

وزارة التعليم العالي و البحث 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

**MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU
DIPLOME D'INGENIEUR D'ETAT EN SCIENCES DE LA MER
Option : AMÉNAGEMENT DU LITTORAL**

Thème :

**Etude du comportement physique et mécanique des
sédiments de dragage pour leur valorisation en
techniques routières
« Cas du port de Sidi Fredj »**

Présenté par :

M^{elle} OUANDJELI Nawal.

M^{elle} SENOUCI Rachida.

Soutenu le 07/09/2016 devant le membre de jury suivant :

M^r OTMANI H.	Maître Assistant B (ENSSMAL)	Président
M^r GUERFI M.	Professeur (ENSSMAL)	Examineur
M^{me} MEHDID S.	Maitre Assistant A (ENSSMAL)	Examinatrice
M^r MEZOUAR K.	Maître de Conférences A (ENSSMAL)	Promoteur

Remerciements

Au moment d'exprimer nos reconnaissances envers les personnes qui ont, de près ou de loin, contribué à la réalisation de ce travail, nous souhaitons en premier lieu adresser nos remerciements les plus sincères à notre promoteur, Monsieur MEZOUAR.K (MCA) à (ENSSMAL). On tient à vous exprimer toute notre gratitude pour nous avoir fait confiance et nous avoir encadrés pendant ces six mois et pour les conseils toujours pertinents et enrichissants.

On tient aussi à remercier vivement Monsieur OTMANI. H (MAB) à (ENSSMAL) d'avoir accepté de présider ce jury et pour sa gentillesse particulière.

Nous tenons aussi à remercier professeur GUERFI. M, Madame MEHDID S (MAA) à (ENSSMAL) pour avoir accepté d'examiner notre travail.

Nous tenons également à remercier vivement Madame DERIAS, chef de département de géologie et géotechnique au CTTP de nous avoir accueilli chaleureusement au niveau du laboratoire de géotechnique.

On tient à remercier notre encadreur Monsieur BESBES K. responsable du laboratoire de géotechnique de nous avoir guider pour effectuer les analyses mécaniques dans des bonnes conditions, ainsi M^r Salim, Madame Sara et M^r Maiza et tout le personnel de CTTP pour leurs aides et soutiens.

On tient également à remercier Monsieur ABOUBEKR. N, professeur en génie civil à l'université de Belkaid à Tlemcen pour ces conseils pertinents qui ont contribué à alimenter notre réflexion.

Nos sincères remerciements à l'ensemble des ingénieurs et techniciens des laboratoires de l'ENSSMAL, le personnel de la bibliothèque et en particulier Fatima et Mohammed

On tient à exprimer notre vive gratitude à tous nos enseignants, depuis la première année fondamentale, jusqu'à la cinquième année universitaire. Un grand merci à tous les membres de nos familles pour leurs soutiens tout au long de cette année.

Liste des figures

Figure 01 : L'origine du sédiment dans l'environnement aquatique.....	17
Figure 02 : Classification granulométrique selon LCPC.....	17
Figure 03 : Les modes de transport sédimentaire.....	18
Figure 04 : Diagramme de Hjulström.....	19
Figure 05 : Drague mécanique à godets.....	22
Figure 06 : Drague mécanique à pelle.....	22
Figure 07 : Drague à benne preneuse.....	23
Figure 08 : Drague hydraulique aspiratrice.....	24
a- Les dragues aspiratrices en marche (DAM).....	24
b- Les dragues aspiratrices stationnaires(DAS).....	24
Figure 09 : La gestion des déblais de dragage selon Lc72	28
Figure 10 : Profil type d'une chaussée.....	35
Figure 11 : Schéma d'une structure de chaussée type souple.....	36
Figure 12 : Schéma d'une structure de chaussée type semi rigide.....	37
Figure 13 : Schéma d'une structure de chaussée type rigide.....	37
Figure 14 : Image satellitaire de la presqu'île de Sidi Fredj.....	39
Figure 15 : Plan de masse du port de Sidi-Fredj.....	41
Figure 16 : Rose des vagues au large de la côte algérienne- Hiver.....	42
Figure 17 : Rose des vagues au large de la côte algérienne-Eté.....	43
Figure 18 : Levés bathymétriques de l'année 1997.....	43
Figure 19 : Levés bathymétriques de l'année 1984.....	44
Figure 20 : Levés bathymétriques de l'année 2009.....	44
Figure 21 : Bathymétrie du port de Sidi Fredj de 2012.....	44
Figure 22 : Modélisation du transport sédimentaire.....	46
Figure 23 : Opération de dragage du port de Sidi-Fredj.....	47

Liste des figures

Figure 24 : Dépôt de sédiment dragué au niveau de la plage de Sidi Fredj.....	47
Figure 25 : Organigramme classification des sols selon le GTR	51
Figure 26 : Localisation des sites de prélèvements.....	52
Figure 27 : Mode de fonctionnement d'une Benne.....	53
Figure 28 : Coupelle de Casagrande.....	59
Figure 29 : Consistance d'un sol.....	60
Figure 30 : Essai équivalent de sable.....	63
Figure 31 : Schéma principe de la répartition des coups de dame par une couche.....	66
Figure 32 : Courbe Proctor.....	68
Figure 33 : Boite de cisaillement.....	70
Figure 34 : Appareil triaxial.....	70
Figure 35 : Schéma des différentes parties de la boite de cisaillement.....	72
Figure 36 : Détermination de la fin de consolidation d'une éprouvette dans la boite de cisaillement.....	75
Figure 37 : Courbe des contraintes de cisaillement en fonction des contraintes normales.....	77
Figure 38 : principe de l'oedomètre.....	78
Figure 39 : Courbe de l'analyse granulométrique.....	83
Figure 40 : Courbe Proctor.....	87
Figure 41 : Résultats de l'essai de cisaillement rectiligne.....	89
Figure 42 : Courbe de compressibilité.....	90
Figure 43 : Organigramme de classification.....	94
Figure 44 : Arrosage des sédiments.....	99
Figure 45 : Traitement aux liants hydrauliques.....	99
Figure 46 : Epannage des gravillons de cloutage.....	99

Liste des photos

Photo 01 : Le prélèvement à bord de l'embarcation.....	52
Photo 02 : L'eau à l'état de saturation.....	54
Photo 03 : Les étapes principales de détermination de la teneur en MO.....	56
Photo 04 : Tamiseuse.....	57
Photo 05 : Les étapes principales de l'essai du bleu de méthylène.....	61
Photo 06 : Appareillage Proctor Normal.....	65
Photo 07 : Les étapes principales de l'essai Proctor modifié.....	67
Photo 08 : Les étapes principales de l'essai de friabilité de sable.....	69
Photo 09 : Les étapes principales de l'essai de cisaillement direct.....	74
Photo 10 : Les étapes principales de l'essai oedométrique.....	79

Liste des tableaux

Tableau 01 : Les valeurs seuils fixés pour l’immersion des sédiments en milieu marin....	26
Tableau 02 : Les différents types d’analyse de caractérisation pour un sédiment de dragage.	29
Tableau 03 : Superficie et profondeur de chaque bassin du port de Sidi Fredj.....	40
Tableau 04 : Les dimensions des appontements fixes.....	40
Tableau 05 Les opérations de dragage au niveau du port de Sidi Fredj.....	47
Tableau 06 : Les différentes classes de la famille 01.....	49
Tableau 07 : Poids du sédiment humide et sec permettant le calcul de w_{sf}	81
Tableau 08 : Résultats de l’essai de détermination de la teneur en MO.....	81
Tableau 09 : Résultats de l’analyse granulométrique par voie sèche.....	82
Tableau 10 : Classification GTR.....	84
Tableau 11 : Paramètres granulométrique.....	84
Tableau 12 : Résultats de la VBS.....	84
Tableau 13 : Classification GTR des sols selon la VBS.....	85
Tableau 14 : Résultats de l’essai équivalent de sable ES.....	85
Tableau 15 : Classification de la qualité du sable selon la valeur de l’ES.....	86
Tableau 16 : Résultats de l’essai Proctor modifié.....	86
Tableau 17 : Résultat de l’essai Friabilité de Sable FS.....	88
Tableau 18 : Les caractéristiques de compressibilité.....	91
Tableau 19 : Classification des sols insensibles à l’eau selon GTR.....	92
Tableau 20 : Classification finale de sédiment de la passe d’entrée du port de Sidi Fred..	94
Tableau 21 : Tableau récapitulatif des techniques de préparation des matériaux pour emploi en couche de forme.....	98

Liste des acronymes

AFNOR : Association Française de **NOR**malisation

BTP : Bâtiments et Travaux **Publics**

CDF : Couche **De** **Forme**

CETMEF : Centre d'Études **Techniques Maritimes Et Fluviales**.

CIRIA : **Construction Industry Research and Information Association**

CUR : Centre **Universitaire Roannais**.

CTTP : **Contrôle Technique des Travaux Publics**.

CTH : organisme national de **Contrôle Technique de la construction Hydraulique**.

DAM : **Drague Aspiratrice en Marche**

DAS : **Drague Aspiratrice Stationnaire**

DTP : **Direction des Travaux Publics**

ENPC : **Ecole Nationale des Ponts et Chaussées**.

ENIT : **Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis**

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**.

GSTA : **Grain Size Trend Analysis**.

GTR : **Guide des Terrassements Routiers**.

GTS : **Traitement des sols à la chaux et / ou aux liants hydrauliques**

HMI : **Hydro Marine Ingénierie**.

IADC : **International Association of Dredging Companies**.

IAPH : **International Association of Ports and Harbors**.

IFREMERMER : **Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER**

Liste des acronymes

- Lc72** : London convention 1972.
- LCPC** : Laboratoire Centrale des **P**onts et **C**haussées.
- LEM** : Laboratoire des **É**tudes **M**aritimes.
- MTP** : **M**inistère des **T**ravaux **P**ublics.
- OSPAR** : Convention d'**O**slo et **P**aris.
- PCB** : **P**olychlorobiphényles.
- PST** : **P**artie Supérieure des **T**errassements.
- PFSC** : **P**late-**F**orme **S**upport de **C**haussée.
- RTR** : **R**ecommandation pour les **T**errassements **R**outiers.
- SETRA** : **S**ervice d'**É**tudes **T**echniques des **R**outes et des **A**utoroutes.

Sommaire

Remerciements.....	I
Liste des figures	II
Liste des photos	III
Liste des tableaux.....	IV
Les acronymes	V

Introduction générale

Introduction générale	13
-----------------------------	----

Chapitre I : Synthèse bibliographique

1. Sédimentation	16
1.1.Origine d'un sédiment marin	16
1.2. Les caractéristiques d'un sédiment marin	16
1.3.Le processus d'un sédiment marin	17
2. Dragage des ports	20
2.1.Définition de dragage	20
2.2.Les phases d'une opération de dragage	20
2.3.Les modalités de dragage	21
2.4.Les techniques de dragage	21
3. La réglementation liée aux opérations de dragage	25
3.1.Au niveau international	25
3.2.Au niveau régional	25
3.3.Au niveau national	26
4. La destination des matériaux de dragage	27
4.1.La caractérisation d'un matériau de dragage	29
4.2.Le traitement et le prétraitement des déblais de dragage	30
4.3.Les filières de gestion de matériaux de dragage	31

Chapitre II : La zone d'étude

1. La situation géographique de la zone d'étude	39
2. Configuration du port	39
2.1.Un plan de masse	39

Sommaire

2.2.Les appontements	40
2.3.Les ouvrages extérieurs	41
3. Données océanographiques	42
3.1.La bathymétrie	42
3.2.La houle	43
4. Ensablement du port de Sidi Fredj	45
5. Dragage du port de Sidi Fredj	46

Chapitre III : Matériels et méthodes

Introduction	49
1. La classification des sédiments de la passe d'entrée du port de Sidi Fredj	49
2. Prélèvements des échantillons	52
2.1.Technique de prélèvement	52
2.2.Mode de fonctionnement d'une benne	53
3. L'identification des sédiments de la passe d'entrée du port de Sidi Fredj	53
3.1.Les essais physiques.....	53
3.1.1. La teneur en eau	53
3.1.2. La teneur en matière organique	55
3.1.3. L'analyse de la fraction grossière	56
3.1.4. L'analyse de la fraction fine	59
3.2.Les essais mécaniques	64
3.2.1. Compactage d'un sédiment	64
3.2.2. La friabilité de sable	68
3.2.3. La résistance au cisaillement	70
3.2.4. Essai oedométrique	77

Chapitre IV : Résultats et discussions

1. Les essais physiques	81
1.1.La teneur en eau	81
1.2.La teneur en matière organique	81
1.3.L'analyse de la fraction grossière	82
1.4.L'analyse de la fraction fine	84
2. Les essais mécaniques	86

Sommaire

2.1.Compactage d'un sédiment	86
2.2.La friabilité de sable	87
2.3. La résistance au cisaillement	88
2.4.L'essai oedométrique	90
3. La classification des matériaux de la passe d'entrée du port de Sidi Fredj	92
3.1.Classification du sédiment selon la nature et le comportement mécanique..	92
3.2.La classification selon la teneur en matière organique	94
3.3.Classification finale du sédiment du port de Sidi Fredj	94

Chapitre V : Les techniques d'amélioration des sédiments de dragage pour leur utilisation en couche de forme

1. Les techniques d'amélioration d'un sol	96
1.1. Action sur la granularité.....	96
1.2. Action sur l'état hydrique	96
1.3. Traitement	97
1.4. Protection superficielle	97
2. Les techniques d'amélioration des sédiments de la passe d'entrée du port de Sidi Fredj pour une utilisation en couche de forme.....	98

Conclusion générale

Conclusion générale	101
----------------------------------	------------

Références bibliographiques

Références bibliographiques.....	104
---	------------

Introduction générale

Introduction générale

Les ports sont des infrastructures de base dans l'économie de tous les pays riverains, ainsi les opérations de dragage se multiplient, soit dans le but de remédier au problème d'ensablement des ports par l'entretien afin de restaurer le plan d'eau du port, ou pour l'approfondissement des fonds afin de faciliter les manœuvres des nouveaux navires.

Ces multiples opérations de dragage engendrent une grande quantité de matériaux, en effet, Selon (**Maherzi et al. 2012**), les volumes dragués annuellement dans le monde représentent plus de 700 Millions m³.

En Algérie, il n'existe pas de statistiques des quantités à excaver annuellement car les dragages ne suivent pas un planning établi, près de 10 millions m³ enlevés pour l'ensemble des ports (**Belkessa, 2005**).

Le port de plaisance de Sidi Fredj est l'un des exemples de ports en Algérie qui subissent un ensablement important au niveau de la passe d'entrée, les opérations de dragage à son niveau génèrent des quantités importantes de sédiments.

La bonne gestion des produits de dragage est devenue une préoccupation majeure ces dernières années, à cause de leurs dangers qu'ils peuvent présenter pour l'environnement par leurs toxicités (**Alzieu et al. 2003**), cela a incité la mise à jour des lois réglementant leurs devenir qui sont devenues de plus en plus sévères.

Dans le domaine de génie civil et en particulier la construction routière, Les ingénieurs routiers sont confrontés à de nombreux problèmes dans la conception des routes, le plus éminent de ces problèmes est l'indisponibilité de matériaux appropriés pour la construction de la route, cela nécessiterait soit la mise à niveau des matériaux locaux ou d'importer un autre matériau approprié pour le site, ce qui augmente le coût de la construction (**Ben ouakhir, 2015**).

Dans une optique de développement durable, les sédiments de dragage peuvent présenter l'opportunité d'utilisation dans la construction routière, en effet, différentes études se multiplient afin d'apprécier la valorisation des sédiments de dragage dans ce secteur [Dubois, V., 2006 ; Tran, N.T., 2009; Dia, M., 2013], (**Achour, 2013**).

L'utilisation des sédiments de dragage du port de Sidi Fredj en technique routière qui fera l'objet de cette présente étude est parmi les rares études réalisées en Algérie pour ce type de matériau.

Afin de vérifier qu'un matériau répond aux exigences et aux critères requis en techniques routières, des paramètres géotechniques sont déterminés à travers de multiples essais physiques et mécaniques.

Cette présente étude est répartie en cinq parties :

- **Première partie :**

Dans cette partie, nous allons présenter en premier lieu, les différentes techniques de dragage portuaire et la législation liée à l'immersion des produits de dragage en mer, et en deuxième lieu nous allons citer les différents modes de gestion de ces sédiments et en particulier en techniques routières.

- **Deuxième partie :**

Dans cette partie, la zone d'étude sera présentée.

- **Troisième partie :**

Afin de répondre à notre problématique de départ, une série d'essais physiques et mécaniques réalisée lors de cette étude seront détaillés.

- **Quatrième partie :**

Dans cette partie, nous allons présenter les résultats des différents essais cités auparavant, leurs discussions ainsi que la classification de ces sédiments.

- **Cinquième partie :**

Dans cette partie, nous allons aborder quelques techniques d'amélioration des produits de dragage en vue de leurs utilisations en couche de forme.

Chapitre I
Synthèse
bibliographique

Introduction

La zone côtière est le siège d'importantes activités économiques, à savoir la pêche, le transport maritime et autre, celles-ci se manifestent au sein des infrastructures portuaires.

les activités portuaires ne peuvent s'exercer que lorsque l'accès aux ports est garanti, mais la majorité de ceux-ci subissent un ensablement qui gêne leur bon fonctionnement et leur rentabilité (**Anger, 2014**), d'où la nécessité de recourir aux opérations de dragage afin de restaurer les tirants d'eau indispensables à la navigation ainsi qu'au bon fonctionnement du port, ces opérations sont également demandées lorsqu'il s'agit d'une évolution de la taille des navires ou un développement des nouvelles activités.

Face à la quantité et à la qualité des sédiments issus des opérations de dragage des ports, la gestion de ces matériaux demeure un enjeu environnemental et économique important (**Abriak et al. 2003**), dans ce présent chapitre nous aborderons les points suivants :

- Le processus de sédimentation.
- Les techniques de dragage les plus utilisées,
- La description du cadre législatif relatif à la gestion des matériaux de dragage,
- Le devenir des produits de dragage.

1. La sédimentation

1.1. Origine d'un sédiment marin

En géologie, le sédiment est un dépôt laissé par les cours d'eau et le vent. Selon **Schneider 2001**, les sédiments peuvent avoir principalement deux origines, une origine **endogène** (les débris des macrophytes et les produits de décomposition d'organismes animaux ou végétaux), l'autre est **exogène** de type naturel : issues de l'érosion du bassin versant sous l'effet des agents météorologiques, de type anthropiques : rejets agricoles, industriels et domestiques (les apports de matière en suspension, de matières organiques : les nutriments et les hydrocarbures, inorganiques : les éléments traces métalliques).

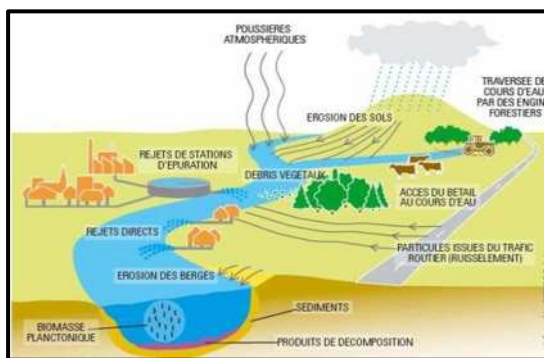


Figure 01 : L'origine du sédiment dans l'environnement aquatique (MAE, 2007)

1.2. Les caractéristiques d'un sédiment marin

Le sédiment marin se caractérise essentiellement par :

1.2.1. La granulométrie

Les tailles des particules sédimentaires sont extrêmement diverses (Chameley, 2011), cette dernière va des blocs aux argiles (figure 02).

Les particules dont la granulométrie est inférieure à $63\mu\text{m}$ représentent la fraction fine (limons et argiles), les éléments dont la taille est supérieure à $63\mu\text{m}$ représentent les particules grenues (sable, graviers, cailloux et blocs) qui sont caractérisées par une faible cohésion, et moins transportables que les particules fines et non contaminé en raison de leur faible surface spécifique.

Les limites entre les classes granulométriques correspondent généralement à un changement dans les propriétés physiques et mécaniques (Dia, 2013).

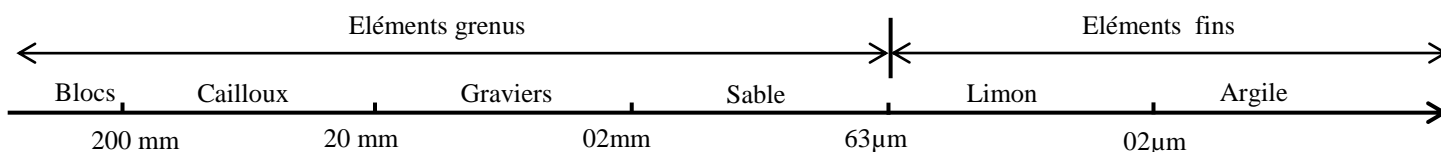


Figure 02 : Classification granulométrique selon LCPC

1.2.2. La composition

Le sédiment de dragage est constitué essentiellement de deux phases :

a. Phase liquide (l'eau)

L'eau occupe l'espace entre les grains solides d'un sédiment, la teneur en eau d'un sédiment de dragage varie entre (100 et 300%), elle dépend essentiellement de la technique de dragage utilisée (Tran Ngoc, 2009).

L'eau dans le sédiment de dragage peut se présenter sous plusieurs formes : libre, pelliculaire, capillaire et en eau de constitution.

b. Phase solide

La phase solide comporte une fraction **organique** et autre **minérale** (inorganique)

▪ La fraction organique

La proportion de la fraction organique dans un sédiment est faible, elle varie entre 02 à 10% et peut atteindre 20% dans certains cas (**Miraoui, 2010**), cette fraction peut être des débris de végétaux, des résidus d'animaux, des micro-organismes et l'ensemble des rejets agricoles et domestiques (exemple : les hydrocarbures et les sels nutritifs).

▪ La fraction minérale

Cette fraction est représentée essentiellement par des minéraux dont l'origine est l'écorce terrestre et les squelettes d'origine endogène, ces composés sont essentiellement les argiles, les carbonates et les silicates, leurs teneurs varient en fonction de leur provenance.

1.3. Le processus de sédimentation

Le transport sédimentaire (**figure 03**) est étroitement liée à l'intensité des courants et à la granulométrie des grains, il existe généralement trois modes de transport : **transport par charriage, par saltation et en suspension**.

