013)

Liste des tableaux

Chapitre 01 :

Tableau 01 : Dénomination des classes granulaires des sédiments

Tableau 02 : Les différentes classes de sédiments

Tableau 03 : Principaux minéraux composants les sédiments d'eau douce, (AZRAR, 2014)

Chapitre 02 :

Tableau 04 : les quantités des sédiments marins à draguer par zone (Bureau d'études et suivi Hydro Marine Ingénierie)

Tableau 05 : Les opérations de dragage au niveau du port de Sidi Fredj (OUANDJELI., SENOUCI, 2016)

Chapitre 03 :

Tableau 06 : Le degré de classement d'un sédiment selon la valeur de l'indice

Tableau 07 : Concentrations normales des métaux lourds dans le sédiment selon les normes Algériennes (ug/g) (Belkessa R.. 2005)

Tableau 08 : Valeurs de l'indice de contamination IC (Alzicu C et al, 1999)

Chapitre 04 :

Tableau 09 : les résultats de la granulométrie du port de Zemmouri

Tableau 10 : les résultats de la granulométrie du port de Sidi Fredj

Tableau 11 : Les paramètres granulométriques pour le port de Zemmouri et Sidi Fredj

Tableau 12 : Classification GTR des granulats

Tableau 13 : Résultats de la teneur en carbonates dans les sédiments prélevés dans les deux ports

Tableau 14 : résultats de l'équivalent de sable pour l'ensemble des échantillons prélevés dans les deux ports

Tableau 15 : Classification de la qualité du sable selon la valeur de l'ES

Tableau 16 : Résultats de la teneur en eau dans les sédiments prélevés dans les deux ports

Tableau 17 : Résultats de la matière organique dans les sédiments prélevés dans les deux ports

Tableau 18 : Résultats du pH dans les sédiments prélevés dans les deux ports

Tableau 19 : Résultats de la conductivité dans les sédiments prélevés dans les deux ports

Tableau 20 : Résultats du VBS dans les sédiments prélevés dans les deux ports

Tableau 21 : Classification GTR des sols selon la VBS

Tableau 22 : Résultats la Masse volumique apparente et la Masse volumique absolue

Tableau 23 : résultats des contraintes

Tableau 24 : Résultats de l'indice des vides (Tassement, port de Zemmouri)

Tableau 25 : Résultats de l'indice des vides (Gonflement, port de Zemmouri)

Tableau 26 : Résultats de l'indice des vides (Tassement, port de Sidi Fredj)

Tableau 27 : Résultats de l'indice des vides (Gonflement, port de Sidi Fredj)

Tableau 28 : Résultats de la concentration des métaux lourds dans les deux ports ainsi leurs IC

Chapitre 05 :

Tableau 29 : Caractéristiques du ciment Cibecor

Tableau 30 : Caractéristiques du ciment Vicat

Liste des acronymes

AFNOR : Association Française de Normalisation

ENSSMAL : Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et l'Aménagement du Littoral

ENSTP : Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics.

GEODE : Groupe d'Etudes et d'Observations sur les Dragages et l'Environnement.

GTR : Guide des Terrassements Routiers.

MO : Matière Organique

OSPAR : **OS** pour la Convention d'Oslo (1972), **PAR** pour la Convention de Paris (1974)

LEM : Laboratoires des Etudes Maritimes

DTP : Direction des Travaux Publics

VBS : Valeur de Bleu du Sol

SAA : Spectrométrie d'Adsorption Atomique

RTR : Recommandation pour les Terrassements Routiers)

GTS : Guide de Traitement des Sols

SETRA : Service d'Etudes Techniques des Routes et des Autoroutes

Sommaire :

Introduction générale:	12
Chapitre 01 : Généralités	
1 Introduction.....	14
2 Sédiment de dragage	15
2.1 Définition	15
2.2 Origine	15
2.3 Granulométrie et classification	16
2.4 Composition.....	18
3 Opération de dragage	20
3.1 Définition	20
3.2 Types de dragage	20
3.3 Méthodes de dragage	20
3.4 Règlementation liée à la gestion des sédiments de dragage.....	22
3.4.1 Au niveau international.....	22
3.4.2 Au niveau régional.....	22
3.4.3 Au niveau national	23
3.4.4 Classification des sédiments.....	24
3.4.5 Normes environnementales.....	24
3.4.6 Permis et autorisation.....	24
3.4.7 Technique de gestion des sédiments	24
3.4.8 Surveillance et suivi.....	24
4 Gestion des produits de dragage	24
4.1 Gestion en mer ou gestion par immersion	24
4.2 Gestion à terre	25
5 Les techniques de valorisation des produits de dragage	25
5.1 Filière matériau de remblai	25
5.2 Valorisation de sédiments de dragage en éco-modelé paysager	26
5.3 Valorisation des sédiments dans les ouvrages de protection (digues en terre)	26
5.4 Valorisation de sédiments en Génie Civil.....	26
5.4.1 Valorisation de sédiments de dragage en technique routière	26
5.4.2 Valorisation de sédiments de dragage en brique.....	26
5.4.3 Valorisation de sédiments de dragage en béton	27
5.5 Utilisation agricole.....	27
5.6 Production d'énergie.....	27
5.7 Recyclage des métaux.....	27

Chapitre 02 :Présentation des zones d'étude

1	Introduction.....	29
2	Le port de Zemmouri	29
2.1	Situation géographique	29
2.2	Opération de dragage	30
2.3	Prélèvement des échantillons	31
2.4	Méthode de prélèvement.....	32
3	Port de sidi Fredj.....	32
3.1	Situation géographique.....	32
3.2	Dragage du port de Sidi Fredj.....	34
3.3	Prélèvement des échantillons.....	35
3.4	Méthode de prélèvement.....	36

Chapitre 03 : Matériels et méthodes (Essais au laboratoire)

1	Introduction.....	38
2	Les essais physico-chimiques	38
2.1	L'analyse granulométrique	38
➤	Principe de l'essai :	38
➤	Matériel nécessaire :	38
➤	Mode opératoire :	39
➤	Expression des résultats :	39
2.2	La détermination de la teneur en carbonates.....	40
➤	Principe de l'essai	40
➤	Matériel nécessaire.....	40
➤	Mode opératoire	41
➤	Expression des résultats	41
2.3	L'équivalent de sable	41
➤	Principe de l'essai	42
➤	Matériel nécessaire.....	42
➤	Mode opératoire	42
➤	Expression des résultats	43
2.4	La teneur en eau à la saturation W_{sr}	43
➤	Principe de l'essai	43
➤	Matériel nécessaire.....	43
➤	Mode opératoire	43
➤	Expressions des résultats.....	43
2.5	La teneur en matière organique (MO).....	44
➤	Principe de l'essai	44

➤	Matériel nécessaire.....	44
➤	Mode opératoire	44
➤	Expression des résultats	45
2.6	Mesure de la conductivité	45
➤	Principe de l'essai	45
➤	Matériel nécessaire.....	45
➤	Mode opératoire	46
➤	Expression des résultats	46
2.7	Mesure de pH.....	46
➤	Principe de l'essai	47
➤	Matériel nécessaire.....	47
➤	Mode opératoire	47
➤	Expression des résultats	47
2.8	Valeur au bleu de méthylène (VBS)	48
➤	Principe de l'essai	48
➤	Matériel nécessaire.....	48
➤	Mode opératoire	48
➤	Expression des résultats	49
2.9	Masse volumique apparente.....	49
➤	Matériel nécessaire.....	50
➤	Mode opératoire	50
➤	Expressions des résultats.....	50
2.10	Masse volumique absolue	50
➤	Matériel nécessaire.....	50
➤	Mode opératoire	51
➤	Expressions des résultats	51
3	Les essais mécaniques.....	51
3.1	Essai de cisaillement direct à la boîte de Casagrande	51
➤	Principe de l'essai	51
➤	Description de la Boîte de Casagrande	51
➤	Préparation des essais	52
➤	Préparation des échantillons	52
➤	Montage de la boîte de cisaillement sur le bâti de chargement.....	52
➤	Mise en route de l'essai	53
3.2	L'essai œdométrique.....	54
➤	Principe de l'essai	54
➤	Matériel nécessaire.....	54
➤	Mode opératoire	54

➤	Expressions des résultats.....	55
4	Analyse des métaux lourds dans le sédiment.....	55
➤	Principe de l'essai	55
➤	Matériel nécessaire.....	55
➤	Mode opératoire	56
➤	Minéralisation à blanc :.....	57
➤	Minéralisation des échantillons :.....	57
➤	Expression des résultats	58

Chapitre 04 : Résultats et discussions

1	Introduction.....	61
2	Les essais physico-chimiques	61
2.1	Granulométrie	61
2.2	La teneur en carbonates	65
2.3	Equivalent de sable	66
2.4	La teneur en eau	67
2.5	La matière organique	68
2.6	pH et Conductivité	69
2.7	Bleu de méthylène.....	70
2.8	La Masse volumique apparente et la Masse volumique absolue	71
3	Les essais mécaniques.....	72
3.1	La résistance au cisaillement à la boîte de Casagrande.....	72
3.2	L'essai œdométrique.....	73
4	Les métaux lourds.....	75
5	Conclusion	75

Chapitre 05 : Valorisation des produits de dragages dans la fabrication du béton et en technique routière

1	Introduction.....	79
2	Valorisation des sédiments de dragage dans la fabrication du béton.....	79
2.1	Les constituants des bétons	79
2.2	Etapas de fabrication du béton à partir d'un sédiment de dragage :	80
2.3	Essais sur le béton :.....	81
2.3.1	Essais sur les bétons frais :.....	81
2.3.2	Essais sur les bétons durcis	82
2.3.3	Essai de durabilité	83
3	Valorisation de sédiments de dragage en technique routière :.....	85
3.1	Préparation des sédiments :.....	85
3.2	Choix des liants hydrauliques :.....	86

3.3	Evolution du Ph et conductivité électrique en fonction du dosage en ciment.....	87
3.4	Etude de comportement mécanique des sédiments traités aux ciments :.....	88
3.5	Paramètre de compactage et de portance des sédiments :.....	89
3.6	Confection des éprouvettes :.....	90
3.7	Etude de la performance mécanique	91
Conclusion :.....		92
Références bibliographiques :		93

Introduction générale:

Le dragage est une opération essentielle pour maintenir la navigabilité des ports et voies navigables, ainsi que pour améliorer la sécurité et l'efficacité des opérations maritimes. Ces travaux sont cruciaux pour éviter l'ensablement et garantir la profondeur requise pour l'accostage des navires.

Toutefois, les réglementations locales, nationales et internationales évoluent progressivement vers des conditions plus strictes (voir le protocole international de 1996). (MOHAMEDOU, B. 2022)

Le port de Zemmouri, en tant que port de pêche et de commerce, joue un rôle vital dans l'économie locale, tandis que Sidi Fredj, avec ses activités touristiques et commerciales, est un pilier du développement régional dépendant grandement de ces opérations de dragage pour assurer un meilleur fonctionnement et leur croissance continue. (SAUSSAYE et al. 2012)

À l'échelle mondiale, la valorisation des sédiments de dragage dans le génie civil est une pratique bien établie. Des projets innovants ont été réalisés, comme le projet "Building with Nature" aux Pays-Bas, où les sédiments de dragage sont utilisés pour créer des zones humides et des îles artificielles pour la protection côtière et la biodiversité. En Belgique, le projet "SeArch" utilise des sédiments de dragage pour fabriquer des briques et d'autres matériaux de construction. En France, le projet "Sedimatériaux" valorise les sédiments en matériaux de construction routière et en sous-couches pour les infrastructures. (SAUSSAYE et al. 2012)

En Algérie, bien que cette pratique soit encore en développement, des initiatives commencent à voir le jour, visant à exploiter les sédiments de dragage dans divers domaines du génie civil. (SENOUCL., OUANJELI, 2016)

La valorisation des sédiments de dragage consiste à réutiliser ces matériaux dans divers domaines, cette approche permet non seulement de réduire le volume des sédiments à éliminer, mais aussi de transformer un passif environnemental en une ressource utile.

Pour atteindre à cette approche, notre étude s'articule autour de cinq chapitres.

Le premier chapitre consiste à présenter des généralités sur les concepts fondamentaux du dragage et de la valorisation des sédiments.

Le deuxième chapitre définit la présentation de la zone d'étude et détaille les caractéristiques des ports de Zemmouri et Sidi Fredj.

Le troisième chapitre concerne les matériels et méthodes qui décrivent les protocoles des analyses physico-chimiques, les essais mécaniques et les tests des métaux lourds effectués sur les sédiments.

Le quatrième chapitre présente les résultats et discussions en traitant les données et en interprétant les résultats obtenus pour évaluer la qualité et le potentiel de la valorisation des sédiments.

Enfin, le cinquième chapitre explore les différentes applications de valorisation des sédiments possibles dans le génie civil. Cette structure permet de comprendre les étapes suivies et les conclusions tirées de notre étude.

Chapitre 01 :

Généralités

1 Introduction

Le chapitre un, intitulé "Généralités", offre une présentation détaillée des sédiments de dragage et des opérations de dragage, ainsi que de la gestion et de la valorisation de ces matériaux. Nous commencerons par définir ce que sont les sédiments de dragage, en explorant leur origine, leur granulométrie, leur classification et leur composition chimique et physique. Ensuite, nous aborderons les opérations de dragage elles-mêmes, en définissant ce processus, en décrivant les différents types et méthodes de dragage, et en examinant la réglementation liée à la gestion des sédiments de dragage aux niveaux international, régional et national. La gestion des produits de dragage sera également abordée, avec une distinction entre la gestion en mer (ou par immersion) et la gestion à terre. Enfin, nous explorerons les diverses techniques de valorisation des produits de dragage. Ce chapitre établira ainsi une base solide pour les chapitres suivants, en fournissant un cadre théorique complet et une compréhension approfondie des enjeux et des opportunités associés à la gestion et à la valorisation des sédiments de dragage.

2 Sédiment de dragage

2.1 Définition

Un sédiment est un ensemble de particules fines qui se déposent et s'accumulent sur le fond. Ces particules sont transportées le plus souvent par le vent, les cours d'eau ou la gravité.

Les sédiments de dragage sont des matériaux extraits du fond des plans d'eau, des rivières ou des ports lors d'opérations de dragage. Ces opérations visent généralement à maintenir la profondeur nécessaire pour la navigation ou à enlever les matériaux contaminés ou indésirables. Les sédiments de dragage peuvent contenir une variété de matériaux, y compris des particules de sol, des débris organiques, des polluants chimiques ou des contaminants métalliques. (SENOUCI., OUANJELI, 2016)

2.2 Origine

Les sédiments peuvent être classés en deux grandes catégories en fonction de leur origine : **endogène** et **exogène** (SHNEIDER,2001).

- Les sédiments endogènes ont une origine interne, souvent liée à des processus naturels tels que la décomposition des plantes et des animaux, la météorisation des roches et la décomposition des matériaux déjà présents dans la zone de dragage.
- Les sédiments exogènes ont une origine externe à la zone de dragage, transportés par la précipitation des poussières atmosphériques, les écoulements des fluides et par ruissèlement vers les rivières et les plans d'eau, où ils peuvent s'accumuler.

Ces sédiments peuvent être d'origine naturelle (érosion des sols, décomposition de la matière végétale), ou anthropique (apports de matières en suspension, de matières organiques, de nutriments ou de micropolluants en raison des rejets agricoles, industriels et domestiques).

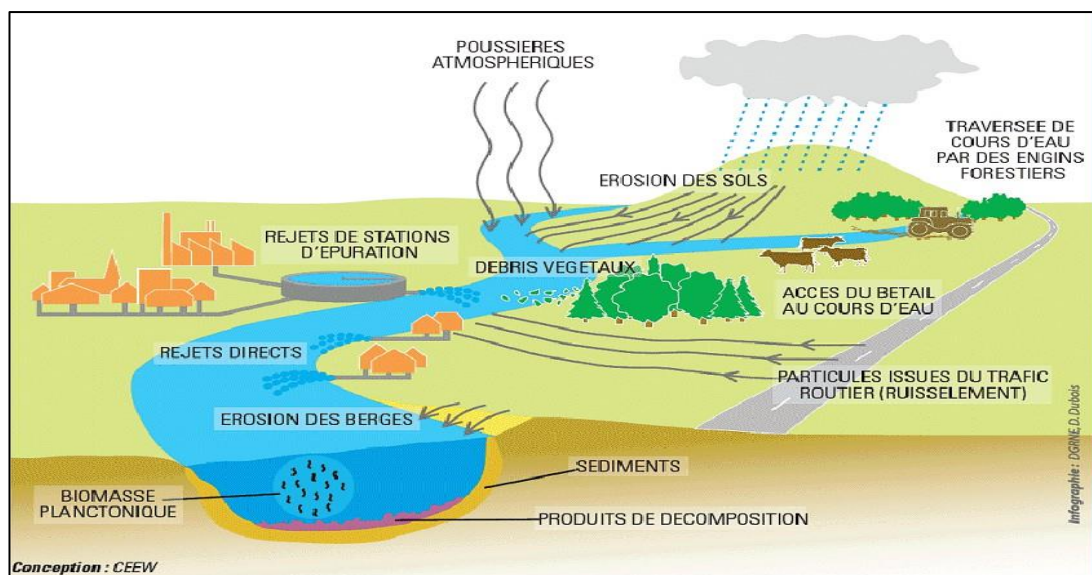


Figure 01 : Origine des sédiments dans l'environnement aquatique (Amar, 2017)

2.3 Granulométrie et classification

La granulométrie d'un sédiment se réfère à la distribution des tailles des particules présentes dans ce sédiment, il se caractérise essentiellement par une fraction minérale grossière (fraction sableuse) et une fraction plus fine (la vase) :

- Les sédiments grossiers contiennent essentiellement des particules d'un diamètre supérieur à 63 μm et sont principalement constitués de sable et de matériaux inorganiques silicatés. Les sédiments sableux présentent : une faible cohésion, une petite surface de contact entre les différentes particules du sédiment et peu d'affinité pour les contaminants.
- Les sédiments fins, aussi appelés vases, sont composés de particules d'une taille inférieure à 63 μm et sont constitués d'argiles ayant un diamètre compris entre 0,2 et 2 μm et de silt ayant un diamètre compris entre 2 μm et 63 μm . Cette fraction fine contient généralement des minéraux argileux et de la matière organique. Les particules fines présentent une forte cohésion entre elles, la surface de contact est importante entre les particules. La prédominance des minéraux argileux, chargés négativement, donne un grand pouvoir adsorbant à la fraction fine des sédiments vis à vis des contaminants métalliques. Quant à la matière organique sédimentaire elle est constituée de macromolécules hétérogènes présentant des sites hydrophiles qui facilitent sa fixation à la surface des particules minérales réactives (minéraux argileux) et la formation de nombreux complexes avec les contaminants métalliques et organiques.

On distingue ainsi : les argiles, les limons, les sables, les graviers et les cailloux selon le tableau ci-dessous :

Tableau 1 : Dénomination des classes granulaires des sédiments

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 (grossiers et fins)
2 μm à 63 μm	Limons (ou silt)
< 2 μm	Vases, boues argileuses

Les différentes classes de sédiments interviennent rarement seules. On définit alors différents faciès lithologiques qui varient encore avec les auteurs et les pays. Voici les plus simples définitions d'après Allen :

Tableau 2 : Les différentes classes de sédiments

Dénomination	Caractéristiques
Sable	Plus de 80 % d'éléments supérieurs à 50 µm
Sable vaseux	De 20 à 80 % d'éléments supérieurs à 50 µm
Vase	Plus de 80 % d'éléments inférieurs à 50 µm

Le sédiment peut être classé selon le pourcentage de ces trois composés en utilisant le diagramme triangulaire de classification des sédiments en fonction de leur texture :

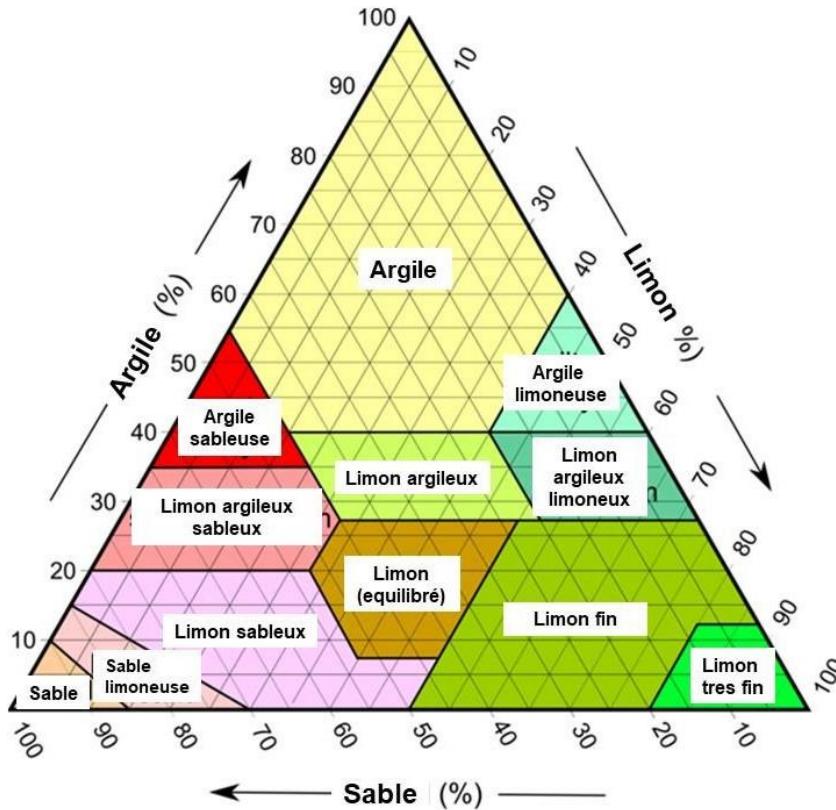


Figure 02 : Classification des sédiments dans le diagramme de Kiel-Rankine

- Les résultats de l'analyse granulométrique, contaminants en fonction de la distribution granulométrique, sont des indicateurs pour la décontamination. En effet, les sédiments grossiers comptent une contamination pratiquement nulle alors que la fraction fine (argile et limon) contient presque la totalité de la contamination.

2.4 Composition

Le sédiment est une matrice relativement hétérogène constituée d'eau et de matériaux organiques (débris végétaux, micro-organismes, etc...), et inorganiques (les argiles, les carbonates et les silicates dont la taille varie de 0,1 μm jusqu'à plusieurs mm), ainsi que des polluants qui proviennent généralement de l'activité humaine. (KHEZAMI, 2014)

❖ L'eau contenue dans les sédiments (eau interstitielle) :

L'eau présente entre les particules de sédiments, connue sous le nom d'eau interstitielle, peut contenir des sels, des nutriments, des matières dissoutes et d'autres composés. Elle est présente sous différentes formes :

- Eau libre, qui n'est pas liée aux fines ;
- Eau capillaire, qui est liée aux fines par des forces de capillarité ;
- Eau colloïdale, qui hydrate les colloïdes ;
- Eau intercellulaire, qui est liée chimiquement à la surface des particules, et constitue un film autour d'elles. (KHEZAMI, 2014)

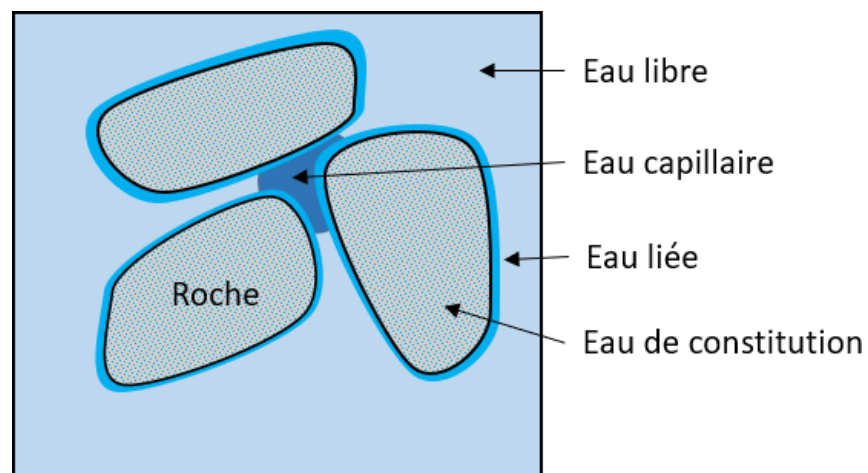


Figure 03 : Les catégories de l'eau dans le sédiment

❖ La matière organique (MO) :

La matière organique occupe un petit volume dans les sédiments, provient de différentes sources, notamment les plantes terrestres, les algues, les débris d'animaux aquatiques, les excréments, les microorganismes morts, etc.

La fraction organique comprend deux catégories : les substances humiques et non humiques.

- La matière organique **humique** est riche en carbone et a une structure moléculaire complexe. Elle est souvent résistante à la décomposition et peut persister dans les sédiments pendant de longues périodes. Les substances humiques interagissent avec les composés minéraux dissous tels que les ions métalliques et sont à l'origine de la couleur noire des sédiments.

Colin (2003) a indiqué que les substances humiques peuvent constituer entre 85 % et 90 % de la fraction organique totale du sol. La proportion de matière organique dans la matière sèche des sédiments varie de 2 % pour les sables de rivière à 90 % dans le cas de la tourbe.

- La matière organique **non humique** provient de diverses sources, y compris la décomposition d'organismes aquatiques, de microorganismes, de débris animaux, de matières fécales, et d'autres sources organiques diverses. Elle peut être composée de composés organiques plus simples et plus facilement décomposables par les microorganismes. (AZRAR, 2014)

❖ La matière inorganique :

Les sédiments inorganiques sont principalement composés de minéraux tels que le quartz, le feldspath, le mica, la calcite, la dolomite, la magnétite, la goethite, et d'autres minéraux courants.

La proportion de chaque minéral dépend de la géologie locale et provient souvent de la désagrégation et de l'érosion des roches environnantes. Les sédiments peuvent également contenir des minéraux apportés par des processus tels que l'érosion éolienne, l'érosion glaciaire ou la sédimentation fluviale. (AZRAR, 2014)

Tableau03 : Principaux minéraux composants les sédiments d'eau douce, (AZRAR, 2014)

Minéraux	Dénomination	Formule chimique
Silicates	Quartz (= silice)	SiO ₂
	Mica	K(Mg, Fe, Al) ₃ AlSi ₃ O ₁₀ (OH) ₂
	Feldspath	(Na, Ca, K)AlSi ₃ O ₈
	Amphibole	(Ca, Mg, Fe, Al) ₃ Si ₄ O ₁₁ (OH)
	Pyroxène	(Ca, Mg, Fe) ₂ Si ₂ O ₆
Argiles	Illite	KMgAl ₂ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂
	Smectite (= Montmorillonite)	XMgAlSiO ₁₀ (OH) ₂
	Chlorite	Mg ₅ Al ₂ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₈
	Kaolinite	Al ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄
Carbonates	Calcite	CaCO ₃
	Dolomite	CaMg(CO ₃) ₂
	Siderite	FeCO ₃
Hydroxyde de Fer	Goethite	FeOOH
	Magnetite	Fe ₃ O ₄
Phosphates	Apatite	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH,F)
	vivianite	Fe ₃ (PO ₄) ₂ .8H ₂ O
Sulfure	Pyrite	FeS ₂

❖ Les polluants :

Les polluants dans les sédiments sont principalement causés par les rejets industriels, urbains et agricoles. En effet, ces opérations génèrent un grand nombre de composés nocifs tels que les métaux lourds, les polluants organiques et les éléments nutritifs. En

raison de la texture fine des sédiments et de la présence de matières organiques, ces derniers ont tendance à accumuler des substances présentant des propriétés toxiques.