- **Le charriage** est un transport par roulement des particules sur le fond.
- Le transport par **saltation** : Le courant fait les grains sauter selon une trajectoire balistique, ces deux modes de transport concernent les matériaux grossiers (sables, graviers et galets).
- le transport en **suspension** : Il concerne les particules fines (sables fins, argiles et silts), lorsque la courantologie est forte, ces particules sont mises en suspension sans qu'elles sont redéposées (**Aoudj et Bouaziz, 2014**)

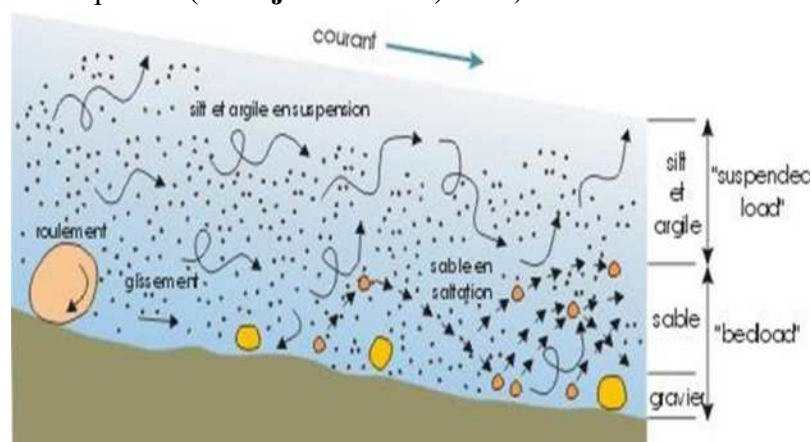


Figure 03 : Les modes de transport sédimentaire (**Boulvain, 2012**).

Les matériaux fins en suspension représentent 90-95% des matériaux transportés, ces particules sont transportées essentiellement lors des crues (**Anger, 2014**), l'absence de toute agitation favorise leur sédimentation.

Le diagramme de *Hjulström* représente les mouvements des grains en fonction de la vitesse des courants (**figure 04**), ce diagramme présente trois processus : érosion, transport et sédimentation, lors du transport sédimentaire, la vitesse des courants augmente avec la granulométrie des grains, par contre la figure présente le cas inverse : augmentation de la vitesse avec une diminution du diamètre (mm) pour les sédiments fins, ceci est due à leur cohésion, la partie inférieure présente la sédimentation, elle montre la relation entre la granulométrie des particules et la vitesse du courant lors de leur dépôt (**Bouvlain, 2012**).

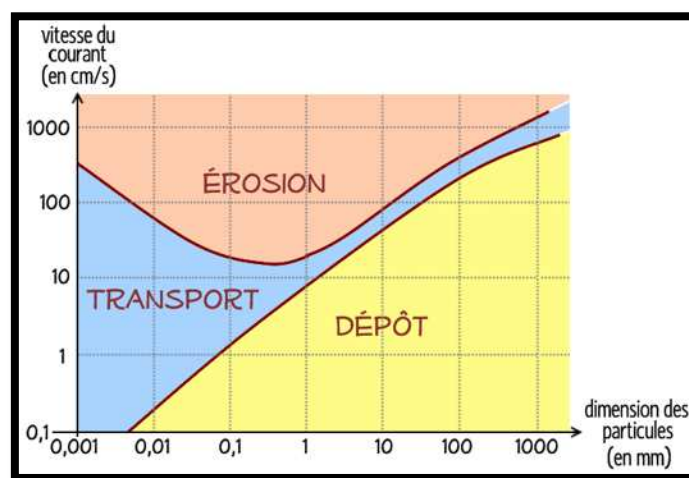


Figure 04 : Diagramme de Hjulström (**Bouvlain, 2012**)

Appliquant le processus de sédimentation (diagramme de Hjulström) sur un port, ceci peut être divisé en deux parties :

- **Les chenaux d'accès**

Ils reçoivent en premier les matériaux provenant du transit sédimentaire dont la granulométrie est plus ou moins importante, il en résulte une sédimentation de nature sableuse et non contaminée (**Grosdemange, 2005**).

- **Les bassins portuaires**

Ces lieux sont caractérisés par une faible courantologie et une agitation réduite, ce facteur favorise surtout la sédimentation des particules fines qui se traduit par un dépôt des sédiments et qui provoque à long terme le phénomène d'envasement des bassins.

La connaissance du phénomène de sédimentation constitue une priorité pour les opérations de dragage, car elle permet d'évaluer la quantité de sédiment à évacuer pendant les travaux (**Damidot et al. 2006**).

2. Le dragage des ports

2.1. Définition du dragage

BOUTIN, R. 2000 a défini le dragage comme "des terrassements effectués sous l'eau avec des engins flottants au moyen de procédés mécaniques ou par aspiration" cette opération constitue une activité vitale pour l'exploitation des ports

2.2. Les phases d'une opération de dragage

Tout projet de dragage consiste généralement en quatre étapes :

2.2.1. Reconnaissance

C'est l'étape principale de chaque opération que ce soit maritime ou terrestre, la reconnaissance consiste à recueillir les données sur le milieu (bathymétrie, géomorphologie, sédimentologie et le cubage) (**Benzada et Dali, 1995**) ainsi que le matériel adapté pour la réalisation de l'opération, elle comporte aussi l'étude d'impact de l'opération de dragage sur le milieu aquatique, voire le devenir du matériau excavé.

2.2.2. Extraction du déblai

Cette opération s'effectue souvent sous l'eau, elle consiste à enlever les matériaux du fond du port au moyen des engins appelés les dragues (**IADC, AIHP, 2010**).

2.2.3. Transport des matériaux

Le mode de transport des matériaux dragués est étroitement lié à la technique de dragage adoptée, plusieurs facteurs interviennent dans son choix : la situation de chantier, les caractéristiques des matériaux (contamination) et le devenir de ces matériaux (**Nguyen, 2008**).

Parmi les modes de transport on cite : les chalands (barges de transports) et les pipelines, parfois ces techniques sont accompagnées à un transport routier.

2.2.4. Réutilisation ou placement

Ces matériaux pourraient être rejetés dans un milieu aquatique, stockés par terre, utilisés en agriculture...etc., l'utilisation de ces matériaux dépend essentiellement de leurs degrés de contamination (**Foucher, 2005**).

Les différentes phases citées au-dessus pourraient être envisagées par le même ou par plusieurs engins (**Chapon, 1975**).

2.3. Les modalités de dragage

Selon l'objectif désigné, on distingue trois types de dragage :

2.3.1. Dragage d'entretien

Le dragage d'entretien se fait d'une façon périodique, il consiste à extraire les matériaux accumulés dans le fond d'un port afin de rétablir le tirant d'eau pour la navigation et restaurer le milieu naturel, le dragage d'entretien ne prévoit aucun agrandissement de la zone draguée, il vise à garder le bon fonctionnement d'un port (**Achour, 2013**).

2.3.2. Dragage d'approfondissement

Ce type de dragage s'inscrit dans le contexte de développement des activités portuaires (commerce, navigation et autres ...), et incité ainsi par l'évolution de la taille des navires afin de s'adapter au seuil de la navigation (**Bachouche, 2010**).

2.3.3. Le dragage d'aménagement des nouvelles aires portuaires

La création de nouvelles installations portuaires occasionne souvent l'excavation et le déplacement des volumes importants de matériaux : roches, graviers, terres, argiles et vases au moyen des dragues (**Bekari et al. 2010**).

2.4. Les techniques de dragage

Les techniques de dragage varient en fonction de volume à draguer, la nature de sédiment (la granulométrie, la texture et la teneur en eau) ainsi que le type de travaux à réaliser (**Carpentier, 2002**).

Elles peuvent être classées en fonction de leurs principes de fonctionnement en trois principales techniques de dragages :

2.4.1. Le dragage mécanique

Le dragage mécanique permet de curer les sédiments de fond par application directe de la force mécanique (**Carpentier, 2002**), ce type des dragues est le plus répandue, elles sont utilisées dans les zones difficiles à l'accès (les bassins étroits, les quais...), les matériaux dragués sont déposés dans des barges ou dans des chalands de transport afin d'être transporté

vers des sites de dépôts, leur principe de fonctionnement dans le milieu aquatique est similaire à celui des méthodes d'excavation sur la terre (Géode, 2014).

Les différents types de dragues mécaniques

Il existe plusieurs exemples de dragues mécaniques, citons quelques-uns :

- **Drague à godets**

Ce modèle est le plus traditionnel (**figure 05**), la drague comporte une chaîne de godets, elle tourne en descendant dans le fond, la partie basse du godet attaque le fond, se charge, remonte puis déverse son contenu sur un tapis roulant qui l'emporte vers une barge de transport, ils peuvent travailler dans des profondeurs de 25 à 30m (Géode, 2012).

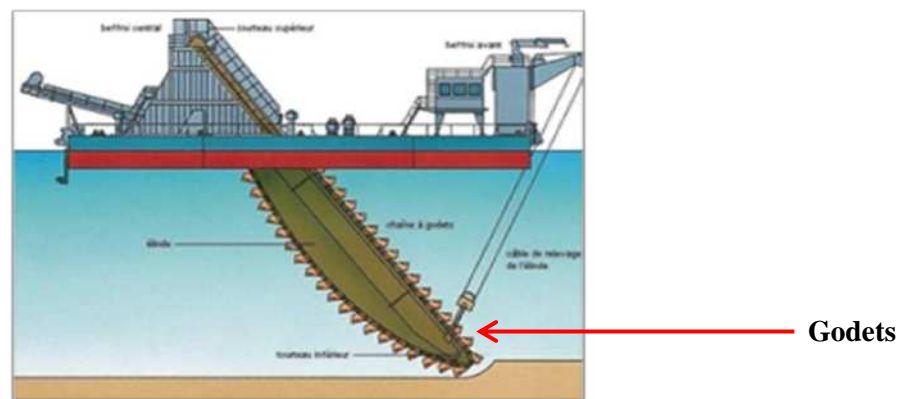


Figure 05 : Drague mécanique à godets (<http://www.ifremer.fr/>)

- **Drague à pelle ou cuiller**

La drague à pelle est une pelleteuse installée sur le ponton d'un chaland (**figure 06**). Elle est utilisée pour les petits travaux. (Géode, 2014).



Figure 06 : Drague mécanique à pelle (www.ghentdredging.be)

Drague à benne preneuse

Ce type de drague est le plus utilisé, au bout d'un câble de levage de la grue est fixée une benne preneuse, formée de deux grappins à mâchoires, la benne prend le sédiment en

s'enfonçant grâce à son poids et à l'action des mâchoires, puis verse le contenu de celle-ci dans des puits de déblais ou des chalands (Géode, 2014). (figure 07)

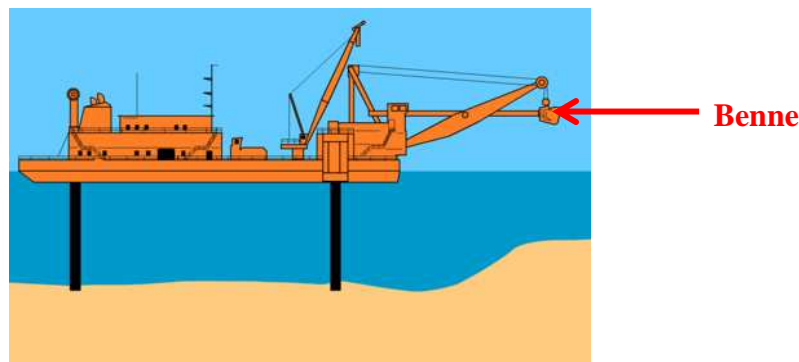


Figure 07 : Drague à benne preneuse (<http://www.ifremer.fr/>)

2.4.2. Le dragage hydraulique

Le dragage est dit hydraulique lorsqu'il est effectué par « hydro aspiration » (Grosdemange, 2005).

Les dragues hydrauliques utilisent des pompes centrifuges afin de fournir la force nécessaire pour l'excavation des boues (mélange d'eau et de sédiments) au travers d'un tube appelé élinde muni d'un embout (bec d'élinde), cette mixture est refoulée directement vers des sites de dépôt à l'aide des conduites longues, dans un puits à déblai, dans des barges ou des chalands de transport afin d'être transporté vers des sites de dépôt (Géode, 2014).

Les différents types de dragues hydrauliques

Il existe plusieurs types de dragues hydrauliques mais les deux suivantes sont les plus souvent utilisées :

- **Les dragues aspiratrices en marche (DAM)**

Le dragage en marche se fait en vitesse réduite, la dépression produite par la pompe centrifuge permet l'aspiration des boues au moyen d'une élinde traînante prolongée par un bec descendu sur le fond, les boues aspirées laissent des sillons de différentes profondeurs selon les conditions de dragage, ce type de technique est utilisé souvent dans le dragage d'entretien des ports et des chenaux d'accès (figure 08.a).

- **Les Dragues Aspiratrices Stationnaires (DAS)**

Cette drague travaille d'une façon stationnaire, son ancrage se fait par un système de câble autour de deux pieux assurant leur stabilité, ces dragues peuvent intégrer un

désagrégateur puissant (appareil rotatif) monté à l'extrémité du bec d'élinde et qui permet de fragmenter les gros morceaux pour les pomper mieux, elle est utilisée souvent dans le milieu portuaire et est destinée pour extraire un matériau non cohésif et peu compacte (**figure 08.b**).

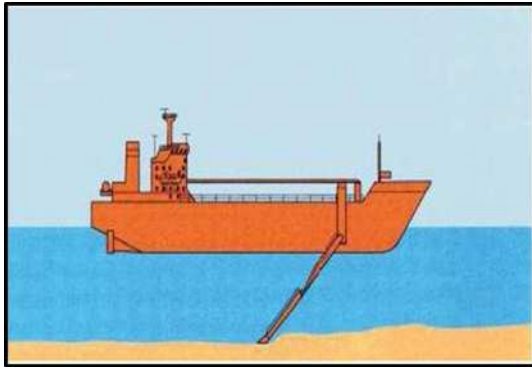


Figure 08.a : DAM

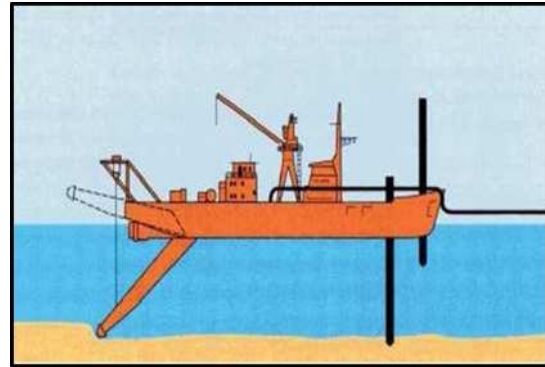


Figure 08.b : DAS

Figure 08: Drague hydraulique aspiratrice (<http://www.ifremer.fr/>)

2.4.3. Le dragage pneumatique

Ce type de dragues fonctionne avec l'air comprimé, un vide d'air est créé dans le cylindre, le sédiment remonte, une fois que le cylindre est plein, les valves sont inversées, l'air comprimé y pénètre et expulse le sédiment, ce type de drague peut être utilisé dans un milieu pollué (**Bel Hadj Ali, 2013**).

Par ailleurs, on distingue d'autres techniques de dragage dites plus spécifique :

2.4.4. Le dragage environnemental

Ce type de drague est utilisé aussi dans les milieux contaminés, elles permettent de limiter la quantité à draguer et éviter sa remise en suspension en utilisant des boucliers ou des écrans permettant de limiter la surface d'excavation, les godets et les pelles sont équipés d'un système étanche de fermeture. Le transport et le stockage sont également conçus pour éviter la dispersion des sédiments pollués.

2.4.5. Le dragage à eau ou à injection

Son principe de fonctionnement est basé sur l'injection de l'eau sous la pression dans le sol, en favorisant la formation d'un mélange d'eau et sédiments en suspension, Cette méthode nécessite une étude approfondie du fond.

Elle peut être utilisée pour les chenaux à fort courant, les bassins à marée de grande amplitude.

3. Réglementation liée à la gestion des déblais 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.

3.1. Au niveau international

▪ 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.

3.2. Au niveau régional

▪ Convention de Barcelone 1976

La convention de Barcelone 1976, amendée en 1995 à laquelle l'Algérie a adhéré le 17 Janvier 1981, cette convention vise à protéger l'environnement marin et côtier de la méditerranée, tout en encourageant des plans nationaux et régionaux contribuant au développement durable. Ces plans doivent évaluer et maîtriser la pollution, assurer la gestion durable des ressources marines et côtières, intégrer l'environnement dans le développement écologique et social et protéger les milieux marins et les patrimoines culturels.

▪ 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.

Tableau 01 : Les valeurs seuils fixés pour l'immersion des sédiments en milieu marin

Concentration en mg/kg de matière sèche sur fraction < à 2mm					
Métaux	N1	N2	PCB	N1	N2
As	25	50	PCB28	0,025	0,05
Cd	1,2	2,4	PCB52	0,025	0,05
Cr	90	180	PCB101	0,05	0,1
Cu	45	90	PCB118	0,025	0,05
Hg	0,4	0,8	PCB138	0,05	0,1
Ni	37	74	PCB153	0,05	0,1
Pb	100	200	PCB180	0,025	0,5
Zn	276	552	PCB totaux	0,5	1

Source : arrêté de 09 août 2009

3.3. 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.

▪ 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.

▪ 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 ... ».

▪ **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.

4. la destination des matériaux de dragage :

Selon la **figure 09**, la gestion des déblais de dragage doit passer impérativement par plusieurs étapes, la caractérisation est l'une des étapes principales afin de choisir la meilleure filière de gestion.

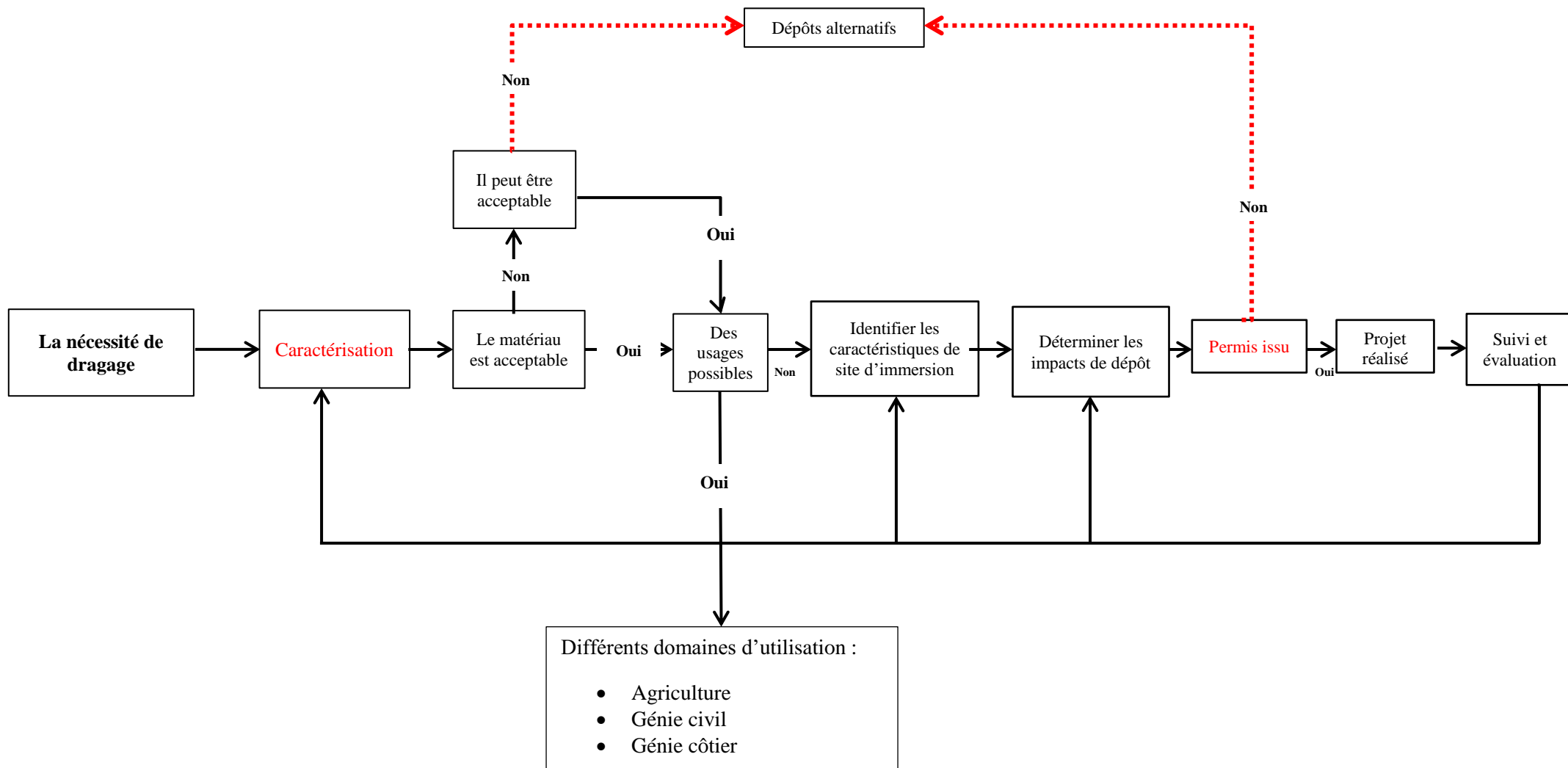


Figure 09: Les étapes principales d'évaluation des sédiments de dragage selon Lc72

4.1. La caractérisation d'un matériau de dragage

En raison du degré de contamination qu'un sédiment de dragage peut présenter, il est nécessaire d'évaluer sa qualité, l'étape de caractérisation s'avère indispensable afin de décrire la nature et le comportement des matériaux et choisir la filière adéquate de gestion.

Il existe deux principaux types d'analyses permettant de caractériser la qualité d'un sédiment (**Tableau 02**) :

Tableau 02 : Synthèse des différents types d'analyse de caractérisation pour un sédiment de dragage

Evaluation de l'impact environnemental	L'analyse biologique	Les bio-essais sont des tests d'écotoxicité de divers ordres permettant d'appréhender la toxicité du produit, l'effet sur la croissance d'organismes vivants, la bioaccumulation.
	L'analyse chimique	Il s'agit de déterminer la teneur en contaminants chimiques organiques et inorganiques, ce type d'analyse donne une indication au choix de la filière de destination de ces matériaux.
	L'analyse environnementale	Ce type d'analyse se fait par le test de lixiviation qui permet d'établir le comportement et la capacité de rétention des polluants dans une matrice.
Evaluation des caractéristiques géotechniques	Analyse minéralogique	Elle permet d'avoir une bonne connaissance du matériau par la détection des différentes phases qui le constituent, elle est étudiée par : la diffraction au rayon X et la fluorescence X.
	Analyse physique	Elle englobe la détermination de la teneur en eau, taux de la matière organique, la granularité et l'argilosité, ces paramètres ont une grande influence sur le comportement mécanique du sédiment
	Analyse mécanique	Elle englobe les essais permettant d'évaluer la résistance et la capacité portante d'un sol.

4.2. Le prétraitement et le traitement des déblais de dragage

Après la caractérisation du sédiment, il est possible de trouver que son taux de pollution dépasse les normes requises par la législation pour être immergé ou valorisé ou épandu, de ce fait, les matériaux dragués doivent faire l'objet d'un traitement et d'un prétraitement.

Par définition, le prétraitement et le traitement des sédiments sont des technologies permettant, soit de rendre aux sédiments contaminés des teneurs en polluants acceptables pour qu'ils puissent éventuellement être réutilisés, soit simplement de réduire la quantité de matériau à mettre en décharge si aucune voie de valorisation n'a été trouvée.

4.2.1. Le prétraitement

Les filières de gestion des sédiments de dragage à terre nécessitent généralement des prétraitements afin de diminuer les volumes par déshydratation, séparation granulométrique ou séchage, rendant le matériau manipulable et simplifiant le transport (**Achard, 2013**) :

- **La déshydratation**

Il existe différents procédés de déshydratation qui permettent d'augmenter la siccité (Pourcentage massique de matière sèche) du sédiment, ce qui facilitera son maniement et augmentera les chances de réussite des traitements (**Grosdemange, 2005**).

Ces techniques permettent de réduire les volumes à traiter en éliminant jusqu'à 50% de l'eau interstitielle contenue dans les sédiments qui en renferment de 50 à 90% selon la technique de dragage utilisée.

- **Les opérations de tri granulométrique**

Il existe plusieurs procédés de tri granulométrique qui permettent de séparer les sable (\emptyset particule $> 63 \mu\text{m}$) des fines (\emptyset particule $< 63 \mu\text{m}$) qui selon la littérature concentrent les métaux lourds via la capacité d'adsorption des argiles

L'objectif de ces opérations est donc de réduire les coûts en réduisant le volume à traité à la fraction la plus polluée du sédiment (**Loustau Cazalet, 2012**).

4.2.2. Le traitement

Selon **Kribi, 2005**, les techniques de traitement sont classées en trois catégories :

- **Procédés de traitement par concentration des polluants** : les polluants sont isolés de la matrice sédimentaire et le sédiment est décontaminé en totalité ou en partie ;
- **Procédés de traitement par dégradation des polluants** : ces procédés ne sont applicables qu'à certaines contaminations organiques. Les polluants sont détruits par voie chimique (oxydation) ou biologique (biodégradation).
- **Procédés de traitement par neutralisation des polluants** : les polluants se retrouvent immobilisés soit par l'ajout de liants hydrauliques, soit par vitrification.

4.3. Les filières de gestion de matériaux de dragage

Le choix de la filière de gestion des matériaux doit satisfaire les conditions suivantes :

- La conformité réglementaire.
- La protection de l'environnement : la solution retenue devant être la moins pénalisante pour l'environnement et la santé humaine;
- Economique : Le choix d'une meilleure technique avec un coût acceptable.
- Sociologiques : la compréhension et l'acceptation par le public de la solution retenue est de plus en plus nécessaire dans le contexte actuel de sensibilisation aux questions touchant à la protection de l'environnement (**Agostini, 2006**).

On distingue différentes filières de gestion des sédiments portuaires :

4.3.1. L'immersion en mer

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.

Au préalable de toute opération d'immersion, une étude granulométrique, hydrodynamique, chimique et biologique du site d'immersion doit être effectuée, ce site est choisi selon les critères physiques suivants :

- L'éloignement des côtes,
- Profondeur suffisamment importante pour que les sédiments ne soient pas repris par les courants (profondeur 100m et plus),
- Le site d'immersion doit être en dehors des zones d'intérêt écologique et halieutique (**Azrarak et Beggar, 2013**).

4.3.2. Le rechargement des plages

Actuellement, les plages connaissent une érosion accentuée, causée en général par le déficit en sédiment, ce dernier est provoqué par la combinaison des facteurs naturels et anthropiques.

Le recul du trait de côte incite la recherche de solutions d'aménagements, par ailleurs celles qui sont en harmonie avec la nature ont données des résultats efficaces comme par exemple le rechargement des plages, la difficulté de trouver un matériau d'alimentation sur terre impose la recherche d'autres sources, d'où l'intérêt de recourir aux sédiments de dragages issus de travaux de développement ou d'entretien, ces matériaux allochtones doivent répondre aux critères suivants :

- Les sédiments doivent être exempts de toutes contaminations (organique ou inorganique),
- Avoir une granulométrie plus au moins importante que celle du matériau autochtone,
- Le volume à mettre en jeu doit dépendre des caractéristiques locales (la pente de la plage, la longueur et la largeur de la plage...),
- Si le matériau est fin, l'apport de matériau peut atteindre parfois de 3 à 05 fois,
- Il faut prévoir environ 10 à 15 % de perte à la mise en place (en raison du vent et des vagues),
- La périodicité des apports (**Bellesort, 1993**).

4.3.3 Le dépôt terrestre ou le stockage

Le stockage des déblais de dragage à terre pourrait être temporaire en vue d'une réutilisation, traitement ou commercialisation ultérieure ou définitif lorsqu'il s'agit d'un matériau dangereux qui ne peut pas être traité, des bassins de confinement ou des barrières en couverture sont couramment utilisés pour déposer les produits et isoler les sédiments du milieu extérieur (**Carpentier, 2002**).

Le principal risque qui pourrait être présenté par cette technique est la pénétration des contaminants dans la chaîne alimentaire à travers les nappes phréatiques (**Wang, 2011**).

4.3.4 Les ouvrages de protection

▪ Les digues à talus

La qualité d'une digue à talus dépend essentiellement de son noyau, ceci est constitué d'un matériau de tout venant, les matériaux issus de dragage peuvent être également convenable pour sa conception, ces matériaux sont plutôt fins par rapport aux autres, d'où la nécessité de prendre des mesures telle que la mise en place du géotextile afin de diminuer le risque de dispersion des particules fines (**CIRIA, CUR, CETMEF, 2009**).

▪ Les géo-tubes

Les matériaux de dragage peuvent être aussi utilisés dans la conception des géo tubes, ceux-ci sont des structures tubulaires, monolithique et flexible utilisées pour lutter contre l'érosion côtière, ils sont réalisés par le pompage hydraulique du matériau de dragage.

4.3.5 Domaine de génie civil

Dans le domaine de génie civil et BTP, les sédiments de dragage peuvent constituer une alternative des granulats produits en carrières et gisements terrestres. Ceci est justifié par la raréfaction et la limitation d'extraction des matériaux nobles, et le souci de développement durable et protection de l'environnement (**Bekari et al. 2010**).

Dans ce domaine les sédiments dragués peuvent être utilisés pour la fabrication de ciments, des briques, des agrégats, des carreaux et du béton, ils peuvent également être employés comme remblais, digues, barrages, barrière antibruit et matériaux routiers.

4.5.3.1. Les techniques routières

Un sédiment de dragage peut passer de l'état déchet à une source valorisée et cela à travers son utilisation comme matériau dans les couches d'une chaussée.

Il existe plusieurs guides à l'échelle internationale qui met en place les conditions et les critères qu'un matériau doit satisfaire pour l'utiliser comme matériau en remblai ou en couche de forme, dont le principal est celui paru en 1992 appelé « Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme » publié par le LCPC et le SETRA, qui est une mise à jour de RTR « Recommandation pour les terrassements routiers », éditée en 1976 par LCPC et SETRA.

Le GTR est le guide le plus employé en Algérie.

a. Définition de la chaussée

a.1. Au sens géométrique

La chaussée est la surface aménagée de la route sur laquelle circulent les véhicules (**Elgaroui et Houichiti, 2010**).

a.2. Au sens structurel

La chaussée est un ensemble de couches de matériaux superposées, cette structure joue le rôle de répartition de la pression exercée par le pneumatique pour l'amener à un niveau compatible avec ce qui peut être supporté par le sol support (**Tran ngoc, 2009**).

b. Les constituants de la chaussée

La chaussée est constituée de deux couches surmontées d'un ensemble appelé plate-forme support de chaussée (**figure 10**), celle-ci est constituée d'une plate-forme surmontée généralement d'une couche de forme.

b.1. La couche de surface

La couche de surface est la couche supérieure de la chaussée, elle est constituée de la couche de roulement sur laquelle s'exercent directement les agressions conjuguées du trafic et du climat, et le cas échéant, d'une couche de liaison, intermédiaire entre les couches d'assise et la couche de roulement qui permet d'assurer une bonne adhérence entre la couche de base et la couche de roulement.

b.2. La couche d'assise

La couche d'assise est constituée généralement de deux couches, la couche de fondation surmontée de la couche de base.

b.2.1. La couche de base

La couche de base constitue, au-dessous de la couche de roulement, une partie du corps de la chaussée pour résister aux charges verticales résultant du passage des véhicules.

Elle est généralement composée de graves (pierres roulées ou concassées) enrobées au bitume, de plus grandes dimensions que pour les bétons bitumineux.

b.2.2. La couche de fondation

Couche inférieure du corps de chaussée, d'une résistance et d'une épaisseur suffisantes pour répartir sur le terrain les pressions résultant des charges verticales. Elle est composée, en général, de graves traitées avec du bitume, du ciment ou du laitier (Matière vitreuse produite dans les hauts-fourneaux).

Ces couches apportent à la chaussée la résistance mécanique aux charges verticales induites par le trafic. Elles répartissent les pressions sur la plate-forme afin de maintenir les déformations à ce niveau dans des limites admissibles (**Ba, 2008**).

c. La plate-forme

La plate-forme support de chaussée (**PFSC**) comprend généralement de bas en haut 02 couches

- la partie supérieure des terrassements (**PST**).
- la couche de forme (**CDF**).

c.1. La partie supérieure des terrassements PST

C'est la zone supérieure d'environ 1m d'épaisseur des terrains en place (section de déblais) ou des matériaux rapportés (section de remblais).

c.2. La couche de forme

Selon le GTR, la couche de forme est une structure plus ou moins complexe permettant d'adapter les caractéristiques aléatoires et dispersées des matériaux de remblai ou

du terrain en place, aux caractéristiques mécaniques, géométriques, hydrauliques et thermiques prises comme hypothèses dans la conception de la chaussée.

La couche de forme est positionnée sur l'arase, elle est constituée de matériaux granulaires ou traités, insensibles à l'eau et au gel, sur une épaisseur usuelle de 0,20 à 0,80 m.

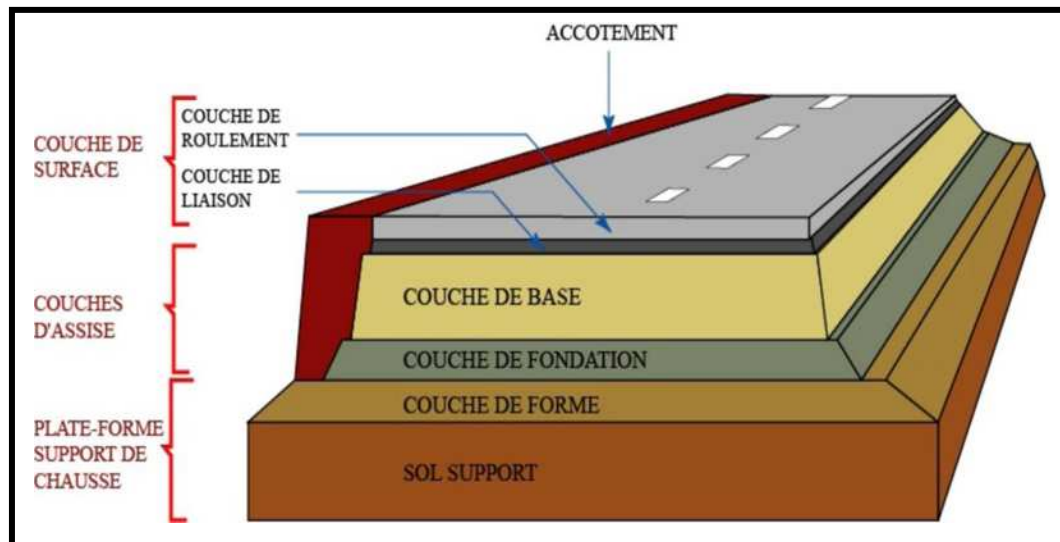


Figure 10 : Profil type d'une chaussée (Ben Ouakhir, 2015)

c.2.1. Le rôle de la couche de forme

La couche de forme joue un rôle important :

- Pendant les travaux, elle assure la protection du sol-support contre la pluie et les effets de cycle gel-dégel,
- elle permet d'assurer la qualité du nivellement ainsi que la circulation des engins en service,
- elle permet d'homogénéiser les caractéristiques mécaniques des matériaux constituant le sol ou le remblai et d'améliorer la portance à long terme,
- A long terme elle doit garantir la pérennité de l'ouvrage par le biais d'une bonne portance,
- réaliser un corps de chaussée d'épaisseur constante sur toute la longueur du chantier (Corte et al. 2000).

c.2.2. Les matériaux utilisés en couche de forme

Selon (Corte et al. 2000), Pour qu'un matériau soit utilisé en couche de forme, il doit répondre aux critères suivants :

- **L'insensibilité à l'eau** : afin d'assurer à long terme, le maintien des caractéristiques mécaniques de cette couche quel que soit l'état hydrique sous la chaussée en service, s'il faut traiter avec de la chaux et/ou des liants hydrauliques.
- **La dimension des plus gros éléments** : doit permettre d'assurer un nivellement de la plate-forme dans les tolérances requises en général plus ou moins 3cm.
- **La résistance sous circulation des engins de chantier** : un matériau de couche de forme, utilisé sans traitement avec un liant hydraulique, doit être suffisamment résistant à la fragmentation et à l'attrition pour ne pas donner lieu, sous l'effet du compactage et du trafic, à la formation d'éléments fins en surface qui le rendraient sensible à l'eau. Cette résistance est appréciée à partir des résultats d'essais mécaniques.
- **L'insensibilité au gel, le cas échéant** : l'incidence néfaste du gel s'apprécie sous deux aspects :
 - la dégradation des roches et des matériaux traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques par "gélifraction".
 - le gonflement au gel des sols par "cryosuccion".

Dans la réalité, on ne constate que seule une faible proportion des matériaux provenant des déblais ou des emprunts qui remplissent naturellement ces conditions. Pour les autres, il est nécessaire d'améliorer leur comportement par une technique appropriée et, en particulier, par un traitement avec de la chaux et/ou des liants hydrauliques (**Bimbard et al. 2000**).

d. Les catégories de chaussée

Il existe plusieurs catégories de chaussées :

- Les chaussées classiques (souples et rigides)
- Les chaussées inverses (mixtes ou semi-rigides) (**Elgaroui et Houichiti, 2010**).

d.1. Chaussée souple

La chaussée souple est constituée par un empilage des matériaux granulaires recouverts d'un revêtement plus ou moins épais à base de bitume généralement, elle est caractérisée par une grande flexibilité et une diffusion localisée des charges. (**figure11**).

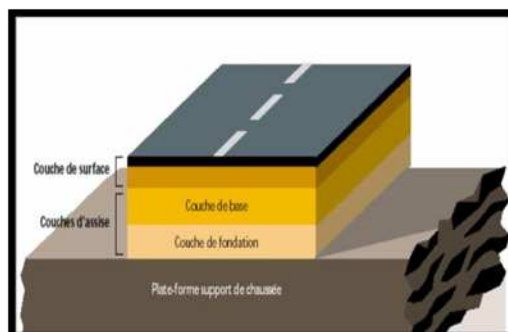


Figure 11 : Schéma d'une structure de chaussée type souple (<http://www.cours-genie-civil.com/>)

d.2. Chaussée semi – rigide

Elle comporte une couche de surface bitumineuse reposant sur une assise en matériaux traités par des liants hydrauliques disposés en couche (base) ou deux couches (base et fondation), ce type de chaussée n'existe à l'heure actuelle qu'à titre expérimental en Algérie (Elgaroui et Houichiti, 2010). (Figure 12)

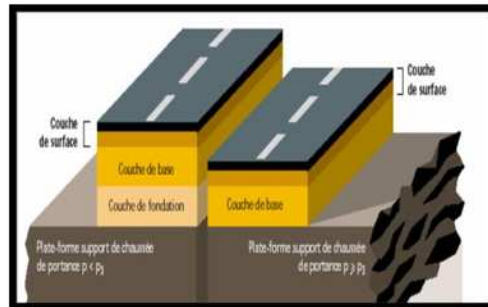


Figure 12: Schéma d'une structure de chaussée type semi rigide (<http://www.cours-genie-civil.com/>)

d.3. Chaussée rigide

Elle est constituée d'une dalle de béton, éventuellement armée (correspondant à la Couche de surface de chaussée souple) reposant sur une couche de fondation qui peut être un grave stabilisé mécaniquement, un grave traité aux liants hydrocarbonés ou aux liants hydrauliques (figure 13).

Ce type de chaussée est pratiquement inexistant en Algérie.

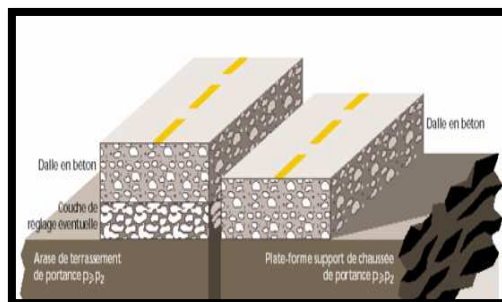


Figure 13 : Schéma d'une structure de chaussée type rigide(<http://www.cours-genie-civil.com/>)

Chapitre II

La zone d'étude

1. Situation géographique de la zone d'étude

Notre zone d'étude se situe dans la localité de Sidi Fredj, cette dernière est une presqu'île qui se situe à 30km à l'Ouest d'Alger (**figure 14**).



Figure 14 : Situation géographique du port de Sidi Fredj (Google earth, 2016).

Le port de Sidi Fredj est construit en 1969 par l'architecte français Fernand Pouillon dans la partie orientale du cap et inauguré en 1971 par le ministre du tourisme.

Le port représente l'élément moteur du complexe touristique de Sidi-Fredj, couvre une superficie totale de 38.000 m² et doté d'une capacité de 300 unités, il est le mieux équipés des ports de plaisance de la région algéroise, il peut accueillir plus de 400 navires, des petits voiliers et canots automobiles jusqu'aux yachts de plusieurs mètres

2. Configuration du port

Le port de plaisance de Sidi-Fredj comprend :

- a. **Un plan de masse** : Il est réparti en cinq (05) darses (Ou bassins) qui permettent l'accostage des bateaux (**figure 15**):
 - **Bassin (1)** : c'est le bassin le plus éloigné de l'entrée du port, et c'est celui qui accueille le déversement d'eaux usées par l'égout principal,

- **Bassin (2)** : Délimité par l'épi de la tour mauresque (appontement 2) et l'épi de la station d'essence,
- **Bassin (3)** : c'est le bassin de l'hivernage, il est délimité par la grande jetée,
- **Bassin (4)** : Délimité par l'appontement (3) à l'intérieur et la petite jetée à l'extérieur,
- **Bassin (5)** : situé à la sortie du port et communique avec le large.

Tableau 03 : Superficie et profondeur de chaque bassin du port de Sidi Fredj (**LEM , 1998** in Zemenzer, 2004)

Bassins portuaires	Superficie (m ²)	Profondeur (m)
01	8000	0.60 - 2.60
02	3000	2.5
03	5000	1.50 – 4.50
04	10000	2.50 – 3
05	9400	3.50

b. Les appontements

Les appontements jouent le rôle d'une passerelle pour assurer une occupation équilibrée du plan d'eau suivant le nombre d'embarcations et le tirant d'eau ils sont en nombre de huit (08) (**Zemenzer, 2004**), on distingue deux types d'appontements(**Halaili et Boukhennaf, 2010**) :

- **Les appontements Fixes** : Ils sont au nombre de quatre (04), ils sont utilisés lorsque le niveau de l'eau dans le bassin est peu variable et que les tirants d'eaux ne sont pas très important

Tableau 04 : Les dimensions des appontements fixes

Appontement fixes	Longueur (m)	Largeur (m)
Appontement 1	28	4
Appontement 2	62	3
Epi pétrolier	110	5
Appontement 3	82	3.5

- **Les appontements flottants :** Ils sont au nombre de quatre (04), ils peuvent augmenter en période estivale 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.

c. **Les ouvrages extérieurs**

Ces ouvrages constituent une barrière contre les houles et les apports solides on distingue ;

- **La grande jetée Nord :** C'est la jetée principale, elle a une longueur de 260 m, se termine par un musoir.
- **La petite jetée Sud :** C'est la jetée secondaire, elle a une longueur de 200 m, elle délimite la plage Est de Sidi-Fredj.

Ces deux jetées sont de type digue à talus en enrochement naturels, le talus arrive jusqu'à une profondeur approximative de 1.5m.

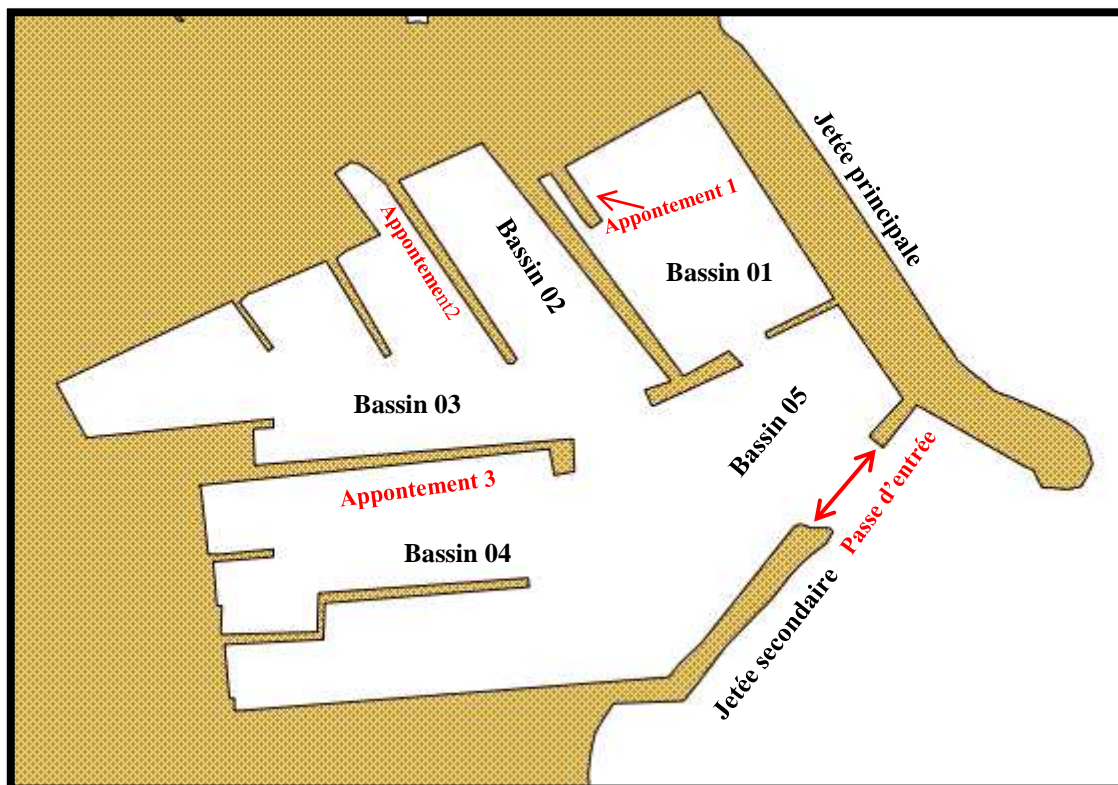


Figure 15 : Plan de masse du port de Sidi-Fredj (Azrarak et Beggar, 2013)

1. **La communication avec le large :**

D'après (Yakhlef et Zaoui, 2013), Les sources de pollution dans le port sont :

2. Les rejets des travaux d'entretien des embarcations (peinture, casiers, huiles détergents...)
3. L'égout qui se jette dans le bassin 01 du port.
4. Les rejets des hydrocarbures (pompe d'essence) et les macros déchets.