➤ Schéma de la composition simplifiée d'un sédiment portuaire :

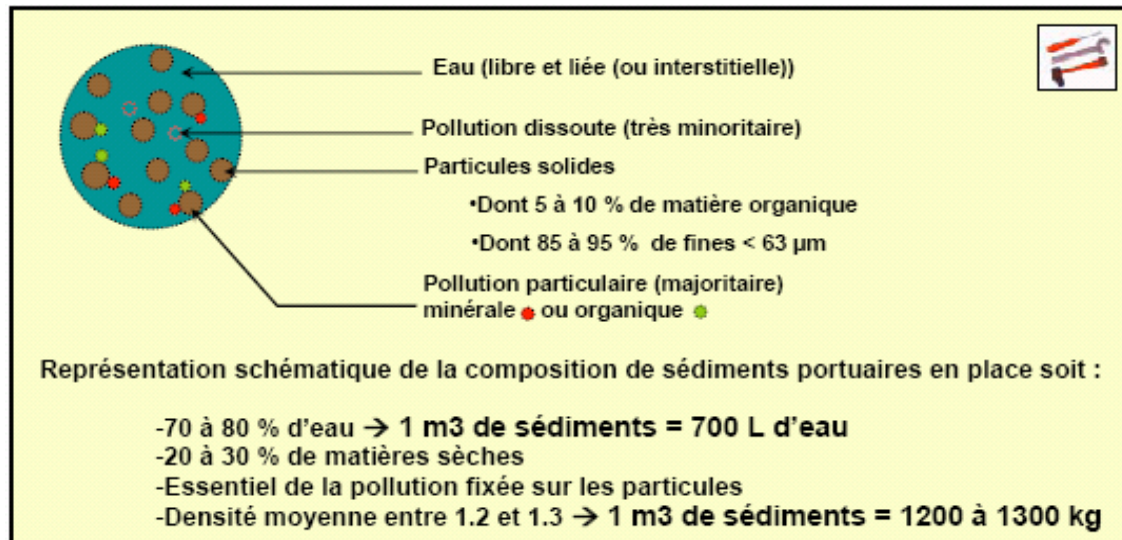


Figure 04 : Schéma de la composition simplifiée d'un sédiment portuaire (IDRA Environnement, 2006)

3 Opération de dragage

3.1 Définition

Le dragage consiste à retirer les sédiments accumulés dans les ports, les canaux, les rivières et les plans d'eau. Cette opération est réalisée soit pour les travaux d'ingénierie portuaire, soit pour la valorisation des sédiments dragués. (MOHAMEDOU, 2022)

3.2 Types de dragage

Le dragage d'approfondissement est effectué pour la sécurité de la navigation maritime et la modernisation des ports. (AZRAR, 2014)

Le dragage d'entretien vise à extraire les sédiments qui se déposent au niveau des chenaux d'accès des ports maritimes où la sédimentation est causée par le sable dominant la plupart du temps, les estuaires où la sédimentation est constituée de particules fines ou de mélange entre sable et vase, les bassins d'écoulement où la sédimentation est liée à la décantation de matières en suspension chargées de particules fines. (AZRAR, 2014)

Le dragage pour la création de nouvelles aires portuaires implique le déplacement de divers matériaux tels que le sable, l'argile et les graviers. (AZRAR, 2014)

3.3 Méthodes de dragage

Il est essentiel que le port soit équipé de dragues puissantes capables d'éliminer

rapidement les obstructions telles que les sables ou les vases dans le chenal de navigation.

On distingue généralement les dragues mécaniques, les dragues hydrauliques et les dragues pneumatiques.

❖ **Les dragages mécaniques** sont employés dans des zones difficilement accessibles et peuvent opérer à des profondeurs allant jusqu'à 25 mètres avec une drague à godets et 30 mètres avec une drague à benne. (AZRAR,2014)

❖ **Les dragues hydrauliques** reposent sur le fonctionnement d'une pompe à eau centrifuge, créant un vide à son entrée. La pression atmosphérique dans l'eau contraint le mélange à emprunter la conduite d'aspiration, constituant ainsi la seule voie possible. (AZRAR,2014)

❖ **La drague pneumatique** est spécialement conçue pour le dragage des sédiments contaminés, avec une évacuation ultérieure des matériaux par chaland ou conduit flottant. (AZRAR,2014)

➤ D'autre part, il existe d'autres méthodes de dragage considérées comme plus spécifiques :

La drague environnementale, utilisée dans des milieux contaminés, vise à réduire la quantité draguée et prévenir la remise en suspension des sédiments. Des boucliers et écrans limitent l'excavation, les godets sont étanches, et les précautions incluent des équipements spéciaux pour les matériaux fortement pollués, comme des têtes de coupe isolées ou des vis sans fin. Ces équipements intègrent des systèmes de contrôle pour limiter la dilution d'eau et optimiser leur efficacité, adaptant les bennes preneuses aux conditions environnementales. (CLAUDE ET AL, 1999)

La drague à eau ou à injection implique l'injection d'eau sous pression dans le sol pour créer un mélange d'eau et de sédiments en suspension. Cette méthode requiert une étude approfondie du fond et est adaptée aux chenaux à fort courant et aux bassins à marée. En fluidisant le sol, soit par de l'eau sous pression, soit par de l'air comprimé, les sédiments sont remis en suspension, facilitant leur transport par les courants. (CLAUDE ET AL, 1999).

Problématiques liées à la gestion des sédiments de dragage :

La gestion des sédiments issus du dragage joue un rôle crucial dans la planification portuaire, nécessitant une évacuation économiquement viable et respectueuse de l'environnement, conformément aux normes définies par les autorités. Le dragage, essentiel aux activités portuaires, implique l'immersion contrôlée des matériaux dans des zones marines spécifiques. Cependant, cette immersion peut engendrer des répercussions environnementales, justifiant la nécessité d'une étude approfondie. Une telle étude devrait évaluer la sensibilité du milieu aux substances présentes, incluant des tests de lixiviation pour la toxicité globale des sédiments et une estimation des impacts potentiels sur l'écosystème. (CHU DUC CHINH, 2021).

3.4 Règlementation liée à la gestion des sédiments de dragage

Les sédiments sont considérés comme des déchets à partir du moment où ils sont extraits de leur milieu naturel et issus du processus de dragage (BEL HADJ ALI, 2013), leur mode de gestion dépend essentiellement du risque qu'ils peuvent présenter pour l'environnement, dans ce contexte, plusieurs textes réglementaires abordent le sujet de gestion des déblais de dragage.

3.4.1 Au niveau international

La Convention de Londres :

Lorsqu'on aborde le problème de gestion de matériaux de dragage contaminés, le document de référence utilisé est connu sous le nom de la convention de Londres 29 Décembre 1972 sur la prévention de la pollution des mers résultants de l'immersion des déchets, cette convention est entrée en vigueur en 30 août 1975, elle exige l'interdiction de toute immersion depuis les navires, les aéronefs et les plates-formes susceptible d'affecter les ressources vivantes et la vie marine. (AZRAR, 2014)

3.4.2 Au niveau régional

- La convention d'OSPAR 1992 :

Est une convention de coopération internationale dédiée à « la protection de l'environnement marin de l'Atlantique du Nord – Est », Elle est née de la fusion de la Convention d'Oslo et celle de Paris, pour l'application de cette convention, les parties contractantes peuvent définir des niveaux de références (seuils de contamination), citant l'exemple de la France :

- ❖ Niveau 01 : En dessous du niveau N1 l'immersion est susceptible d'être autorisée tandis qu'au-dessus de ces seuils une étude plus approfondie pourrait être nécessaire.
- ❖ Niveau 02 : Au-delà du niveau N2 l'immersion est interdite sauf si elle présente la solution la moins dommageable pour l'environnement. (AZRAR, 2014).

- La Convention de Barcelone 1976 :

Amendée en 1995 et à laquelle l'Algérie a adhéré en 17 janvier 1981, vise à protéger l'environnement marin méditerranéen. Elle encourage la mise en place de plans nationaux et régionaux pour le développement durable, impliquant l'évaluation et la maîtrise de la pollution, la gestion durable des ressources marines, l'intégration de l'environnement dans le développement écologique et social, ainsi que la protection des milieux marins et des patrimoines culturels. Les protocoles liés à la lutte contre la pollution par les hydrocarbures et autres substances nuisibles, ainsi que celui concernant l'immersion des sédiments de dragage, définissent des directives précises et les conditions d'octroi des permis d'immersion. (AZRAR, 2014)

3.4.3 Au niveau national

Toute opération d'immersion effectuée à partir d'un port algérien relève de la loi n° 83-03 du 05 février 1983 relative à la protection de l'environnement au chapitre III intitulé « protection de la mer » et concernant les articles 48 à 52. Le dossier de demande d'autorisation d'immersion est adressé au ministre chargé de l'environnement selon l'article 49 concerné par les opérations de dragage. Après enquête publique, on peut proposer des règlements et autoriser le déversement, l'immersion ou l'incinération en mer, dans les conditions telles que les opérations garantissent l'innocuité et l'absence de nuisance du déversement, de l'incinération ou de l'immersion. La réglementation algérienne en matière de dragage et d'immersion s'appuie, actuellement, sur le décret n° 88-228 du 05 novembre 1988, définissant les conditions et modalités d'immersion de déchets susceptibles de polluer la mer, effectuées par les navires ou aéronefs, à prendre en compte lors d'une analyse de sédiments marins ou portuaire, publié au J.O. le 09 novembre 1988. (OUANDJELI., SENOUCI, 2016)

- ❖ **Article 2** : Il est stipulé que « toute opération d'immersion susceptible de polluer la mer doit se faire dans le cadre des dispositions de la loi n°83-03 du 05 février 1983 susvisée et celles contenues dans le protocole relatif à la prévention de la pollution de la mer Méditerranée par les opérations d'immersion effectuées par les navires et aéronefs, fait à Barcelone, le 16/02/1976 ratifié par le décret 81-02 du 17 janvier 1981 susvisé. (OUANDJELI., SENOUCI, 2016).
- ❖ **Article 3** : En application à l'article 48 de la loi 83-03 du 5 février 1983 susvisé, l'immersion de déchets sous toutes ses formes est interdite : 1°) « Lorsque les déchets contiennent une ou plusieurs substances énumérées à l'annexe I du protocole relatif à la prévention de la pollution de la mer Méditerranée par les opérations d'immersion effectuées par les navires et aéronef fait à Barcelone le 16 Février 1976... ». 2°) « Dans les zones maritimes présentant des intérêts particuliers du point de vue de la sécurité et sur les plans économiques et écologiques ... ». (OUANDJELI., SENOUCI, 2016)
- ❖ **Article 8** : Conformément aux dispositions de la loi n°83-03 du 05 février 1983 susvisée, le ministre chargé de l'environnement est fondé à réclamer au demandeur de permis tout complément de justifications portant sur : - les résultats des analyses des échantillons de déchets faites dans des conditions qu'il aura déterminées cas par cas et pour lesquels la demande de permis d'immersion est présentée, - les études qui lui paraissent nécessaires, sur notamment l'état biologique et écologique du milieu marin dans la zone où l'immersion est projetée et au voisinage de celle-ci. (OUANDJELI., SENOUCI, 2016).

3.4.4 Classification des sédiments

Les sédiments de dragage sont classifiés en fonction de leur contamination chimique et biologique. Les critères de classification varient d'un pays à l'autre, mais ils déterminent généralement comment les sédiments doivent être traités et disposés.

3.4.5 Normes environnementales

Des normes strictes régissent les niveaux de contaminants admissibles dans les sédiments et l'eau environnante. Ces normes visent à protéger la santé humaine et l'environnement.

3.4.6 Permis et autorisations

Avant d'entreprendre des travaux de dragage, il est souvent nécessaire d'obtenir des permis ou des autorisations spécifiques des autorités environnementales compétentes. Ces permis précisent les conditions de dragage, de gestion des sédiments et de leur disposition finale.

3.4.7 Techniques de gestion des sédiments

Les méthodes de gestion des sédiments doivent souvent être approuvées. Cela peut inclure la réutilisation des sédiments pour des projets de restauration écologique ou de construction, leur confinement dans des installations spécifiques ou leur traitement pour réduire les contaminants.

3.4.8 Surveillance et suivi

Une surveillance continue est souvent requise pendant et après les opérations de dragage pour vérifier la conformité aux normes environnementales et évaluer les impacts à long terme.

4 Gestion des produits de dragage

En général, les deux modes de gestion des sédiments sont la gestion en mer et la gestion à terre.

4.1 Gestion en mer ou gestion par immersion

L'immersion en mer constitue le mode d'évacuation le plus utilisé en Algérie (BELKESSA, 2005), elle n'est appliquée que sur un matériau peu ou pas pollué.

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 : dans ce processus, les sédiments sont expulsés à la surface de l'eau à travers la proue du navire de dragage, formant une trajectoire en arc-en-ciel (Rainbowing). Cette opération se déroule généralement dans une zone en mer, située à une profondeur significative et en dehors du chenal de navigation. (BRAY, 2008)
Cette méthode est utilisée pour redistribuer les sédiments dans des zones marines profondes afin d'éviter l'envasement des chenaux de navigation.

- Le rejet par conduite : le rejet par conduite est une méthode de gestion des sédiments adaptée aux dragues stationnaires. En effet, les sédiments sont évacués à travers des conduites spéciales vers les berges, où ils peuvent être pris en charge et gérés à terre, souvent dans des projets de construction ou de réhabilitation environnementale.
- Le rejet par barges : les sédiments excavés ou dragués sont déposés dans une barge ou un chaland. Ensuite, la barge est utilisée pour transporter les sédiments vers la rive, où ils peuvent être déchargés pour être gérés à terre. (BRAY, 2008)
 Cette méthode est utilisée pour transporter les sédiments dragués vers des zones de dépôt éloignées en mer, contribuant ainsi à la restauration de plages ou à la création d'îles artificielles.
- Le rejet par clapage : implique l'utilisation des navires équipés d'un fond de cale ouvrable qui permet aux sédiments de passer à travers et de se déposer au fond du plan d'eau. (BRAY, 2008)
 La méthode de rejet par clapage est utilisée pour déposer les sédiments dragués dans des zones de décharge désignées en mer, par exemple, lors du creusement de ports où les sédiments excédentaires sont déplacés pour maintenir des profondeurs de navigations appropriées.

4.2 Gestion à terre

La gestion à terre des sédiments implique le stockage de ces matériaux, soit de manière permanente dans un site d'enfouissement, dans le cas où les sédiments sont tellement pollués qu'ils ne peuvent faire l'objet ni de clapage en mer, ni de valorisation à terre, soit de manière temporaire afin de permettre l'élimination de l'excès d'eau et éventuellement de sel. Cette période temporaire vise à préparer les sédiments pour une valorisation ultérieure ou un enfouissement approprié. (DAWID, 2017)

5 Les techniques de valorisation des produits de dragage

La valorisation des sédiments de dragage implique de les utiliser dans diverses applications, telles que les remblais (pour remplir des espaces vides), les rechargements artificiels (pour restaurer des zones côtières), les modèles écologiques paysagers (pour créer des paysages naturels) et dans le génie civil (pour la construction de structures comme le béton et la brique). Cette approche permet de réduire les déchets et de protéger l'environnement tout en répondant à divers besoins de construction et d'aménagement.

5.1 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.

5.2 Valorisation de sédiments de dragage en éco-modelé paysager

L'utilisation des sédiments non immergés dans la conception des aménagements paysagers écologiques est vue comme une approche novatrice pour valoriser les sédiments issus du dragage portuaire, ce qui pourrait réduire la quantité de sédiments dragués. Ces aménagements, appelés éco-modelés ou buttes paysagères, contribuent à créer des environnements urbains de meilleure qualité et à promouvoir des initiatives environnementales. (AZRAR,2014)

5.3 Valorisation des sédiments dans les ouvrages de protection (digues en terre)

La valorisation des sédiments dans les digues représente une approche innovante qui peut contribuer à une gestion plus durable des ressources naturelles tout en renforçant les infrastructures de protection contre les inondations. Les projets de réalisation de digues en terre sont généralement situés à proximité du point de captage des sédiments, et par conséquent l'impact environnemental lié au transport est très réduit ainsi que les coûts qu'ils auraient engendrés. (AZRAR,2014)

5.4 Valorisation de sédiments en Génie Civil

Dans le domaine du Développement Durable, la gestion des sédiments issus du dragage portuaire doit respecter des critères techniques, économiques et environnementaux spécifiques. Les options principales sont le stockage ou l'utilisation des sédiments, souvent limitées par des réglementations environnementales strictes. Des études récentes explorent l'utilisation des sédiments comme matériaux de construction, notamment pour les routes, le béton, les granulats, l'aménagement paysager et la construction de briques, en fonction de leurs propriétés physico- chimiques, géotechniques et environnementales. (BRAY, 2008)

5.4.1 Valorisation de sédiments de dragage en technique routière

Le secteur de la construction routière est le principal consommateur de granulats, ce qui rend l'utilisation des importantes quantités de sédiments générées chaque année lors des travaux routiers une solution prometteuse pour contribuer à une gestion durable des sédiments et à la préservation des ressources naturelles en granulats. Étant donné que les sédiments sont considérés comme des déchets, il est crucial de s'assurer qu'ils ne présentent aucun risque pour l'environnement et la santé humaine lors de leur utilisation en génie civil. Une étude approfondie de la caractérisation physique, géotechnique, mécanique et environnementale des sédiments est essentielle pour leur utilisation dans les techniques de construction routière. (AZRAR,2014)

5.4.2 Valorisation de sédiments de dragage en brique

La transformation des sédiments de dragage en brique peut constituer une importante source de matières premières pour les matériaux de construction. Selon les caractéristiques physiques des sédiments, leur intégration dans les matériaux de construction peut impliquer leur utilisation directe ou après un traitement préalable. Par exemple, les sédiments fins peuvent remplacer une partie de l'argile naturelle dans la production de briques ou la fabrication de granulats artificiels, tandis que les sédiments sableux peuvent être incorporés dans la fabrication du béton. (AZRAR,2014)

5.4.3 Valorisation de sédiments de dragage en béton

Il est possible de valoriser les produits de dragage en béton. Par exemple, une recherche a démontré que le sable de dragage et le sédiment du Grand Port Maritime de Dunkerque peuvent être utilisés dans la production de béton, présentant des résistances mécaniques intéressantes pouvant atteindre jusqu'à 41 MPa. De même, d'autres recherches ont substitué une partie du ciment par des sédiments de dragage pour obtenir des bétons bon marché avec des résistances mécaniques proches de celles des bétons ordinaires. De plus, une étude a montré que l'incorporation de sédiments dans le béton peut améliorer ses performances mécaniques, bien que l'augmentation du taux d'incorporation puisse affecter la microstructure et la porosité du matériau. En conclusion, ces recherches démontrent que les produits de dragage peuvent être valorisés efficacement dans la production de béton, offrant ainsi une solution économique et durable tout en résolvant le problème du stockage des sédiments. (AZRAR,2014)

5.5 Utilisation agricole

Dans certains cas, les sédiments de dragage peuvent être utilisés comme amendement pour les sols agricoles, après traitement pour réduire les contaminants. Cela peut améliorer la fertilité du sol et réduire la dépendance aux engrais chimiques.

5.6 Production d'énergie

Certains procédés de valorisation des sédiments peuvent impliquer la production d'énergie à partir de biogaz généré par la décomposition anaérobie des sédiments organiques. Cela peut contribuer à la gestion des déchets et à la production d'énergie renouvelable.

5.7 Recyclage des métaux

Les sédiments contenant des métaux peuvent être traités pour récupérer et recycler ces métaux précieux ou stratégiques, réduisant ainsi la nécessité d'extraire ces ressources naturelles de nouvelles mines.

Chapitre 02 :
Présentation des zones
d'étude

1 Introduction

Le deuxième Chapitre, intitulé "Présentation de la Zone d'Étude", offre un aperçu détaillé des ports de Zemmouri et de Sidi Fredj, les deux sites sélectionnés pour notre étude sur la valorisation des sédiments de dragage. Ce chapitre décrit d'abord la situation géographique de ces ports, en mettant en lumière leur importance stratégique, économique et environnementale dans la région. Nous y explorerons ensuite les opérations de dragage effectuées dans chaque port, en décrivant les objectifs, les techniques utilisées, ainsi que les défis spécifiques rencontrés. La section inclura également une explication des méthodes de prélèvement des échantillons de sédiments, appliquées de manière similaire dans les deux ports, pour assurer une collecte représentative et fiable des matériaux à analyser. Ce cadre contextuel est essentiel pour comprendre les caractéristiques des sédiments de dragage des ports de Zemmouri et Sidi Fredj et pour évaluer leur potentiel de valorisation dans le cadre de notre étude.

2 Le port de Zemmouri

2.1 Situation géographique

La ville de Zemmouri est située à 60 Km environ à l'Est d'Alger, entre 3°15' et 3°45' de longitude Est et 36°45' et 37° de latitude Nord, au fond de la baie de Zemmouri, avec à l'Est le Cap Djinet et à l'Ouest le Cap Matifou.

Le port de Zemmouri El Bahri appartient administrativement à la commune de Zemmouri, dans la Wilaya de Boumerdes, abrite surtout des sardiniers (Senneurs) et reconnu à sa fameuse sardine de Zemmouri. (ALLIOUANE et RAMDANI, 2006)



Figure 05 : Carte de la baie de Zemmouri + une carte du port (Google Earth, 2024)

Le port de Zemmouri est constitué de :

- Une jetée principale de 325 ml, avec -6.00 mètres au niveau du musoir.
 - Une jetée secondaire de 300 ml, avec -5.00 mètres au niveau du musoir.
 - Une passe d'entrée : 80 ml.
 - Une longueur totale des quais : 697,5 ml.
 - Un linéaire d'accostage : 427,50 ml, dont :
 - Quai d'avitaillement : 30 ml.
 - Quai de servitude : 78 ml.
 - Quai d'accostage : 257 ml.
 - Quai de réparation : 35 ml.
 - Une Estacade de réparation : 27,5 ml.
 - Nombre d'appontements : 03.
 - Capacité totale des appontements : 270 ml.
 - Surface du plan d'eau : 3.4 ha.
 - Surface du Terre-plein : 3.5 ha.
 - Tirant d'eau : 3 à 4 mètres au niveau des quais, et de 6 mètres au niveau de la passe d'entrée.
- (ALLIOUANE et RAMDANI, 2006)

2.2 Opération de dragage

L'opération de dragage à effectuer au niveau de ce port consiste à enlever des sédiments, des débris et d'autres matériaux du fond essentiellement le sable et la vase entraînés par les courants et le vent, afin de maintenir sa profondeur et de faciliter l'accès aux voies navigables. Le volume total du sédiment dragué prévu est 104000 m³ lors de la réalisation de l'opération avec une moyenne de 8000 m³ par mois pendant 13mois (GITRAMA, 2016)

Remarque : La quantité de sédiment à draguer a été évaluée à 87801 m³ lors de l'étude du projet.

Tableau 04 : Les quantités des sédiments marins à draguer par zone (Bureau d'études et suivi Hydro Marine Ingénierie)

N°	Désignation de la zone	Cote de dragage	Surface à draguer	Quantité à draguer
01	Zone N° 01 a	-5.50 m	26 718 m ²	48 931 m ³
	Zone N° 01 b	-5.00 m	6 799 m ²	15 882 m ³
	Zone N° 01 c	-4.80 m	436 m ²	624 m ³
02	Zone N° 02	-4.00 m	13 050 m ²	8 563 m ³
03	Zone N° 03	-3.50 m	6 185 m ²	5 772 m ³
04	Zone N° 04	-3.00 m	16 893 m ²	7 007 m ³
05	Zone N° 05 a	-2.50 m	638 m ²	465 m ³
	Zone N° 05 b	-3.50 m	266 m ²	317 m ³
	Zone N° 05 c	-2.50 m	300 m ²	240 m ³
Quantité globale des sédiments marins à draguer			71 285 m ²	87 801 m ³

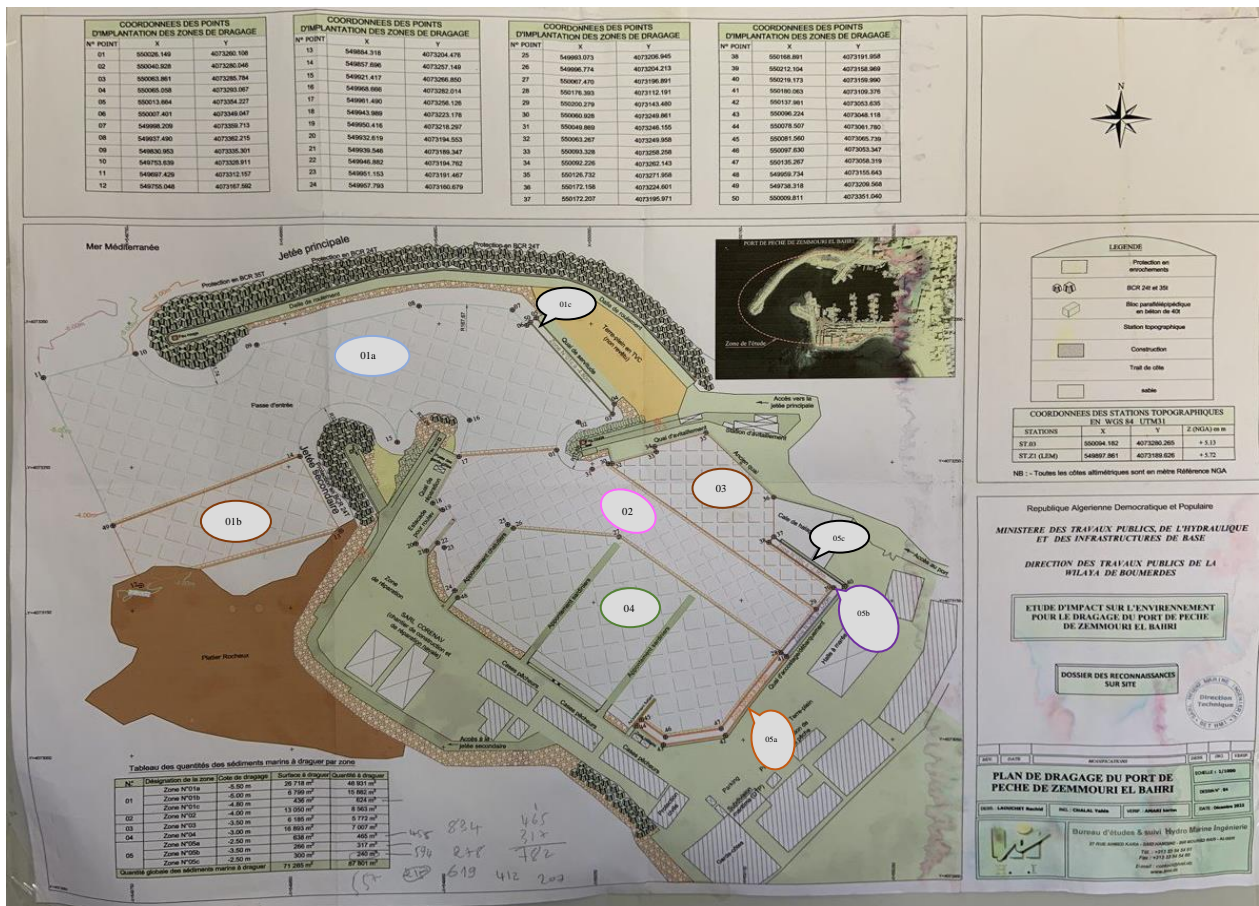


Figure 06 : un plan de masse du port de Zemmouri

2.3 Prélèvement des échantillons

Dans le cadre de notre étude, pour évaluer la composition et la qualité des sédiments de dragage, nous avons commencé par le prélèvement d'échantillons sur trois sites distincts : au niveau de la passe d'entrée, le milieu du bassin et le quai (comme les illustrent les images ci-dessous), soigneusement sélectionnés en fonction de leur représentativité permettant ainsi une analyse exhaustive et précise.



Figure 07 : La passe d'entrée



Figure 08 : Bassin du port

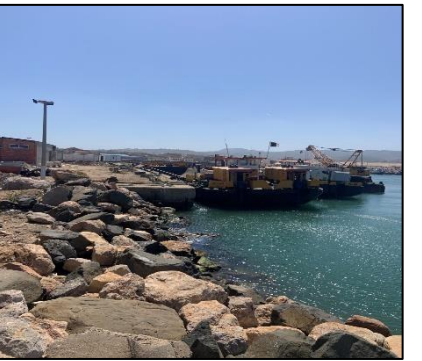


Figure 09 : Quai

2.4 Méthode de prélèvement

La benne preneuse, attachée à une grue, est descendue jusqu'au fond du plan d'eau. Une fois au fond, les deux coquilles de la benne s'ouvrent et se referment pour emprisonner les sédiments. La benne, maintenant fermée et contenant les sédiments, est ensuite remontée à la surface par la grue, permettant de transférer les échantillons dans des conteneurs



Figure 10 : Photo représentant la grue utilisée pour le prélèvement

3 Port de sidi Fredj

3.1 Situation géographique

Le port de sidi Fredj est un port de plaisance situé à environ 30 km à l'ouest d'Alger dans la partie ouest de la baie d'el Djamilia, ayant ligne linéaire côtière d'environ 6 km de longueur, il couvre une superficie de 38000 m², il est le mieux équipés des ports de plaisance de la région algéroise. Ce port de plaisance est l'un des plus attrayants de la rive sud de la méditerranée avec une capacité de plus de 400 embarcations plaisancières.