La communication avec le large du côté Est et l'accès ce fait par la passe d'entrée orientée vers le Nord-est d'une largeur de 50 m et une profondeur de 04 m, alors que du côté Ouest, la communication avec le large est assurée par le petit canal qui se situe à proximité de la tour mauresque.

Malgré ces apports importants de pollution, la communication avec le large est minime, ainsi on constate que l'eau des bassins est insalubre ce qui implique que la communication avec le large est réduite et insuffisante pour le renouvellement des eaux (Bellahsene, 2002).

3. Données océanographiques

3.1. La houle

Le régime de la houle dans la région de Sidi Fredj est proportionnel à celui des vents, il se caractérise par :

- En hiver : Les houles de direction Ouest dominant avec des hauteurs significatives allant de 0.75 à 5.25m, ces houles engendrent des courants de retour qui entraînent les sédiments vers le large.

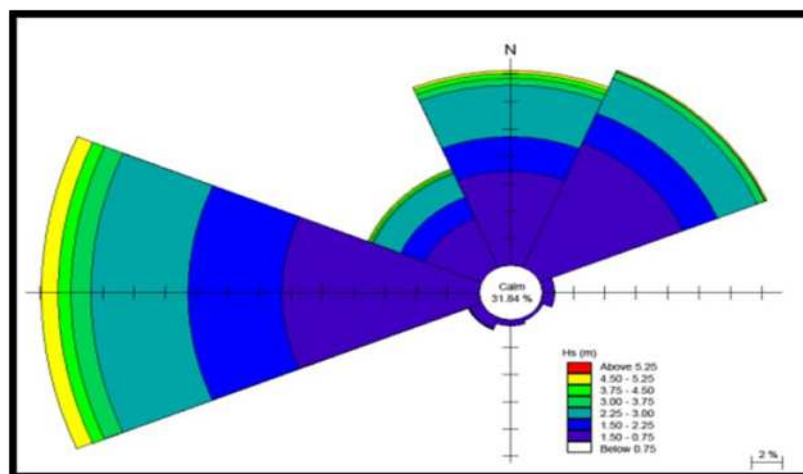


Figure 16: Rose des vagues au large de la côte algérienne- Hiver (CTH, 2008)

- En été, les directions dominantes sont issues de secteur Nord-Est avec des hauteurs significatives allant de 0.75 à 3m.

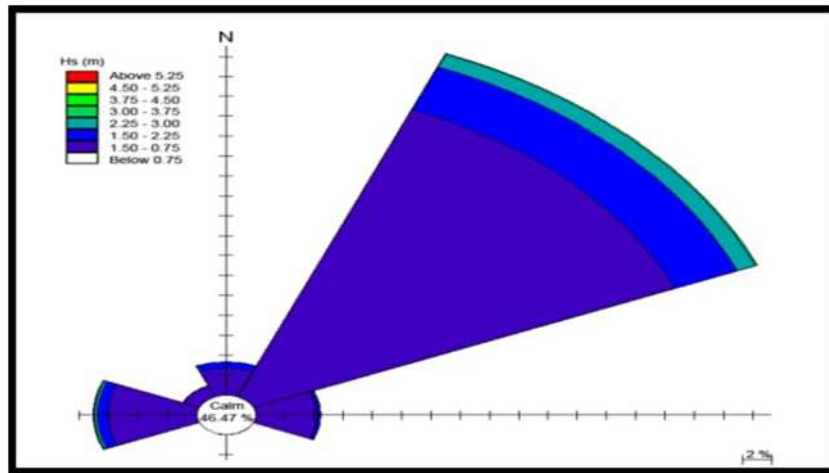


Figure 17 : Rose des vagues au large de la côte algérienne-Eté-(CTH, 2008)

3.2. La bathymétrie

En comparant les levés bathymétriques de 1977 et 1984 et celui de 2009 fait par le CTH, on remarque qu'en 1977 (Figure 18), les bassins (1), (2) et (3) du port ont connu un ensablement important par rapport aux bassins (4), (5) et la passe d'entrée.

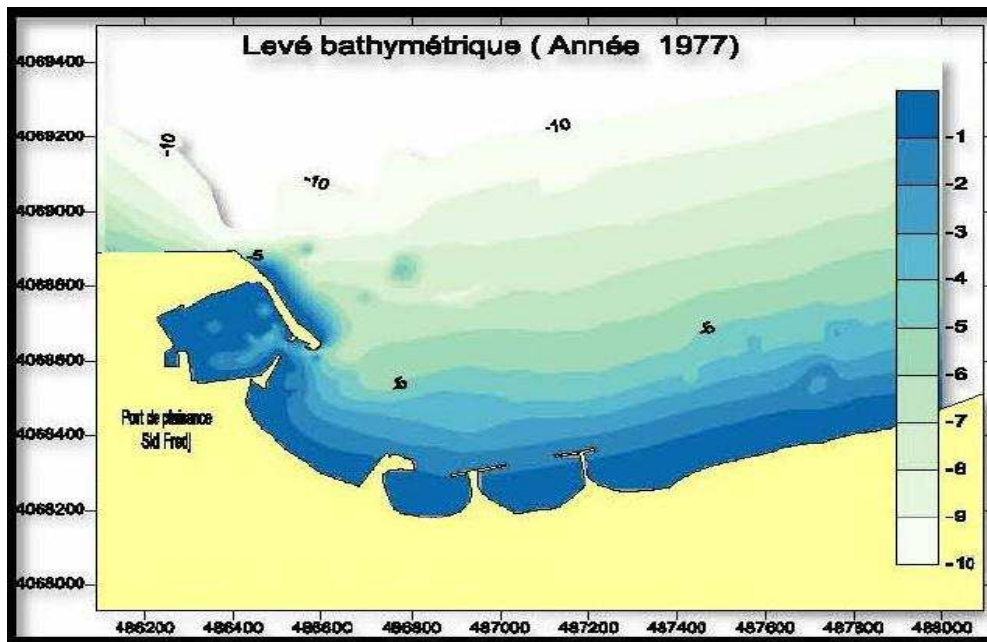


Figure 18: Levés bathymétriques de l'année 1977(CTH, 2011)

Entre 1977 et 1984, une opération de dragage a eu lieu, mais les levés bathymétriques de 1984 (**Figure 19**) montrent une accentuation du phénomène d'ensablement ou la profondeur maximale au niveau de chaque bassin est de 1.5m.

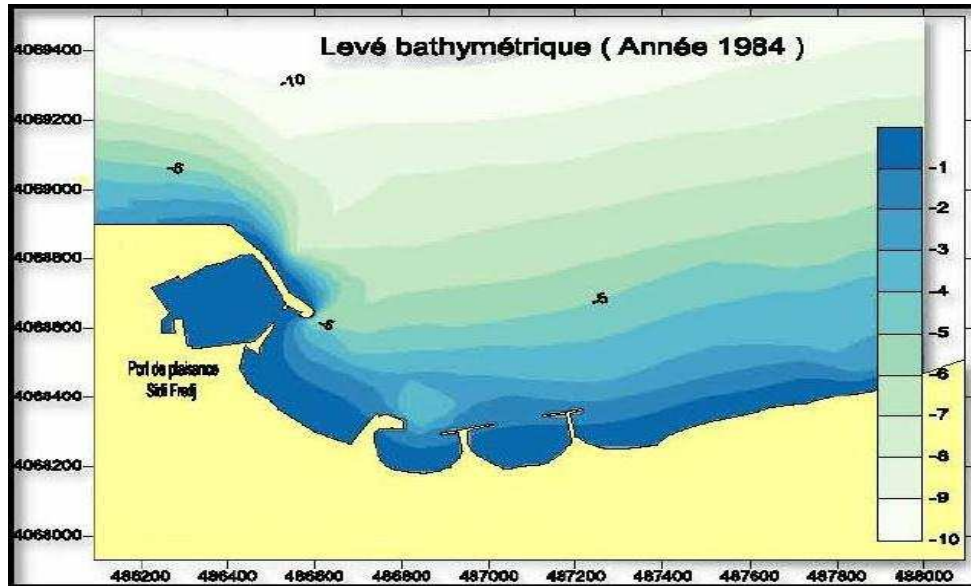


Figure 19: Levés bathymétriques de l'année 1984 (CTH, 2011)

Le levé bathymétrique de 2009 (**Figure 20**), montre un ensablement important au niveau des bassins ou la profondeur varie entre -1m et -3m contrairement à la passe d'entrée dont les profondeurs peuvent atteindre 5m.

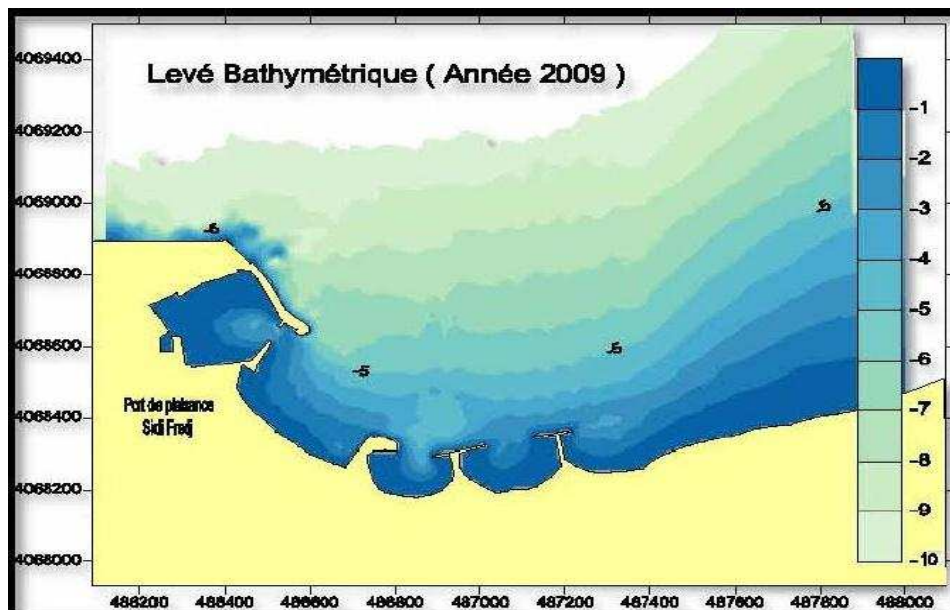


Figure 20: Levés bathymétriques de l'année 2009 (CTH, 2011)

D'après la **figure 21** qui montre des levés bathymétrique réalisés par HMI en 2012 et une carte bathymétrique fait par (**Azrarak et Beggar, 2013**), on remarque une bathymétrie qui varie entre 0.5 et 4m cela implique que le port connait un ensablement très important plus particulièrement au niveau de la passe d'entrée (0-0.5m)

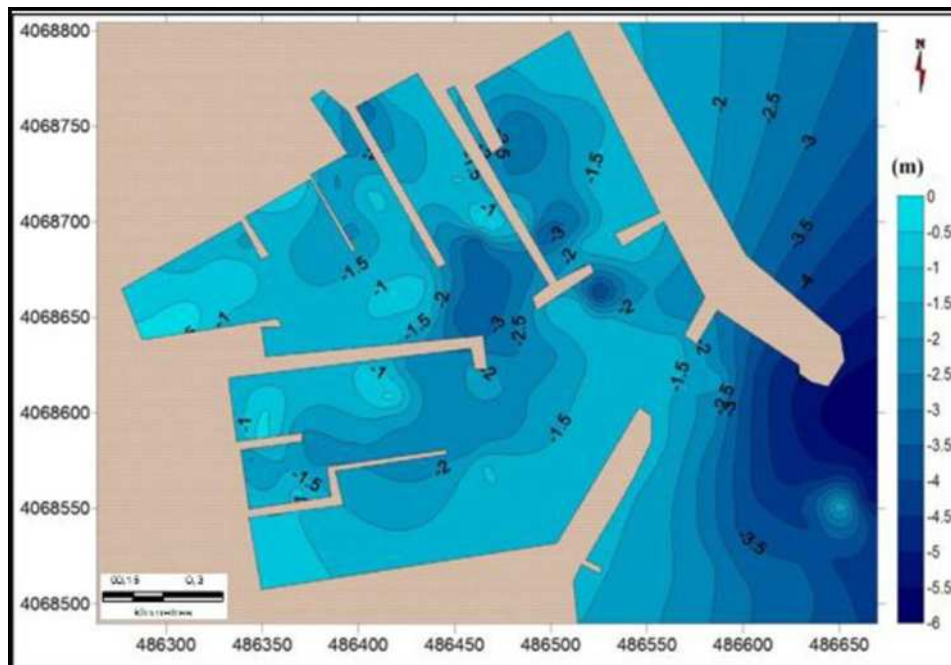


Figure 21: Bathymétrie du port de Sidi Fredj de 2012(**Azrarak et Beggar, 2013**)

4. L'ensablement du port de Sidi Fredj

Avant la construction du port en 1969, la région de Sidi Fredj était soumise à un double transit littoral : le transport Est-Ouest était le plus important et se produisait sous l'effet des vents de Nord-Est et le transport Ouest-Est sous l'influence des houles Nord-Ouest permettait de stabiliser la plage par un retour des sédiments sur la partie Est.

Après la construction de la première phase portuaire, le transport Est-Ouest est arrêtée par la structure portuaire, parallèlement une érosion de plages apparaît entre l'hôtel El Riad et le front de mer de Moretti, suivie d'un engraissement progressif de l'anse Est au détriment de la zone de Moretti.

Il a été constaté que les houles de direction Nord-Est arrive obliquement a la côte et provoque un tourbillon au niveau de la plage de Sidi-Fredj, ce tourbillon est accentué à cause de la présence des épis au niveau de cette zone, par ailleurs ces houles créent un courant qui remonte vers le port ce qui provoque probablement l'ensablement du port.

La modélisation de transport sédimentaire fait par le modèle mathématique vectoriel GSTA (**figure 22**), montre que les directions du transport sédimentaire sont perturbées, cela provoque des courants qui se dirigent vers le port provoquant ainsi l'ensablement.

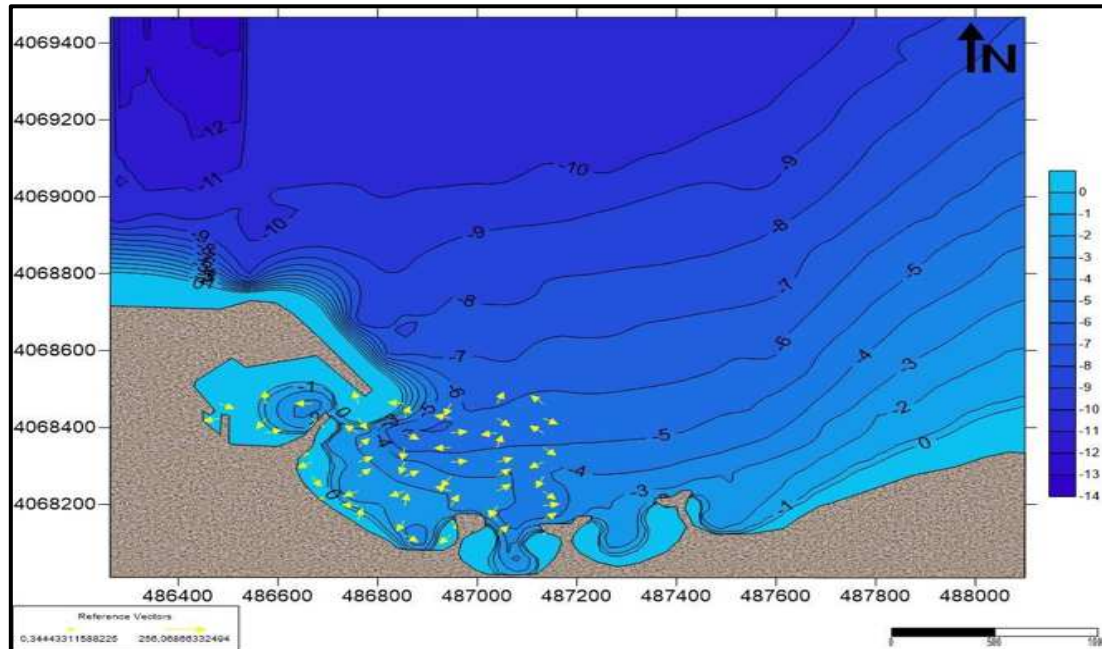


Figure 22: Modélisation du transport sédimentaire (Khalidi, 2015)

5. 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'à -4m de profondeur.

Le volume de sable dragué est estimé à 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.



Figure 23: Opération de dragage du port de Sidi-Fredj



Figure 24 : Dépôt de sédiment dragué au niveau de la plage de Sidi Fredj

Le **tableau 05** représente quelques opérations dont les données sont disponibles.

Tableau 05: Les opérations de dragage au niveau du port de Sidi Fredj (Aissat et Cheikh, 2013)

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

Chapitre III

Matériels et Méthodes

Introduction

Tout projet de conception d'une route nécessite une reconnaissance de site de réalisation du projet ainsi que les caractéristiques du matériau utilisé, de ce fait, différents essais doivent être effectués *in situ* et d'autres au laboratoire.

Les essais au niveau du laboratoire, qui font l'objet de ce travail permettent de déterminer une panoplie de caractéristiques liés à la nature du sédiment en place, outre leur implication directe dans les calculs (tassements et stabilité) (Elgaroui et Houichiti, 2010), ces caractéristiques permettront d'identifier notre sédiments afin de le classifier en fonction des guides existants.

Le guide des terrassements routiers communément appelé **GTR**, précise la nature des matériaux et donne les caractéristiques indispensables pour leurs utilisations ainsi que les mesures à prendre pour y parvenir (Cabane, 2004).

1. Classification des sédiments de la passe d'entrée du port de Sidi Fredj

Pour déterminer la faisabilité des sédiments de dragage de la passe d'entrée du port de Sidi Fredj en techniques routières et plus particulièrement en couche de forme, notre matériau doit être classé selon le GTR qui se base sur les paramètres suivants :

- Le D_{max} ;
- Le tamisât à $80\mu\text{m}$;
- Le tamisât de 2mm ;
- I_p et VBS (éventuellement ES).

Ces paramètres permettent de faire en premier lieu une classification primaire selon la nature des matériaux, on peut distinguer trois grandes familles :

Famille 01 :

En fonction de ces paramètres et des seuils fixés, on peut distinguer quatre grandes classes :

Tableau 06 : Les différentes classes de la famille 01

Paramètres de nature	Classe
$D_{max} \leq 50\text{mm}$ et tamisât à $80\mu\text{m} > 35\%$	A- Sols fins
$D_{max} \leq 50\text{mm}$ et tamisât à $80\mu\text{m} \leq 35\%$	B- Sols sableux et graveleux avec fines
$D_{max} > 50\text{mm}$ et tamisât à $80\mu\text{m} > 12\%$ ou si $80\mu\text{m} \leq 12\%$ VBS $> 0.1\%$	C- Sols comportant des fines et des gros éléments
VBS ≤ 0.1 et tamisât à $80\mu\text{m} \leq 12\%$	D- Sols insensible à l'eau

La famille 02 : la famille des sols organiques et sous-produits industriels :

Cette famille concerne les matériaux particuliers dont l'emploi en remblai et en couche de forme, la connaissance des teneurs des matériaux organiques dans un sol peut révéler essentiel d'un point de vue technique et économique.

La famille 03 : La famille des sols rocheux

Cette classe concerne les matériaux rocheux dont le diamètre est supérieur à 50 mm, leurs emplois en remblai et en couche de forme nécessitent la connaissance de leur nature géologique ainsi que la connaissance de leur comportement mécanique (fragmentabilité, dégradabilité, masse volumique...).

La classification GTR est expliquée à travers **la figure 25**.

Afin de réaliser cette étude, une sortie en mer a été programmée le 04/05/2016 au port de Sidi-Fredj afin de faire des prélèvements de sédiments.

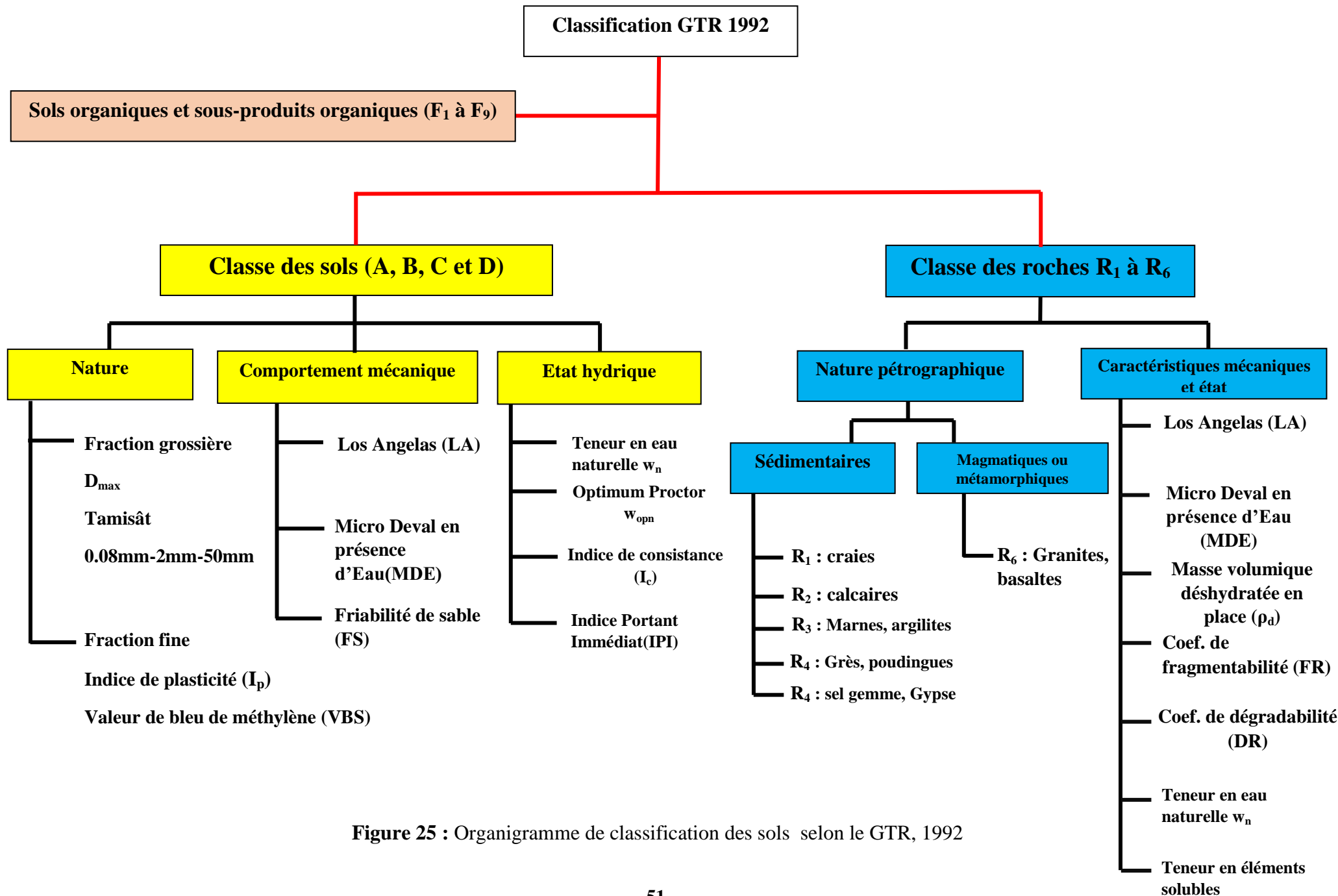


Figure 25 : Organigramme de classification des sols selon le GTR, 1992

2. prélèvement des échantillons

Les prélèvements ont été effectués au niveau de la passe d'entrée du port de Sidi Fredj qui connaît un ensablement important, le choix des stations de prélèvement a été fait d'une manière aléatoire en raison de l'homogénéité de la nature des sédiments accumulés dans la passe d'entrée du port.

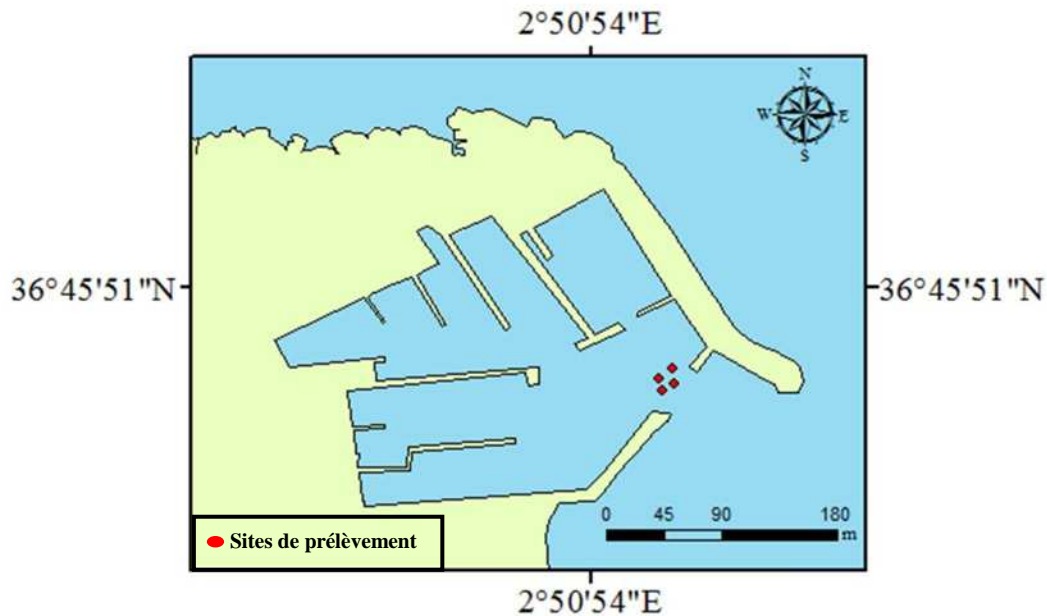


Figure 26 : Localisation des sites de prélèvements.

1.1.La technique de prélèvement de sédiment

Les prélèvements des sédiments au niveau de la passe d'entrée du port de Sidi Fredj ont été effectués à bord de l'embarcation « Aurès », lors de la campagne, nous avons utilisé deux types de benne, une grande et une petite (**photo 01**).



Photo 01 : Le prélèvement à bord de l'embarcation

2.1. Mode de fonctionnement de la benne

La benne est munie de mâchoires amovibles que l'on fait descendre au fond de la mer à l'aide d'une corde.

Lors de la descente, les mâchoires sont ouvertes, dès qu'elles touchent le fond, la vanne qui les maintenait ouvertes se relâche et au moment de la remontrée, les mâchoires se referment pour emprisonner une quantité de sédiment.

A bord de l'embarcation la benne est ouverte et son contenu y est collecté dans des seaux.

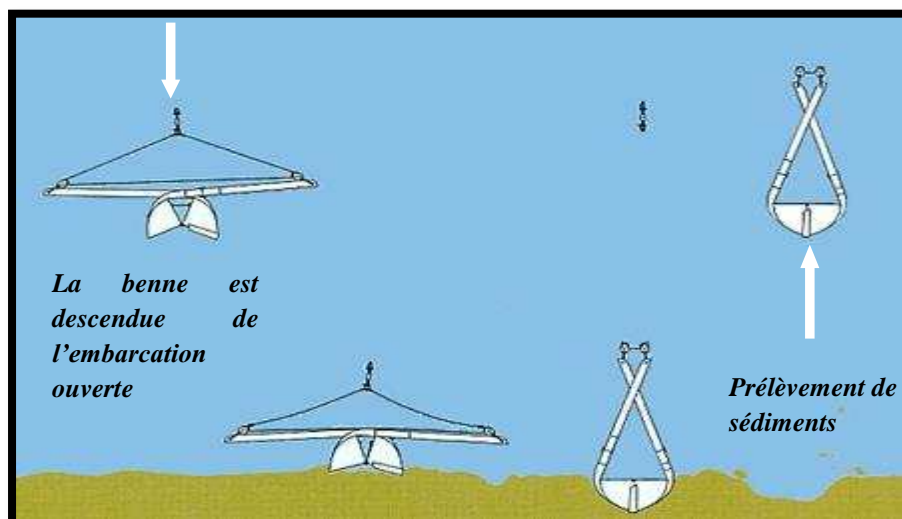


Figure 27: Mode de fonctionnement d'une Benne (Otmani, 2014).

3. L'identification des sédiments de port de Sidi Fredj

La détermination des caractéristiques des sédiments a été effectuée à travers une série d'essais physiques et autres mécaniques

3.1. Les essais physiques

3.1.1. La teneur en eau à la saturation w_{sr} :

La teneur en eau représente un paramètre important, car elle définit l'état hydrique du matériau et intervient directement lors de la valorisation en matériaux routiers, elle dépend essentiellement de la méthode de prélèvement et de type de matériau du site.

a. Principe

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.



Photo 02 : L'eau à l'état de saturation

a. Appareillage

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

b. Mode opératoire

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

- Numéroter 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 .

c. Expressions des résultats

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

$$w_{sr} (\%) = m_w / m_s \quad \text{.....(01)}$$

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).

3.1.2. 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 (**Ben Abdelghani et al. 2014**), 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.

a. principe de la méthode

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 (**Djerad, 2010**).

b. Appareillage

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

c. Mode opératoire

- Numéroter et peser les creusets vides et noter P_1 ;
- Tarer la balance de précision ;
- Peser une quantité de sédiments P (**Photo 03.a**) ;
- Placer les creusets dans un four à moufle pendant 02 heures à 600°C (**Photo 03.b**) ;
- 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 leurs contamination qui peut entraîner un biais des résultats (**Photo 03.c**) ;
- Placer les creusets dans un dessiccateur afin d'absorber l'humidité ;

- Repeser les creusets et noter P_2 .



Photo 03 : Les étapes principales de détermination de la teneur en MO

d. Expression des résultats

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

$$\text{MO (\%)} = \frac{(P_i - P_f) * 100}{P_i} \dots\dots\dots(02)$$

Avec :

MO (%) : La teneur en matière organique ;

$P_i = P_1 + P$: Le poids initial du sédiment sec (g) ;

$P_f = P_2$: Le poids de sédiment incinéré (g) ;

3.1.3. L'analyse de la fraction grossière (supérieure à 80 μm)

La détermination de répartition des différentes classes granulométriques supérieures à 80 μm est un paramètre de nature qui se reporte à des caractéristiques intrinsèques qui ne varient pas dans le temps, ce paramètre est déterminé par l'analyse granulométrique.

a. L'analyse granulométrique

La granulométrie est une caractéristique nécessaire, non seulement pour la définition même du sédiment mais aussi pour la formulation des matériaux routiers (Tribout, 2010).

Pour la granulométrie par tamisage, la masse de matériau à tamiser M (en kg) doit être telle que :

$$M \geq 0,2 * D \dots\dots\dots(03)$$

Avec :

D = diamètre du plus gros granulat en mm

b. Principe

Cette méthode consiste à faire passer un échantillon de sédiment à travers une série de tamis de mailles décroissantes emboîtés les uns sur les autres, ensuite peser le refus de chaque tamis et calculer le pourcentage pour enfin tracer une courbe granulométrique qui va permettre de caractériser la distribution granulaire des particules fines à grossières du matériau.

c. Mode opératoire

- Etuver une quantité de sédiment à une température de 105° pendant 24h ;
- Après séchage, peser $m_1=1000g$;
- Rincer le sédiment sec à l'aide d'un tamis de $80\mu m$ afin d'éliminer la fraction fine ;
- Le refus du tamis de $80\mu m$ est mis dans une boîte de pétri et remis à l'étuve pendant 24h à une température de $105^{\circ} C$;
- Après séchage, on pèse le sédiment à nouveau et noter m_2 afin de calculer le taux de pélite (%) = m_1-m_2 ;
- Faire passer le sédiment à travers une série de tamis de maille décroissante et tamiser à l'aide d'une tamiseuse de fréquence 45 Hertz pendant 10 minutes ;
- A la fin de tamisage, peser le refus de chaque tamis afin de tracer une courbe granulométrique.



Photo 04 : Tamiseuse

d. Expression des résultats

La courbe granulométrique est tracée en diagramme semi-logarithmique avec :

- En abscisse, le logarithme de la dimension des ouvertures des tamis en valeurs croissantes ;
- En ordonnée, le pourcentage, en poids du matériau total de la fraction du sol dans les grains ont un diamètre moyen inférieur à celui de l'abscisse correspondante (**Plumelle et al. 2013**).

A travers cette analyse granulométrique on déterminera les paramètres suivants :

- **Le D_{\max} à 50 millimètres** : c'est la dimension maximale des plus gros éléments contenus dans le sol, cette caractéristique permet de faire la scission entre les différentes classes des sols (A, B, C et D).

Cette caractéristique régit, en particulier, les possibilités pratiques de réaliser le mélange du sol avec les produits de traitement (**Corte et al. 2000**)

- **Le tamisât à 0,08 millimètre** : Cette caractéristique exprime la finesse du matériau, et d'évaluer par la suite leur sensibilité à l'eau.
- **Le tamisât à 2 millimètres** : permet de distinguer les sols à tendance sableuse, des sols à tendance graveleuse.
- **Le coefficient d'uniformité**

Le coefficient d'uniformité caractérise la répartition en taille des éléments qui composent un matériau de type sol (**Belkacemi, 2015**), il est calculé par la relation suivante :

$$C_u = d_{60} / d_{10} \dots\dots\dots(04)$$

- **Le coefficient de courbure**

Calculée par la relation suivante :

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{60} \times d_{10}} \dots\dots\dots(05)$$

Avec :

d_{10} , d_{30} et d_{60} , les diamètres pour lesquels les pourcentages de tamisât cumulés sont respectivement de 10%, 30% et 60%

En géotechnique, la connaissance de cette caractéristique fournit, dans le cas des matériaux granulaires donne une information qualitative sur les valeurs des dosages qui seront nécessaires pour atteindre le niveau de résistance visé (Bimbard *et al.* 2000).

3.1.4. L'analyse de la fraction fine (inférieure à 80 μ m)

La teneur en particules fines peut être déterminée par trois paramètres :

3.1.4.1. 1. Les limites d'Atterberg

La consistance d'un sol fin varie avec sa teneur en eau (Plumelle *et al.* 2013), la délimitation des frontières de la consistance d'un sol fin a été l'idée de suédois Atterberg et qui est basée sur les variations des teneurs en eau qui indiquent les différents états de consistance d'un sédiment fin.

Ces limites sont :

- **La limite de liquidité (w_L)**

Elle est définie comme la valeur de la teneur en eau pour laquelle le sol passe de l'état liquide à l'état plastique, elle est déterminé à l'aide de la coupelle de Casagrande ou à l'aide du pénétromètre.



Figure 28 : Coupelle de Casagrande (<http://www.geotech-fr.org/>)

- **La limite de plasticité (w_P)**

La limite de plasticité représente la valeur de la teneur en eau (%) pour laquelle le sol passe de l'état plastique à l'état solide, elle est déterminée par la méthode du rouleau.

Ces deux limites permettent de déterminer l'indice de plasticité

- **L'indice de plasticité**

L'indice de plasticité est défini par la différence entre la limite de liquidité et celle de plasticité, il représente le domaine situé entre l'état liquide et l'état solide, d'où la relation :

$$I_p = w_L - w_p \dots\dots\dots(06)$$

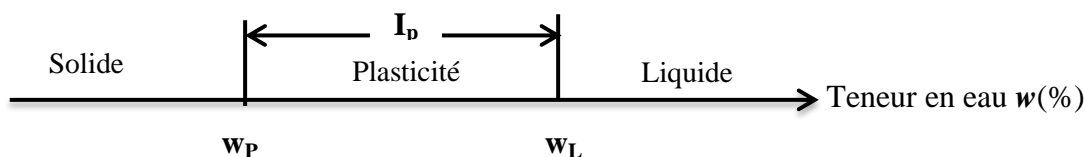


Figure 29 : Consistance d'un sol (Plumelle et al. 2013)

3.1.4. 2. Valeur au bleu de méthylène (VBS)

Il représente la quantité de bleu de méthylène pouvant s'adsorber sur les surfaces externes et internes des particules du sol, ou autrement dit une grandeur directement liée à la surface spécifique du sol (Corte et al. 2000).

a. Le principe d'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'absorption du bleu de méthylène sur les particules d'argiles est terminée.

b. Appareillage

- Bécher ;
- Appareil agitateur ;
- Un dispositif de dosage ;
- Papier filtre ;
- Solution de bleu de méthylène ;
- Eau distillée ;

c. Mode opératoire

L'essai de la détermination de la valeur de bleu de méthylène est réalisé selon la norme

AFNOR NF P 94 - 068

- Tamiser un échantillon de sable à travers un tamis de 5mm ;
- Peser 60g ;
- Introduire l'échantillon dans un bécher de 3000cm³ et ajouter 500 cm³ d'eau distillée, ces derniers sont mis en suspension et dispersé à l'aide d'un agitateur à ailettes

(vitesse (700 ± 100) tr/min) pendant 10 minutes jusqu'à disparition visuelle de tout agglomérat de particules de sol dans la suspension ou de toute accumulation sur les bords du récipient (**Photo 05.a**) ;

- A l'aide d'un dispositif de dosage, introduire 5cm^3 de bleu de méthylène et agiter à une fréquence de 400 tr/min (**Photo 05.b**) ;
- 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 (**Photo 05.c**) ;
 - À partir de ce moment, laisser se poursuivre l'adsorption du bleu dans la solution et effectuer des taches, 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.

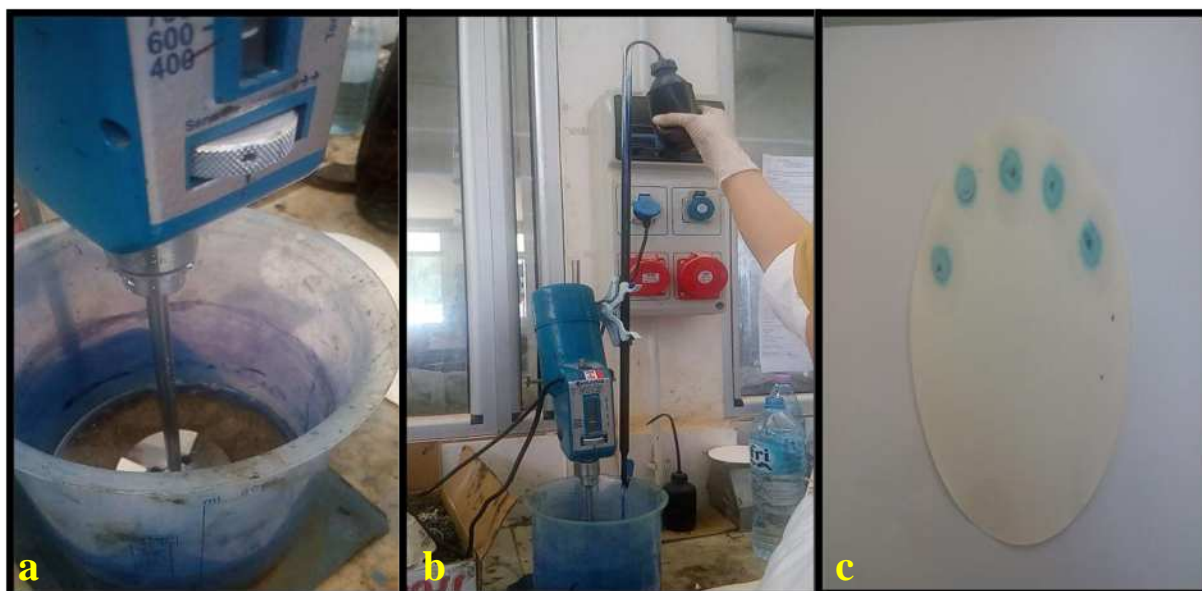


Photo 05 : Les étapes principales de l'essai du bleu de méthylène

d. Expression des résultats

La VBS s'exprime en gramme de bleu pour 100 g de matériau

$$\text{VBS} = \frac{B}{m_0} \times 100 \quad \text{.....(7)}$$

Avec :

B : la masse du bleu introduite $V \times 0.01$

m₀ : la masse sèche de prise d'essai.

3.1.4.3. 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.

a. 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 flocculat au-dessus.

b. Matériels utilisés

- 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 ;

c. 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 l'ensemble pendant 10 minutes ;
- Laisser l'éprouvette reposer quelques minutes ;
- 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 20 minutes ;
- Après 20 minutes, le sable brut se dépose au fond de l'éprouvette et au-dessus se dépose le flocculat (l'argile +les particules fines).

A l'aide d'un réglet métallique, on mesure les hauteurs suivantes :

Sable brut + flocculat = h_1 .

Sable brut seul = h_2 .

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.

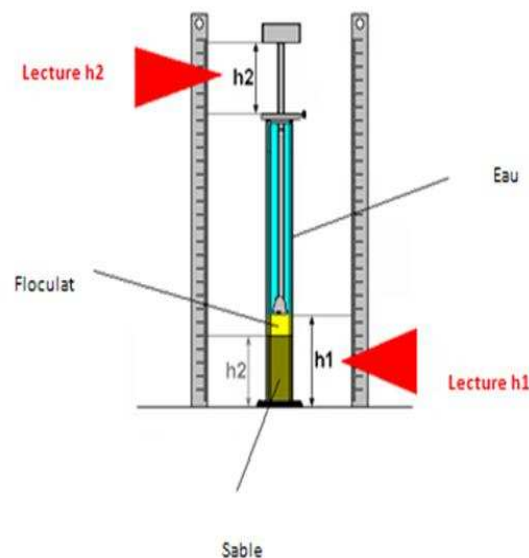


Figure 30 : Essai équivalent de sable (<https://www.univ-bpclermont.fr>)

d. 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 :

$$ES(\%) = (h_2/h_1) * 100 \quad \text{.....(08)}$$

3.2. Les essais mécaniques

Les essais mécaniques ont été réalisés au niveau de CTTT.

3.2.1. Compactage d'un sédiment

a. Définition

Le compactage est l'ensemble des opérations mécaniques qui conduisent à accroître la densité en place d'un sédiment. Cette opération augmente la compacité d'un sol, donc resserrer la texture du matériau, réduit les possibilités de la déformation du terrain et améliorer sa capacité portante (**Costet et Sanglerat, 1981**).

L'évaluation d'aptitude de compactage d'un sédiment de dragage est effectuée à l'aide de l'essai de Proctor (**Achour, 2013**), il existe deux types d'essais de Proctor qui diffèrent selon l'énergie de compactage.

- **L'essai de Proctor normal**

Energie de compactage modérée pour remblais en terre (barrages en terre, digues,...).

- **L'essai de Proctor modifié**

Energie de compactage intense pour fondation de chaussées, les remblais et couche de forme...).

b. Principe de l'essai de Proctor

L'essai de Proctor consiste à humidifier un sédiment à plusieurs teneurs en eau croissantes et le compacter selon un procédé et une énergie identique et normalisé afin de déterminer la

masse volumique sèche du matériau (ρ_d), l'essai de Proctor doit être réalisé sur un matériau dont le diamètre maximal ne dépasse pas 20mm.

A la fin de l'essai, on trace une courbe qui représente les variations de la masse volumique sèche en fonction de la teneur en eau [$\gamma_d=f(w)$], elle est appelée **courbe Proctor**.

c. Appareillage

- Tamis d'ouvertures de mailles carrées de dimensions nominales de 20mm ;
- Moule Proctor : c'est un moule cylindrique, ouvrable en deux coquilles et fixé sur une base ;
- La dame de Proctor : elle est définie par son diamètre, sa masse et sa hauteur de chute.
- Règle à araser ;
- Balance de précision ;
- Des sacs hermétiques permettant de conserver la teneur en eau des échantillons ;
- Bacs d'homogénéisation pour préparation du matériau ;
- Spatule, etc.
- Eprouvette ;
- Récipients ;
- Etuve ;
- Pinceau ;
- Eau.



Photo 06 : Appareillage Proctor Normal

d. Mode opératoire

L'essai de Proctor Modifié a été réalisé selon la norme **AFNOR NF P 94 093**.