Les coordonnées géographiques du port

-Longitude : 36°45'45''N et 36°45'56''N

-Latitude : 2°50'45''E et 2°51'E.

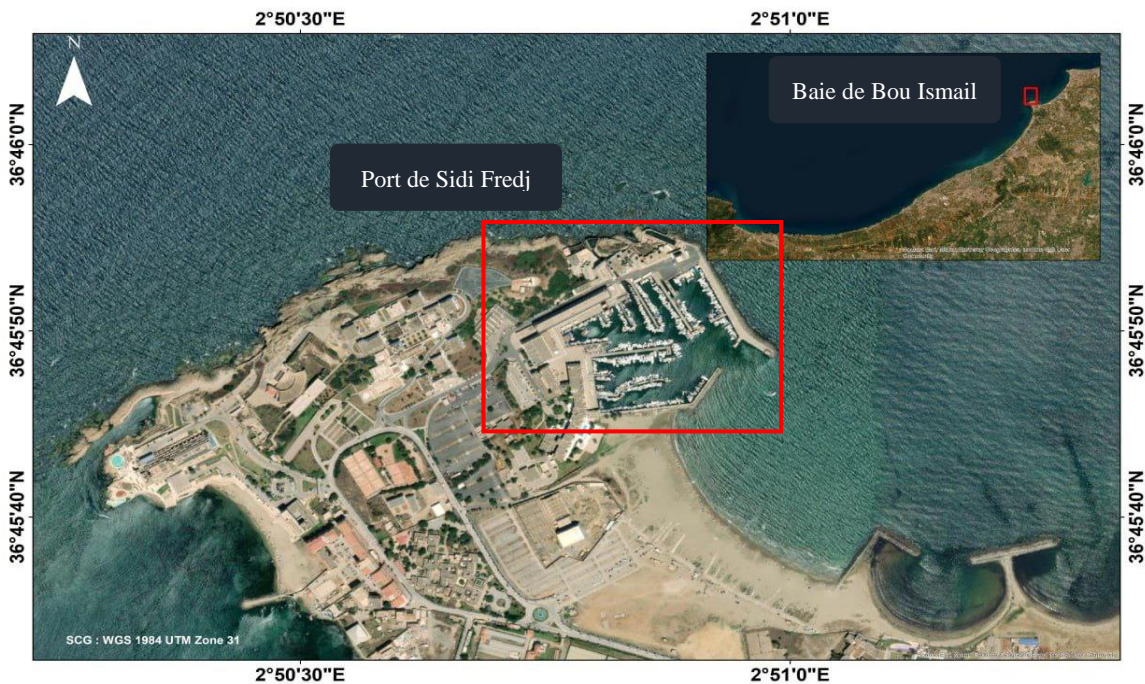


Figure 11 : Carte de la baie de Bou Ismail + une carte du port de Sidi Fredj (Google Earth, 2024)

Le port de sidi Fredj comprend :

❖ **Un plan de masse :**

Y'aura 5 bassins qui permettent l'accostage des bateaux :

- Le bassin 01 : Le plus éloigné de l'entrée du port, c'est celui qui accueille le déversement d'eaux usées par l'égout principal, il a une superficie de 8000 m² et une profondeur de 0,60 m à 2,60 m.
- Le bassin 02 : Délimité par l'épi de la tour mauresque (appontement 02) et épi de la station d'essence. Il a une superficie de 3000 m² et une profondeur de 2,5 m.
- Le bassin 03 : C'est le bassin de l'hivernage, il est délimité par la grande jetée. Il a une superficie de 5000 m² et une profondeur de 1,5 m à 4,5 m.
- Le bassin 04 : Délimité par l'appontement 03 à l'intérieur et la petite jetée à l'extérieur, il a une superficie de 10000 m² et une profondeur de 2.5 m à 3 m.
- Le bassin 05 : situé à la sortie du port et communique avec le large, il a une superficie de 9400 m² et une profondeur de 3,5 m. (LEM, 1998)

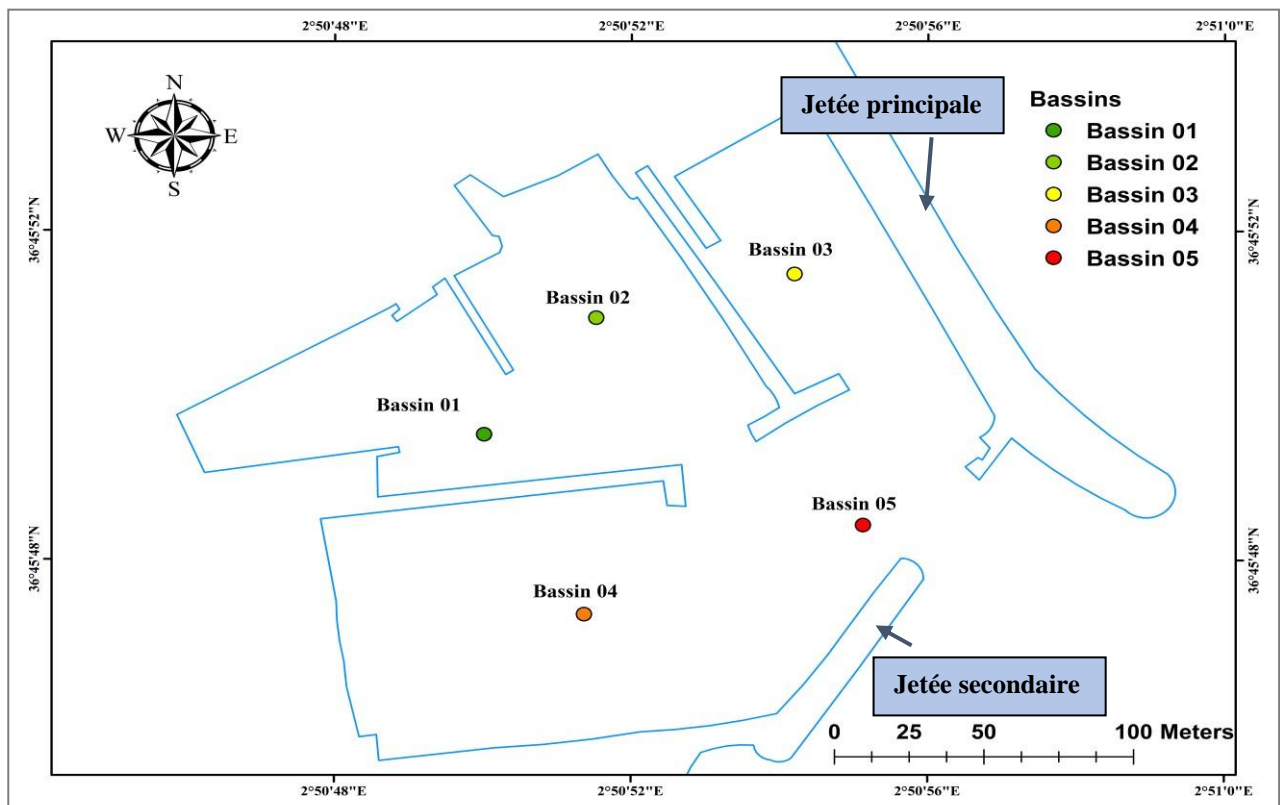


Figure 12 : Carte des bassins du Port de Sidi Fredj (BOUYACOUB; DJILALI, 2021)

❖ Les ouvrages de protection :

- La jetée principale : c'est la grande jetée nord a une longueur de 260 m et la jetée et terminée par un musoir servant de barrière.
- La jetée secondaire : c'est la petite jetée sud a une longueur de 200 m et délimite la plage est de sidi Fredj.

Ces deux jetées sont de type de digue à talus en enrochement naturels.

- Longueur totale des (3) quais : 570 ml
- Plan d'eau : 3.10 ha
- Terre-plein : 2.5 ha

❖ Les ouvrages d'accostage :

On remarque que y'aura 2 types des appontements :

- Les appontements fixes : (4 appontements)

Utilisés lorsque le niveau dans le bassin est peu variable et que les tirants d'eaux ne sont pas importants.

- Les appontements flottants : (4 appontements)

Ils peuvent augmenter en période estival lorsque la flotte devient Plus importante, ils sont utilisés lorsqu'il y a de fortes variations de niveau de l'eau dans le bassin et que les tirants d'eaux sont très grands. (MERIALA et MELIANI, 2019).

3.2 Dragage du port de Sidi Fredj

Plusieurs opérations de dragage ont été réalisées au niveau du port de Sidi Fredj.

La dernière opération était en 2012, et cela dans le cadre de la convention n°081/2012 du 02/07/2012, la direction des travaux publics de la wilaya d'Alger a confié au bureau d'étude « Hydro Marine Ingénierie-HMI » la réalisation d'une étude dans le but de draguer le port de plaisance de Sidi Fredj), cette mission a débuté en mois d'Octobre 2012 (DTP, 2012).

L'opération de dragage a eu lieu dans le but de restaurer le tirant d'eau en niveau de la passe d'entrée et de chenal d'accès en le draguant jusqu'a -4m de profondeur.

Le volume de sable dragué est estimé a environ 25 000 m³ et le coût total est de 39 429 000.00 DA (DTP, 2012), à la fin de l'opération de dragage, le sédiment a été déposé au niveau de la plage Est de Sidi Fredj.

Tableau 05 : Les opérations de dragage au niveau du port de Sidi Fredj (OUANDJELLI., SENOUCI, 2016)

Année	Volume dragué (m ³)	Société
1992	6000	SONATRAM/ MEDITRAM
2003	20000	DTP d'Alger
2006	/	DTP d'Alger
2012	25000	DTP d'Alger

3.3 Prélèvement des échantillons

Les prélèvements ont été effectués sur les deux sites suivants portant les coordonnées GPS suivantes :

- Au niveau de la passe d'entrée ($36^{\circ} 45'48.6$)
- Au milieu du bassin du port ($36^{\circ} 45'47.8$)

Remarque : Un prélèvement de sédiments n'a pas pu être réalisé au niveau du quai du port. En raison de la présence d'algues car elles peuvent compromettre la qualité des échantillons en les rendant non représentatifs de la composition réelle des sédiments.



Figure 13 : La partie quai du port de Sidi Fredj



Figure 14 : Coordonnées GPS prises dans le bassin du port de Sidi Fredj

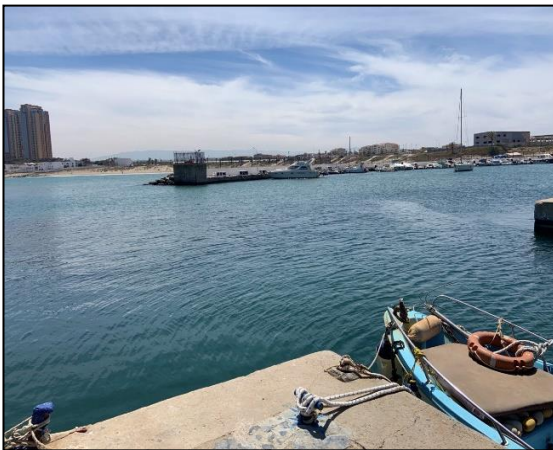


Figure 15 : Bassin du port de Sidi Fredj

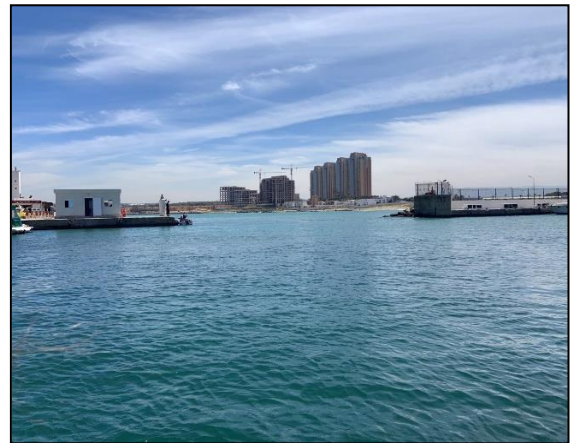


Figure 16 : Passe d'entrée du port de Sidi Fredj

3.4 Méthode de prélèvement

L'opération a été faite à l'aide d'une benne manuelle plongée dans l'eau jusqu'à ce qu'elle repose sur le fond, refermer lentement pour capturer les sédiments, soulever avec précaution hors de l'eau pour éviter toute perte de sédiments et transférer son contenu dans un conteneur propre et étiqueté, répéter cette opération dans différentes zones du site de prélèvement pour garantir la représentativité de l'échantillon collecté.

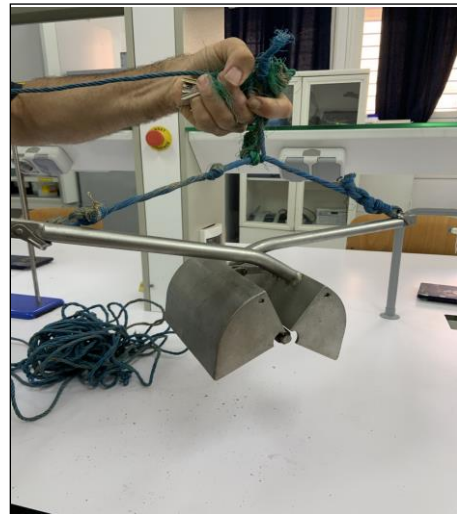


Figure 17 : Photo de la benne

Chapitre 03 :
Matériels et méthodes
Essais au laboratoire

1 Introduction

Dans ce chapitre, nous avons détaillé les outils et les protocoles utilisés pour mener à bien nos analyses physico-chimiques, nos essais mécaniques et la détection des métaux lourds. Nous avons procédé à une caractérisation approfondie des sédiments de dragage provenant de notre zone d'étude. Chaque procédure a été choisie en fonction de sa pertinence pour évaluer les propriétés nécessaires à la valorisation des sédiments dans le génie civil.

2 Les essais physico-chimiques

2.1 L'analyse granulométrique

La granulométrie est une opération qui consiste à étudier la répartition des différents grains d'un échantillon, en fonction de leurs caractéristiques (poids, taille, ...).

- **Tamisat** : partie de l'échantillon passé à travers les mailles du tamis.
- **Refus** : partie de l'échantillon qui n'est pas passée à travers les mailles du tamis.
- **Refus cumulé** : c'est la somme de tous les refus, celui du tamis lui-même plus tous les refus des tamis de maille plus grande. Il peut être exprimé en gramme ou en % de refus cumulés.

➤ Principe de l'essai :

L'essai consiste en fait à classer les différents grains constituant l'échantillon par une série de tamis emboîtés les uns dans les autres. Les ouvertures de ces tamis sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau est placé en partie supérieure et le classement est obtenu alors par vibration de la colonne de tamis.

➤ Matériel nécessaire :

- ❖ Série de Tamis AFNOR norme NF X 11-501 : dont les mailles sont respectivement (63 μm , 80 μm , 100 μm , 125 μm , 140 μm , 160 μm , 180 μm , 200 μm , 250 μm , 315 μm , 400 μm , 500 μm , 630 μm , 800 μm et de 1000 μm .)
- ❖ Etuve ventilée de marque MEMMERT.
- ❖ Balance de précision de type ADVENRURER (de 1/100g)
- ❖ Colonne vibrante de marque RETSCH
- ❖ Grandes boîtes de pétries en verre



Figure 18 : Balance,



Figure 19 : Série de tamis AFNOR,

➤ **Mode opératoire :**

- Sécher les échantillons à 105°C pendant 24h dans des boîtes de pétries
- Peser 150g de chaque échantillon (P1)
- Laver l'échantillon sous le robinet à l'aide d'un tamis de 50 µm et agiter manuellement (pour éliminer la fraction pélitique).
- Sécher à nouveau l'échantillon lave, a 105°C pendant 24h.
- Repeser l'échantillon après séchage P2 (pour déterminer la quantité de fraction pélitique)

- Le taux de pélites est déterminé par l'expression suivante :

$$P\% = \frac{P1-P2}{P1} \times 100$$

P1 : Poids initial de l'échantillon.

P2 : Poids sec de l'échantillon après rinçage.

- Tamiser sur une colonne vibrante pendant 10 min.
- Peser les refus de chaque tamis.

Au total cinq échantillons ont été analysés (3 échantillons pour le port de zemmouri, 2 échantillons pour le port de Sidi fredj)

➤ **Expression des résultats :**

Il existe différents indices qui permettent de caractériser de manière chiffrée les résultats d'une analyse granulométrique, notamment à partir de la courbe granulométrique cumulative.

Le quartile 1 (Q1) est la valeur du diamètre à 25 % de la courbe, la médiane (Md) est la valeur du diamètre à 50 % de la courbe, le quartile 3 (Q3) est la valeur du diamètre à 75 % de la courbe.

Toujours à partir des courbes cumulatives, un indice de classement So (sorting-index de Trask) peut être calculé :

$$So = \sqrt{(Q3/ Q1)}$$

Cet indice So permet d'apprécier le degré de classement d'un sédiment :

Tableau 06 : Le degré de classement d'un sédiment selon la valeur de l'indice So

Valeur de l'indice So	Degré de classement
So < 0.5	Extrêmement bien classé
0.5 < So < 1	Très bien classé
1 < So < 2.5	Bien classé
2.5 < So < 3	Normalement classé
3 < So < 4	Faiblement classé
4 < So	Très mal classé

Un autre indice peut être calculé. Il s'agit de l'indice (ou coefficient) d'asymétrie Sk ("Skewness" de Trask) :

$$SK = \frac{Q1 \times Q3}{Md^2}$$

Il exprime la symétrie du mode de l'histogramme par rapport à la médiane :

Si Sk < 1, le classement est maximum vers les fines ;

Si Sk = 1, la symétrie est parfaite ;

Si $S_k > 1$, le classement est maximum vers les grossiers.

Il existe autres indices granulométriques expriment la position et la dispersion de la distribution granulométrique. Ceux qui sont les coefficients d'uniformité caractérisant la pente de la courbe granulométrique, également appelé coefficient de Hazen C_u et la courbure C_c de la courbe granulométrique.

$$C_u = d_{60} / d_{10}$$

$$C_c = d_{30}^2 / (d_{60} \times d_{10})$$

Où d_{10} , d_{30} et d_{60} représentent les diamètres correspondant respectivement à 10 %, 30 % et 60 % du passant.

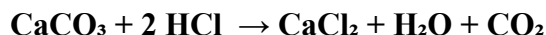
2.2 La détermination de la teneur en carbonates

La calcimétrie permet de connaître la teneur en carbonate de calcium, ce dernier peut servir comme étant outils stratigraphiques. Elle donne des indications sur la productivité de surface et éventuellement des apports de carbonates détritiques. (HECHAICHI ; ZEROUALI, 2016)

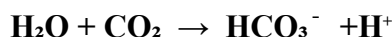
➤ Principe de l'essai

Cette méthode détermine le pourcentage de la fraction carbonatée contenue dans le sédiment, elle donne le volume de dioxyde de carbone dégagé sous l'action d'attaque d'acide chlorhydrique en excès pour un échantillon préparé.

Le calcaire CaCO_3 réagit avec le HCl pour donner le dioxyde de carbone (CO_2), H_2O et dichlorure de calcium CaCl_2 . Ce qui n'est pas attaqué par l'acide chlorhydrique HCl est constitué par des éléments insolubles non organogènes. Le volume de CO_2 est mesuré dans un tube manométrique après l'attaque de l'échantillon par le HCl suivant la réaction suivante :



On utilise l'eau saturée en sel pour éviter la perte de CO_2 à partir de leur réaction avec H_2O selon la réaction suivante :



Le but de cette manipulation est de calculer le pourcentage de CaCO_3 dans les échantillons étudiés, cela se fait en comparaison avec un échantillon témoin de carbonate pur (100% CaCO_3).

➤ Matériel nécessaire

- ❖ Balance électronique de type ADVENTURER (dont la précision est de 1/100g)
- ❖ Calcimètre de Bernard
- ❖ Boîtes de pétri, erlenmeyer, cuve.
- ❖ Etuve
- ❖ Solution saturée en chlorure de sodium (NaCl)
- ❖ Acide chlorhydrique (HCl)



Figure 21 : Erlenmeyer + HCl,

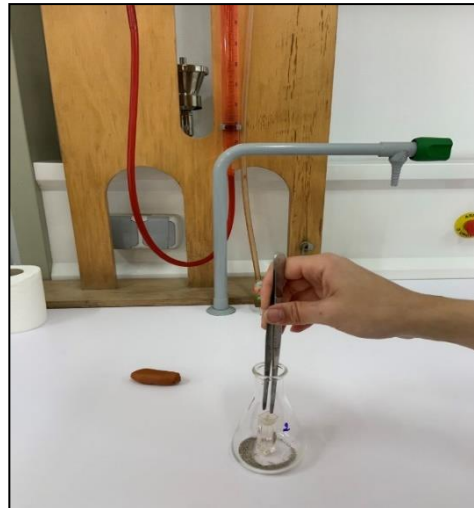


Figure 20 : Calcimètre de Bernard,

➤ Mode opératoire

- Préparer une solution saturée de NaCl et la remplir dans le calcimètre, on note le volume V_1
- Peser 1g de l'échantillon broyé et 0,2g de carbonate pur
- Introduire d'abord l'échantillon témoin en carbonate.
- Remplir une cuve avec l'acide chlorhydrique et l'introduire dans l'erenmeyer avec précaution.
- Boucher l'erenmeyer avec un bouchon relié au tube gradué de calcimètre de Bernard
- Renverser l'acide contenu dans la cuve sur l'échantillon et agiter pour activer la réaction.
- A la fin de l'effervescence on note la division correspond au V_2 sur le tube gradué.
- Répéter les mêmes étapes pour chaque échantillon.

➤ Expression des résultats

Pour l'échantillon témoin en carbonate pur ou l'échantillon du sédiment, le volume CO_2 dégagé (ml) est donné par l'expression suivante :

$$V(\text{témoin})/\text{échantillon} = V_2 - V_1$$

On obtient le % de CaCO_3 par une simple opération :

$$\% \text{CaCO}_3 = \frac{V(\text{échantillon})}{V(\text{témoin})} \times 100\%$$

2.3 L'équivalent de sable

Dans les techniques routières, la propreté d'un sédiment est l'une des caractéristiques essentielles afin d'obtenir un niveau élevé de qualité et une pérennité de l'ouvrage.

Le terme propreté veut dire l'absence des éléments indésirables tel que : les débris des organismes, les sels solubles, matières organiques mais surtout l'argile (COMPANAC, 1981)

La détermination de la propreté du sable est fournie par l'essai équivalent de sable.

➤ Principe de l'essai

L'essai d'équivalent de sable consiste à placer un échantillon d'un sédiment sec dont le diamètre est inférieur à 05mm dans une éprouvette contenant une solution lavante dont le rôle est de provoquer la floculation des particules fines. A la fin de l'essai un dépôt de sédiment brut se forme au fond de l'éprouvette et un floculat au-dessus.

➤ Matériel nécessaire

- ❖ Tamis de 05 mm ;
- ❖ Solution lavante (solution de glycérine formaldéhyde et de chlorure de calcium);
- ❖ Eprouvette graduée avec 02 traits repères ;
- ❖ Balance de précision ($\pm 0.1g$) ;
- ❖ Entonnoir ;
- ❖ Piston tare ;
- ❖ Réglet métallique ;
- ❖ Récipients ;
- ❖ Tube plongeur ;

➤ Mode opératoire

L'essai de l'équivalent de sable est réalisé selon la norme **AFNOR NF P 18-598**

- Peser 120 g de sédiment sec dont le diamètre est inférieur à 05mm ;
- A l'aide d'un entonnoir, introduire le sédiment dans l'éprouvette déjà remplie en solution lavante jusqu'au premier trait et secouer puis laisser l'ensemble se reposer pendant 10 minutes ;
- Mélanger le tout en inclinant l'éprouvette horizontalement par agitation manuelle en faisant 90 va-et-vient pendant 30secondes ;
- Introduire le tube plongeur dans l'éprouvette, rincer les parois avec la solution lavante puis enfoncer le tube jusqu'au fond de l'éprouvette afin de remonter les particules fines
- Remplir jusqu'au deuxième trait de l'éprouvette avec la solution lavante ;
- Laisser la solution décanter pendant 20 minutes ;
- Après 20 minutes, le sable brut se dépose au fond de l'éprouvette et au-dessus se dépose le floculat (l'argile +les particules fines), pui à l'aide d'un réglet métallique, on mesure les hauteurs suivantes : Sable brut + floculat =h1.

Sable brut seul =h2.

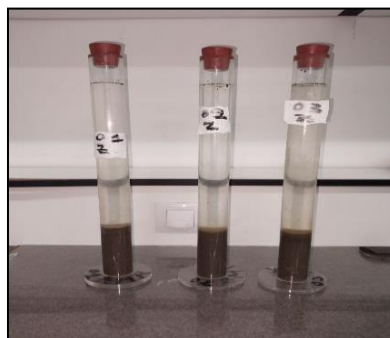
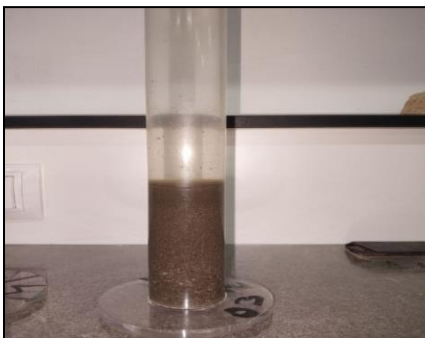


Figure 22 : Résultats de l'équivalent de sable,

La hauteur du sable brut (h_2) est déterminée également par un piston lesté de 1Kg, elle correspond à la longueur de la tige qui n'a pas pénétré dans l'éprouvette, la longueur totale (h_1) se mesure comme précédemment.

➤ Expression des résultats

Selon la méthode de mesure des deux hauteurs, on distingue deux types d'équivalent de sable :

- Equivalent de sable visuel ESV (mesure avec un réglet)
- Equivalent de sable par piston ESP (mesure avec un piston).

On détermine l'équivalent de sable par la relation suivante : **ES (%) = $(h_2/h_1)*100$**

2.4 La teneur en eau à la saturation W_{sr}

La teneur en eau d'un sédiment dépend essentiellement de la méthode de prélèvement et de type de matériau du site. Elle est représentée par sa perte d'eau qui est provoquée par étuvage.

➤ Principe de l'essai

L'essai de détermination de la teneur en eau consiste à placer un échantillon d'une masse connue dans l'étuve, après séchage la masse est pesée à nouveau et la teneur en eau est calculée.

➤ Matériel nécessaire

- ❖ Etuve ;
- ❖ Boite de pétri ;
- ❖ Spatule ;
- ❖ Balance de précision ($\pm 10^{-2}$ g) ;

➤ Mode opératoire

La teneur en eau est déterminée selon la norme **AFNOR NF P94-050** :

- Numéroté et peser les boites de pétri vide et noter m_1 ;
- Peser une quantité m de sédiment humide, noter ($m_2 = m_1 + m$) ;
- Passer l'échantillon à l'étuve à une température de 105°C jusqu'au moment où il atteint un état hydrique sec ;
- Peser à nouveau l'échantillon de sédiment et noter m_3 .

➤ Expressions des résultats

Le calcul de la teneur en eau se fait par la relation suivante :

$$w_{sr} (\%) = m_w/m_s$$

Avec :

w (%) : La teneur en eau ;

m_w : La masse d'eau évaporée, calculée comme suit : $m_w = m_3 - m_2$;

m_s : La masse des grains solides (m_3).

2.5 La teneur en matière organique (MO)

L'origine de la matière organique dans un sédiment marin est diverse, elle peut être soit d'origine autochtone (production primaire, débris des organismes ou micro-organisme), ou d'origine allochtone (les cours d'eaux, les retombées atmosphériques ou rejets agricoles et industriels).

En géotechnique, la matière organique est considérée comme un facteur nuisible pour le matériau routier car elle leur provoque d'une part une faible résistance mécanique et d'autre part une grande capacité de rétention d'eau, cette capacité d'absorption de l'eau peut générer des phénomènes de gonflement et de retrait préjudiciables à la stabilité d'une chaussée (SENOUCI., OUANDJELI, 2016), d'où la nécessité de déterminer son taux dans un matériau de construction routière.

La détermination de ce paramètre constitue ainsi un point essentiel pour l'identification et la classification des matériaux.

➤ Principe de l'essai

La teneur en matière organique est déterminée par la méthode de perte au feu, cette méthode consiste à placer un échantillon de sédiment sec pendant 02 heures dans un four à moufle à une température de 600°C, puis, la température est abaissée jusqu'à 50°C afin d'éviter l'humidification des échantillons, après la calcination, la teneur en matière organique est calculée ((SENOUCI., OUANDJELI, 2016),

➤ Matériel nécessaire

- ❖ Four à moufle ;
- ❖ Balance de précision ;
- ❖ Creusets en porcelaine ;
- ❖ Pince.

➤ Mode opératoire

- Numéroté et peser les creusets vides et noter P1 ;
- Tarer la balance de précision ;
- Peser une quantité de sédiments frais P ;
- Placer les creusets dans un four à moufle pendant 02 heures à 600°C ;
- Baisser la température jusqu'à 50°C ;
- A l'aide d'une pince, retirer les creusets en évitant les exposer à un courant d'air afin d'éviter leur contamination qui peut entraîner un biais des résultats ;
- Placer les creusets dans un dessiccateur afin d'absorber l'humidité ;
- Peser les creusets avec sédiments après calcination et noter P2 ;



Figure 23 : Balance de



Figures 24 : Four à moufle.

➤ Expression des résultats

Le calcul de la teneur en matière organique se fait par la relation suivante :

$$MO\% = \frac{(P_i - P_f) * 100}{P_i}$$

Avec :

MO (%) : La teneur en matière organique ;

P_i = P₁ + P : Le poids initial du sédiment sec (g) ;

P_f = P₂ : Le poids de sédiment incinéré (g) ;

2.6 Mesure de la conductivité

La conductivité d'une solution est la mesure de la capacité des ions à transporter le courant électrique. Ce passage du courant électrique s'effectue par la migration des ions dans un champ électrique produit par un courant alternatif. (FIALA, 2020)

➤ Principe de l'essai

L'essai de conductivité des sédiments consiste à mesurer leur capacité à conduire l'électricité en appliquant un courant entre deux électrodes et en calculant la conductivité à partir de la résistance mesurée.

➤ Matériel nécessaire

- ❖ Conductivimètre avec une cellule pour mesurer la conductivité
- ❖ Étuve à une température de 104 °C ± 1 °C
- ❖ Agitateur mécanique (environ 280 oscillations par minute)
- ❖ Balances analytiques dont la sensibilité est de 0,1 mg et 0,01 g
- ❖ Tamis avec des ouvertures de 2 mm
- ❖ Eau distillée

Tous les réactifs commerciaux utilisés sont de qualité ACS, à moins d'indication contraire. L'eau utilisée pour la préparation de l'étalon et les échantillons est de l'eau distillée ou déminéralisée.



Figure 25 : Conductivimètre

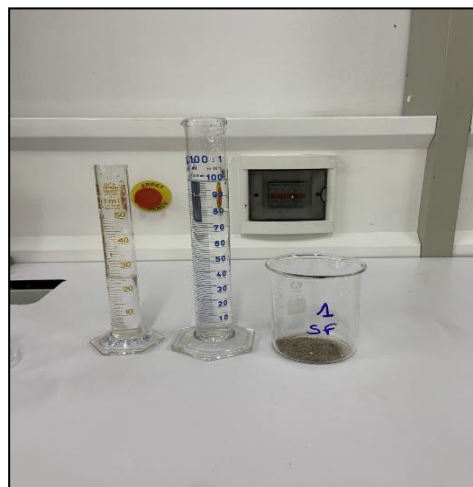


Figure 26 : Eau distillée & sédiment

➤ Mode opératoire

- Calibration de l'électrode
- Peser 5g de sédiment séché à 105°C pendant 24h
- Verser l'échantillon dans un bécher de 500 ml
- Ajouter 125ml de l'eau distillée
- Mettre un barreau à l'intérieur du mélange et placer le sur l'agitateur
- Agiter pendant 30 minutes à la température ambiante avec un agitateur mécanique (environ 280 oscillations/minute)
- Laisser décanter le solide et mesurer la conductivité sur la portion liquide.

➤ Expression des résultats

Le conductivimètre possède une sonde de température qui corrige la conductivité à 25 °C. Pour les liquides, les résultats sont lus directement et sont exprimés en $\mu\text{S}/\text{cm}$.

2.7 Mesure de pH

Le pH des sédiments se réfère à la mesure de l'acidité ou de la basicité des sédiments, qui sont des matériaux déposés au fond des cours d'eau, des lacs, des océans ou d'autres plans d'eau. Il est déterminé par la concentration des ions d'hydrogène (H^+) présents dans les interstices des sédiments. Cette mesure est cruciale pour évaluer l'environnement chimique des sédiments, influençant leur composition chimique, la disponibilité des nutriments et des contaminants, ainsi que les processus biogéochimiques qui s'y déroulent. (FIALA, 2020)

➤ Principe de l'essai

Le principe de l'essai de pH pour les sédiments est de mesurer l'acidité ou la basicité des sédiments en fonction de la concentration d'ions hydrogène (H^+) dans les interstices des sédiments. Cela se fait généralement en prélevant un échantillon représentatif de sédiments, en le mélangeant avec de l'eau ou une solution tampon, puis en mesurant le pH de cette suspension à l'aide d'un pH-mètre calibré. Cette mesure est essentielle pour évaluer l'état chimique des sédiments et comprendre leur impact sur les écosystèmes aquatiques et terrestres voisins.

➤ Matériel nécessaire

- ❖ Échantillon de sédiment marin
- ❖ Électrode de pH
- ❖ pH-mètre ou pH-testeur
- ❖ Solution tampon de pH connu (pH 7)
- ❖ Agitateur magnétique et barreau
- ❖ Bêchers en verre propre
- ❖ Eau distillée



Figure 27 : pH-mètre

➤ Mode opératoire

- Calibration du pH-mètre : Placer l'électrode de pH dans la solution tampon de pH 7.
- Peser 5g de sédiment séché à 105°C pendant 24h et le mettre dans un bécher de 500 ml
- Ajouter 125ml de l'eau distillée
- Mettre un barreau à l'intérieur du mélange et placer le sur l'agitateur
- Agiter pendant 30 minutes à la température ambiante avec un agitateur mécanique (environ 280 oscillations/minute)
- Plonger l'électrode de pH dans l'échantillon et attendre que la lecture du pH se stabilise.
- Pour obtenir des résultats précis, répéter les mesures sur plusieurs échantillons de sédiment marin et calculer une moyenne des valeurs obtenues.
-
- Nettoyage et stockage : Après utilisation, rincer soigneusement l'électrode de pH à l'eau distillée pour éliminer tous les résidus. Stocker l'électrode conformément aux instructions du fabricant pour éviter tout dommage ou contamination.

➤ Expression des résultats

Le pH-mètre est équipé d'une sonde de température qui ajuste automatiquement la mesure du pH en fonction de la température ambiante, pour obtenir une lecture précise à 25 °C. Pour les liquides, les résultats sont lus directement sur l'écran de l'appareil et sont exprimés en unités de pH.

2.8 Valeur au bleu de méthylène (VBS)

Cet essai permet de mesurer la capacité des éléments fins à adsorber du bleu de méthylène.

Le bleu de méthylène étant adsorbé préférentiellement par les argiles, les matières organiques et les hydroxydes de fer, cette capacité rend compte globalement de l'activité de surface de ces éléments.

On appelle « valeur de bleu » des fines, la quantité exprimée en grammes de bleu de méthylène adsorbée par 100 g de fines. (OUANDJELI ; SENOUCI, 2016)

➤ Principe de l'essai

L'essai consiste à introduire successivement une solution de bleu de méthylène dans une suspension de matériau maintenue en agitation et à prélever périodiquement une goutte de la suspension que l'on dépose sur un papier filtre.

Dès qu'on remarque l'apparition des auréoles bleutées autour de la tâche, on considère que l'adsorption du bleu de méthylène sur les particules d'argiles est terminée. (OUANDJELI ; SENOUCI, 2016)

➤ Matériel nécessaire

- ❖ Bêcher en plastique de 3 l ayant un diamètre intérieur de 155 mm
- ❖ Appareil agitateur
- ❖ Un dispositif de dosage
- ❖ Papier filtre
- ❖ Solution de bleu de méthylène (10 g de poudre de méthylène sont ajoutés à 1000 g d'eau distillée, ensuite mélanger pendant 45 minutes à 600 rpm), La solution préparée est conservée pendant 24h et doit être utilisée dans les 28 jours qui suivent.
- ❖ Eau distillée
- ❖ Une burette de capacité 100 ml ou 50 ml et de graduation 1/10 ml ou 1/5 ml ou une micropipette de 5 ml et une de 2 ml.
- ❖ Papier filtre : quantitatif et sans cendre ($< 0,010$) ; grammage : 95 g/m² ; épaisseur : 0,20 mm ; vitesse de filtration 75 ; rétention : 8 micromètres.
- ❖ Une baguette de verre : longueur 300 mm ; diamètre 8 mm.
- ❖ Un agitateur à ailettes, tournant entre 400 et 700 tr/min. Le diamètre des ailettes est compris entre 70 mm et 80 mm.
- ❖ Un bac carré en matière plastique de 150 mm de côté et 60 mm de hauteur.

➤ Mode opératoire

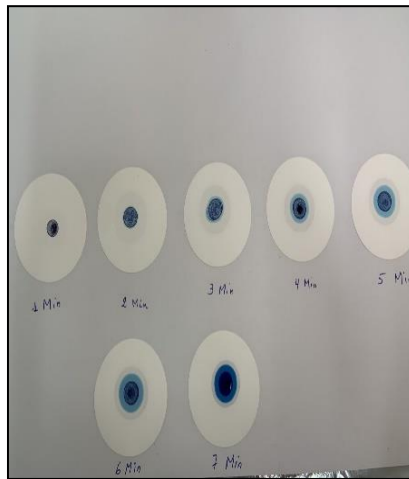
- Tamiser un échantillon du sédiment séché à travers un tamis de 5mm
- Peser 60g
- Introduire l'échantillon dans un bécher de 3000 cm³ et ajouter 5000 cm³ d'eau distillée,
- Ces derniers sont mis en suspension et dispersés à l'aide d'un agitateur à ailettes (vitesse (700 ±100) tr/min) pendant 10 minutes jusqu'à la disparition visuelle de tout agglomérat de particules de sol dans la suspension ou de toute accumulation sur les bords du récipient ;

- A l'aide d'un dispositif de dosage, introduire 5 cm³ de bleu de méthylène et agiter à une fréquence de 400 tr/min
- Procéder l'essai de la tâche sur un papier filtre de la manière suivante :
- Poser le papier filtre sur un support adapté non absorbant
- A l'aide d'une baguette de verre prélever une goutte de suspension et la déposer sur le papier filtre, une tâche se forme composée d'un dépôt central de matériau coloré bleu sombre entouré d'une zone humide ;
- Dès qu'on remarque une apparition d'une auréole périphérique bleu clair, on dit que le test est positif ;
- A partir de ce moment, laisser se poursuivre l'adsorption du bleu dans la solution et effectuer des tâches, de minute en minute, sans ajout de solution.

Remarque : Dans le cas où la tâche ne présente pas une auréole périphérique de bleu clair, l'injection de bleu de méthylène se poursuit jusqu'à l'apparition de cette dernière.



Figure 28 : Dispositif de dosage,



Figures 29 : Les tâches de bleu de méthylène sur le papier filtre,

➤ Expression des résultats

VBS est exprimée en grammes de bleu pour 100 g de matériau :

$$VBS = \frac{B}{m_0} * 100$$

Avec : B : masse du bleu introduite V *0,01

m_0 : masse sèche de prise d'essai

2.9 Masse volumique apparente

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules.

➤ **Matériel nécessaire**

- ❖ Un récipient cubique ou cylindrique de volume connu et dont la taille est adaptée aux granulats :
 - D Granulats de dimension maximale $D \sim 20 \text{ mm}$: récipient de capacité 1 L
 - D Granulats de dimension maximale $D > 20 \text{ mm}$: récipient de capacité $> 1 \text{ L}$
- ❖ Une règle à araser métallique.
- ❖ Une main écope pour le remplissage
- ❖ Une balance de portée 2 : 5 kg, précision 1 g
- ❖ Des bacs en plastique pour effectuer les essais

➤ **Mode opératoire**

- Déterminer le volume du récipient = V
- Noter la masse du récipient propre et vide = M_0
- Placer le récipient dans le bac en plastique
- Verser les granulats secs, par couches successives et sans tassement : utiliser les mains comme entonnoir naturel
- Araser à l'aide de la règle métallique par un mouvement horizontal de va et vient
- Noter la masse du récipient rempli = M_1
- Vider les granulats dans un autre bac en plastique
- Renouveler l'opération au moins deux (2) fois avec un autre échantillon du même type

➤ **Expressions des résultats**

La masse volumique apparente est donnée par : $V = \frac{M_1 - M_2}{V}$

Remarque :

L'essai est répété au minimum 2 fois et la moyenne de ces essais donne la valeur de la masse volumique apparente.

2.10 Masse volumique absolue

La masse volumique absolue P_s est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains

- La masse spécifique est la masse de granulats secs (M_s) rapportée au volume absolu (uniquement volume de solides Y_s)
- La mesure du volume des solides ne tient pas compte des pores fermés contenus par les granulats.

➤ **Matériel nécessaire**

- ❖ Des éprouvettes graduées en plastique.
- ❖ Une tige agitatrice
- ❖ Un entonnoir pour le remplissage
- ❖ Une balance de portée 2 : 5 kg, précision 1g
- ❖ Des bacs en plastique pour effectuer les essais

➤ Mode opératoire

Méthode de l'éprouvette graduée

- Placer l'éprouvette dans le bac en plastique
- Verser de l'eau dans l'éprouvette (presque demi hauteur) et noter V1
- Préparer un échantillon de granulats secs de masse M (environ 300 g)
- Verser l'échantillon dans l'éprouvette à l'aide d'un entonnoir et provoquer le départ des vides (air) en remuant le mélange avec la tige
- Noter le nouveau volume d'eau dans l'éprouvette V2
- Vider les granulats dans un bac en plastique et jeter son contenu
- Renouveler l'opération au minimum 2 fois

➤ Expressions des résultats

La masse volumique absolue est donnée par :

$$\rho_s = \frac{M}{V_2 - V_1}$$

Remarque : L'essai est répété au minimum 2 fois et la moyenne de ces essais donne la valeur de la masse volumique absolue.

3 Les essais mécaniques

3.1 Essai de cisaillement direct à la boîte de Casagrande

➤ Principe de l'essai

Les caractéristiques de résistance au cisaillement d'un sol peuvent être déterminées à partir d'un essai de cisaillement à la "Boîte de Casagrande". Un échantillon de sol, contenu dans une boîte, elle-même composée de deux demi-boîtes (pour fixer le plan de cisaillement), est soumis à une contrainte verticale s avant d'être cisailé à vitesse constante. Par conséquent la contrainte de cisaillement t s'accroît jusqu'à une valeur maximum que l'on mesure. On en déduit l'état de contrainte τ_r , s_r de l'échantillon de sol à la rupture. En réalisant plusieurs essais, sur un même matériau, avec différentes valeurs de contraintes verticales, on peut déterminer le critère de rupture de Mohr-Coulomb et définir ses valeurs de cohésion c et d'angle de frottement.

➤ Description de la Boîte de Casagrande

L'échantillon de sol est placé à l'intérieur de demi-boîtes qui peuvent se déplacer horizontalement l'une par rapport à l'autre. Un piston permet d'exercer sur le sol un effort normal N constant pendant toute la durée de l'essai. Une demi-boîte est entraînée horizontalement à vitesse constante. A tout instant, on mesure la force de cisaillement T . Un second comparateur vertical permet de mesurer la variation de hauteur Dh de l'échantillon. On exerce sur le plan de séparation AB des deux demi-boîtes une contrainte dont les composantes normale et tangentielle ont pour valeur moyenne :

$$\sigma = N A_c \quad \tau = T A_c$$

où A_c est la section corrigée de l'éprouvette (variant en fonction du déplacement relatif Dl).

➤ Préparation des essais

❖ Contraintes verticales

Nous avons travaillé sur un sable sec. Nous avons réalisé deux essais pour les valeurs de contraintes normales suivantes :

- Essai n°1 : $\sigma = 50$ kPa,
- Essai n°2 : $\sigma = 150$ kPa.

Les masses à disposer sur le plateau de l'étrier sont fonction de la contrainte verticale souhaitée, de la section initiale de l'échantillon de sable (6 cm de côté) et du bras de levier qui permet de multiplier par un facteur 5 la force créée par la mise en place des masses.

- Ensuite nous avons calculé les masses à utiliser pour appliquer les contraintes normales détaillées ci-dessus.

❖ Vitesse

La vitesse de cisaillement est conditionnée par le type d'essai que l'on veut réaliser. Pour un essai non drainé, ou sur sol sec, nous pouvons travailler avec une vitesse relativement élevée de 1 mm/min.

➤ Préparation des échantillons

Nous avons réalisé deux échantillons en disposant du sable dans les boîtes. Pour chaque boîte, les demi-boîtes inférieure et supérieure ainsi que le piston sont numérotés : les éléments correspondent les uns aux autres et que les numéros soient alignés.

1. Avant de remplir une boîte de sable, placer correctement les deux demi-boîtes l'une par rapport à l'autre et solidariser-les à l'aide des goupilles en aluminium.
2. Visser ensuite les trois vis métalliques sur la demi-boîte supérieure. A partir du moment où elles arrivent en contact avec la boîte inférieure, visser les vis d'un quart de tour supplémentaire. De cette manière, surélever très légèrement la boîte supérieure, et éviter alors que le frottement des demi-boîtes l'une sur l'autre altère la mesure.
3. Placer la boîte, sans le piston, sur la balance et la remplir d'environ 250 g de sable.
4. Compacter le sable en effectuant un piquage. Veiller à ce que le compactage soit identique dans les différents échantillons, en piquant le même nombre de coups à chaque préparation (par exemple effectuer deux tours de piquage avec 10 piquages par tour). L'angle de frottement dépend de la densité de l'échantillon de sable.
5. Refermer la boîte avec le piston, celui-ci doit venir affleurer la partie supérieure de la demi-boîte supérieure.

➤ Montage de la boîte de cisaillement sur le bâti de chargement

1. Fixer la boîte de cisaillement remplie de sable sur le chariot mobile du bâti de chargement en serrant les vis papillons.
2. Maintenir avec une main l'étrier de chargement en contact avec le piston de la boîte, régler en même temps l'horizontalité du bras de levier en tournant le volant. Le pointeau doit être

- aligné avec la gorge de la bague.
3. Charger alors le plateau des masses préalablement calculées afin de d'appliquer la contrainte normale désirée.
 4. Positionner et bloquer l'anneau dynamométrique (le ressort supportant l'anneau dynamométrique permet de compenser le poids de l'anneau en le maintenant dans une position horizontale). Si l'anneau dynamométrique n'est pas correctement en contact avec la queue de la demi-boîte supérieure, tournez le volant dans le sens des aiguilles d'une montre pour réaliser cette opération. Reliez ces deux éléments par vissage.
 5. Pour supprimer les jeux, exercer un léger effort de traction à l'anneau. Pour cela, agir sur le volant dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Arrêter lorsque le capteur de l'anneau indique une valeur proche de -0.05 mm.
 6. Pour mesurer le déplacement vertical du piston (fonction du gonflement ou du tassement de l'échantillon en cours d'essai), placer un comparateur sur la partie supérieure de l'étrier et régler son zéro de manière à ce que la tige du comparateur soit à mi-course.
 7. Dévisser de quelques tours les trois vis métalliques de la demi-boîte supérieure. La demi-boîte supérieure reste bloquée verticalement par frottement avec le sable et il n'y a plus aucun contact physique parasite (pas même par l'intermédiaire des vis) risquant de fausser les mesures de cisaillement.



Figures 30 : La boîte de cisaillement 10/10 cm et le bâti de chargement

➤ Mise en route de l'essai

- Positionner l'interrupteur rotatif sur « cisaillement ».
- Procéder au démarrage de l'essai en appuyant sur le bouton « marche ».
- Effectuer, toutes les 15 secondes, les mesures :
 - De la déformation de l'anneau dynamométrique,
 - Et du déplacement vertical du piston
- La rupture de l'éprouvette se produit au bout de quelques minutes et correspond à un maximum de déformation de l'anneau dynamométrique. Poursuivre l'essai jusqu'à obtenir une décroissance régulière de l'effort.

L'essai est alors considéré comme étant terminé alors appuyer sur le bouton « arrêt ».

3.2 L'essai œdométrique

➤ Principe de l'essai

L'essai consiste à placer une éprouvette de matériau dans une enceinte cylindrique rigide (œdomètre), un dispositif applique un effort axial vertical sur l'éprouvette, l'éprouvette est drainée en haut et en bas et maintenue saturée durant toute la durée de l'essai.

Cette éprouvette est soumise à un chargement par paliers croissant et décroissant que l'on maintient constant pendant les 24 heures, les variations de la hauteur des éprouvettes sont mesurées pendant l'essai en fonction de la durée d'application de la charge.

➤ Matériel nécessaire

L'appareil œdométrique comporte :

- ❖ Un bâti métallique permettant par l'intermédiaire d'un levier d'appliquer au piston les pressions de consolidation désirées.
- ❖ Eprouvette de matériaux.
- ❖ Une cellule ou enceinte œdométrique de consolidation : moule cylindrique qui empêche toutes déformations radiales lors l'essai.
- ❖ Disque drainant inférieur
- ❖ Disque drainant supérieur, ces deux disques permettant le drainage de l'échantillon en cours d'essais et éviter au sein de matériaux l'apparition de pression interstitielle.
- ❖ Un couvercle pour répartir l'effort de compression sur la surface totale de l'échantillon.
- ❖ Réservoir
- ❖ Liquide d'imbibition
- ❖ Un système de mesurage
- ❖ Effort N sur l'éprouvette

➤ Mode opératoire

L'essai œdométrique est réalisé selon la norme **AFNOR NF P 94 -090-1** :

- Après la confection de l'éprouvette, placer la dans la cellule entre deux pierres poreuses ;
- Placer l'ensemble sur le bâti ;
- Appliquer des charges croissantes toutes les 24 heures ;
- Procéder à un déchargement par paliers stabilisés de contraintes décroissants (La durée des paliers de chargement et de déchargement est de 24 heures) ;
- Pour chaque palier, effectuer sur un comparateur fixé à l'appareil des lectures de tassements ;
- La durée de l'essai pour une seule éprouvette peut atteindre 14 jours



Figure 31 : Œdomètre

➤ Expressions des résultats

- Graphique

Cet essai permet de tracer une courbe de compressibilité (œdométrique) [e , $\log(\sigma_v)$] donnant la variation de l'indice des vides de sédiments en fonction de la contrainte effective verticale appliquée sur l'éprouvette.

- Détermination des paramètres de compressibilités
 - **Indice de compression C_c** : il représente la pente de la droite vierge.
 - **Indice de gonflement C_g** : C'est la pente moyenne (au signe près) d'un cycle déchargement-recharge.
 - **La pression de pré consolidation P_c** : elle correspond à la contrainte effective maximale sous laquelle le sol s'est déjà consolidé au cours de son histoire géologique.

4 Analyse des métaux lourds dans le sédiment

L'analyse des métaux lourds dans les sédiments de dragage est essentielle pour prévenir la contamination environnementale et protéger la santé publique. Cette évaluation garantit que les sédiments valorisés, contenant des éléments comme le Cd, Cr, Mn, Ni, Zn, Cu et Pb, respectent les normes de sécurité et les réglementations en vigueur.

➤ Principe de l'essai

La méthode utilisée dans les analyses des métaux lourds présentés dans la présente étude est la méthode d'extraction métal total adsorbé à la surface des grains par une digestion partielle qui s'effectue généralement avec des acides forts concentrés (HNO_3 , HCl).

La spectrométrie d'adsorption atomique est la plus utilisée, elle permet de doser une soixantaine d'éléments atomiques à l'état de trace. SAA fonctionne en vaporisant un échantillon pour convertir les atomes présents en un état gazeux. Ces atomes gazeux absorbent de la lumière à des longueurs d'onde spécifiques. La quantité de lumière absorbée est mesurée et est proportionnelle à la concentration de l'élément dans l'échantillon, permettant ainsi de doser précisément les éléments présents à l'état de trace.

➤ Matériel nécessaire

- ❖ Piluliers en plastique
- ❖ Plaque chauffante
- ❖ Micro-onde
- ❖ Lyophilisateur
- ❖ Mortier en porcelaine
- ❖ Four à moufle
- ❖ Godets en téflon
- ❖ SAA

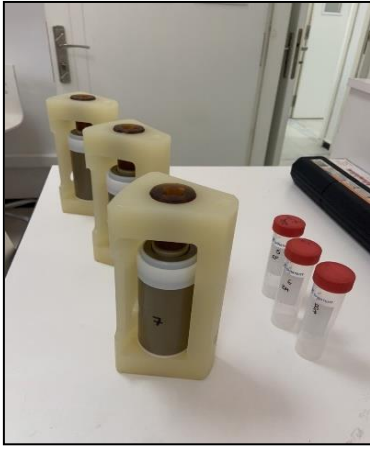


Figure 32 : Préparation des godets pour les mettre au four



Figure 33 : Mortier en porcelaine



Figure 34 : Godets en téflon



Figure 35 : Spectrophotomètre



Figure 36 : Four a moufle

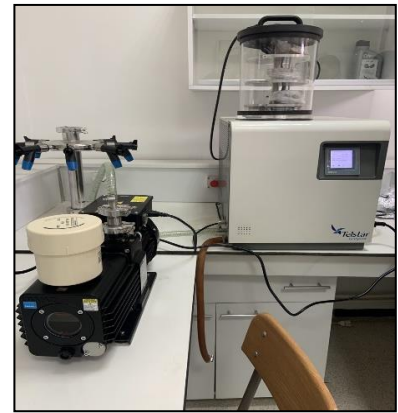


Figure 37 : Liophilisateur

➤ Mode opératoire

Nettoyage du matériel utilisé pour la détermination des métaux traces :

Afin d'éviter les contaminations, tout instrument et verrerie utilisés pendant le prélèvement, le traitement et le stockage des échantillons, doivent subir préalablement des opérations de nettoyage spécifiques.

Traitements des sédiments : Les échantillons sont prélevés et conservés au congélateur et ont subi la série des traitements suivants :

- a) **Lyophilisation :** cette opération est effectuée dans un pendant 72 heures sous vide et à très basse température (-50 °C).
Ce moyen de déshydratation est préférable à celui de l'évaporation à l'étuve car, dans ce dernier cas, l'élévation de la température peut être une source de pertes en métaux les plus volatils en particulier le mercure.
- b) **Broyage :** Après lyophilisation, les échantillons de sédiments lyophilisés sont broyés à l'aide d'un mortier en porcelaine jusqu'à l'obtention d'une poudre fine. Cette dernière est récupérée dans des piluliers en verre et stockée dans un endroit sec (dessiccateur).

- c) **Homogénéisation** : Pour avoir une répartition homogène des particules de sédiment dans l'échantillon, on procède à une agitation manuelle. Elle permet de prélever une quantité de sédiment représentative de l'échantillon.
- d) **Extraction des métaux lourds** : Les méthodes d'extraction des métaux lourds dans le sédiment sont multiples et regroupées en deux classes : les méthodes d'extraction totale et les méthodes d'extraction sélectives.

La méthode d'extraction qui est utilisée permet l'extraction du métal totale adsorbé à la surface des grains par une digestion partielle qui s'effectue généralement avec des acides forts concentrés, on utilise l'**eau régale** : mélange (HNO_3 , HCl) concentrés dans une proportion de deux 3 volumes d'acide chlorhydrique pour un d'acide nitrique.

Principe de la digestion ou de la minéralisation :

La digestion consiste à libérer les différents métaux adsorbés à la surface des particules sédimentaires et/ou piégés par la matière organique et les minéraux par extraction et mise en solution.

➤ **Minéralisation à blanc :**

Avant d'utiliser les godets, on procède à une minéralisation à blanc. On met dans chaque godet 2 ml d'eau régale (1 volume d'acide nitrique (HNO_3) concentré à 68 % + 3 volumes d'acide chlorhydrique (HCl) concentré à 37%). Puis, on ferme hermétiquement les godets et on chauffe sur une plaque chauffante à 150 ° C pendant 2h30min.