- Le matériau prélevé doit être séché à l'air ou dans une étuve à une température 50°C maximum jusqu'à un état hydrique sec ;
- Après le séchage, le matériau est passé par un tamis de 20mm et seul le tamisat est conservé pour l'essai ;
- On pèse 2500 g de sédiment pour la confection d'une seule éprouvette et on le met dans un bac ;
- Le volume de l'eau distillée est déterminé à partir la teneur en eau de départ ($w = 04\%$) en utilisant la formule suivante $w(\%) = W_w/W_s$;
- A l'aide d'une éprouvette, humidifier le matériau et malaxer à la main jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène ;
- Mettre le mélange dans des sachets hermétiques afin de conserver sa teneur en eau.
- Avant l'introduction de du matériau dans le moule :
 - Enlever la rehausse du moule de Proctor ;
 - Tarer la balance de précision ;
 - Peser l'embase du moule et noter P_1 ;
 - reposer la rehausse du moule ;
- Introduire alors une quantité de matériau pour que la hauteur de la première couche après compactage soit légèrement supérieure au cinquième de la hauteur du moule (**Photo 07.a**) ;
- Compacter cette couche avec la dame en appliquant respectivement 25 coups par couche suivant **la figure 31** et en répétant l'opération pour les autres couches (**Photo 07.b**) ;

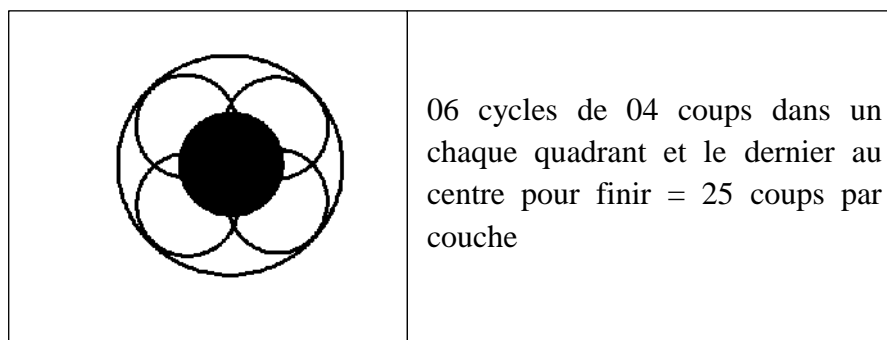


Figure 31 : Schéma principe de la répartition des coups de dame par une couche (AFNOR, 1999)

- Après le compactage de la dernière couche, la rehausse est retirée, le sédiment doit être dépassé le moule d'une hauteur d'un centimètre au maximum ;
 - Cet excédent est arasé soigneusement à partir du centre en évitant de créer des trous sur la surface arasée (**Photo 07.c**) ;
 - Après l'arasement, peser l'ensemble et noter P_2 ;
 - Extraire deux prises représentatives de l'échantillon l'une en haut et l'autre en bas ;
 - Déterminer la teneur en eau de chaque prise ;
 - Puis, on détermine la teneur en eau moyenne des deux prises (w) ;
- Déterminer la masse volumique du matériau sec, celle-ci est exprimé par la relation suivante :

$$\rho_d = \frac{(P_2 - P_1)}{(1+w)V_{\text{moule}}} \dots\dots\dots(09)$$

Avec :

- ρ_d : la masse volumique sèche de sédiment en (t/m^3) ;
- P_1 : le poids du moule vide en (g) ;
- P_2 : le poids du moule et sédiment humide en (g) ;
- V_{moule} : volume du moule en (cm^3) ;
- Ces opérations sont répétées de 03 fois, en augmentant à chaque essai la teneur en eau de 2% de l'échantillon de départ et à la fin de chaque essai on nettoie le moule.



Photo 07: Les étapes principales de l'essai Proctor modifié

e. Expressions des résultats

On trace la courbe Proctor [$\rho_d=f(w)$] avec :

- En abscisse : la teneur en eau w ;
- En ordonnée : la masse volumique sèche du matériau ρ_d .

Cette courbe a pour but de déterminer les caractéristiques optimales de Proctor (W_{OPM} , $\rho_{d OPM}$).

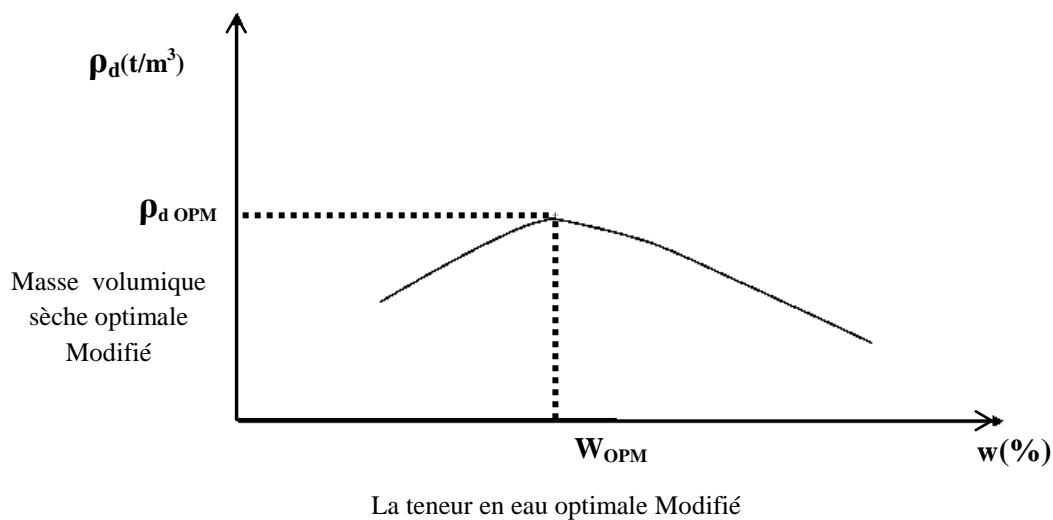


Figure 32 : Courbe Proctor

3.2.2. L'essai de friabilité de sable

a. Principe de l'essai

L'essai de friabilité de sable consiste à mesurer la quantité de sable inférieur à 0.1mm produite, en soumettant les sables, écrêtés à 2 ou 4mm, à l'abrasivité de billes, en présence de l'eau dans un cylindre en rotation (**Plumelle et al. 2013**).

b. appareillage

- Appareil Micro-Deval
- Tamis de 0.2mm et 2mm.
- Charge broyante constituée de billes sphériques en acier de diamètre :
 - 30 mm
 - 18mm

- $10 \pm 0.5 \text{ mm}$.
 - Etuve.
 - Bacs.
- c. Mode opératoire**

L'essai de friabilité de sable est réalisé selon la norme **AFNOR NF P18 576**.

- Tamiser par voie humide le matériau sur le tamis 0.2mm et 2mm ;
- Sécher à l'étuve pendant 24h à une température de 105°C ;
- Homogénéiser et peser l'échantillon pour un essai qui doit être de 500 g ($\pm 2\text{g}$) ;
- Préparation de la charge broyante :
 - Prendre 9 billes de 30 mm de diamètre, ajouter 11 billes de 18 mm de diamètre et compléter par des billes de 10 mm de diamètre jusqu'à l'obtention d'une masse de $2500\text{g} \pm 4\text{g}$ (**Photo 08.a**).
- Introduire la charge dans le cylindre d'essai, puis les 500g de matériaux préparé ;
- Ajouter 2.5 l de l'eau (**Photo 08.b**) ;
- Mettre le cylindre en rotation à la vitesse de $100 \text{ tr/min} \pm 5\text{tr/min}$ pendant 15 minutes (**Photo 08.c**) ;
- Après 15 minutes, verser lentement la totalité du contenu du cylindre sur deux tamis superposés de 08mm et 0.1mm ;
- Laver l'ensemble sous jet jusqu'à eau claire, puis enlever le tamis de 08 mm ;
- Sécher le refus au tamis à l'étuve à 105°C ;
- Tamiser à sec le refus à un tamis de 0.1mm ;
- Peser le refus.



Photo 08 : Les étapes principales de l'essai de friabilité de sable

a. Expression des résultats

Le calcul de coefficient de friabilité est donné par la relation suivante :

$$FS = (m / M) * 100 \dots\dots\dots(10)$$

Avec :

M : Masse de l'échantillon en g.

m : masse des éléments inférieur à 0.1mm en g.

3.2.3. Résistance au cisaillement

On définit la résistance au cisaillement comme la contrainte de cisaillement maximale que le sol peut supporter, il existe deux principaux types d'essais au laboratoire utilisés pour déterminer la résistance au cisaillement :

- essai de cisaillement direct ou boîte de Casagrande ;
- essai triaxial.



Figure 33:B de cisaillement



Figure 34 : Appareil triaxial

Source : (<http://www.geotech-fr.org>)

Dans notre étude, on va détailler l'essai de cisaillement direct .

a. But de l'essai

L'essai de cisaillement permet d'une part de tester la résistance d'un sol donné et d'autre part, il permet de tracer la courbe intrinsèque du sol étudié, et de déterminer son **angle de frottement interne ϕ** et sa **cohésion C**, ces deux derniers paramètres sont utilisés pour le

dimensionnement des fondations et le calcul de coefficient de sécurité FS à la rupture des talus.

$$\tau = c + \sigma \times tg\phi \quad \dots\dots\dots(11)$$

Avec

τ : contrainte au cisaillement

σ : Contrainte appliqué à l'éprouvette

C: Cohésion

ϕ : Angle de frottement interne.

b. Les modalités de réalisation de l'essai

▪ Essai drainé et non drainé

1. Essai drainé

Lorsque le système de drainage est mis en communication avec l'atmosphère et la vitesse d'application de déviateur de contrainte étant suffisamment faible pour qu'une aucune pression interstitielle ne se développe au sein de l'éprouvette, l'essai est dit **drainé**.

2. Essai non drainé

Le drainage étant fermé, aucun échange avec l'extérieur n'est possible, l'essai est dit **non drainé**.

▪ Essai consolidé et non consolidé

1. Essai consolidé

Lorsqu'on applique une contrainte verticale sur l'éprouvette et le système de drainage est ouvert jusqu'à la dissipation complète de pression interstitielle, on dit que l'essai est **consolidé**.

2. Essai non consolidé

Si, en revanche, le système de drainage est fermé, on commence tout de suite à faire croître la contrainte verticale, l'essai est dit **non consolidé (Léreau, 2006)**

Selon les différentes modalités de réalisation de l'essai, différents types d'essais :

UU : Essai non consolidé drainé

CU : essai consolidé non drainé

CD : consolidé drainé

c. Principe de l'essai

L'essai s'effectue sur une éprouvette de sol de forme cylindrique, dont la teneur en eau et la densité est connue, placée dans une boîte de cisaillement constitué de demi-boîtes indépendantes qui peuvent se déplacer horizontalement l'une par rapport à l'autre.

On applique une force verticale donnée sur l'échantillon jusqu'à la compression désirée, puis une force horizontale sur la partie inférieure de la boîte pour permettre le cisaillement.

d. Appareillage :

L'appareillage spécifique à l'essai de cisaillement (AFNOR, 1994):

- Le bâti.
- La boîte de cisaillement.
- Le dispositif d'application de l'effort normal sur l'éprouvette.
- Le dispositif produisant le déplacement relatif horizontal entre les deux demi-boîtes.
- Le système de mesure des efforts, des déplacements et du temps.

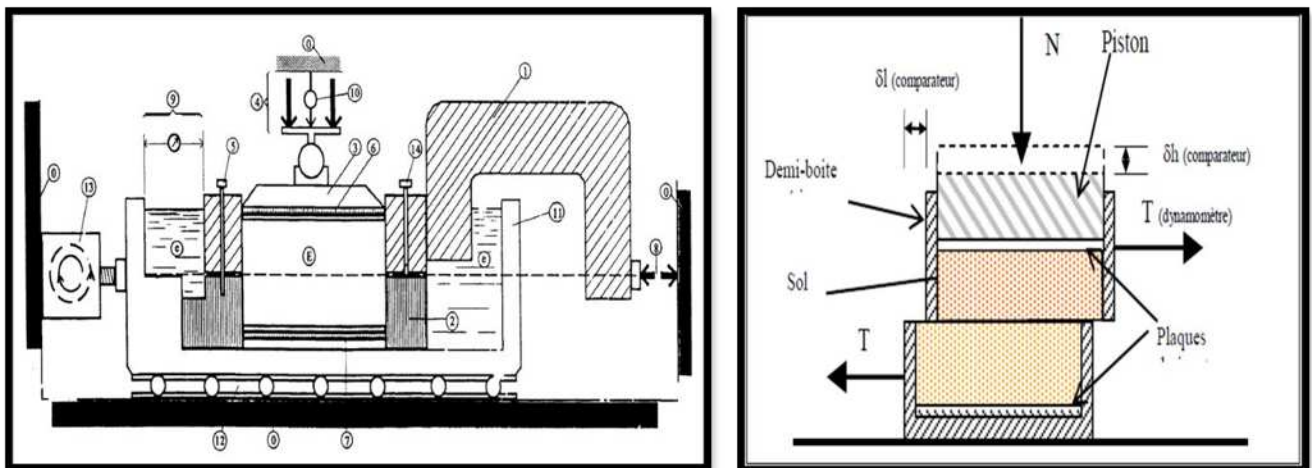


Figure 35 : Schéma des différentes parties de la boîte de cisaillement (AFNOR, 1994)

0 Bâti

1 Demi-boîte supérieure

2 Demi-boîte inférieure

3 Piston rigide

4 Dispositif d'application de l'effort vertical N centré sur le piston

5 Solidarisation des demi-boîtes

6 Plaque drainante supérieure

7 Plaque drainante inférieure amovible

8 Dispositif de mesure de l'effort horizontal T

9 Dispositif de mesure de déplacement relatif horizontal

10 Dispositif de mesure de déplacement vertical

11 Châssis étanche

12 Glissière sans frottement

13 Système de déplacement à vitesse constante

14 Vis de soulèvement de la demi-boîte

e Eau déminéralisée

E Eprouvette de sol

L'essai de cisaillement direct est réalisé selon la norme **AFNOR NF P 94-071-1** selon les étapes suivantes :

d.1 Préparation de l'éprouvette :

- Peser 300g de sable ;
- Peser 18.9 ml d'eau, ce volume est obtenu à partir de la formule suivante :

$$V = m * W_{OPM} \dots\dots\dots(12)$$

Avec :

V : volume d'eau

m : masse de sédiment = 300g

W_{OPM} : la teneur en eau optimale de notre sable.

- Confectionner des éprouvettes de sol dont la hauteur est telle que :

$$6 d_{max} \leq h \leq L/2 \dots\dots\dots(13)$$

Avec :

h : la hauteur de l'éprouvette (mm).

L : diamètre du coté intérieur de la boîte de cisaillement de section droite.

d_{max} : La dimension maximale des particules constituant le matériau, on prend en considération :

- $d_{max} \leq 5\text{mm}$ dans le cas de la boîte de 60mm de côté.
- $d_{max} \leq 8\text{mm}$ dans le cas de la boîte de 100 mm de côté.

- Tailler les éprouvettes (**photo 09.a**) de telle sorte que les dimensions de la section cylindrique de l'éprouvette soit ajustée au mieux à celles de la boîte et que la hauteur (h) en mm soit telle que :

$$20 \leq h \leq L/2 \dots\dots\dots(14)$$

- Placer une plaque drainante dans le fond de la demi-boîte inférieure ;
- Introduire l'éprouvette dans les deux demi-boîtes solidarisiées au préalable en s'assurant que le plan de glissement la partage en deux parties sensiblement égales (**photo 09.b**) ;

d.2 Phase de saturation et consolidation :

- Remplir le châssis avec de l'eau déminéralisé ;
- Placer la boîte de cisaillement contenant l'éprouvette dans le châssis étanche fixé sur le bâti (**photo 09.c**) ;
- Placer le piston munie de sa plaque drainante sur l'éprouvette (**photo 09.d**) ;
- Laisser reposer 24h avant l'application de l'effort ;
- Fixer le système de mesure de l'effort de cisaillement horizontal (T) et noter la valeur d'origine du capteur de l'effort ;
- Régler la position du capteur de mesure du déplacement relatif horizontal entre les deux demi-boîtes et noter la valeur originale ;
- Positionner le capteur de mesure du déplacement vertical du piston par rapport à un repère fixe et noter la valeur d'origine ;
- Appliquer sur la face supérieure de l'éprouvette un effort vertical (N) maintenant constant durant la durée de l'essai ;



Photo 09 : Les étapes principales de l'essai de cisaillement direct

- Mesurer le déplacement vertical du piston δ_h en fonction du temps, pendant 1 heure jusqu'à stabilisation, cette dernière est considérée atteinte lorsque la courbe ($\delta_h=f$ (temps)) a la forme comme l'indique la **Figure 36**, cette courbe qui permet de déterminer t_{100} ;

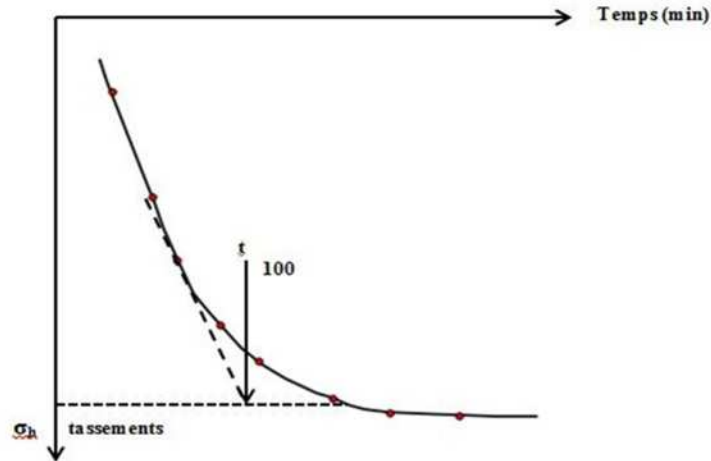


Figure 36 : Détermination de la fin de consolidation d'une éprouvette dans la boîte de cisaillement (AFNOR, 1997)

Phase de cisaillement

- Déterminer à l'issu de la phase de consolidation, la vitesse maximale de cisaillement par la relation suivante :

$$V_{\max} = 125 / t_{100} \quad \text{Avec} \quad V_{\max} \leq 25 \quad \dots\dots\dots(15)$$

Avec :

t₁₀₀ : la durée conventionnelle de consolidation de l'éprouvette sous un effort vertical (min).

- Libérer le système de solidarisation des deux demi-boîtes ;
- Supprimer le contact entre les deux demi-boîtes en agissant sur le vis de la boîte supérieure ;
- Produire un cisaillement dans l'éprouvette selon le plan horizontale de glissement des deux demi-boîtes l'une par rapport à l'autre en leurs imposant un déplacement relatif σ_1 a une vitesse constante $V \leq V_{\max}$;
- Arrêter le cisaillement si :

- La variation de l'effort (T) pour un intervalle de mesure correspondant à un déplacement horizontal δl de 0.5mm, est inférieure à 1/100 de l'effort maximal.
- Le déplacement horizontal δl a atteint au moins 5mm.
- Peser l'éprouvette et noter les particularités du plan de rupture ;
- Déterminer sa teneur en eau.
- La lecture des résultats se fait simultanément à chaque augmentation de déplacement horizontal d'environ 0.2mm jusqu'à 2 mm, puis tous les 0.5mm au-delà.

f. Expression des résultats :

Il faut calculer les paramètres suivants :

- **La contrainte normale effective σ'** est calculée par l'expression suivante :

Avec : $\sigma' = N / A$ (16)

σ' : contrainte normale effective.

N : L'effort vertical (N).

A : l'aire de la section transversale de l'éprouvette avant le cisaillement (cm²).

- **La contrainte de cisaillement τ** est calculée par l'expression suivante :

Avec : $\tau = T / A$ (17)

τ : La contrainte de cisaillement.

T : l'effort horizontal de cisaillement (N).

A : l'aire de la section transversale de l'éprouvette avant le cisaillement (cm²).

Tracer la droite de résistance au cisaillement τ en fonction de la contrainte normale effective σ' afin de déterminer les paramètres de résistance au cisaillement C qui Correspond au point d'intersection entre la droite et l'ordonné et ϕ à partir de la pente de la droite.

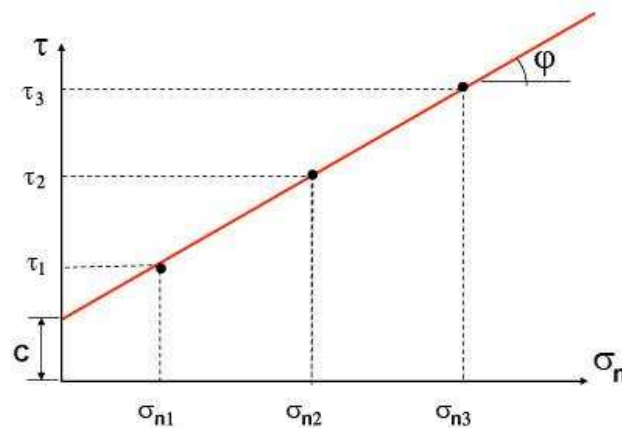


Figure 37: Courbe des contraintes de cisaillement en fonction des contraintes normales

3.2.4. L'essai œdométrique

a. 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.

b. Appareillage

L'appareil œdométrique comporte (**Figure 38**) :

- 0- Un bâti métallique permettant par l'intermédiaire d'un de levier d'appliquer au piston les pressions de consolidation désirées.
- 1- Eprouvette de matériaux.
- 2- Une cellule ou enceinte œdométrique de consolidation : moule cylindrique qui empêche toutes déformations radiales lors l'essai.
- 3- Disque drainant inférieur
- 4- 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.

- 5- Un couvercle pour répartir l'effort de compression sur la surface totale de l'échantillon.
- 6- Réservoir
- 7- Liquide d'imbibition
- 8- Un système de mesure
- 9- Effort N sur l'éprouvette (Chiki, 2010)

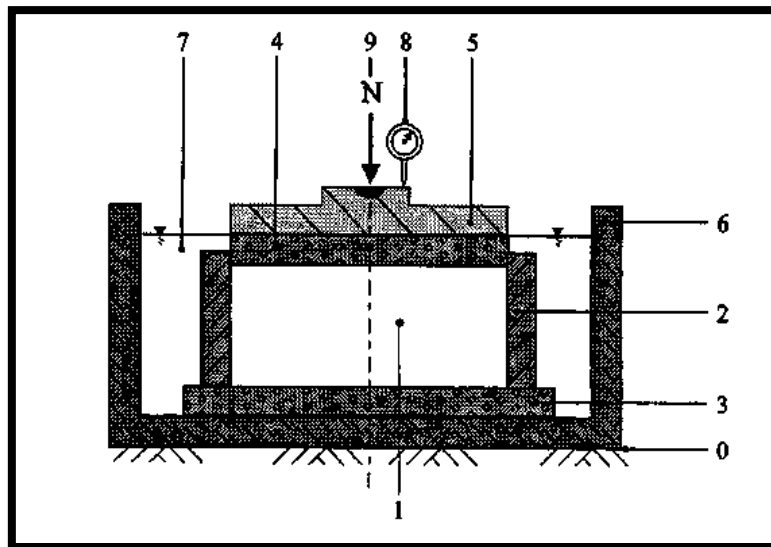


Figure 38 : Principe de l'oedomètre (AFNOR, 1997)

c. 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 (**photo 10.a**) ;
- Placer l'ensemble sur le bâti (**photo 10.b**) ;
- Appliquer des charges croissantes toutes les 24 heures (**photo 10.c**);
- 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 ;

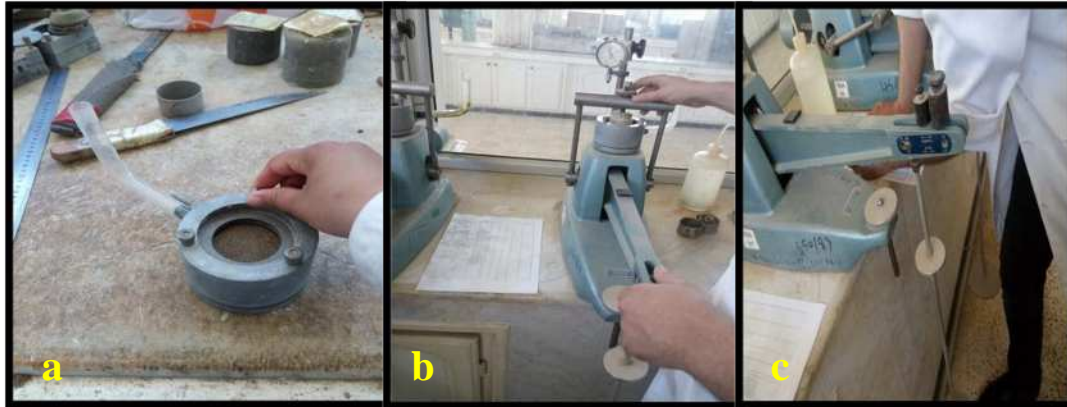


Photo 10 : Les étapes principales de l'essai oedométrique

d. Expressions des résultats

- Graphique

Cet essai permet de tracer une courbe de compressibilité (oedométrique) $[e, \log(\sigma_v)]$ 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.