On laisse refroidir les échantillons avant d'ouvrir la soupape de sécurité doucement, puis on ouvre les godets et on rince à l'eau bidistillée et on sèche dans l'étuve.

➤ **Minéralisation des échantillons :**

La minéralisation a lieu sous hotte aspirante dans des godets en téflon. On pèse environ 0,5g de sédiment lyophilise et l'introduire dans chaque godet. On y ajoute 6 ml d'eau régale (1 volume d'acide nitrique (HNO_3) concentré à 69 % + 3 volumes d'acide chlorhydrique (HCl) concentré à 37%) puis on ferme hermétiquement les godets.

Laisser les échantillons à température ambiante toute une nuit (minéralisation à froid) puis on les met le lendemain sur la plaque chauffante à 120 ° C pendant 2h 30min.

Laisser refroidir les échantillons avant d'ouvrir la soupape de sécurité doucement, puis ouvrir les godets et transférer les minéralisâtes dans des tubes en polypropylène de 50 ml. Il faut rincer bien les godets avec l'eau bidistillée au moins 3 fois en récupérant le maximum des rinçages dans les tubes et ajuster ensuite jusqu'au trait de jauge avec l'eau bidistillée.

La solution obtenue doit être agitée, elle est ensuite conservée au réfrigérateur à + 4°C jusqu'au moment du dosage afin d'éviter toute perte et contamination.

Un godet pour témoin blanc a été inséré avec chaque série d'échantillons et subit le même

traitement que ces derniers.

e) Analyse des métaux lourds

L'analyse des métaux lourds s'effectue grâce à la spectrophotométrie d'absorption atomique (SAA).

Le dosage d'élément par SAA repose sur le principe qu'un atome soumis à un rayonnement d'énergie E , peut passer d'un état fondamental à un état excité, caractérisé par des électrons à un niveau d'énergie plus élevé et instable : c'est le phénomène d'absorption. Le retour de l'atome à son état fondamental s'accompagne de l'émission d'un rayonnement photonique spécifique caractérisé par sa longueur d'onde λ .

L'intensité de l'absorption dépend directement du nombre de particules absorbant la lumière selon la loi de Beer-Lambert.

D'après cette dernière, la densité optique d'une solution d'une substance absorbante dans un solvant transparent est proportionnelle à l'épaisseur de la solution traversée et à la concentration des substances absorbante de la solution (AUDIGIE C et al, 1985)

$$I = I_0 \times e^{-\epsilon l C}$$

En pratique, l'absorbance A peut être appréhendée par la variation de l'intensité lumineuse à travers la chambre d'atomisation de l'élément à doser.

La lecture s'effectue en absorbance (A) ou en densité optique (DO) :

$$A = DO = \log I_0/I = \epsilon.l.C$$

Où :

I : Intensité de l'énergie lumineuse transmise (émergente).

I_0 : Intensité de l'énergie lumineuse émise (incidente).

ϵ : Coefficient d'absorption atomique (constant).

l : Longueur du trajet optique (constante).

C : Concentration de l'élément absorbant (analyte).

❖ Etalonnage de l'appareil :

L'étalonnage doit être réalisé très soigneusement, dans un domaine de concentration où la loi de **Beer Lambert** est respectée. La mesure de la concentration d'un élément dans l'échantillon est déterminée à partir d'une courbe d'étalonnage. La gamme d'étalonnage doit autant que possible être comprise autour de valeurs de l'échantillon à analyser. Les solutions étalons sont préparées au moment de l'analyse à partir de solution mère qui a une concentration connue en g/l de l'élément à doser.

➤ Expression des résultats

La concentration de chaque métal est déterminée à partir de l'équation de la droite d'étalonnage, cette dernière est établie par régression linéaire. Connaissant la densité optique du métal (calculée par le programme), on calcule alors la concentration de l'échantillon.

$$CF = \frac{((C(\text{éch}) \times Fd) - C(\text{blanc})) \times V}{Pc}$$

CF : Concentration finale du métal dans le sédiment ($\mu\text{g/g.Ps}$).

Ps : poids sec.

C(éch) : Concentration de l'échantillon donnée par le programme ($\mu\text{g/ml}$).

V : Volume de la solution finale après minéralisation (50 ml).

Pc : Poids corrigé du sédiment traité (0,5 g environ).

Fd : Facteur de dilution.

❖ Indice de contamination :

Pour la présente étude, les analyses des métaux lourds ont porté sur la comparaison des concentrations par rapport aux normes algériennes et françaises. Concernant les normes algériennes, il s'agit en fait d'une synthèse élaborée par la DGE (Direction Générale de l'Environnement).

Tableau 07 : Concentrations normales des métaux lourds dans le sédiment selon les normes Algériennes ($\mu\text{g/g}$) (Belkessa R. 2005)

Métaux Normes	Hg	Pb	Cd	Cu	Zn	Cr	Ni
Algérienne	1.5	250	2	150	500	250	75

L'indice de contamination correspond au rapport de la concentration observée par rapport à la concentration normale, il est calculé par la formule suivante :

$$IC = \frac{\text{Concentration observée}}{\text{Concentration normale}}$$

Tableau 08 : Valeurs de l'indice de contamination IC (ALZIU C et al, 1999)

IC	Observation
IC < 3	Concentration normale
3 < IC < 10	Cas de pollution
IC > 10	Zone à risque

Chapitre 04 :

Résultats et discussions

1 Introduction

Après avoir mené une série d'analyses rigoureuses sur les sédiments de dragage provenant des ports de Zemmouri et de Sidi Fredj, nous présentons dans ce chapitre une discussion approfondie et une interprétation détaillée de nos résultats. L'objectif de cette section est de contextualiser les données obtenues, d'en explorer les implications et de les comparer aux résultats trouvés dans la littérature existante.

Ce chapitre de discussion et d'interprétation vise à fournir une compréhension complète et nuancée des données obtenues, tout en soulignant l'importance de la valorisation des sédiments de dragage comme une solution viable et durable pour le secteur du génie civil.

2 Les essais physico-chimiques

2.1 Granulométrie

On fait la classification des matériaux selon le « Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme » (GTR.1992), la distribution granulométrique constitue le premier paramètre d'entrée dans les tables de classification. Le but de cette analyse est de déterminer la distribution pondérale de la taille des différentes familles de grains des matériaux étudiés.

Port de zemmouri :

Tableau 09 : les résultats de la granulométrie du port de Zemmouri

Tamis (mm)	Echantillon 01(g)	Echantillon 02(g)	Echantillon 03(g)
1	1,87	1,64	57,25
0,80	1,34	2,40	3,37
0,63	2,71	5,51	3,42
0,50	4,48	9,34	5,30
0,40	5,45	12,25	5,24
0,315	10,95	22,33	10,04
0,25	17,13	26,51	15,13
0,20	32,31	34,72	21,35
0,18	13,63	9,13	5,07
0,16	30,47	15,32	7,25
0,14	13,16	4,65	2,11
0,1	13,08	3,01	2,34
0,08	1,28	0,31	0,89
0,063	0,35	0,16	0,88
Reste	0,28	0,22	2,08
Pois après rinçage	147,96	147,30	141,84

Port de Sidi Fredj :

Tableau 10 : les résultats de la granulométrie du port de Sidi Fredj

Tamis (mm)	Echantillon 01(g)	Echantillon 02(g)
1	0,25	0,32
0,80	0,24	0,20
0,63	0,46	0,37
0,50	1,17	1,30
0,40	1,59	1,79
0,315	3,78	4,67
0,25	5,30	6,68
0,20	14,59	17,72
0,18	10,11	11,90
0,16	34,00	40,70
0,14	25,18	29,25
0,1	43,80	30,04
0,08	6,34	2,13
0,063	0,76	0,39
Reste	0,34	0,16
Poids après rinçage	147,74	147,47

Paramètres granulométriques :

Tableau 11 : Les paramètres granulométriques pour le port de Zemmouri et Sidi Fredj

Paramètres	Port de Zemmouri			Port de Sidi Fredj	
	Ech.01	Ech.02	Ech.03	Ech.01	Ech.02
D_{max}	0,58	0,68	1	0,32	0,33
D_{10}	0,14	0,17	0,17	0,11	0,12
D_{30}	0,17	0,22	0,25	0,13	0,15
D_{60}	0,22	0,30	0,83	0,17	0,17
C_u	1,59	1,76	4,75	1,51	1,38
C_c	0,93	0,93	0,43	0,99	1,04
Q_1	0,23	0,18	0,22	0,13	0,15
M_d	0,46	0,2	0,26	0,16	0,17
Q_3	0,9	0,28	0,29	0,19	0,19
S_o	1,98	1,25	1,15	1,21	1,13
S_k	0,98	1,26	0,94	0,96	0,99

Les courbes granulométriques :

❖ Port de Zemmouri

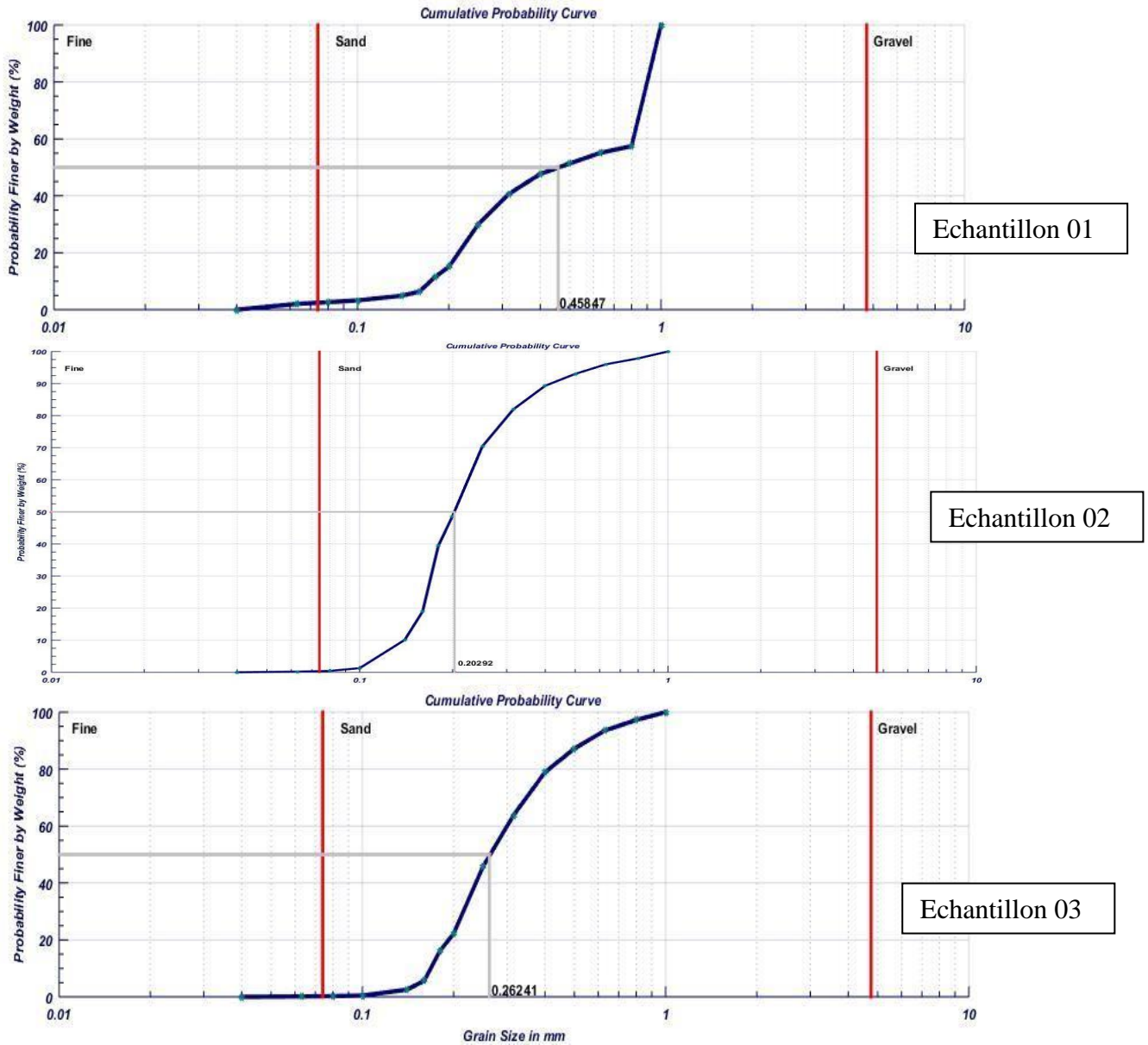
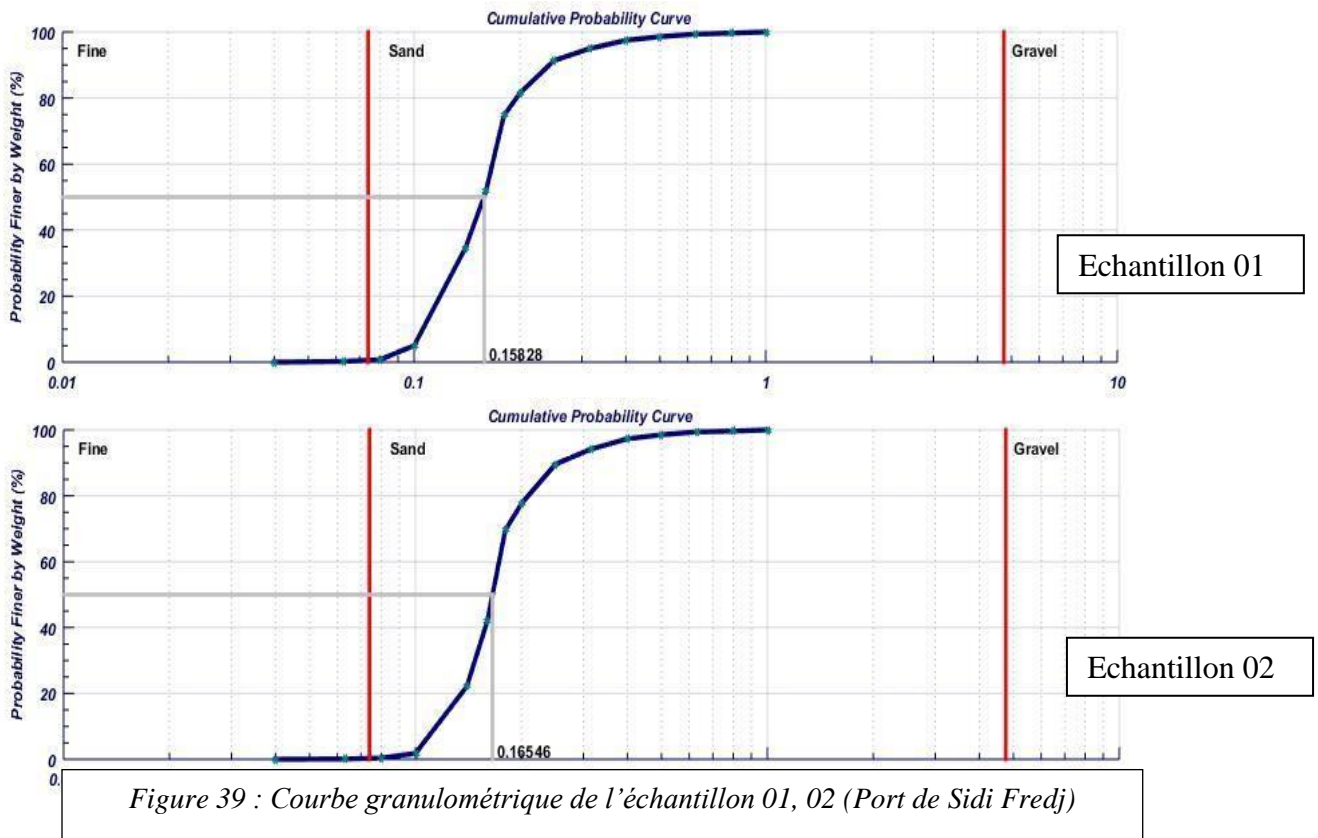


Figure 38 : Courbe granulométrique de l'échantillon 01, 02 et 03 (Port de Zemmouri)

❖ **Port de Sidi Fredj :**



Interprétation des Résultats

❖ **Classification GTR :**

Tableau 12 : Classification GTR des granulats

Taille	Granulats
>20 cm	Blocs
2 cm - 20 cm	Cailloux
2mm – 2 cm	Graviers
63µm – 02 mm	Sables
02µm – 63 µm	Limons ou silts
< 02µm	Vases, Boues argileuses

- En se basant sur la classification GTR, on déduit que notre sédiment est majoritairement du sable.

Port de Zemmouri

- Les échantillons 01 et 02 présentent des indices d'uniformité relativement bas (1,59 et 1,76), indiquant une distribution de tailles de particules assez étroite et donc des sédiments peu bien gradués. Pour les indices de courbure proches de 1 (0,93), indiquant une distribution modérément bien graduée et relativement stable.
- L'échantillon 03 à un Cu de 4,75, ce qui montre une distribution de tailles de particules beaucoup plus large, suggérant des sédiments bien gradués, plus adaptés à diverses applications en génie civil, avec un Cc de 0,43, montre une distribution moins bien graduée, ce qui peut affecter la stabilité et la performance des sédiments pour certaines utilisations.

Indice de Sélection (So) et Coefficient de Symétrie (Sk) :

- L'échantillon 01 à un So de 1,98 et un Sk de 0,98, sédiment bien classé et leur classement est maximum vers les fines.
- L'échantillon 02 montre un So de 1,25 et un Sk de 1,26, suggérant une meilleure dispersion des tailles de particules et une légère prédominance de particules plus grosses.
- L'échantillon 03 à un So de 1,15 et un Sk de 0,94, indiquant une faible dispersion et une légère prédominance de particules fines.

Port de Sidi Fredj :

- Les deux échantillons présentent des indices d'uniformité bas (1,51 et 1,38), indiquant une distribution de tailles de particules assez étroite. Cela suggère que les sédiments sont bien gradués.
- Les indices de courbure des deux échantillons (0,99 et 1,04) sont proches de 1, indiquant une distribution granulométrique relativement stable et bien graduée.

Indice de Sélection (So) et Coefficient de Symétrie (Sk) :

- Les indices de sélection (1,21 et 1,13) montrent une dispersion modérée des tailles de particules, indiquant que les sédiments ont une granulométrie relativement uniforme.
- Les coefficients de symétrie (0,96 et 0,99) suggèrent une distribution presque symétrique des particules, avec une légère prédominance de particules fines.

2.2 La teneur en carbonates

Les valeurs permettant de calculer la valeur de la teneur en carbonates dans les sédiments du port de Zemmouri et de Sidi Fredj sont reportées dans le tableau 13 :

Tableau 13 : Résultats de la teneur en carbonates dans les sédiments prélevés dans les deux ports

Port	Echantillon	Essai 01	Essai 02	Essai 03	Moyenne	CaCO ₃ (%)
Zemmouri	Echantillon 01	41	43,5	42	42,17	90,68
	Echantillon 02	46,5	47	45	46,17	99,28

	Echantillon 03	47	48	48	46,33	99,64
Sidi Fredj	Echantillon 01	96	97,5	100	97,83	97,83
	Echantillon 02	89	87,5	87,5	88,00	88,00

Les deux ports montrent des teneurs élevées en carbonates, suggérant des environnements marins favorables à la précipitation et à l'accumulation des minéraux.

Port de Zemmouri

- Une teneur en CaCO_3 entre 90 et 99% indique une présence élevée de carbonate de calcium, suggérant que les sédiments sont fortement calcaires. Ce niveau est approprié pour des applications nécessitant des propriétés cimentaires ou des amendements calcaires.

Port de Sidi Fredj

- La teneur en CaCO_3 obtenue indique des sédiments très riches en carbonate de calcium, similaires à ceux des échantillons du port de Zemmouri, et donc très adaptés à des applications nécessitant un fort contenu calcaire.

Les teneurs en carbonate de calcium des sédiments des ports de Zemmouri et de Sidi Fredj sont globalement très élevées, indiquant que ces sédiments sont majoritairement composés de carbonate de calcium. Cela les rend particulièrement adaptés pour des usages dans les domaines de la construction nécessitant des matériaux calcaires, comme les amendements de sol ou les composants de ciment.

2.3 Equivalent de sable

En 1978, la classification RTR (Recommandation pour les Terrassements Routiers) a retenu le paramètre équivalent de sable comme un paramètre permettant l'évaluation de la propreté de sable, dès que la VBS est introduite, le GTR (Guide des Terrassements Routiers) a considéré l'ES comme une valeur de référence, cette valeur n'est utilisée que pour se familiariser à la propreté du sable (OUANDJELI., SENOUCI, 2016).

Les résultats de la détermination de la valeur d'équivalent de sable ES sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau 14 : résultats de l'équivalent de sable pour l'ensemble des échantillons prélevés dans les deux ports

Port	Echantillon	h1 (cm)	h2 (cm)	ESV (%)	Moyenne ESV (%)
Zemmouri	Echantillon 01	10,80	10,50	97,22	92,59 %
	Echantillon 02	10,20	9,70	95,10	
	Echantillon 03	10,30	8,80	85,44	
Sidi Fredj	Echantillon 01	10,60	10,40	98,11	98,17 %
	Echantillon 02	11,30	11,10	98,23	

Tableau 15 : Classification de la qualité du sable selon la valeur de l'ES

Valeur de ES (%)	Qualité de sable
ES<65	Sable argileux
65<ES<75	Sable légèrement argileux
75<ES<85	Sable propre à faible proportion de fines argileuses
ES>85	Sable très propre

D'après les résultats obtenus, les sédiments des deux ports ont une moyenne ES supérieure à 85 % sont principalement composés de particules de sable très propre, avec très peu de limon et d'argile.

Cela peut être interprété par l'agitation intense due aux vagues, aux courants et éventuellement aux activités de navigation au niveau de la passe d'entrée, ce qui peut favoriser la décantation des particules plus grossières, comme le sable, car elles ont une densité plus élevée et sont moins susceptibles d'être maintenues en suspension dans l'eau.

Une fois à l'intérieur du port, où l'agitation est généralement réduite en raison de l'abri offert par les structures portuaires, les particules fines comme l'argile et le limon ont plus de chances de se déposer.

2.4 La teneur en eau

Les valeurs permettant de calculer la valeur de la teneur en eau à la saturation des sédiments du port de Zemmouri et de Sidi Fredj sont reportées dans le tableau 16 :

Tableau 16 : Résultats de la teneur en eau dans les sédiments prélevés dans les deux ports

Port	Echantillon	m1	m2	m3	m w	Wsr%	Moyenne Wsr%
Zemmouri	Echantillon 01	126,04	160,08	155,25	4,83	3,11	2,94%
	Echantillon 02	132,47	160,01	154,6	5,41	3,50	
	Echantillon 03	128,63	160	156,54	3,46	2,21	
Sidi Fredj	Echantillon 01	125,56	185,56	170,95	14,60	8,54	8,42%
	Echantillon 02	137,50	197,49	182,35	15,13	8,30	

La plupart des sols naturels, qui sont de nature sableuse et graveleuse, peuvent avoir une teneur en eau jusqu'à environ 15 à 20 %. Dans les sols naturels à grain fin (limoneux ou argileux), on peut trouver des teneurs en eau jusqu'à 50 à 80 %.

1. Port de Zemmouri (teneur en eau : 2,94%) :

Une teneur en eau de 2,94% est très faible, surtout par rapport aux sols naturels sableux et graveleux qui peuvent atteindre jusqu'à 15 à 20 % de teneur en eau. Cela suggère que le sédiment est très sec, ce qui peut indiquer un faible taux de saturation et potentiellement une bonne capacité de drainage.

2. Port de Sidi Fredj (teneur en eau : 8,42%) :

Une teneur en eau de 8,42% est également relativement faible, bien qu'elle soit plus élevée que

celle de Zemmouri. Elle reste en dessous des valeurs typiques pour les sols sableux et graveleux (jusqu'à 20 %), ce qui indique une certaine capacité de rétention d'eau mais sans atteindre des niveaux qui pourraient entraîner des problèmes de gonflement excessif ou de stabilité réduite.

En résumé :

Les sédiments avec une faible teneur en eau sont souvent plus stables et moins sujets à des problèmes de gonflement ou de retrait. Cela pourrait être avantageux pour des applications nécessitant des matériaux avec une faible réactivité à l'eau.

2.5 La matière organique

Les valeurs permettant de calculer la valeur de la matière organique dans les sédiments du port de Zemmouri et de Sidi Fredj sont reportées dans le tableau 17 :

Tableau 17 : Résultats de la matière organique dans les sédiments prélevés dans les deux ports

Port	Echantillon	P ₁	P	P ₂	MO (%)	Moyenne MO (%)
Zemmouri	Echantillon 01	32,65	3,00	35,53	0,35	2,18 %
	Echantillon 02	32,72	3,00	35,64	0,25	
	Echantillon 03	32,42	3,00	33,31	5,93	
Sidi Fredj	Echantillon 01	32,72	3,00	35,65	0,20	0,24 %
	Echantillon 02	32,65	3,00	35,55	0,28	

La classification de GTR considère qu'un matériau est :

- Faiblement organique lorsque sa teneur en MO est supérieure à 3% et inférieure à 10%.
- Fortement organique lorsque celle-ci est supérieure à 10%.

Avec une teneur en matière organique de 2,18% pour le port de Zemmouri et de 0,24% pour Sidi Fredj, ces sédiments sont considérés comme non organiques selon la classification mentionnée (puisque les valeurs sont inférieures à 3%). Cela signifie que les deux sédiments ont une faible proportion de matière organique.

En termes d'utilisation potentielle, ce sédiment pourrait être plus stable et moins susceptible de décomposer rapidement, ce qui peut être avantageux pour certaines applications telles que le remblai ou les fondations, et toute utilisation nécessitant des matériaux stables et peu sujets à la décomposition biologique.

2.6 pH et Conductivité

pH :

Les valeurs permettant de calculer le pH dans les sédiments du port de Zemmouri et de Sidi Fredj sont reportées dans le tableau 18 :

Tableau 18 : Résultats du pH dans les sédiments prélevés dans les deux ports

Port	Echantillon	pH	Moyenne pH
Zemmouri	Echantillon 01	8,86	8,85
	Echantillon 02	8,84	
	Echantillon 03	8,85	
Sidi Fredj	Echantillon 01	8,98	8,89
	Echantillon 02	8,79	

Un pH de 8,8 dans le sédiment d'un port indiquerait une alcalinité relativement élevée (FIALA, 2020). Les sédiments portuaires peuvent être influencés par divers facteurs, tels que :

- Dépôts de calcaire : Si le port est situé dans une région où il y a une forte présence de calcaire, cela peut augmenter le pH du sédiment en raison de la dissolution du carbonate de calcium.
- Pollution industrielle : Les déversements industriels peuvent contenir des substances chimiques basiques qui élèvent le pH du sédiment. Par exemple, certains produits chimiques utilisés dans les processus industriels peuvent avoir un effet alcalin.
- Activités agricoles
- Déversements d'eaux usées

En effet, dans le cas du port de Sidi Fredj la partie près des quais nous avons remarqué une croissance importante des algues, ce qui peut contribuer à cette alcalinité, car les algues peuvent sécréter des substances qui modifient le pH de leur environnement. Dans ce cas, il est possible que les algues produisent des composés alcalins ou consomment des acides présents dans le milieu, ce qui élève le pH.

Pour le cas de Zemmouri un pH de 8,85 indique que les sédiments sont légèrement alcalins. Cette alcalinité suggère la présence de carbonates et d'autres composés alcalins.

Les pH des sédiments des ports de Zemmouri (8,85) et de Sidi Fredj (8,89) montrent qu'ils sont relativement alcalins. Cette caractéristique est généralement bénéfique pour les applications en génie civil, offrant une bonne résistance à la corrosion et contribuant à la stabilité chimique des matériaux de construction. La similitude des pH entre les deux ports suggère des conditions chimiques comparables, permettant des usages similaires des sédiments dans des projets de construction

Conductivité

Les valeurs permettant de calculer la conductivité dans les sédiments du port de Zemmouri et de Sidi Fredj sont reportées dans le tableau 19 :

Tableau 19 : Résultats de la conductivité dans les sédiments prélevés dans les deux ports

Port	Echantillon	Conductivité (µS/cm)	Moyenne Conductivité (µS/cm)
Zemmouri	Echantillon 01	536	620,67
	Echantillon 02	753	
	Echantillon 03	573	
Sidi Fredj	Echantillon 01	568	600,5
	Echantillon 02	633	

Des valeurs de 620,67 µS/cm dans les sédiments du port de Zemmouri et de 600,5 µS/cm pour le port de Sidi Fredj indiquent des niveaux de conductivité relativement similaires entre les deux sites, avec une valeur légèrement plus élevée au niveau de Zemmouri.

Un niveau de conductivité d'environ 600 dans le sédiment du port signifie simplement que ce sédiment peut permettre le passage de l'électricité à un certain niveau.

Ces résultats peuvent être interprétés par la présence des sels dissous et d'ions provenant de l'eau de mer.

Les conductivités des sédiments des ports de Zemmouri et de Sidi Fredj montrent des niveaux de salinité modérés (620,67 µS/cm et 600,5 µS/cm, respectivement). Ces niveaux suggèrent que, bien que la présence de sels dissous doive être prise en compte, ils ne représentent pas un obstacle insurmontable pour l'utilisation des sédiments en applications de génie civil.

2.7 Bleu de méthylène

Les valeurs permettant de calculer la valeur de bleu de méthylène dans les sédiments du port de Zemmouri et de Sidi Fredj sont reportées dans le tableau 20 :

Tableau 20 : Résultats du VBS dans les sédiments prélevés dans les deux ports

Port	Echantillon	m _o	V (ml)	B	VBS	Moyenne VBS (g)
Zemmouri	Echantillon 01	60	35	0,35	0,58	0,55
	Echantillon 02	60	30	0,3	0,50	
	Echantillon 03	60	30	0,35	0,58	
Sidi Fredj	Echantillon 01	60	30	0,3	0,50	0,54
	Echantillon 02	60	35	0,35	0,58	

La classification des sols selon la norme GTR (Guide des Terrassements Routiers) permet de déterminer les caractéristiques des sols et leur aptitude à divers usages, en particulier dans les travaux de terrassement et de construction. Voici une classification simplifiée basée sur les valeurs de VBS :

Tableau 21 : Classification GTR des sols selon la VBS

VBS (g/ 100g)	Type de sol
0.1	Seuil en dessous duquel on peut considérer que le sol est insensible à l'eau Ce critère doit cependant être complété par la vérification du tamisât à 80 μm qui doit être $\leq 12\%$.
0.2	Seuil à partir duquel apparaît la sensibilité à l'eau
1.5	Seuil distinguant les sols sablo-limoneux des sols sablo argileux
2.5	Seuil distinguant les sols limoneux peu plastiques des sols ; limoneux de plasticité moyenne
6	Seuil distinguant les sols limoneux des sols argileux
8	Seuil distinguant les sols argileux des sols très argileux.

Les sédiments des ports de Sidi Fredj et de Zemmouri présentent des teneurs moyennes en argile, ce qui les classe dans une catégorie intermédiaire selon la classification GTR allant de 0,5 à 0,58 ml/g, classant ces sols comme faiblement argileux. Ces sols présentent une capacité d'adsorption et de gonflement limitée, ce qui les rend adaptés à des usages dans des conditions où les caractéristiques modérées de stabilité sont suffisantes.

2.8 La Masse volumique apparente et la Masse volumique absolue

Les valeurs permettant de calculer les valeurs de la Masse volumique apparente et la Masse volumique absolue dans les sédiments du port de Zemmouri et de Sidi Fredj sont reportées dans le tableau 22 :

Tableau 22 : Résultats de la Masse volumique apparente et la Masse volumique absolue

	Port de Zemmouri				Port de Sidi Fredj			
	Essai 01	Essai 02	Essai 03	Moyenne	Essai 01	Essai 02	Essai 03	Moyenne
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,37	1,38	1,36	1,37	1,26	1,26	1,25	1,26
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2,12	2,15	2,12	2,13	2,12	2,12	2,12	2,12

Une masse volumique apparente de $1,37 \text{ g/cm}^3$ et une masse volumique absolue de $1,26 \text{ g/cm}^3$ (inférieure à $2,5 \text{ g/cm}^3$) indiquent que les sédiments contiennent probablement des minéraux avec une densité plus faible que le quartz ($2,65 \text{ g/cm}^3$) et d'autres minéraux inorganiques courants ($2,5$ à $2,8 \text{ g/cm}^3$) comme des feldspaths, des micas ou d'autres minéraux moins denses.

Masse Volumique Apparente

- Sables secs : $1,5$ à $1,8 \text{ g/cm}^3$
- Sables humides : $1,7$ à $2,0 \text{ g/cm}^3$

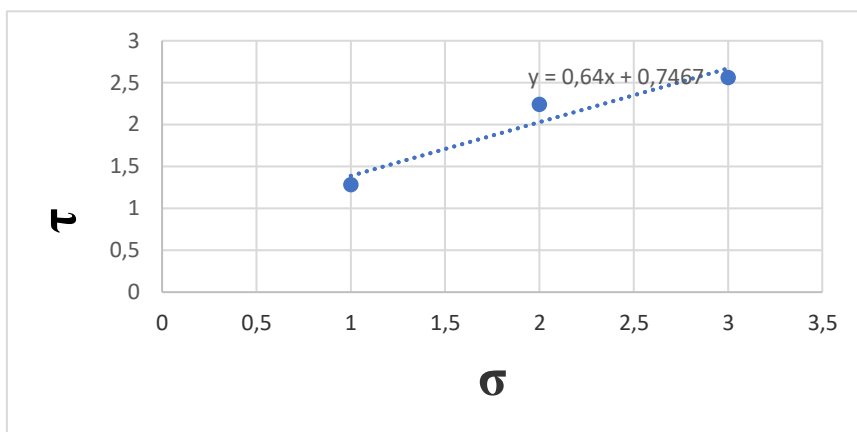
D'après nos résultats, il s'agit d'un sédiment sec pour les deux ports.

3 Les essais mécaniques

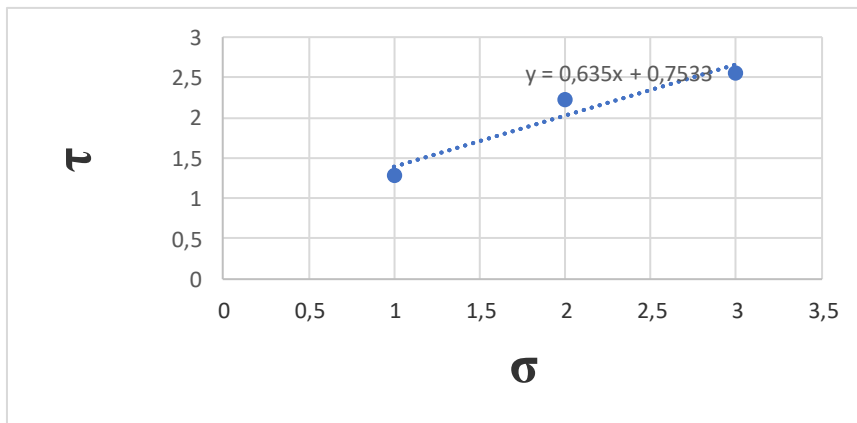
Dans le cadre de notre étude, nous avons réalisé des essais mécaniques notamment l'essai de cisaillement et l'essai œdométrique, pour évaluer et déterminer les caractéristiques mécaniques essentielles des sédiments des deux ports et d'explorer leur potentiel pour des applications structurales et géotechniques.

3.1 La résistance au cisaillement à la boîte de Casagrande

Les données recueillies permettent de déterminer des paramètres clés tels que la cohésion et l'angle de frottement interne. Ces paramètres sont essentiels pour comprendre le comportement mécanique des sédiments de dragage et leur aptitude à être utilisés dans des applications de génie civil. Voici les résultats obtenus de nos essais de résistance au cisaillement.



Port de Zemmouri



Port de Sidi Fredj

Figure 40 : Courbe intrinsèque de Contrainte tangentielle τ en fonction de la contrainte normale σ

Interprétation des résultats :

- Cohésion (c)

- Une cohésion de 0,75 indique une faible à modérée adhérence entre les particules du sol, ce qui contribue à la résistance au cisaillement. Cela suggère que les sols des ports de Zemmouri et de Sidi Fredj ont des propriétés de cohésion similaires, permettant une certaine stabilité intrinsèque sans charge externe.

- Angle de frottement interne (ϕ)

Un angle de frottement de 0,64 rad (ou 36,6 degrés) est relativement élevé, indiquant que les sols ont une bonne résistance au cisaillement en raison des forces de friction entre les particules. Cela signifie que les sols des deux ports peuvent supporter des charges importantes sans glisser ou se déformer de manière significative.

3.2 L'essai œdométrique

Les résultats de la détermination de la valeur d'équivalent de sable ES sont représentés dans les tableaux suivants 23, 24, 25, 26 et 27 :

- Diamètre $d = 5\text{cm}$
- Section du moule : $S = 19.63\text{ cm}^2$
- Hauteur initiale : $h = 2\text{ cm}$
- Poids de l'échantillon sec : $W_d = 18\text{g}$
- Poids volumique des grains solides : $\gamma_s = 2.65\text{g/cm}^3$

Pour le calcul de l'indice des vides e , on utilise la relation suivante :

$$e = H_v/H_s$$

Où : H_s : hauteur des grains solides

H_v : hauteur des vides

Avec :

$$H_s = W_d / (\gamma_s \cdot S)$$

$$H_s = 0,35$$

Calcul des contraintes :

P= 9,81 N

Tableau 23 : Résultats des contraintes

Charge appliquée (kg)	0,5	1	2	4	8
Contraintes (N/m ²)	249,87	4997,45	9994,90	19989,81	39979,62

Port de Zemmouri :

Tableau 24 : Résultats de l'indice des vides (Tassement, port de Zemmouri)

Pression (Kg/cm ²)	ΔH_i (cm)(Tassement)	Hauteur de l'éprouvette (H _s)	Hauteur des vides (H _v)	Indice des vides e
0,25	0,055	1,945	1,595	0,820
0,5	0,063	1,937	1,587	0,819
1	0,073	1,927	1,577	0,818
2	0,088	1,912	1,562	0,817
4	0,095	1,905	1,555	0,816

Tableau 25 : Résultats de l'indice des vides (Gonflement, port de Zemmouri)

Pression (Kg/cm ²)	ΔH_i (cm)(Gonflement)	Hauteur de l'éprouvette (H _s)	Hauteur des vides (H _v)	Indice des vides e
0,25	0,04	1,96	1,61	0,821
0,5	0,074	1,926	1,576	0,818
1	0,086	1,914	1,564	0,817
2	0,091	1,909	1,559	0,817
4	0,094	1,906	1,556	0,816

Port de Sidi Fredj :

Tableau 26 : Résultats de l'indice des vides (Tassement, port de Sidi Fredj)

Pression (Kg/cm ²)	ΔH_i (cm)(Tassement)	Hauteur de l'éprouvette (H _s)	Hauteur des vides (H _v)	Indice des vides e
0,25	0	2	1,650	0,825
0,5	0,015	1,985	1,635	0,824
1	0,031	1,969	1,619	0,822
2	0,042	1,958	1,608	0,821
4	0,059	1,941	1,591	0,820

Tableau 27 : Résultats de l'indice des vides (Gonflement, port de Sidi Fredj)

Pression (Kg/cm ²)	ΔH_i (cm)(Gonflement)	Hauteur de l'éprouvette (Hs)	Hauteur des vides (Hv)	Indice des vides e
0,25	0,004	1,996	1,646	0,825
0,5	0,033	1,967	1,617	0,822
1	0,049	1,951	1,601	0,821
2	0,053	1,947	1,597	0,820
4	0,057	1,943	1,593	0,820

Interprétation :

- Compressibilité : Les deux sables montrent une faible compressibilité sous des charges croissantes. L'indice des vides diminue légèrement avec l'augmentation de la charge, ce qui est attendu pour des sables, car ils se réarrangent sous charge mais ne se compactent pas autant que les sols argileux.
- Gonflement : Les résultats des tests de gonflement indiquent que les deux types de sable ne montrent pas de gonflement significatif. L'indice des vides reste relativement stable, ce qui suggère que ces sables ne présentent pas de comportement expansif notable.

En résumé, les sédiments des ports de Zemmouri et de Sidi Fredj montrent une faible compressibilité et une faible susceptibilité au gonflement, caractéristiques typiques des sables. Ces résultats peuvent être utilisés pour évaluer la stabilité et la capacité de charge des sols de ces ports dans le cadre de projets d'infrastructure.

4 Les métaux lourds

Dans le contexte des sédiments de dragage, la présence de métaux lourds tels que le plomb, le cadmium, et le mercure est particulièrement préoccupante en raison de leurs effets néfastes sur l'environnement et la santé humaine. La caractérisation de ces métaux dans les sédiments est cruciale pour évaluer les risques associés à leur utilisation en génie civil. Dans notre étude, nous avons analysé les concentrations de **Cadmium (Cd)**, **Chrome (Cr)**, **Nickel (Ni)**, **Zinc (Zn)**, **Cuivre (Cu)**, **Plomb (Pb)** dans les échantillons de sédiments afin de garantir leur conformité avec les normes environnementales et de déterminer leur aptitude pour une valorisation sûre et efficace.

Tableau 28 : Résultats de la concentration des métaux lourds dans les deux ports ainsi leurs IC

Les métaux lourds	Port de Zemmouri		IC Zemmouri	Port de Sidi Fredj		IC Sidi Fredj
	Valeur (métal mg/l)	Valeur (métal $\mu\text{g/g}$)		Valeur (métal mg/l)	Valeur (métal $\mu\text{g/g}$)	
Cd	0,993	0,0993	0,050	0,999	0,0999	0,050
Cr	0,362	36,2	0,145	0,31	31	0,124
Ni	0,189	18,9	0,252	0,112	11,2	0,149
Zn	0,886	88,6	0,177	0,516	51,6	0,103
Cu	0,125	12,5	0,083	0,086	8,6	0,057
Pb	0,0796	7,96	0,032	0,0647	6,47	0,026

Interprétation des résultats :

1 Cadmium (Cd) :

- Les deux ports présentent une concentration de Cadmium de 0,05, ce qui est relativement bas et bien en dessous des seuils critiques selon les normes algériennes. Le Cadmium est un métal lourd toxique qui peut être préoccupant à des concentrations plus élevées.

2 Zinc (Zn) :

- Zemmouri montre une concentration de Zinc de 0,177, tandis que Sidi Fredj a une concentration plus basse de 0,103. Le Zinc peut provenir de diverses sources industrielles et urbaines, mais dans les deux cas, bien que Zemmouri dépasse légèrement Sidi Fredj, les concentrations restent en dessous des seuils de préoccupation élevée.

3 Cuivre (Cu) :

- Zemmouri présente une concentration de Cuivre de 0,083, comparé à 0,057 pour Sidi Fredj. Le Cuivre est souvent utilisé dans les peintures anti-fouling et peut provenir également de déchets industriels. Les deux valeurs restent faibles et en dessous des seuils critiques.

4 Plomb (Pb) :

- Zemmouri présente une concentration de Plomb de 0,032 et Sidi Fredj 0,026. Le Plomb est connu pour ses effets néfastes sur la santé humaine, mais à ces niveaux bas, il ne représente généralement pas de risque élevé.

5 Chrome (Cr) :

- Zemmouri présente une concentration de Chrome de 0,145, comparé à 0,124 pour Sidi Fredj. Le Chrome peut provenir de diverses sources industrielles telles que les rejets des tanneries, des industries métallurgiques, et des produits chimiques. Les deux valeurs restent faibles et bien en dessous des seuils critiques.

6 Nickel (Ni) :

- Zemmouri présente une concentration de Nickel de 0,252, comparé à 0,149 pour Sidi Fredj. Le Nickel est souvent associé aux activités industrielles et aux rejets urbains, ainsi qu'à l'érosion des roches. Bien que les valeurs restent faibles par rapport aux seuils critiques, Zemmouri montre une concentration de Nickel plus notable.

En résumé :

L'ensemble des résultats obtenus montrent que les sédiments dans ces ports ne sont pas fortement contaminés selon les normes algériennes, où un IC inférieur à la norme algérienne pour chaque métal ; ce qui est considéré comme une concentration normale suggérant une pollution modérée à légère. Cependant, le port de Zemmouri montre des concentrations légèrement plus élevées de Zn, Cu, Cr, et Ni par rapport à Sidi Fredj, ce qui pourrait indiquer une légère variation dans les sources de contamination

5 Conclusion

Les sédiments du port de Zemmouri sont bien adaptés aux travaux de génie civil grâce à leur granulométrie graduée et à leur composition principalement sableuse, idéale pour la fabrication de béton et l'utilisation en technique routière. Leur haute teneur en carbonate de calcium les rend également propices à des applications comme les matériaux cimentaires ou les amendements agricoles, avec une bonne capacité de drainage et une stabilité chimique favorable.

De même, les sédiments du port de Sidi Fredj se distinguent par leur distribution granulométrique étroite et stable, avec une prédominance de particules fines. Cette caractéristique les rend également très appropriés pour les projets de génie civil nécessitant une forte résistance mécanique. Leur faible teneur en matière organique, une conductivité modérée et un pH élevé contribuent à leur stabilité chimique et à leur résistance à la corrosion, renforçant ainsi leur utilité pour des infrastructures durables et robustes.

Chapitre 05 :
**Valorisation des produits
de dragages dans la
fabrication du béton et en
technique routière**

1 Introduction

Ce chapitre présente une étude théorique de la valorisation des sédiments de dragage dans la fabrication de béton et dans les techniques routières. Nous y détaillons les approches théoriques, les procédures envisagées et les essais nécessaires pour évaluer l'efficacité des sédiments comme matériau de construction. Bien que les limitations de temps nous aient empêchés de mener des expérimentations pratiques, nous avons basé notre analyse sur des études de cas existantes et des données de la littérature. Nous discutons des processus potentiels de préparation et de mélange des sédiments pour la production de béton, ainsi que des tests théoriques de résistance et de durabilité. De même, nous explorons les applications des sédiments dans la construction routière en tant que matériau de base et de sous-couche, en nous appuyant sur des modèles et des simulations. Cette approche théorique ouvre des perspectives sur l'utilisation durable des sédiments de dragage et leur intégration dans les pratiques du génie civil.

2 Valorisation des sédiments de dragage dans la fabrication du béton

2.1 Les constituants des bétons

La fabrication du béton à base de sédiments de dragage nécessite des ingrédients de base tels que les gravillons, le sable, le sédiment, le ciment, l'eau et les adjuvants.

Un mètre cube de béton durci pèse environ 2450 kg. Il contient en poids 13/16 de sable et de gravier, 2/16 de ciment et 1/16 d'eau. (HAMMOUCHE ; BOUBEKEUR, 2016)

- ❖ **Le ciment** : est le liant hydraulique garantissant un durcissement adapté à l'application, par excellence. Il est composé principalement de calcaire et de marne, qui sont brûlés et réduits avec d'autres adjuvants en une poudre fine. Ce mélange a la propriété de durcir si on ajoute de l'eau et de rester ensuite solide. (HAMMOUCHE ; BOUBEKEUR, 2016)
- ❖ **L'eau de gâchage** : indispensable au processus d'hydratation et à un bon compactage du béton, doit remplir des exigences spécifiques. Fondamentalement, l'eau météorique, l'eau souterraine et l'eau recyclée conviennent bien à cet usage. Les ressources en eau potable naturelle sont, elles, épargnées. (HAMMOUCHE ; BOUBEKEUR, 2016)

Les dosages de l'eau et du ciment sont deux facteurs importants. En effet, l'ouvrabilité et la résistance sont grandement affectées par ces deux paramètres. Plus le rapport eau/ciment est grand, plus l'ouvrabilité sera grande. En effet, plus il y a d'eau, plus le béton aura tendance à remplir aisément les formes. Le rapport des masses E/C « moyen » est normalement fixé à 0,55. C'est ce rapport qui est le plus souvent utilisé, car le béton obtenu dispose d'une assez bonne ouvrabilité, tout en ayant une bonne résistance.

Le phénomène de ressuage est dû à un rapport eau sur ciment trop élevé. Il se manifeste par l'apparition d'une flaque au-dessus du béton frais. Au niveau des granulats, on observe la présence d'eau à l'interface entre les granulats et la pâte de ciment. La résistance en est réduite, car l'eau s'évapore et il y a des vides entre le granulat et la pâte. (HAMMOUCHE ; BOUBEKEUR, 2016)

Les granulats : (sable et gravier) de granulométries diverses sont ajoutés en fonction des qualités requises du béton.

Sable normalisé pour béton :

Ces sables doivent contenir des grains fins, moyens, et gros. Les grains fins se disposent dans les intervalles entre les gros grains pour combler les vides. Ils jouent un rôle important : ils réduisent la variation volumique, les dosages se feront en poids plutôt qu'en volume comme c'est souvent le cas, afin d'éviter les erreurs de dosage, par suite de l'augmentation de volume de sable humide. (HAMMOUCHE ; BOUBEKEUR, 2016)

Les diamètres maximums des grains de ce sable sont :

- Extra-fins : jusqu'à 0,8 mm (en tamis), soit 1mm (en passoire).
- Fins : jusqu'à 1,6 mm.
- Moyens : jusqu'à 3,15 mm.
- Gros : jusqu'à 5 mm.

❖ **Les additifs** : du béton peuvent être ajoutés lors de la préparation du béton afin de satisfaire à des exigences spécifiques : une plus longue durée d'ouvrabilité, une consistance plus pâteuse ou plus souple, une étanchéité accrue à l'eau et aux gaz, une bonne résistance au gel et aux produits de dégel ainsi qu'une solidité renforcée. (HAMMOUCHE ; BOUBEKEUR, 2016)

Les ajouts que l'on utilise dans les bétons sont :

- Poudres fines pouzzolaniques (cendres, fumée de silice...);
- Fibres de différentes natures ;
- Colorants (naturels ou synthétiques) ;
- Polymères

❖ **Les adjuvants** : Sont des produits chimiques incorporés au béton en faible quantités afin d'en améliorer certaines propriétés. Les adjuvants les plus courants peuvent être organiques ou inorganiques. On distingue : (HAMMOUCHE ; BOUBEKEUR, 2016)

- Les accélérateurs ou retardateurs de prise.
- Les réducteurs d'eau (plastifiant) et hauts réducteurs d'eau (super plastifiants)
- Les hydrofuges.
- Les entraîneurs d'air.

Le dosage en adjuvants n'exécède pas 5% de la masse de ciment.

2.2 Etapes de fabrication du béton à partir d'un sédiment de dragage :

La méthode pratique permettant de déterminer la composition des bétons est la méthode de DREUX-GORISSE. (HAMMOUCHE ; BOUBEKEUR, 2016)

C'est une méthode simplifiée convient pour les ouvrages courants réalisés avec des moyens limités (dosage volumétrique), elle permet de déterminer les quantités optimales de matériaux (eau E, ciment C, sable S, gravillon g et gravier G) nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton conformément au cahier des charges.

Plusieurs étapes de calcul successives sont nécessaires à l'obtention de la formulation théorique de béton : (HAMMOUCHE ; BOUBEKEUR, 2016)

- Détermination du rapport C/E
- Détermination de C et E
- Détermination du mélange optimal à minimum de vides
- Détermination de la compacité du béton
- Détermination des masses de granulats

➤ **Dosage en ciment :**

Le dosage en ciment le plus courant pour un béton de qualité est généralement de 350 kg/m³.

Nous allons donc, adopter cette valeur que nos résultats couvrent les cas les plus courants de la pratique.

➤ **Dosage en eau :**

Le rapport d'eau sur ciment couramment utilisé est égale à 0.5 (E/C= 0.5), sachant que le dosage en ciment est de 350 kg/m³, donc on peut déterminer la quantité d'eau nécessaire pour 1 m³ de béton. (HAMMOUCHE ; BOUBEKEUR, 2016)

On a : C= 350 kg/m³ et E/C= 0.5

Donc : E= 175 kg/m

➤ **Dosage des granulats :**

Tracé de la courbe granulaire de référence (O, A, B), qui nous permettra de déterminer les différents pourcentages (%) des entrants dans la composition du béton (Pourcentage de gravier et du sable).

2.3 Essais sur le béton :

La qualité et les proportions des constituants du béton déterminent ses propriétés finales. Un bon mélange de béton doit être bien conçu en tenant compte des exigences spécifiques du projet, et les conditions environnementales, c'est pourquoi il est nécessaire d'effectuer les essais suivants sur le béton une fois conçu : (HAMMOUCHE ; BOUBEKEUR, 2016)

2.3.1 Essais sur les bétons frais :

- Essai de consistance (affaissement au cône d'Abrams) NF P18-451 : aussi connu sous le nom d'essai d'affaissement ou essai de cône d'Abrams, est une méthode standardisée pour évaluer la consistance du béton frais. La consistance est une mesure de la fluidité du béton, c'est-à-dire de sa capacité à s'écouler. Cet essai est largement utilisé pour vérifier la qualité et l'homogénéité du béton avant sa mise en œuvre.

Cet essai consiste à remplir un cône tronqué avec du béton frais, à le retirer ensuite et à mesurer la déformation (ou affaissement) du béton sous l'effet de son propre poids.

Résultats : Affaissement (Slump) : La distance mesurée est l'affaissement du béton et est exprimée en millimètres (mm).

Types de Consistance :

- Faible affaissement (0-25 mm) : Indique un béton très sec.
- Affaissement moyen (25-50 mm) : Indique un béton de consistance moyenne.
- Affaissement élevé (50-100 mm) : Indique un béton fluide.

- Affaissement très élevé (100-175 mm) : Indique un béton très fluide.
- Essai du contrôle du volume d'air entraîné (Aéromètre) : est une méthode utilisée pour déterminer la quantité d'air inclus dans le mélange de béton. Ce volume d'air est crucial pour la durabilité et la performance du béton, en particulier dans des environnements soumis à des cycles de gel-dégel. Cet essai consiste à mesurer le pourcentage d'air présent dans un échantillon de béton frais. Cet air est soit entraîné intentionnellement par l'ajout d'agents entraîneurs d'air, soit piégé lors du malaxage. (HAMMOUCHE ; BOUBEKEUR, 2016)

Le principe de l'essai repose sur la mesure de la pression appliquée à un échantillon de béton frais dans un récipient scellé (l'aéromètre). La différence de pression permet de déterminer le volume d'air présent dans le béton. L'essai est basé sur la loi de Boyle-Mariotte qui stipule que, à température constante, le volume d'un gaz est inversement proportionnel à la pression qu'il subit. (HAMMOUCHE ; BOUBEKEUR, 2016)

Interprétation des Résultats :

Volume d'air idéal : La quantité d'air entraîné dans le béton doit correspondre aux spécifications du projet. Typiquement, pour le béton utilisé dans des environnements soumis au gel-dégel, un volume d'air de 4 à 7 % est recommandé.

Conséquences des écarts :

- Un volume d'air trop faible peut entraîner une mauvaise résistance au gel-dégel.
- Un volume d'air trop élevé peut réduire la résistance mécanique du béton.
- Mesure des masses volumiques fraîches ρ : Cet essai permet de déterminer la masse volumique du béton à l'état frais, c'est-à-dire avant qu'il ne durcisse. La masse volumique fraîche du béton est définie comme le rapport de la masse du béton frais à son volume. Elle est exprimée en kilogrammes par mètre cube (kg/m^3). Cet essai est réalisé pour vérifier si le béton fabriqué correspond à la masse volumique prévue par la formulation.

Interprétation des Résultats :

Masse Volumique Attendue : La masse volumique du béton frais dépend des matériaux utilisés et de leur proportion. Elle est généralement comprise entre 2200 et 2500 kg/m^3 pour le béton standard.

Contrôle de Qualité : Si la masse volumique fraîche mesurée est significativement différente de celle attendue, cela peut indiquer des problèmes dans la proportion des constituants, le mélange ou la compaction du béton.

2.3.2 Essais sur les bétons durcis

- Mesure des masses volumiques : La mesure de la masse volumique du béton durci est essentielle pour évaluer la qualité du béton après son durcissement. Cet essai permet de déterminer la densité du béton à l'état durci, ce qui peut donner des indications sur sa porosité, sa compacité et sa résistance. (HAMMOUCHE ; BOUBEKEUR, 2016)

Interprétation des Résultats :

Masse Volumique Typique : La masse volumique du béton durci dépend des matériaux et des proportions utilisés. Pour du béton standard, elle varie généralement entre 2200 et 2500 kg/m^3 .

Qualité du Béton : Une masse volumique anormalement basse peut indiquer la présence de vides ou

une mauvaise compaction, tandis qu'une masse volumique élevée peut être due à un excès d'agrégats lourds ou d'eau.