Chapitre IV

Résultats et discussions

1. L'identification des sédiments de la passe d'entrée du port de Sidi Fredj

1.1. Les essais physiques

1.1.1. La teneur en eau à la saturation w_{sr}

Les valeurs permettant de calculer la valeur de la teneur en eau à la saturation des sédiments de la passe d'entrée du port de Sidi Fredj sont reportées dans le tableau 07.

D'après les calculs, la valeur de la teneur en eau est d'environ 36.46 %, cette valeur s'avère importante, ceci pourrait être expliquée par l'influence de la profondeur du prélèvement, le mode de prélèvement (benne, carottier), la nature des sédiments (leur capacité de rétention d'eau est fonction, par exemple, des teneurs en fines et en M.O.) et la destruction des particules organiques ou éléments volatils lors l'étuvage des sédiments.

Tableau 07 : Poids du sédiment humide et sec permettant le calcul de w_{sr}

	boîte de pétri vide(g)	sédiment humide(g)	sédiment + boîte de pétri (g)	après séchage (g)
échantillon 01	124,73	300	424,73	346,07
échantillon 02	125,67	299,99	425,66	346,37
échantillon03	129,33	300	429,33	346,87

La teneur en eau à la saturation (w_{sr}) moyenne= 36.46%

1.1.2. La teneur en matière organique

Les résultats de cet essai sont reportés dans le **tableau 08**

Tableau 08 : Résultats de l'essai de détermination de la teneur en MO

N° de creuset	Poids de creuset vide (g)	Masse de sédiment (g)	Creuset + sédiment après séchage (g)	Teneur en MO (%)
1	61.9292	5.0019	66.7484	3.65
2	63.1215	5.0005	67.6375	9.69
3	64.2014	5	68.9146	5.74
4	59.9575	5.0019	64.6755	5.68

Moyenne de la teneur en MO = 6.19%

La concentration de la matière organique dans les sédiments de la passe d'entrée du port de Sidi Fredj est d'environ 6%, ce taux est similaire à celui trouvé par l'étude faite par

Azrarak et Beggar en 2013, par contre la même étude a trouvé que le taux de la MO augmente dans les bassins 01 et 03 et en particulier à l'entrée du bassin 02 où le taux est estimé à 11.54%.

Contrairement à (**Bertrand et al. 2014**) qui considère qu'un matériau a une teneur en matière organique élevée à partir du moment où celle-ci est supérieure à 5%, 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%.

En se basant sur ce guide, on peut déduire que notre sédiment est faiblement organique.

1.1.3. L'analyse de la fraction grossière

La granularité est l'un des premiers paramètres géotechniques qui permet la classification d'un matériau, ce paramètre est fourni par l'analyse granulométrique.

Les résultats obtenus de l'essai granulométrique sont reportés dans le tableau **09**, ces résultats ont permis de tracer la courbe granulométrique (**Figure 39**).

Tableau 09: Résultats de l'analyse granulométrique

Tamis (μm)	masse (g)	% de refus	cumulés décroissants(%)
2000	0,4	0,04	99,96
1600	0,19	0,019	99,941
1400	0,25	0,025	99,916
1250	0,23	0,023	99,893
1000	0,62	0,062	99,831
800	1,77	0,177	99,654
630	2,99	0,299	99,355
500	5,86	0,586	98,769
400	10,3	1,03	97,739
315	24,48	2,448	95,291
250	38,5	3,85	91,441
200	184,7	18,47	72,971
180	67,93	6,793	66,178
160	375,69	37,569	28,609
140	105,3	10,53	18,079
100	122,39	12,239	5,84
80	16,29	1,629	4,211
<80	2,47	0,247	3,964

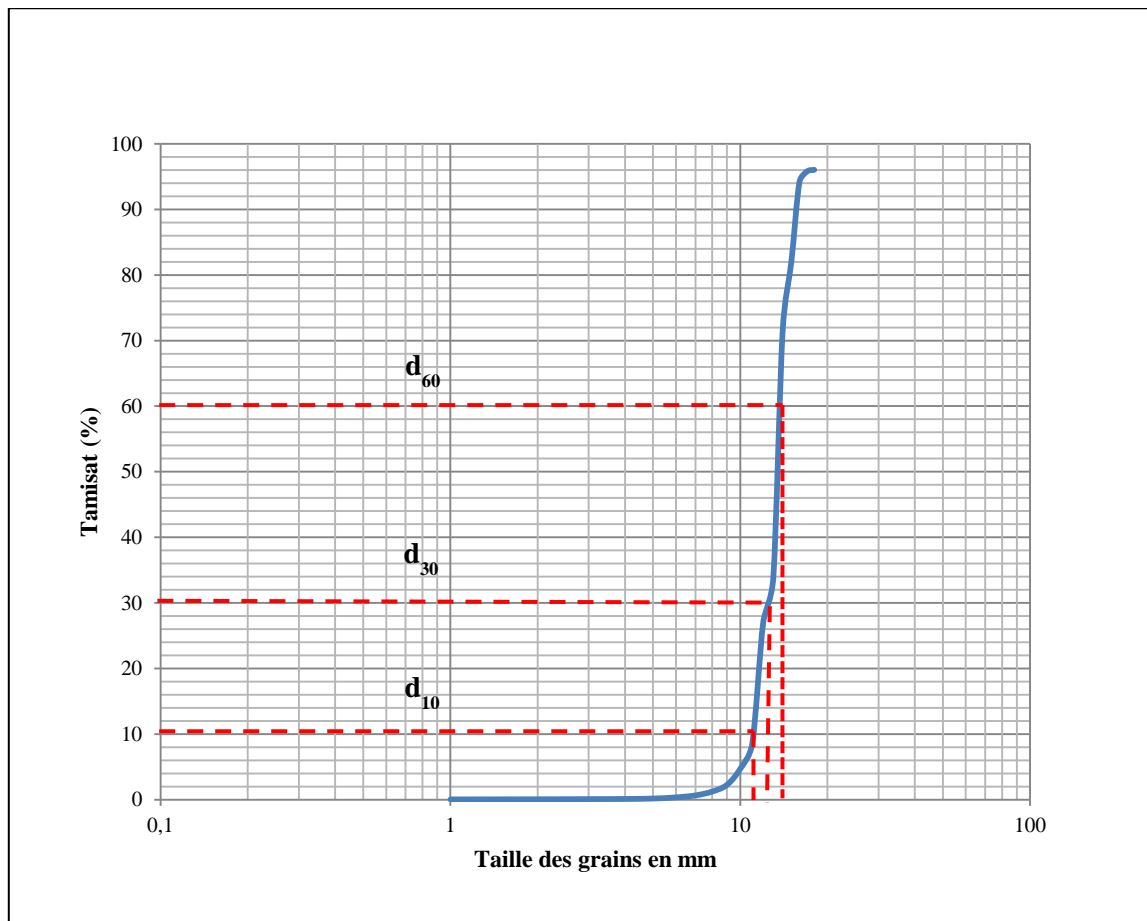


Figure 39 : Courbe de l'analyse granulométrique

En se basant sur la classification GTR (**tableau 10**), on déduit que notre sédiment est majoritairement du sable.

D'après les résultats de cet essai qui sont reportés dans le **tableau 11**, on remarque que notre échantillon présente une forte teneur en particule dont le diamètre est inférieur à 2mm, contrairement au pourcentage des particules fines dont le diamètre est inférieur à 80 μ m qui est d'environ 0.25%.

Le coefficient d'uniformité (C_u) et le coefficient de courbure (C_c) calculés à l'aide de la courbe granulométrique (**Figure 39**) permettent d'apprécier qualitativement la forme de la courbe, généralement un $C_u < 2$ reflète une granulométrie serrée ou uniforme (**Desodt et Reiffsteck, 2015**) et $C_c > 2$ témoigne une granulométrie variée ou étalée, d'autre part, une valeur de $C_c < 1$ indique une grandes quantité de particules fines par contre $C_c > 3$ renseigne sur la présence d'éléments grossiers.

En se basant sur la classification LCPC des sols grenus et sachant que notre sédiment présente une teneur en particules fines inférieures à 05 % , un C_c égale à 1.1651 et un C_u égale à 1.35, on déduit que notre sable est propre, mal gradué.

Tableau 10 : Classification GTR

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

Tableau 11: Paramètres granulométrique

Paramètres	Résultats
D_{max}	2 mm
Tamisât à 2 mm	96%
Tamisât à 0.08 mm	0.25%
D_{10}	0.1303
D_{30}	0.16342
D_{60}	0.17591
C_u	1.3500
C_c	1.1651

1.1.4 l'analyse de la fraction fine

1.1.4.1 Les limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg ainsi que l'indice de plasticité de sédiment de la passe d'entrée du port de Sidi Fredj sont indéterminés en raison de la faible teneur en particules fines (0.25%).

1.1.4.2 La valeur de bleu de méthylène VBS

Le résultat de l'essai de la VBS des sédiments de la passe d'entrée de Sidi Fredj est représenté dans le tableau 12 :

Tableau 12: Résultats de la VBS

Masse sèche de sédiment	$m_0 = 60g$
Quantité totale de la solution de colorant ajouté	B= 5ml*0.01
Valeur au bleu de méthylène (g de colorant/kg)	VBS = 0.083

La valeur de bleu de méthylène obtenue est inférieure à 0.1, selon la classification adopté par le GTR, représenté dans le **tableau 13**, cette valeur indique que notre sable est insensible à l'eau, cette caractéristique est vérifiée par le tamisât de 80 μ m qui est inférieure à 12%.

Tableau 13 : 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.

1.1.4.3 L'équivalent de sable

En 1978, la classification RTR 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 a considéré l'ES comme une valeur de référence, cette valeur n'est utilisée que pour se familiariser à la propreté du sable (**Corte et al. 2000**).

Les résultats de la détermination de la valeur d'équivalent de sable ES sont représentés dans le **tableau 14** :

Tableau 14 : Résultats de l'essai équivalent de sable ES

Type de mesure	Visuel			Par piston		
Eprouvette	1	2	3	1	2	3
Hauteur 1 (cm)	11,35	11,5	12	11.35	11.5	12
Hauteur 2 (cm)	11,1	11.4	11.8	10.65	10.8	11
ES (%)	97,797	99,130	98,333	93,833	93,913	91,667
ES moyen (%)	98,420			93,137		

Les valeurs de l'équivalent de sable visuel et par piston sont presque similaires, d'après la classification reportée dans le **tableau 15**, on déduit que les sédiments de la passe d'entrée du port de Sidi Fredj sont des sable très propres, cette particularité fournit à la chaussée une grande stabilité.

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

Conclusion

L'indice de plasticité, la valeur de bleu de méthylène ainsi que la valeur d'équivalent de sable sont des paramètres permettant de déterminer la teneur en particules fines d'un matériau, selon ces trois paramètres, nous avons pu conclure que les matériaux de la passe d'entrée du port de Sidi Fredj sont de nature sableuse propre présentant une teneur très faible en particules fines.

Ce résultat pourrait être interprété par l'agitation au niveau de la passe d'entrée du port de Sidi Fredj qui favorise la décantation des particules plus ou moins grossières alors que les particules fines sont déposées à l'intérieur des bassins où l'agitation est réduite.

1.2. Les essais mécaniques

1.2.1. L'essai Proctor

Les résultats de l'essai Proctor modifié réalisé dans le but de déterminer la masse volumique sèche optimale et la teneur en eau optimale de notre sédiment sont reportés dans le tableau suivant :

Tableau 16 : Résultats de l'essai Proctor modifié

N° essai	1	2	3
Eau ajoutée	4%	6%	8%
poids Embase vide (g)	3005	3005	3005
volume du moule	924,16	924,16	924,16
Poids Embase + sol humide (g)	4385	4451	4471
poids sol humide (g)	1380	1446	1466
Poids sol sec (g)	1326,92	1364,15	1357,4
densité du sol	1,44	1,470	1,46
Poids de bac vide (g)	656	656	662
Poids sol humide (g)	1184	1272	1235
Poids sol sec + bac (g)	1163,8	1237,1	1191,9
Poids de l'eau (g)	20,2	34,9	43,1
Poids de sol sec (g)	507,8	581,1	529,9
Teneur en eau %	3,98	6,01	8,13

A l'issu des résultats du tableau, on a pu tracer la courbe Proctor qui représente les variations de la masse volumique sèche en fonction de la teneur en eau ($\rho_d=f(w)$), à partir de cette courbe (**Figure 40**), on a déterminé les caractéristiques de compactage (ρ_{dOPM} , W_{OPM}) à partir du maximum de la courbe, ce maximum correspond à **l'optimum Proctor Modifié**.

On remarque une augmentation de la masse volumique sèche en fonction de la teneur en eau, cette augmentation s'arrête à l'optimum Proctor, à partir de cet optimum masse volumique sèche diminue.

Ces deux paramètres sont important sont utilisés selon le GTR pour la classification mais aussi ils renseignent sur les conditions de travail sur le chantier.

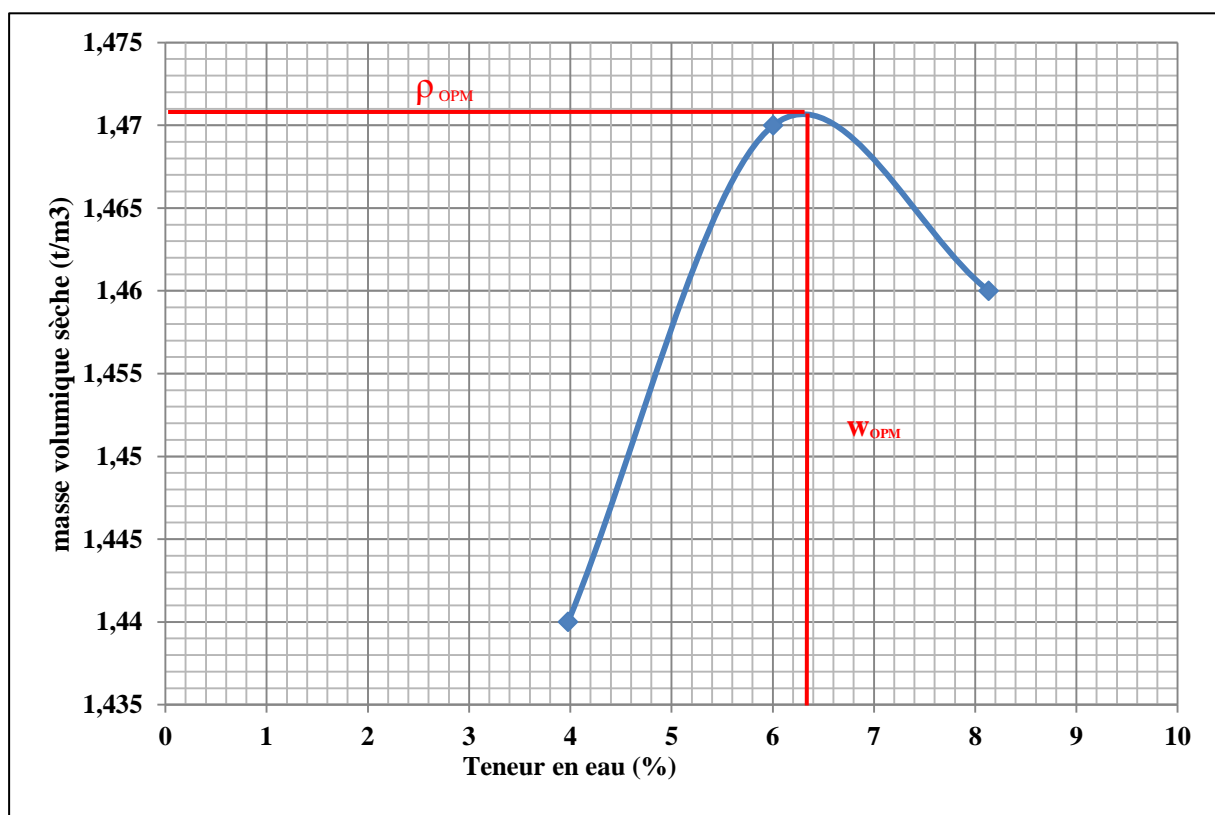


Figure 40 : Courbe Proctor

1.2.2. Essai de friabilité de sable :

L'indice de friabilité de sable **FS** est pris en considération pour juger la possibilité ou non de l'utilisation du matériau étudié en couche de forme. Il permet de distinguer les matériaux dont la fraction granulaire est susceptible de résister au trafic et qui de ce fait peuvent être utilisés tels quels dans la construction des couches de forme, de ceux qui risquent

de se fragmenter pour se transformer en un sol constitué en majorité d'éléments fins, inutilisable dans son état naturel sans traitement.

Le résultat de l'essai pour la détermination de l'indice de Friabilité de Sable FS est reporté dans le tableau 17.

Tableau 17 : Résultat de l'essai Friabilité de Sable FS

La masse de l'échantillon	M = 500 g
La masse des éléments inférieurs a 0.1mm	m = 139 g
Indice de Friabilité de Sable FS	FS = (m/M)*100 = 27.8 %

Les seuils retenus pour la distinction entre les sols résistants au trafic et les sols non résistants sont :

FS > 60 % : granulométrie fine et uniforme, constitué de grains friables sous l'action du trafic qui pourrait se transformer en éléments fins sensibles à l'eau ;

FS ≤ 60 % : granulométrie fine et uniforme, constitués de grains résistants au trafic.

L'indice FS de notre sédiment est de **27.8%** donc notre sédiment est résistant au trafic et peuvent être utilisé en couche de forme après quelques corrections et traitements.

1.2.3. La résistance au cisaillement rectiligne

Dans la présente étude, on a réalisé un essai de type Consolidé Drainé CD avec une vitesse de cisaillement de 0.0032 mm/mm.

Avant d'effectuer l'essai de cisaillement, les éprouvettes ont subi une consolidation drainée pendant 24h, et cela en appliquant pour chaque échantillon une charge de 0.5bars, 1bars et 2 bars respectivement. A la stabilisation, les forces horizontales ont été appliquées sur les trois échantillons. La figure suivante réalisée par le logiciel soltests présente les résultats obtenus lors de cet essai.



ORGANISME NATIONAL DE CONTROLE TECHNIQUE DES TRAVAUX PUBLICS

C.T.T.P

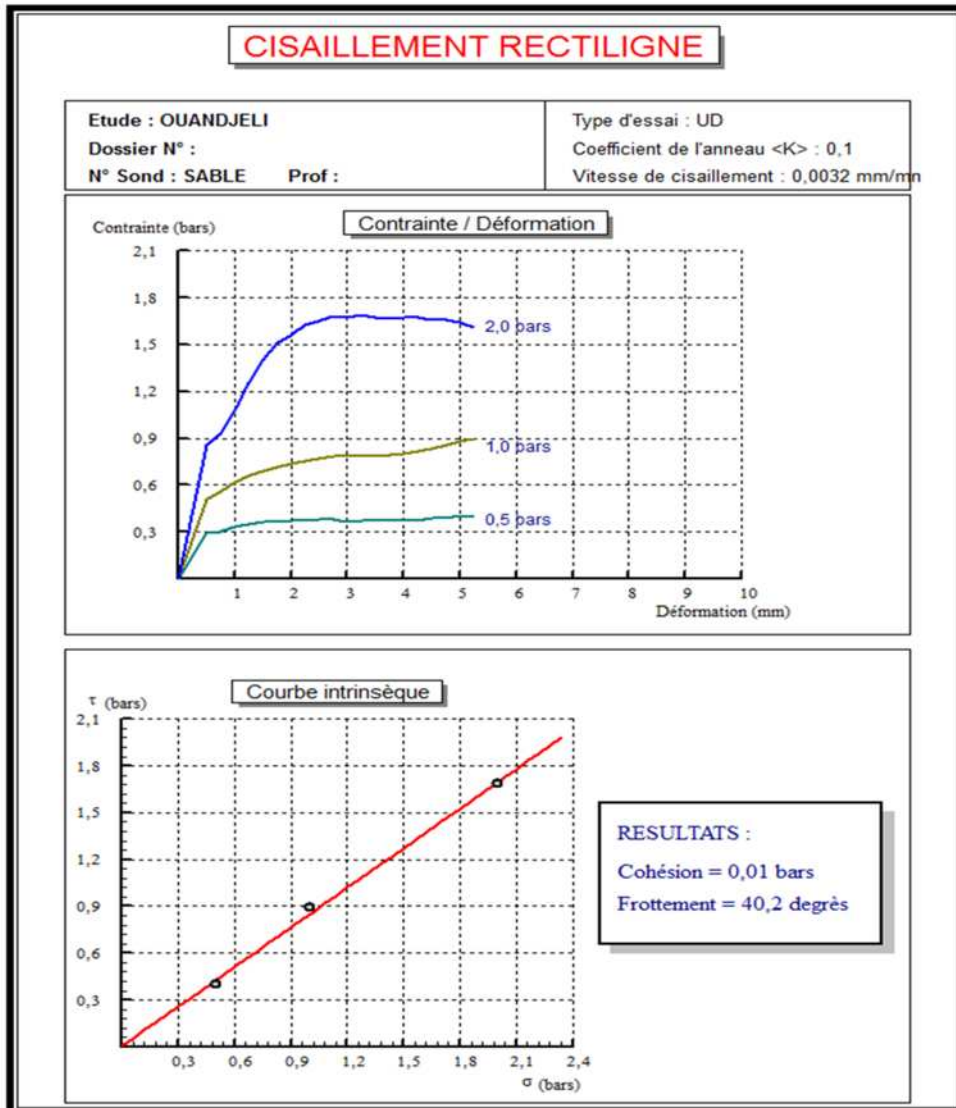


Figure 41 : Les différents résultats de l'essai de cisaillement rectiligne

La courbe intrinsèque des sédiments de la passe d'entrée du port de Sidi Fredj nous a permis de déterminer l'**angle de frottement interne ϕ** qui est de 40.2° et sa **cohésion C** qui est de 0.01 bars comme indiqué sur la même figure.

L'allure de la courbe intrinsèque est linéaire, mais les résultats montrent que nous avons affaire à un sol incohérent (**Cohésion C** très faible), par contre notre sédiment est très résistant car son **angle de frottement interne ϕ** est supérieur à 20° .

1.2.4. Essai de compressibilité

L'objectif de l'essai est d'étudier la compressibilité des matériaux de port de Sidi Fredj à travers une courbe : indice des vides - contrainte effective (Figure 42) réalisée par le logiciel soltests.