- **Essai de compression** : C'est un test de résistance mécanique qui mesure la capacité du béton à résister à des forces de compression. Cet essai est crucial pour déterminer la résistance à la compression du béton, une propriété essentielle pour la conception et la sécurité des structures en béton. (HAMMOUCHE ; BOUBEKEUR, 2016)

Résultats et Interprétation :

Un béton de structure courante doit souvent avoir une résistance à la compression minimale de 25 MPa après 28 jours de cure.

2.3.3 **Essai de durabilité**

- **Attaque de sulfates** : L'attaque des sulfates est un processus de dégradation du béton causé par la réaction entre les sulfates présents dans l'environnement (sol, eau) et les composants hydratés du ciment. Cette réaction produit des composés expansifs, tels que l'ettringite, qui provoquent des fissures et la détérioration du béton. L'essai de durabilité contre l'attaque des sulfates évalue la résistance du béton à cette forme d'agression chimique. (HAMMOUCHE ; BOUBEKEUR, 2016)

Résultats et Interprétation :

Expansion Longitudinale :

Une faible expansion indique une bonne résistance à l'attaque des sulfates.

Une expansion importante (>0.05%) est généralement considérée comme un signe de détérioration.

- **Attaque des chlorures** : L'essai d'attaque des chlorures sur le béton durci vise à déterminer la capacité du béton à résister à la pénétration des ions chlorure. Cet essai permet de mesurer la profondeur de pénétration des chlorures et d'évaluer la durabilité du béton dans des environnements agressifs. L'essai le plus couramment utilisé est l'essai de migration des chlorures. (HAMMOUCHE ; BOUBEKEUR, 2016)

Interprétation des Résultats :

Faible Pénétration des Chlorures : Indique une bonne résistance du béton à l'attaque des chlorures, souvent associé à une faible porosité et une bonne qualité de l'enrobage.

Haute Pénétration des Chlorures : Indique une vulnérabilité du béton à la corrosion des armatures, nécessitant des mesures correctives telles que l'augmentation de l'enrobage, l'utilisation d'inhibiteurs de corrosion, ou l'emploi de mélanges de béton plus résistants. (HAMMOUCHE ; BOUBEKEUR, 2016)

- **Mesure de pH** : La mesure du pH sur le béton durci permet d'évaluer l'alcalinité de la matrice cimentaire. Le pH du béton frais est généralement très élevé (entre 12 et 13) en raison de la présence d'hydroxyde de calcium. Cependant, des facteurs comme la carbonatation peuvent réduire le pH du béton durci au fil du temps, ce qui peut influencer la durabilité et la protection de l'armature en acier.

Résultats :

- pH élevé (12-13) : Indique un béton sain et non carbonaté. Cela signifie que l'alcalinité est intacte, assurant une bonne protection contre la corrosion des armatures en acier.
 - pH modéré (9-11) : Peut indiquer une légère carbonatation. Il est conseillé de vérifier l'état des armatures si ce niveau est détecté.
 - pH faible (7-8) : Suggère une carbonatation avancée. La protection des armatures en acier est réduite, ce qui peut entraîner une corrosion accélérée.
-
- **Mesure de la conductivité électrique** : permet d'évaluer la capacité du béton à conduire l'électricité. Cette propriété est liée à la perméabilité du béton et à la présence de solutions ioniques dans ses pores, ce qui peut fournir des informations sur la durabilité et l'état de corrosion des armatures. Pour le béton durci, la conductivité dépend principalement de la porosité, de la teneur en eau et de la présence d'ions dans les pores du béton. (HAMMOUCHE ; BOUBEKEUR, 2016)

Résultats :

Faible Conductivité : Indique un béton dense et moins perméable, ce qui est généralement favorable pour la durabilité.

Haute Conductivité : Peut indiquer une plus grande porosité ou la présence d'ions dans les pores, ce qui peut suggérer une susceptibilité accrue à la corrosion des armatures et à une moindre durabilité.

- **Résistance à la compression** : est la capacité du béton durci à résister à des charges axiales compressives. Elle est généralement exprimée en mégapascals (MPa) et constitue une mesure clé de la qualité et de la durabilité du béton. Cet essai est l'un des plus couramment réalisés pour évaluer les performances du béton durci. (HAMMOUCHE ; BOUBEKEUR, 2016)

Interprétation des Résultats :

- Comparaison avec les Spécifications : Les résultats de la résistance à la compression sont comparés aux spécifications de conception du béton. Par exemple, un béton standard pour les structures peut avoir une résistance à la compression spécifiée de 25 MPa à 28 jours.
- Analyse des Écarts : Si la résistance mesurée est significativement inférieure à la résistance spécifiée, cela peut indiquer des problèmes dans la qualité des matériaux, le processus de mélange, de cure, ou des erreurs dans la préparation des échantillons.
- Utilisation Pratique : Les résultats de l'essai de résistance à la compression sont utilisés pour valider les mélanges de béton avant leur utilisation en chantier, pour contrôler la qualité des ouvrages réalisés et pour évaluer la durabilité et la sécurité des structures en béton au fil du temps.

3 Valorisation de sédiments de dragage en technique routière :

La démarche suivie pour valoriser les sédiments en technique routière est illustrée sur la Figure. L'étude du compactage permettra de déterminer les caractéristiques optimales (WOPM, pOPM) du sédiment par l'essai Proctor modifié et l'aptitude de celui-ci à supporter la circulation des engins à travers l'Indice Portant Immédiat (IPI). Dans une seconde partie, la formulation des matériaux routiers est abordée en choisissant des produits de traitement tels que les liants hydrauliques et/ou des correcteurs granulaires. Les caractéristiques optimales des formulations sont déterminées sur la base d'essais de compacité. Cette étape est suivie de l'étude du comportement mécanique et de l'impact environnemental des formulations. Ainsi, l'aptitude des matériaux formulés à être utilisés en couches routières peut être vérifiée à travers cette étude. (AZRAR, 2014)

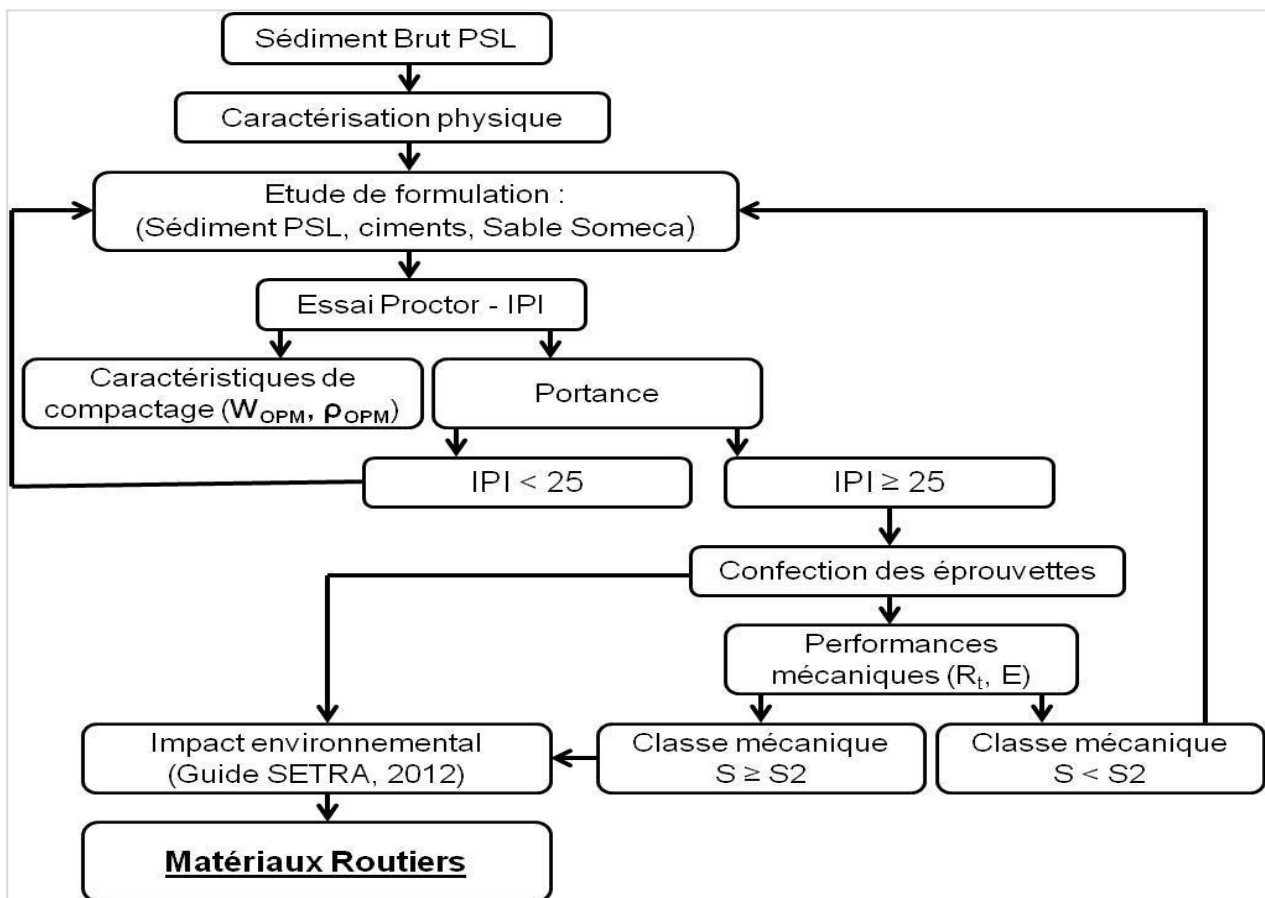


Figure 41 : Méthodologie adoptée pour la valorisation des sédiments (DIA, 2013)

3.1 Préparation des sédiments :

La préparation des sédiments sableux pour leur utilisation en technique routière commence par une évaluation de leur teneur en eau, qui doit être ajustée pour atteindre la teneur optimale de compactage. D'abord, les sédiments sont échantillonnés et testés pour déterminer leur teneur initiale en eau. Si la teneur en eau est trop élevée, les sédiments doivent être séchés par aération naturelle ou par l'utilisation de dispositifs de séchage mécanique. À l'inverse, si la teneur en eau est insuffisante, de l'eau est ajoutée progressivement en mélangeant uniformément jusqu'à atteindre la

teneur optimale. Cette préparation garantit une meilleure compaction et une meilleure performance mécanique une fois les liants hydrauliques ajoutés et le mélange mis en œuvre. (AZRAR, 2014)

La caractérisation physique des sédiments a montré que leur teneur en eau n'est pas très élevée.

3.2 Choix des liants hydrauliques :

Liant hydraulique :

Le choix du liant hydraulique pour le traitement du sol est lié d'une part au critère technique en fonction de la nature et des propriétés du matériau à traiter afin de choisir le liant le plus adapté permettant d'obtenir les performances mécaniques exigées. Deux paramètres primordiaux conditionnent le choix de type de traitement : la fraction argileuse et la granulométrie car la réactivité des sols dépend de ces deux paramètres. Le guide de traitement des sols GTS (GTS, 2000) recommande, pour les sols sableux et/ou graveleux dont la VBS est inférieure à 0,5, un traitement au ciment. (AZRAR, 2014)

Pour les sédiments sableux, les liants hydrauliques recommandés sont généralement les suivants selon l'étude d'AZRAR 2014 :

Ciment Cibelcor

Le ciment Cibelcor utilisé est de type CEM I 42,5 R HSR LA. Ce ciment est obtenu par broyage simultané d'un minimum de 95 % de clinker Portland et d'une faible quantité de sulfate de calcium. Il est utilisé pour ses propriétés de résistance aux eaux agressives et sa bonne tenue au gel. Ce ciment possède une haute résistance aux sulfates grâce à sa faible teneur en aluminat tricalcique, Il a été utilisé avec succès dans plusieurs travaux scientifiques de l'école des mines de Douai portant sur le traitement des sédiments de dragage portuaire (Wang, 2011 ; Miraoui, 2010 ; Tran Ngoc, 2009 et Dubois 2006) ce qui explique son choix.

Tableau 29 : Caractéristiques du ciment Cibelcor

Caractérisation physique				Masse volumique (g/cm ³)				Surface massique (cm ² /g)		
				3,17				3400		
Caractéristiques chimiques (%)										
PF	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Cl ⁻	Na ₂ O	C ₃ A
1	21,40	3,30	4,00	63,30	2,40	2,80	0,57	0,03	0,53	2,00

Ciment Vicat

Le ciment Vicat utilisé dans cette étude est de type CEM III/B 42,5 N-LH/SR CE PM NF de l'usine Fos Sur Mer au Sud de la France. C'est un ciment de haut fourneau composé au minimum de 20 % de clinker et au maximum de 80 % de laitier et d'un ajout de sulfate de calcium. Il est utilisé pour ses propriétés de résistance aux eaux agressives et sa bonne tenue au gel. Ce ciment est moins cher

et adapté à la stabilisation des sols.

Tableau 30 : Caractéristiques du ciment Vicat

				Masse volumique (g/cm ³)	Surface massique (cm ² /g)						
Caractérisation physique				2,99	5390						
Caractéristiques chimiques (%)											
PF	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Cl ⁻	Na ₂ O	C ₃ A	
0,88	-	-	-	-	-	2,72	-	0,05	0,34	7,80	

Dosage en liants hydrauliques :

Des échantillons de sédiments sont mélangés avec différents pourcentages de liants (comme le ciment Cibelcor ou Vicat). Ces essais permettent d'identifier le dosage optimal. Typiquement, les dosages peuvent varier entre 3% et 8% du poids des sédiments, mais cela dépend des résultats des tests et des exigences de la construction routière. (AZRAR, 2014)

Le guide de traitement des sols (GTS, 2000) recommande, pour un matériau de type B2, un dosage en liant hydraulique de l'ordre de 6 %. Ce pourcentage est calculé par rapport à la masse sèche totale selon l'étude d'AZRAR 2014.

3.3 Evolution du Ph et conductivité électrique en fonction du dosage en ciment

Nous avons réalisé des mélanges eau/sédiment/ciment pour examiner l'effet du ciment Cibelcor sur le pH et la conductivité électrique. Pour déterminer la quantité de ciment nécessaire pour atteindre des pH alcalins, des essais ont été réalisés en ajoutant des pourcentages croissants de ciment Cibelcor à de l'eau déminéralisée et à des mélanges eau/sédiment dans un rapport liquide/solide (L/S) de 5 (50 ml d'eau pour 10 g de sédiments). Les résultats montrent que pour un rapport L/S = 5, le pH des mélanges se stabilise autour de 12 lorsque le dosage en ciment Cibelcor dépasse 3 %. En revanche, lorsque le ciment Cibelcor est mélangé uniquement avec de l'eau déminéralisée (sans sédiments), une faible quantité de 0,5 % de ciment est suffisante pour atteindre un pH stable. En conclusion, un dosage de 6 % de ciment Cibelcor est suffisant pour obtenir un pH alcalin en présence de sédiments. De plus, l'ajout de ciment augmente la conductivité électrique, particulièrement en présence de sédiments, en raison de la solubilisation des composés inorganiques qui libèrent des ions dans la solution. (AZRAR, 2014)

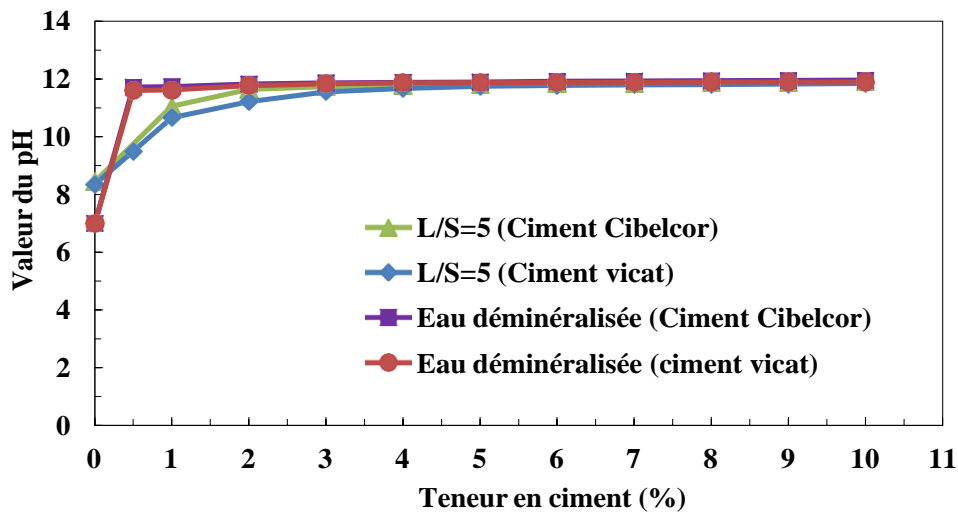


Figure 42 : Courbe montrant l'évolution du Ph en fonction du dosage en ciment

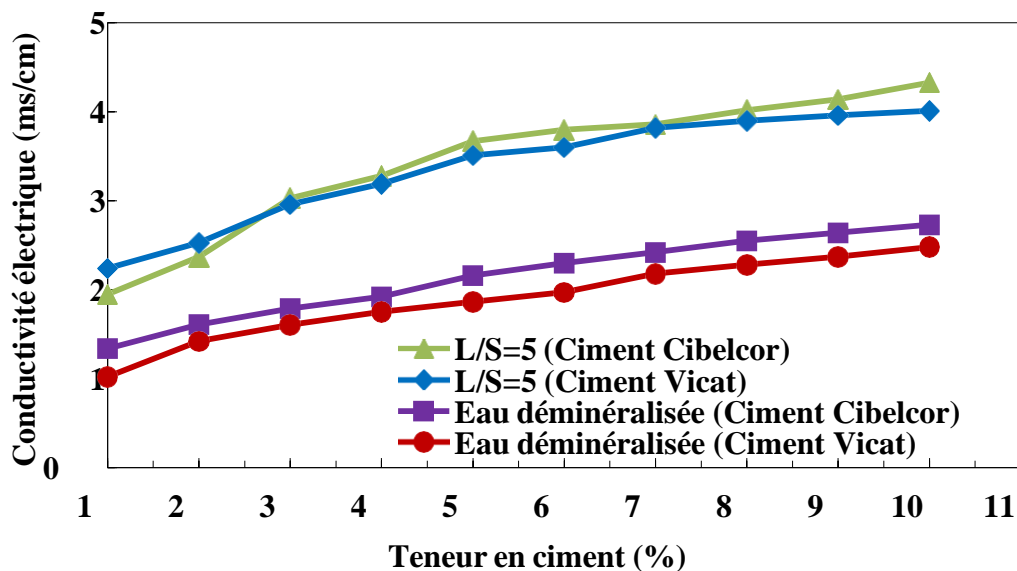


Figure 43 : Courbe montrant l'évolution De la conductivité électrique en fonction du dosage en ciment

3.4 Etude de comportement mécanique des sédiments traités aux ciments :

L'utilisation des sédiments en technique routière nécessite de vérifier plusieurs critères à court et long terme :

- Des essais de poinçonnement pour évaluer l'Indice de Portance Immédiate (IPI) [NF P94-078, 1997 ; NF P94-093, 1999] ;
- Des essais de compression uniaxiale pour apprécier les cinétiques de prise et déterminer l'âge approprié pour la mise en circulation de la couche traitée [NF P98-232-1, 1991], ainsi que pour la détermination des modules élastiques en compression ;

- Des essais de traction indirecte pour évaluer les résistances à la traction et les modules élastiques en traction (R_t et E_t) [NF P98-232-3].

3.5 Paramètre de compactage et de portance des sédiments :

Le compactage des sédiments a été effectué à l'aide de l'essai Proctor. Il existe deux types d'essai Proctor à deux énergies différentes de compactage. L'essai Proctor normal et modifié. Pour la construction des remblais, c'est l'essai Proctor normal qui est utilisé alors que pour la réalisation des couches de chaussée, le compactage est effectué à l'aide de l'essai Proctor modifié utilisant une énergie plus grande. L'objectif de cette étude est d'évaluer l'aptitude des sédiments à être utilisés en couches d'assises de chaussée. L'essai Proctor modifié a donc été choisi comme test de compactage selon la norme NF P-94 093. (DIA, 2013)

Cet essai consiste à humidifier un matériau à différentes teneurs en eau et procéder à son compactage pour chacune des teneurs en eau. Ensuite la masse volumique sèche du matériau est déterminée pour les différentes teneurs en eau. La courbe Proctor est obtenue en traçant la variation de la masse volumique sèche en fonction de la teneur en eau. D'une façon générale, cette courbe présente une teneur en eau particulière pour laquelle la densité sèche du matériau est maximale. Ces deux valeurs sont appelées caractéristiques optimales de compactage Proctor. Des mesures de poinçonnement sont effectuées sur les éprouvettes compactées afin d'estimer la capacité portante des matériaux. L'indice portant immédiat (IPI) à tenir en compte correspond à celui déterminé pour les caractéristiques optimales. Ce paramètre permet d'estimer l'aptitude d'un matériau à supporter la circulation des engins de terrassement. Pour l'essai Proctor modifié une énergie conventionnelle comprise entre 2,56 et 2,8 MJ/m³ est utilisée. Cette énergie se calcule selon l'équation suivante : (DIA, 2013)

$$E = \frac{m \times h \times n_1 \times n_2 \times g}{V}$$

Avec E l'énergie spécifique, m la masse de la dame, h la hauteur de la dame, n_1 le nombre de coups par couche (56 coups), n_2 le nombre de couche (5 couches), g la pesanteur et V le volume du moule. La masse volumique sèche est obtenue à partir de la relation suivante :

$$\gamma_d = \frac{P_2 - P_1}{1 + w \cdot V_{\text{moule}}}$$

Avec

P_2 : poids du moule avec le matériau arasé et compacté ; P_1 : poids du moule vide w : teneur en eau et V_{moule} : volume du moule.

L'indice portant immédiat (IPI) a été déterminé à partir de la courbe de l'effort de pénétration appliqué par poinçonnement sur le sédiment compacté dans le moule en fonction du déplacement. La valeur de l'IPI est définie conventionnellement selon la formule suivante :

$$IPI = \max \text{ de } \frac{\text{Effort de pénétration à 2,5 (KN)}}{13,35} \times 100; \frac{\text{Effort de pénétration à 5 (KN)}}{19,93} \times 100$$

La préparation des sédiments à différentes teneur en eau a été effectuée à l'aide d'un malaxeur à cisaillement rapide afin de bien homogénéiser les sédiments et l'eau. Le mélange ainsi obtenu est soigneusement fermé hermétiquement dans un sac.

3.6 Confection des éprouvettes :

Pour la mise en œuvre d'une couche de fondation sur un chantier, le Guide des Terrassements Routiers (GTR, 2000) recommande d'atteindre une qualité de compactage de niveau « Q2 ». Cela signifie que, à la teneur en eau optimale déterminée par l'essai Proctor modifié, la densité moyenne en haut de couche doit être au minimum de 97 % de la densité sèche optimale Proctor modifié (pdOPM), et celle en fond de couche doit être de 95 % pdOPM. (AZRAR, 2014)

Les éprouvettes utilisées pour les essais mécaniques sont confectionnées selon la norme NF P98-114-3. Elles mesurent 10 cm de longueur et 5 cm de diamètre, et conviennent aux matériaux dont la taille maximale est inférieure à 6,3 mm. Le protocole de confection des éprouvettes est réalisé par compression statique, conformément à la norme NF P98-230-2, qui décrit également les moules utilisés et les modalités de conservation normale des éprouvettes

En ce qui concerne la confection des éprouvettes, la quantité de matériau humide de chaque éprouvette est calculée d'une part, selon l'équation (1) pour les essais de la compression uniaxiale et d'autre part, selon l'équation (2) pour les essais de la traction indirecte, en utilisant les caractéristiques de compactage. Les éprouvettes confectionnées sont conservées dans des boîtes en plastique hermétique à 20 °C.

$$M = V \times (1 + w_{OPM}) \times 0,97 \times \rho_{dOPM} \quad (1)$$

100

$$M = V \times (1 + w_{OPM}) \times 0,95 \times \rho_{dOPM} \quad (2)$$

100

Avec : M : masse théorique de l'éprouvette à la confection (g) ;

ρ_{dOPM} : masse volumique sèche à l'Optimum Proctor Modifié ; V : volume de l'éprouvette (cm³) ;

WOPM : teneur en eau à l'Optimum Proctor Modifié (%).



Figure 44 : Exemple d'éprouvette après démoulages (DIA, 2013)

3.7 Etude de la performance mécanique

La performance mécanique des mélanges élaborés est évaluée au travers du module d'élasticité et de la résistance en traction. Les résultats obtenus sont ensuite positionnés sur l'abaque de classification selon la norme NF P 98 114-3 pour vérifier la possibilité d'utilisation en couche de fondation des mélanges élaborés. Il est important de noter que les valeurs de référence pour la classification des matériaux sont définies après 360 jours de maturation. Lorsque la période d'étude au laboratoire ne permet pas d'effectuer la mesure à 360 jours, la norme NF P 98 114-2 propose une corrélation, dépendant du type de liant, entre les résultats à 28, 60 et 90 jours de cure normale à 20 °C et ceux de 360 jours. Les résultats obtenus sur les mélanges élaborés sont estimés à 360 jours en utilisant des coefficients empiriques donnés dans les équations : (AZRAR, 2014)

$$\frac{R_{t28\text{jours}}}{R_{t360\text{jours}}} = 0,6 \qquad \frac{E_{t28\text{jours}}}{E_{t360\text{jours}}} = 0,65$$

Pour chaque mélange élaboré, au moins trois éprouvettes cylindriques d'élancement 2 sont utilisées pour déterminer la résistance à la traction et le module d'élasticité. (AZRAR, 2014)

Conclusion :

La présente étude a exploré la valorisation des sédiments de dragage des ports de Sidi Fredj et de Zemmouri, en examinant leur potentiel d'application dans les techniques routières et la fabrication de béton. Grâce à des analyses physico-chimiques approfondies et des essais mécaniques rigoureux, nous avons pu évaluer la composition et les propriétés des sédiments, ainsi que leur compatibilité avec les normes et exigences du génie civil.

Les principaux résultats de notre étude indiquent que les sédiments de dragage des deux ports présentent des caractéristiques intéressantes pour une utilisation dans les techniques routières. Les analyses physico-chimiques ont révélé que, malgré la présence de certains métaux lourds, les concentrations restent dans des limites acceptables après traitement, permettant ainsi leur intégration sécurisée dans les matériaux de construction routière. Les essais mécaniques ont démontré que les sédiments traités peuvent contribuer positivement aux propriétés mécaniques des matériaux routiers, en offrant une bonne résistance et durabilité.

En ce qui concerne la fabrication de béton, les résultats montrent que les sédiments de dragage peuvent être incorporés comme composant partiel dans les mélanges de béton. Les tests ont révélé que les mélanges de béton contenant des sédiments, après un traitement adéquat, atteignent des performances satisfaisantes en termes de résistance à la compression et de durabilité. Ainsi, les sédiments de dragage peuvent être utilisés pour produire des bétons de qualité, tout en réduisant la dépendance aux matériaux traditionnels.

La valorisation des sédiments de dragage dans les techniques routières et la fabrication de béton présente plusieurs avantages significatifs. Elle permet non seulement de résoudre les problèmes de gestion et de stockage des sédiments, mais aussi de contribuer à la conservation des ressources naturelles en substituant partiellement les matériaux conventionnels par des matériaux recyclés. Cette approche s'inscrit dans une perspective de développement durable, en favorisant une économie circulaire et en minimisant les impacts environnementaux liés à la gestion des déchets de dragage.

En conclusion, cette étude démontre que les sédiments de dragage des ports de Sidi Fredj et de Zemmouri peuvent être efficacement valorisés dans les techniques routières et la fabrication de béton, après un traitement approprié. Les résultats obtenus encouragent une intégration accrue de ces matériaux dans les projets de génie civil, offrant ainsi une solution viable et écologique pour la gestion des sédiments de dragage en Algérie. Des recherches supplémentaires et des projets pilotes seront nécessaires pour affiner les techniques de traitement et optimiser les mélanges, afin de maximiser les bénéfices économiques et environnementaux de cette approche innovante.

Références bibliographiques :

- ALZIEU, C. (1999).** Dragages et environnement marin. France : Ifremer, P.225
- AMARNI, N. (2014).** Etude géotechnique pour la consolidation d'un terre-plein littoral au port d'Alger, P. 69
- AZRAR, H. (2014).** Contribution à la valorisation des sédiments de dragage portuaire : Technique routière, béton et granulats artificiels. Génie civil. France : Université de Lille 1, P. 224
- AZRARAK, R., & BEGGAR, H. (s. d.). (2013).** Le port de Sidi Fredj : Quantité et devenir des sédiments de dragage. Aménagement du littoral. Delly Brahim : ENSSMAL, P. 104
- BARENDS, F. B. J. (Éd.). (2011).** Introduction to soft soil Geotechnique Content, context and application. IOS Press. Amsterdam : IOS Press, P. 365
- BELAID, I., & BENHADDOU, A. (2018).** Utilisation de déchets de poudre de verre comme un remplaçant partiel du ciment pour la préparation du béton et sable de dune sous un climat aride. Génie civil. Ouargla : Université Kasdi Merbah Ouargla Faculté Des Sciences Applique, P. 68
- BELAYALI, F. (2021).** Valorisation des sédiments de dragage dans les asphaltes d'étanchéité. Génie civil. France : Université De Lille, P. 189
- BOUYACOUB, N., & DJILALI, H. (2021).** Evaluation de la qualité des sédiments superficiels du port de Sidi Fredj en vue d'une opération de dragage. Ingénierie de l'environnement marin et côtier. Delly Brahim : ENSSMAL, P.102
- BRAY, R. N. (Éd.). (2008).** Environmental Aspects of Dredging. London: CRC Press, P. 396
- CHU, D. C. (2021).** Valorisation des sédiments de dragage dans l'industrie cimentaire, P. 240
- DIA, M. (2013).** Traitement et Valorisation de Sédiments de Dragage Phosphatés en Technique Routière. Génie civil et environnement. France : Université d'Artois, P. 169
- ENNAHAL, I. (s. d.).** Valorisation des sédiments de dragage dans des matrices polymères. Génie civil. France : Université de Lille 1, P. 225
- FIALA, M. (2020).** Études Physico-Chimiques Des Eaux Et Sédiments De L'étang Bages-Sigean (Aude), P. 31
- FRAR, I., ALLAL, L. B., AMMARI, M., & AZMANI, A. (2014).** Utilisation des sédiments de dragage portuaire comme matière première dans la fabrication des briques en terre cuite (Utilization of dredged port sediments as raw material in production of fired brick), P. 10
- HAMMOUCHE, N., & BOUBEKEUR, L. (2016).** Valorisation des boues de dragage dans les bétons et mortiers. Université Abderrahmane Mira de Bejaia Faculté de la Technologie. Matériaux et structure. Bejaia : Université Abderrahmane Mira de Bejaia, P. 193

- KHEZAMI, I. (2014).** Approche expérimentale de valorisation des sédiments de dragage dans des applications de Génie Civil. Génie civil et environnement. France : Université Lille 1, P. 227
- MKAHAL, Z. (s. d.).** Co-valorisation des matériaux alternatifs en technique routière : Faisabilité technique et environnementale des usages en remblais et liants hydrauliques routiers, P. 205
- MOHAMEDOU, B. (2022).** Valorisation de sédiments de dragage dans la fabrication de blocs de terre comprimée stabilisée par des liants géopolymères. Génie civil. France : CY Cergy Paris Université, P.143
- OUANDJELI, N., & SENOUCI, R. (2016).** Etude du comportement physique et mécanique des sédiments de dragage pour leur valorisation en techniques routières « Cas du port de Sidi Fredj ». Delly Brahim : ENSSMAL, P.112
- Service d'études sur les transports, les routes et leurs Service d'études sur les transports, les routes et leurs. (2012).** Acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs en technique routière, P. 50
- WILLARD, H. H., & YOUNG, P. (1928).** Ceric Sulfate as A Volumetric Oxidizing Agent. Iii. The Titration of Iodide. Vol. 50, n° 5, P.1371
- SAUSSAYE, L., & all. (2012).** Evaluation environnementale de la réutilisation de sédiments de dragage en tant que matériau alternatif, P. 9

ANNEXE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر و تهيئة الساحل
Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du
Littoral

Business Model Canvas (BMC)

Option : Gestion et Protection du Littoral

Thème :

**Entreprise de Construction et Entretien des Routes
ECER**

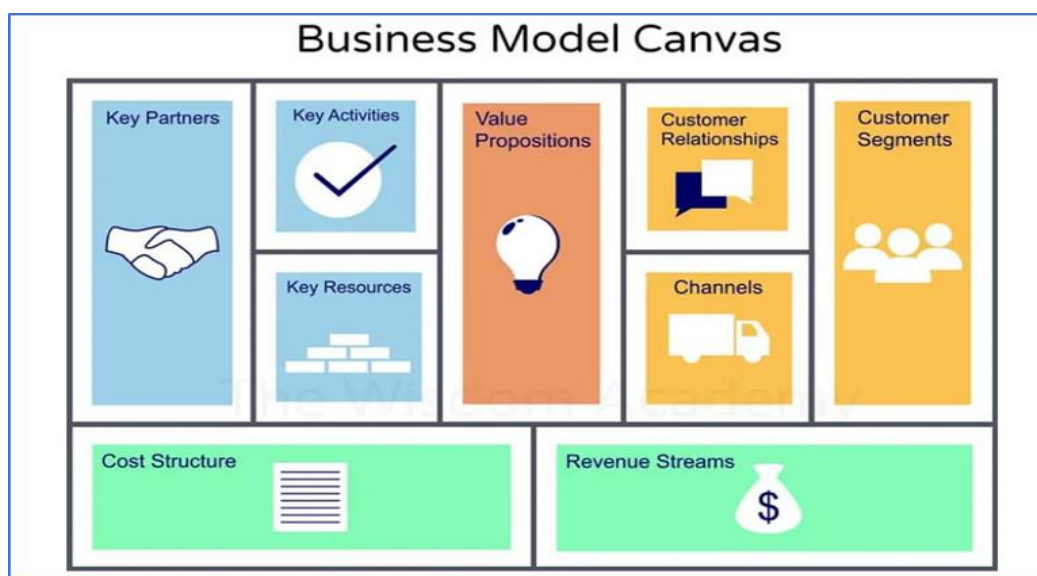
Présenté par :

- ❖ DJAOU Taoues
- ❖ BOUKHADRA Chaima

Business Model Canvas

Le Business Model Canvas (BMC) est un outil essentiel pour comprendre et communiquer de manière structurée la logique fondamentale des entreprises. Il met en évidence les composantes clés du modèle économique, incitant à une réflexion approfondie sur les parties prenantes, les revenus, les coûts, les avantages concurrentiels et les opportunités de croissance. Utilisé dans la planification stratégique et le développement de nouveaux produits et services, le BMC permet une analyse complète et cohérente.

Dans cette section de notre mémoire, nous détaillons le BMC de notre startup, en décrivant toutes ses composantes. Cet outil stratégique de gestion se présente sous la forme d'un cadre visuel comprenant neuf éléments clés, comme illustré à la figure 1.



1 Introduction générale :

En Algérie, la gestion durable des ressources naturelles et la recherche de solutions innovantes pour le développement infrastructurel sont des priorités stratégiques. Parmi les défis environnementaux et économiques, la valorisation des sédiments de dragage émerge comme une opportunité prometteuse. Ces sédiments, accumulés dans les fonds marins, les rivières et les lacs en raison des activités de dragage nécessaires à la navigation et à la gestion des ressources en eau, représentent souvent un problème de gestion coûteux et complexe.

La valorisation des sédiments de dragage dans le génie civil offre une double solution : d'une part, elle permet de transformer ces matériaux en ressources utiles pour la construction, réduisant ainsi la nécessité d'extraction de nouvelles matières premières ; d'autre part, elle contribue à la réduction des impacts environnementaux liés à l'accumulation des sédiments et aux techniques de gestion traditionnelles. En particulier, l'utilisation des sédiments de dragage pour la fabrication de

béton et les techniques routières représente une voie innovante et durable pour répondre aux besoins croissants en infrastructures tout en soutenant une économie circulaire.

Ce projet de micro-entreprise vise à exploiter ces potentialités en Algérie, en développant des procédés de traitement et de stabilisation des sédiments pour les transformer en matériaux de construction performants. En mettant l'accent sur l'innovation, la durabilité et la réduction des coûts, cette initiative ambitionne de devenir un acteur clé dans le secteur du génie civil, tout en contribuant à la protection de l'environnement et à la croissance économique locale.

2 Premier axe : Présentation du projet

2.1 L'idée de projet :

Notre startup, spécialisée dans le génie civil, se consacre à la valorisation des sédiments de dragage pour divers projets de construction et d'infrastructure en Algérie. Face aux défis environnementaux posés par ces sédiments, souvent considérés comme des déchets, nous avons identifié leur potentiel en tant que matériau de construction durable. Nous nous concentrons sur la collecte, le traitement et la transformation des sédiments de dragage en produits utilisables dans le génie civil, notamment pour des applications routières. Notre démarche inclut le développement de procédés de traitement innovants afin de garantir la qualité et la sécurité des produits finaux. Nous envisageons d'implanter nos installations de traitement à proximité des principales zones portuaires algériennes. Cette localisation stratégique permettra de collecter les sédiments disponibles en abondance, réduisant ainsi les coûts de transport et maximisant l'efficacité opérationnelle. Nous collaborons également avec des partenaires locaux et des autorités environnementales pour garantir la conformité réglementaire et l'acceptation sociale de nos activités.

2.2 Les valeurs proposées :

Les valeurs proposées pour la valorisation des sédiments de dragage dans le génie civil en Algérie sont les suivantes :

- **Modernité** : Utilisation innovante des sédiments de dragage, créant une nouvelle solution pour des projets de génie civil où il n'existait auparavant aucune offre similaire.
- **Réduction des risques** : Réduction des risques environnementaux liés à l'accumulation de sédiments dans les cours d'eau, tout en sécurisant les clients par l'utilisation de matériaux éprouvés et conformes aux normes.
- **Accessibilité** : Mise à disposition de matériaux de construction durables aux entreprises locales qui n'y avaient pas accès auparavant, en valorisant une ressource locale abondante.
- **Facilité d'utilisation** : Transformation des sédiments de dragage en produits faciles et simples à utiliser, réduisant ainsi la complexité des projets de construction et améliorant l'efficacité sur le chantier.
- **Réduction des coûts** : Réduction des coûts de production grâce à l'utilisation de sédiments locaux, diminuant ainsi les dépenses liées à l'importation de matériaux de construction.

Ces valeurs montrent comment la valorisation des sédiments de dragage peut apporter des solutions novatrices, performantes et durables dans le domaine du génie civil en Algérie, tout en répondant aux besoins spécifiques des clients et en contribuant à la protection de l'environnement.

2.3 L'équipe de travail :

1. BOUKHADRA Chaima : En tant que responsable de la gestion des matériaux nécessaires, notamment les sédiments de dragage, et des ressources humaines, supervise l'approvisionnement en matériaux, assure leur gestion efficace et responsable, tout en prenant en charge les aspects liés aux ressources humaines, y compris le recrutement et le bien-être des employés.
2. DJAOU Taoues : En tant que responsable des relations extérieures, dirige le développement des partenariats stratégiques, gère les relations avec les parties prenantes et assure la communication externe, tout en supervisant le suivi des travaux sur le terrain pour notre projet
3. ABOU SKHAIL Ahmed : En tant que responsable des finances, est chargé de la gestion prudente des finances de l'entreprise, y compris la planification budgétaire, le suivi des flux de trésorerie, et la gestion des investissements pour assurer la viabilité financière à long terme de notre projet.

Organisation du travail :

- Nous répartissons les tâches et les responsabilités en fonction de nos domaines d'expertise respectifs, en nous appuyant sur nos forces individuelles pour maximiser l'efficacité du projet.
- Nous entretenons une communication ouverte et régulière, discutant des progrès du projet, des défis rencontrés et des décisions à prendre.
- Les échanges d'idées et les prises de décision se font de manière collaborative, en tirant parti de nos perspectives complémentaires pour parvenir à des solutions efficaces.

2.4 Objectifs du projet :

Les objectifs de notre projet d'entreprise dans la valorisation des sédiments de dragage en techniques routières en Algérie, sont définis comme suit :

1. Court terme (1-2 ans) :

- Atteindre une part de marché de 10% dans la construction et l'entretien des routes de façon écologique en Algérie.
- Établir des partenariats avec au moins 3 entreprises de construction pour l'utilisation des matériaux issus des sédiments de dragage dans les projets routiers.
- Augmenter la notoriété de l'entreprise en participant à des salons et conférences sur le génie civil et l'environnement.

2. Moyen terme (3-5 ans) :







- Devenir l'un des principaux fournisseurs de matériaux de construction écologique en Algérie, avec une part de marché de 25% dans le secteur du béton et des techniques routières.
- Diversifier les applications des sédiments de dragage en développant de nouveaux produits pour le secteur de la construction.
- Renforcer la capacité de production et investir dans des technologies de traitement plus avancées pour améliorer la qualité et l'efficacité des produits.

3. Long terme (6-10 ans):

- Atteindre une part de marché de 40% dans le secteur de la construction écologique en Algérie.
- Étendre les activités à l'international, en exportant les produits à base de sédiments de dragage vers d'autres pays d'Afrique du Nord.
- Contribuer de manière significative à la réduction des déchets de dragage en Algérie, en valorisant plus de 80% des sédiments disponibles.

Ces objectifs démontrent une vision claire et ambitieuse pour notre micro-entreprise, axée sur l'innovation, la durabilité et la compétitivité, avec des plans bien définis pour capturer et augmenter la part de marché à court, moyen et long terme.

2.5 Calendrier de réalisation du projet :

		1	2	3	4	5	6	7
1	 Études préalables : choix de l'implantation de l'unité de production, préparation des documents nécessaires	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2	 Commande des équipements		✓					
3	 Location d'un siège de production	✓						
4	 Installation des équipements		✓					
5	 Achat de matières premières		✓	✓	✓	✓	✓	✓
6	 Réalisation du prototype				✓	✓	✓	✓

3 Deuxième axe : Aspects innovants

3.1 Les domaines d'innovation :

Notre projet se distingue par son innovation dans le domaine de la construction et de l'entretien routier, en utilisant des sédiments de dragage comme ressource clé. Nous innovons en transformant ces matériaux jusqu'ici considérés comme des déchets en une ressource précieuse et durable pour le génie civil.

Cette approche novatrice permet non seulement de résoudre un problème de gestion des déchets, mais aussi de promouvoir la durabilité et l'efficacité dans la construction et l'entretien des

infrastructures routières en Algérie.

En outre, notre initiative crée des opportunités d'emploi locales, contribuant ainsi au développement économique et social de la région.

4 Troisième axe : Analyse stratégique du marché

4.1 Le segment du marché

Marché potentiel : Nous cherchons à établir des partenariats stratégiques avec :

- Entreprises de construction et d'ingénierie routière locales.
- Autorités gouvernementales responsables des infrastructures routières et de l'environnement.
- Universités et instituts de recherche pour le développement technologique et l'innovation.
- Fournisseurs de matériaux de construction et d'équipements pour le génie civil.
- Organisations internationales spécialisées dans la durabilité environnementale et les technologies innovantes pour le génie civil

Marché cible (le segment) Notre marché cible comprend :

- Ministères des Travaux Publics et des Transports pour la réalisation d'infrastructures routières durables.
- Entrepreneurs en construction impliqués dans des projets d'infrastructure routière.
- Municipalités et collectivités locales pour l'aménagement urbain et rural.
- Développeurs immobiliers cherchant des solutions durables pour l'accès aux nouveaux projets.
- Entreprises de transport et de logistique nécessitant des routes sûres et efficaces..

4.2 Mesure de l'intensité de la concurrence

Parmi les entreprises majeures opérant dans le domaine de la valorisation des sédiments de dragage en Algérie, on trouve :

- Eco-Génie Civil Algérien (EGCA)
 - Part de marché : 35%
 - Forces : Expertise technique avancée, collaborations avec des institutions de recherche, respect des normes environnementales.
 - Faiblesses : Dépendance aux financements publics, capacités de production limitées.
- DragaTech Algérie
 - Part de marché : 25%
 - Forces : Technologie innovante, forte présence sur le marché régional, partenariats stratégiques.
 - Faiblesses : Réglementations environnementales strictes, concurrence étrangère.

4.3 La stratégie marketing

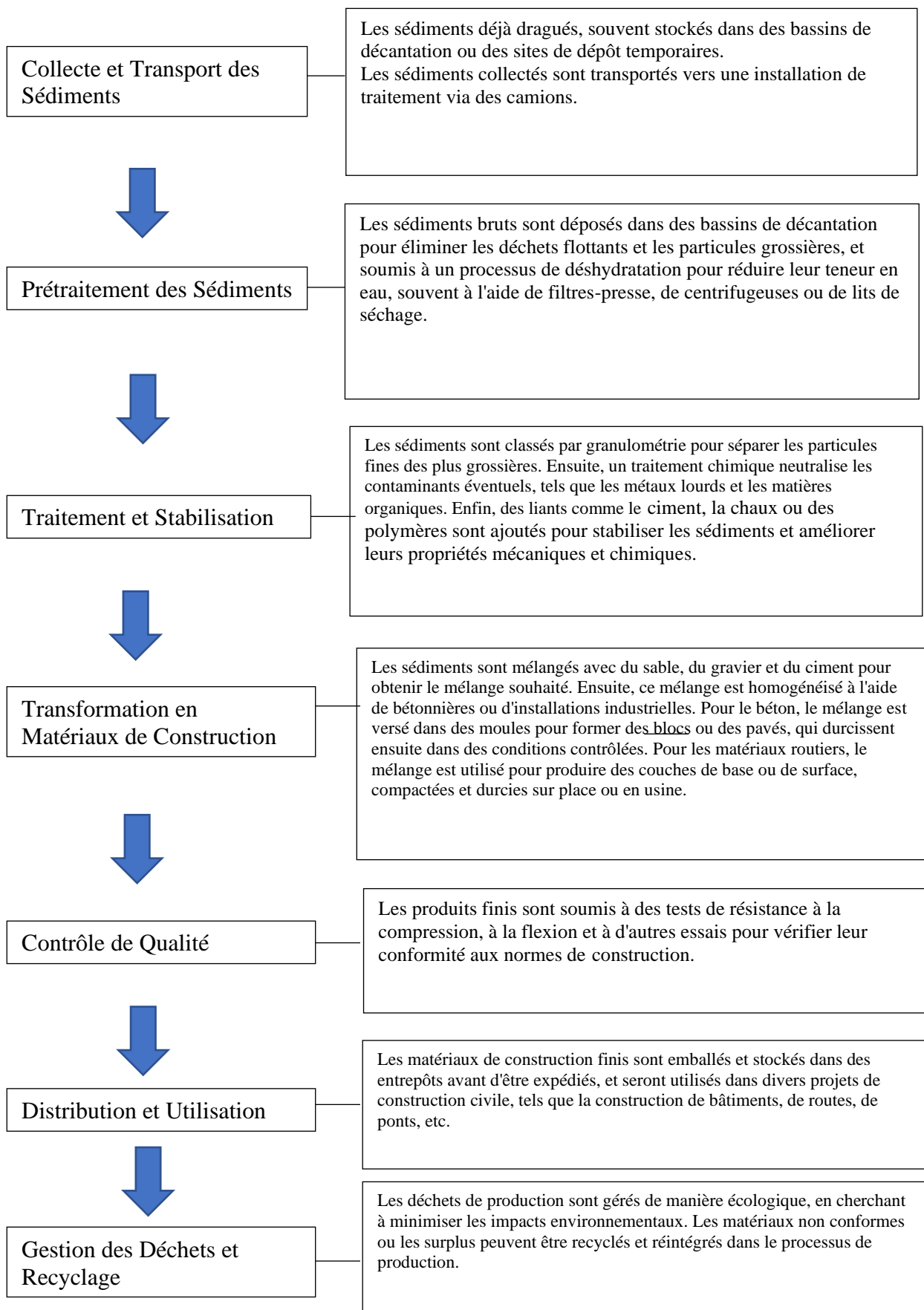
Pour commercialiser nos services, nous adoptons une approche multifacette :

- Participation à des événements sectoriels, salons et conférences pour rencontrer nos clients potentiels.
- Utilisation d'une plateforme en ligne avec un site web détaillant nos services, études de cas et témoignages clients.
- Établissement de partenariats locaux stratégiques pour étendre notre portée et notre impact.
- Ventes directes et consultations personnalisées pour répondre aux besoins spécifiques de nos clients.

Cette stratégie globale vise à positionner notre projet comme un leader innovant dans la valorisation des sédiments de dragage pour la construction routière en Algérie, tout en garantissant une croissance durable et profitable. Quatrième axe : Plan de production et d'organisation.

4.4 Le Processus de production :

Le processus de production des matériaux de construction à base de sédiments de dragage implique plusieurs étapes clés pour transformer les sédiments bruts en produits utilisables, tels que le béton et les matériaux pour les techniques routières. Voici un aperçu détaillé du processus :



4.5 L'Approvisionnement :

Nous avons établi une politique d'approvisionnement stratégique pour garantir l'efficacité de nos opérations. Nous allons collaborer directement avec des fournisseurs de matières premières telles que le ciment, les additifs et les adjuvants nécessaires à la transformation des sédiments de dragage. Pour la récupération des sédiments, nous travaillerons en partenariat avec les ports, avec lesquels nous élaborerons des conventions spécifiques. Nous allons également avoir des accords avec le laboratoire CTTP pour effectuer les analyses nécessaires afin d'assurer la qualité et la sécurité de nos matériaux. En ce qui concerne le matériel lourd pour les travaux, comme les camions et les bulldozers, nous collaborerons avec des entreprises spécialisées qui fournissent l'équipement requis. Notre politique de paiement flexible sera gérée via CCP et CIB, offrant des conditions optimisées et des délais de réception adaptés à nos besoins.

4.6 La main d'œuvre :

Notre projet de valorisation des sédiments de dragage est estimé créer environ 10 emplois. Ces postes comprendront :

- Nous 2 ingénieurs spécialisés dans la gestion et la protection du littoral.
- 1 ingénieur en génie civil spécialisé dans les techniques routières.
- 1 technicien qualifié pour travailler sur les équipements de pointe.
- 1 comptable pour la gestion financière.
- 2 agents de soutien divers pour des tâches opérationnelles.
- 1 femme de ménage.

5 Cinquième axe : Plan financier

❖ Les Coûts et charges :

Coûts initiaux du projet selon les estimations du marché

La nature de la dépense	Type de dépenses	Fournitures	Prix en Dinar algérien	Dépense selon nature
Dépenses ponctuelles	Dépenses administratives	Notarié, taxes, etc	15 000,00 DA	34 280 000,00 DA
	Dépenses d'investissement	Bulldozer	5 000 000,00 DA	
		Pelle mécanique	3 500 000,00 DA	
		Niveleuses	5 600 000,00 DA	
		Compacteur/vibrateur	50 000,00 DA	
		Camion benne	5 000 000,00 DA	
		Finisseurs de route	4 500 000,00 DA	
		Rouleau compresseur	4 000 000,00 DA	
		Scie à asphalte et béton	300 000,00 DA	
		Camion-citerne	6 000 000,00 DA	
		Marteau-piqueur	15 000,00 DA	
		Matériel de signalisation	10 000,00 DA	
		Truelle, pelle et pioche	20 000,00 DA	
		Niveau et outil de mesure	20 000,00 DA	
		Équipements de sécurité : Casques, gilets réfléchissants, bottes de sécurité, etc.	100 000,00 DA	
		Matériel de bureau : imprimante, ordinateur, etc	150 000,00 DA	
		Dépenses périodiques	Dépenses de fonctionnement	
Produits et matériaux nécessaires Bitume, Granulats, Liants) (hydrauliques, Additifs	2 000 000,00 DA			
Main d'œuvre	1 440 000,00 DA			
Locations annuelles	2 400 000,00 DA			
Total		40 170 000,00 DA		

Charges 1km : Dépenses de fonctionnement				
Dépenses d'exploitation directes				
Déclaration	Bitume	Agrégat	Additifs	Liants hydrauliques
Quantité	12000	200000	2000	2000
Prix	80,00 DA	30,00 DA	30,00 DA	35,00 DA
Total	960 000,00 DA	6 000 000,00 DA	60 000,00 DA	70000,00 DA
Total				7 090 000,00 DA
Charges d'exploitation indirectes				
Déclaration	main d'oeuvre	Locations annuelles	Fournitures de bureau	Frais électriques et sanitaires
Total annuel	1 440 000,00 DA	2 400 000,00 DA	50 000,00 DA	50 000,00 DA
Total				3 940 000,00 DA
Total				11 030 000,00 DA
Frais de financement				
Déclaration				Prêt
Total annuel				1 040 000,00 DA
Total				1 040 000,00 DA
Frais d'investissement et d'administration				
Déclaration	Frais de documentation			Prêt
Total annuel	15 000,00 DA			150 000,00 DA
Total				165 000,00 DA
Bénéfice net				2 976 050,00 DA
Pourcentage de profit %du projet 60				1 785 630,00 DA
Pourcentage de société exploitante %40				1 190 420,00 DA

Partenaires clés <ul style="list-style-type: none"> - Agences gouvernementales spécialisées dans l'aménagement et la gestion du territoire (CNTTP, ANA) - Sociétés d'ingénierie (COSIDER, ALGERITP, GCB) -Des entreprises de surveillance environnementale (ANCC) -Entreprises de l'industrie pétrolière et gazière (SONATRACH) -Entreprises de transport maritime et portuaires. -Développeurs d'infrastructures. 	Activités principales <ul style="list-style-type: none"> - Réaliser des études topographiques, géologiques, et géotechniques pour évaluer les conditions du site - Réaliser des tests de qualité sur les matériaux utilisés - Réaliser la construction de routes, y compris la préparation du site, l'excavation, le terrassement, et l'asphaltage. - Effectuer des travaux de maintenance et de réhabilitation des routes existantes, tels que le resurfaçage et les réparations - Élaborer des plans de travail, des budgets et des calendriers pour chaque projet et Évaluer les besoins. - Réaliser des études pour évaluer les impacts environnementaux des projets routiers. 	Valeurs ajoutées <ul style="list-style-type: none"> - Réduction des déchets et protection des écosystèmes marins grâce à la réutilisation des sédiments de dragage. - Transformation des sédiments en matériaux de construction, diminuant la dépendance aux matières premières traditionnelles. - Génération d'emplois directs et indirects, stimulant l'économie locale. - Valorisation des Ressources Locales par l'utilisation de matériaux disponibles localement. - Fourniture de routes sûres et fiables, essentielles pour la connectivité et le développement socio-économique. - Respect des normes environnementales et de construction 	Relation clients <ul style="list-style-type: none"> - Assurer une communication claire et régulière pour comprendre les besoins spécifiques des clients - Adapter nos solutions aux exigences uniques de chaque client pour répondre efficacement à leurs attentes - Utilisation de systèmes de modélisation numérique, géomatique, et technologies de pointe pour la planification et l'optimisation des projets. 	Clients <ul style="list-style-type: none"> - Bureau d'Études et d'Ingénierie Environnementale (BEIE) - Direction des Travaux Publics de la Wilaya d'Alger Direction des Travaux Publics de la Wilaya de Oran, Direction des Travaux Publics de la Wilaya de Annaba - GISMED (Groupe d'Ingénierie et de Services pour l'Environnement et le Développement) - COSIDER Construction - GIRAMA (Groupe d'Ingénierie et de Travaux Maritimes et Routiers d'Algérie) - Association des Ingénieurs des Travaux Publics (AITP), Syndicat National des Travailleurs du Génie Civil et du BTP (SNTGCB) - EPE Entreprise de Préfabrication et d'Exploitation (EPE) -vSociété Algérienne des Travaux Publics (SATP) - Société Algérienne de Génie Civil et de Construction (SAGC)
	Ressources liées <ul style="list-style-type: none"> - Personnel Qualifié : Experts en génie civil, gestion des ressources naturelles, géotechnique marine, et ingénieurs en environnement. - Accès à des Sédiments de Dragage : Conventions avec les autorités portuaires pour l'approvisionnement en sédiments de dragage. - Collaborations avec CTTT pour les analyses des sédiments - Collaborations avec Cosider ou GIRAMA pour la location de matériels 		Les canaux de distribution <ul style="list-style-type: none"> - Participation à des conférences et salons professionnels pour rencontrer des parties prenantes clés et présenter nos services innovants. - Utilisation d'une plateforme en ligne et d'un site web détaillant nos offres, études de cas, témoignages clients et informations de contact. - Partenariats avec des entreprises locales pour étendre les services. 	
Coûts 5 890 000,00 DA		Revenus 1 785 630,00 DA		