Le tableau 18 résume l'ensemble des caractéristiques de compressibilité

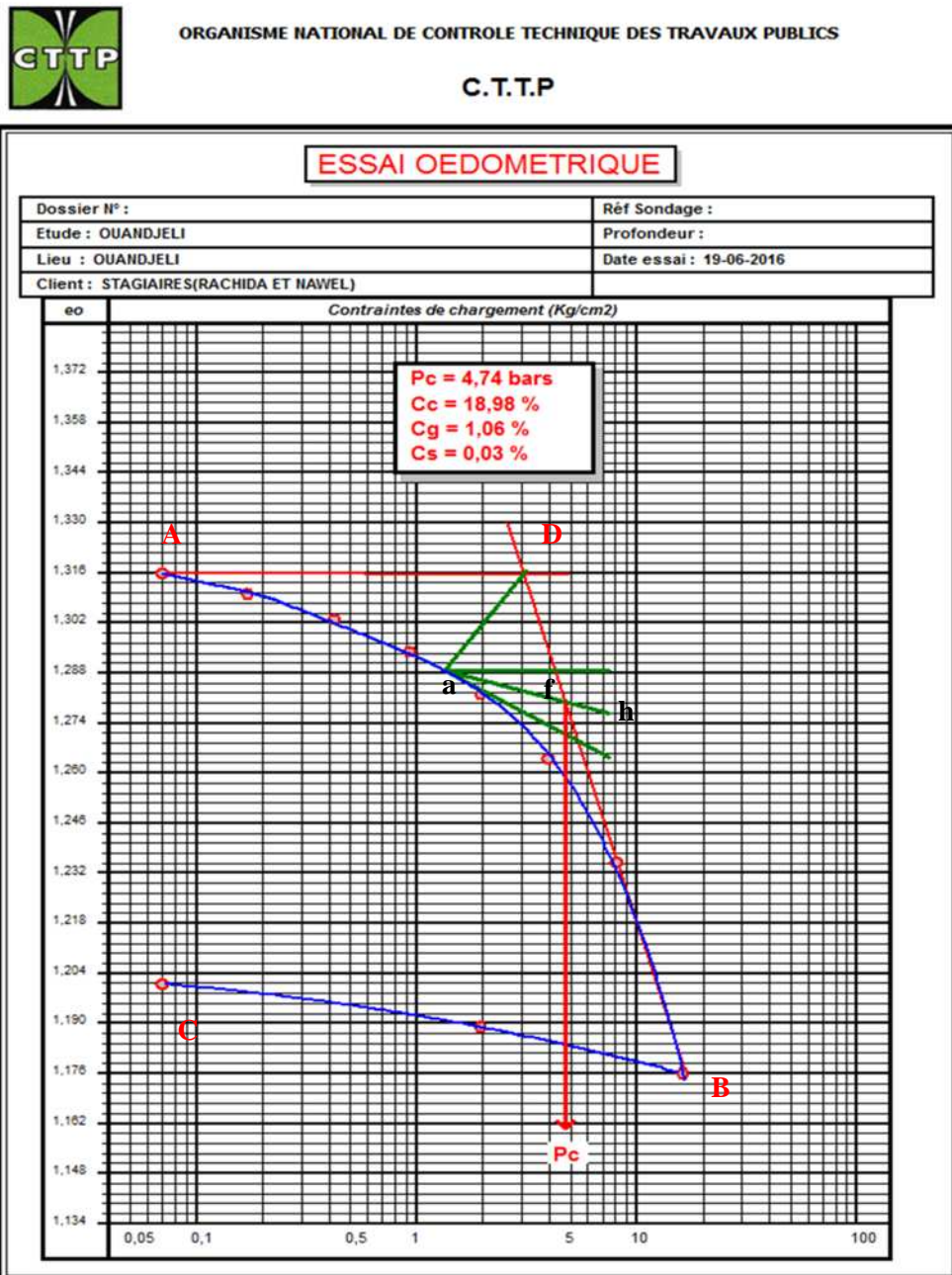


Figure 42 : Courbe de compressibilité

Tableau 18 : Les caractéristiques de compressibilité.

Paramètres	Caractéristique oedométrique
Indice des vides initial e_0	1.316
Indice des vides final e_f	1.2012
Pression de préconsolidation	4.74 bars
Indice de compression C_c	18.98 %
Indice de gonflement C_g	1.06 %

L'essai de compressibilité a permis d'obtenir une courbe de déformation des sables [e , $\log(\sigma)$] (**Figure 42**), cette courbe présente deux segments :

Segment AB : ce segment a une forme parabolique représentant une phase de compression (chargement par palier jusqu' à environ 18 kg/cm²), l'indice des vides initial e_i commence à diminuer jusqu'il atteint une valeur de 1.176, la variation d'indice des vides au cours de tassement est d'environ 0,1.

Segment BC : ce segment a une forme sensiblement rectiligne, il représente une phase de déchargement par palier où le sédiment subit une faible gonflement entraînant une très faible élévation d'indice des vides.

La faible variation d'indice des vides en fonction des contraintes de chargement montre que les sédiments de la passe d'entrée du port de Sidi Fredj sont faiblement compressibles, cela peut être interprété par la nature du sédiments qui est un sable.

La courbe oedométrique a permis de déterminer la pression de pré consolidation P_c qui égale 4.74 bars, elle représente l'intersection de la droite vierge (BD) et la tangente (ah) en point **f**, en comparant sa valeur avec la pression dues au poids de la terre (égale 04 bars), on peut déduire que notre échantillon est sur consolidé.

Les indices C_c et C_g obtenus de la courbe de compressibilité montrent que les sédiments de la passe d'entrée de Sidi Fredj sont faiblement compressibles. Cela pourrait être expliqué par la faible teneur en matière organique.

La faible compression de notre échantillon fournit à la couche de forme une grande stabilité.

2. La classification GTR des sédiments de la passe d'entrée du port de Sidi Fredj

2.1 Classification du sédiment selon la nature et le comportement mécanique

Pour utiliser les sédiments de la passe d'entrée du port de Sidi Fredj en techniques routières, il est nécessaire d'établir la classification GTR, la démarche de classification adoptée est expliquée à travers le **tableau 19**

Tableau 19: Classification des sols insensibles à l'eau selon GTR

Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique		
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Valeurs seuils retenues		Sous classe
VBS ≤ 0,1 et tamisat à 80 μm ≤ 12%	D Sols insensibles à l'eau	D _{max} ≤ 50 mm et tamisat à 2 mm > 70%	D ₁ Sables alluvionnaires propres, sables de dune...	Matériaux insensibles à l'eau; mais leur emploi en couche de forme nécessite la mesure de leur résistance mécanique (Los Angelès - LA - et/ou Micro Deval en présence d'eau - MDE -) ou Friabilité des sables (FS).	FS ≤ 60	D ₁₁
					FS > 60	D ₁₂
		D _{max} ≤ 50 mm et tamisat à 2 mm ≤ 70%	D ₂ Graves alluvionnaires propres, sables...		LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	D ₂₁
					LA > 45 et MDE > 45	D ₂₂
					LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	D ₃₁
					LA > 45 et MDE > 45	D ₃₂
D _{max} > 50 mm	D ₃ Graves alluvionnaires grossières propres, dépôts glaciaires,...					

D'après les résultats obtenus, on a pu faire une classification primaire de notre sédiment, en se basant sur le paramètre de granularité (tamisât de 0.08mm) et la valeur de bleu de méthylène (VBS), ces deux caractéristiques permettent de déduire que les sédiments de la passe d'entrée de port de Sidi Fredj sont des matériaux insensibles à l'eau représentant la **classe D**.

Un deuxième niveau de classification a été établi, en se basant sur le paramètre de la granularité plus particulièrement la valeur de D_{max} qui est de 02 mm et le pourcentage du tamisât à 2mm qui est de 96.25%, à travers ces deux paramètres, on a pu déduire que la nature des sédiments de la passe d'entrée de Sidi Fredj est un sable alluvionnaire propre ou un sable

de dune représentant la première **sous classe D₁** en fonction de la nature , ces matériaux ne présentent aucune cohésion et ils sont perméables, et très érodables.

La classification GTR vient non seulement déterminer la nature des sédiments du port de Sidi Fredj mais aussi donne ainsi une indication sur l'origine des sédiments qui s'accumulent dans la passe d'entrée du port, ce sédiment est de nature terrestre transporté vers le milieu marin par les cours d'eaux et le vent.

La classification selon le comportement mécanique confirme le résultat de la classification précédente, cette classification est basée sur le paramètre friabilité de sable (FS), à travers lequel, on a déduit que les sédiments de la passe d'entrée font partie de la **sous classe D₁₁**, les matériaux de cette sous classe sont résistant à la friabilité et peu traficable.

La démarche de la classification adoptée est expliquée à travers l'organigramme suivant :

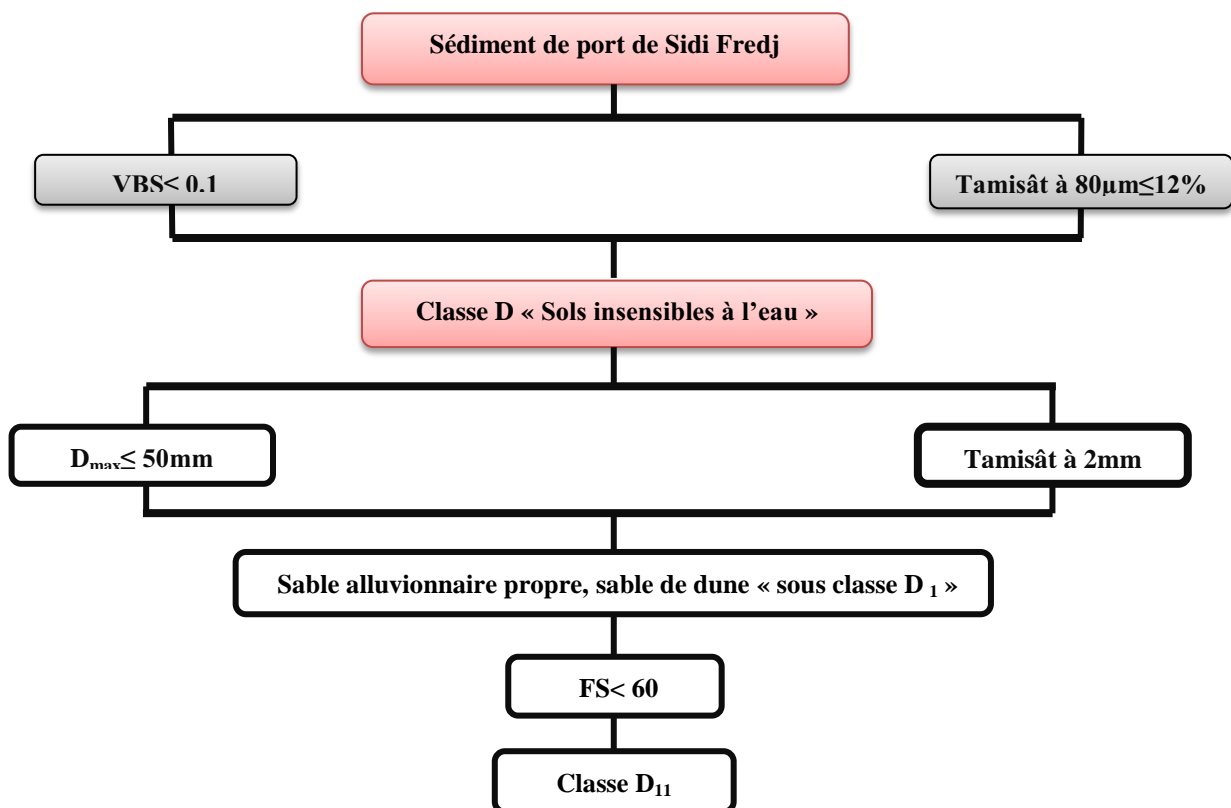


Figure 43 : Organigramme de classification selon (GTR, 1992)

2.2 La classification du sédiment selon la teneur en matière organique

Selon le GTR, les matières organiques font partie de la grande **famille F** : Sols organiques et sous-produits industriels.

En se basant sur le taux de la matière organique qui est d'environ 06,19%, on a pu déduire que les sédiments de la passe d'entrée du port est faiblement organique appartenant à la sous classe F_{11} qui représente les matériaux naturels contenant l'humus, tourbes, des débris de végétaux et d'animaux, ces matières sont facilement reconnaissable ainsi, leur présence en excès dans le port induit une couleur noirâtre et une odeur caractéristique.

2.3 Classification finale du sédiment de port de Sidi Fredj

On peut conclure que les sédiments de la passe d'entrée du port de Sidi Fredj sont de type alluvionnaire ou sont des sédiments dunaire, ces matériaux sont peu organiques, insensibles à l'eau, non friables mais peu traficables en raison de la finesse des grains.

Tableau 20: Classification finale de sédiment de la passe d'entrée du port de Sidi Fredj

Paramètre de classification	Sédiment de la passe d'entrée du port
La teneur en MO	F_{11}
VBS et le tamisât de 80 μ m	D
D_{max} et le tamisât de 2mm	D_1
Friabilité de sable (FS)	D_{11}
Classification (GTR, 1992)	$D_{11}F_{11}$

Conclusion

L'analyse physique et mécanique des sédiments de la passe d'entrée du port de Sidi Fredj a permis de les identifier, de déterminer leurs caractéristiques et de les classer selon le guide technique des terrassement routiers (**GTR, 1992**). Cette première étude au laboratoire a montré que ces sédiments sont des matériaux propres de nature sableuse, présentant une teneur en eau importante à la saturation, une faible teneur en matière organique, résistant à la friabilité et peu compressible.

La classification GTR, 1992 a permis de déduire que les sédiments de port de Sidi Fredj sont des matériaux faiblement organiques, insensibles à l'eau, alluvionnaires ou d'origine dunaire résistants mais peu traficables, ces matériaux font partie de la classe D , sous classe D_{11} .

**Chapitre V : Les techniques
d'amélioration des sédiments de
dragage pour leur utilisation en
couche de forme**

1. Les techniques d'amélioration d'un sol

Les produits de dragage sont essentiellement des matériaux fins, leur utilisation dans le domaine des techniques routières doit répondre à certaines exigences, ils doivent avoir des propriétés mécaniques et environnementales convenables afin d'être adapté à l'usage envisagé.

Généralement, les matériaux de dragage ne satisfont pas les critères requis dans le **GTR**, notamment les propriétés mécaniques en raison de leur forte teneur en eau et leur faible portance d'où la nécessité d'adopter des techniques afin d'améliorer la qualité de ces matériaux.

Selon le **GTR** et le **GTS**, les différentes actions d'amélioration qui peuvent être envisagées sont :

1.1 Actions sur la granularité :

Cette action peut être réalisée à travers :

- L'élimination de la fraction fine sensible ($0/ d$) à l'eau soit par criblage dans l'état naturel ou avec lavage-débouage ;
- L'élimination de la fraction $0/d$ permet d'obtenir un matériau insensible à l'eau mais qui peut présenter une certaine instabilité sous trafic ;
- L'élimination de la fraction grossière du matériau peut se faire selon différents modes : le concassage, la fragmentation en place à l'aide de briseurs de pierres, engins à chenilles et/ou rouleaux à grilles très lourds, l'écrêtage par cribles mobiles, engins épierreurs, ces éléments grossiers empêche le réglage de plate-forme ;
- Fragmentation de la fraction grossière afin d'obtenir des éléments fins.

1.2 Actions sur l'état hydrique

Les actions envisagées sont :

- Un arrosage pour maintenir la teneur en eau durant le malaxage et le compactage ;
- une humidification de la masse du matériau pour ramener son état hydrique de sec à moyen. Dans ce cas, il faut être conscient que les quantités d'eau peuvent être importantes car il faut, d'une part apporter l'eau nécessaire à l'augmentation de la teneur en eau pondérale recherchée, et d'autre part compenser les pertes dues à l'évaporation durant le malaxage.

1.3 Le traitement

Cette action consiste à mélanger les différents produits, tel que la chaux, les liants hydrauliques (ciment, volantes...) ou des correcteurs granulométriques.

Le traitement d'un sédiment de dragage avec un liant (chaux, ciment, liant hydraulique) a pour but d'améliorer ses propriétés afin de lui conférer des caractéristiques à court terme (modification des teneurs en eau) et à long terme, il fournit au matériau des performances mécaniques supérieures à celle qui possède à l'état naturel et durable tout au long de la vie de l'ouvrage (Segui, 2011).

Selon l'état du matériau, le traitement à préconiser peut être :

- Un traitement aux liants hydrauliques (ciment normalisé, liants spéciaux à usage routier, cendres volantes sulfocalciques, laitiers broyés...), ce traitement est adopté pour un matériau peu ou pas argileux ;
- un traitement mixte chaux + ciment dans le cas des sols moyennement argileux ;
- un traitement à la chaux seule. Ce traitement est plus spécialement adapté aux sols argileux et très argileux ;
- un traitement associant liant hydraulique et correcteur granulométrique dans le cas de sols granulaires peu «traficables» ;
- un traitement par apport d'un correcteur granulométrique ;
- Traitement à la chaux.

1.4 Protection superficielle

Selon le type de matériau utilisé en couche de forme, les techniques de protection qui peuvent être appliquées sont :

- un enduit de cure gravillonné ou éventuellement clouté ;
- une couche de fin réglage, il s'agit d'une couche fine de quelques centimètres.

Selon le GTR, chaque action citée auparavant présente un code, le tableau suivant présente les différentes d'actions ainsi que leurs codes :

Tableau 21 : Tableau récapitulatif des techniques de préparation des matériaux pour emploi en couche de forme

Rubrique	Code	Technique de préparation des matériaux
G Action sur la granularité	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Elimination de la fraction 0/d sensible à l'eau
	2	Elimination de la fraction grossière empêchant un malaxage correct du sol
	3	Elimination de la fraction grossière empêchant un réglage correct de la plate-forme
	4	Elimination de la fraction 0/d sensible à l'eau et de la fraction grossière empêchant un réglage correct de la plate-forme
	5	Fragmentation de la fraction grossière pour l'obtention d'éléments fins
W Action sur la teneur en eau	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Arrosage pour maintien de l'état hydrique
	2	Humidification pour changer d'état hydrique
T Traitement	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Traitement avec un liant hydraulique
	2	Traitement avec un liant hydraulique éventuellement associé à la chaux
	3	Traitement mixte : chaux + liant hydraulique
	4	Traitement à la chaux seule
	5	Traitement avec un liant hydraulique et éventuellement un correcteur granulométrique
	6	Traitement avec un correcteur granulométrique
S Protection superficielle	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Enduit de cure éventuellement gravillonné
	2	Enduit de cure gravillonné éventuellement clouté
	3	Couche de fin réglage

2. Les techniques d'amélioration des sédiments de la passe d'entrée du port de Sidi Fredj pour une utilisation en couche de forme

Les sédiments de la passe d'entrée du port de Sidi Fredj appartiennent à la classe D et plus particulièrement à la **sous classe D₁₁**, cette classe qui représente les matériaux insensibles à l'eau, résistant à la friabilité et peu traficable.

L'utilisation de ce type de matériaux en couche de forme exige à prendre en considération certaines corrections et application d'actions qui dépendent non seulement de la nature du matériau mais aussi de la situation météorologique du jour de conception de couche de forme.

En fonction de la situation météorologique, on peut distinguer différentes actions à prendre en compte :

- si la pluie est forte, la mise en place de la couche de forme dans cette situation est déconseillée.
- Si la pluie est faible, la conception de la couche de forme à la base des sédiments de la passe d'entrée du port de Sidi Fredj nécessite un traitement avec correcteur granulométrique.
- S'il n'y a pas de la pluie, et vu que les sédiments de la passe d'entrée sont peu traficables, deux solutions d'amélioration peuvent être envisagées :
 - Il suffit de traiter les sédiments avec un correcteur granulométrique.
 - si l'eau du matériau a subi une évaporation lors de la conception de la couche de forme il faut :
 - arroser les sédiments afin de maintenir leurs état hydrique (Figure 44);
 - Traiter les sédiments avec liant hydraulique associé éventuellement avec un correcteur granulométrique (Figure 45);
 - appliquer un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté afin de protéger la couche de forme (Figure 46).



Figure 44 : Arrosage des sédiments



Figure 45: Traitement aux liants hydrauliques

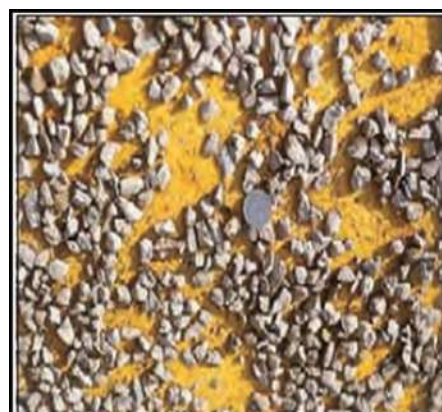


Figure 46 : Epannage des gravillons de cloutage.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le port de Sidi Fredj subit chaque année un ensablement important au niveau de la passe d'entrée, les opérations de dragage au niveau de ce port génèrent une grande quantité de matériaux.

La gestion de ces déblais doit s'inscrire dans une démarche de développement durable, ainsi l'utilisation de ces sédiments en techniques routières constitue une voie alternative pour la gestion de ces sédiments.

Dans le contexte de la bonne gestion des sédiments de dragage, nous avons traité un mémoire de fin d'étude qui porte sur l'étude de comportement physique et mécanique des sédiments de dragage du port de Sidi Fredj en vue de leurs valorisations en techniques routières et plus particulièrement en couche de forme.

Après l'identification de notre sédiment à travers des paramètres physiques et mécaniques, nous avons pu faire une classification selon le guide des terrassements routiers GTR, cette dernière a montré que les sédiments de la passe d'entrée du port de Sidi Fredj sont des matériaux insensibles à l'eau, de nature alluvionnaire ou dunaire.

Un deuxième niveau de classification GTR a été établi en fonction d'indice de friabilité de sable FS, ce paramètre de comportement mécanique nous a permis de déduire que les sédiments de la passe d'entrée sont des matériaux résistants à la friabilité.

A travers la jonction des différents paramètres, on peut conclure, que les sédiments de la passe d'entrée du port de Sidi Fredj sont des matériaux insensibles à l'eau, peu traficable en raison de leur finesse et de leur uniformité granulaire et sont constitués des grains résistants au trafic.

L'emploi de ce type de matériau en couche de forme nécessite le traitement aux liants hydrauliques, l'arrosage et la protection superficielle, ces différentes actions confèrent aux sédiments de la passe d'entrée du port une résistance mécanique et ainsi une longue durée de vie pour l'ouvrage.

La valorisation des sédiments portuaires en génie civil est un grand projet d'intérêt économique et écologique, notre travail n'était que le premier pas pour étudier la faisabilité de l'utilisation de ce type de matériau en couche de forme, indispensable et

complémentaire avant l'étape de la valorisation pour laquelle les caractérisations suivantes sont nécessaires :

- une caractérisation chimique afin de savoir le taux des différentes molécules chimiques telles que NaCl, CaCO₃, sulfates et sulfures ; le taux de pollution en analysant les métaux lourds et les hydrocarbures ;
- une caractérisation environnementale;
- la caractérisation minéralogique.

Malgré l'importance de caractérisations citées au-dessus pour la détermination de devenir de notre matériau, nous n'avons pas pu les réaliser en raison de manque de moyens et de temps.

Enfin, Il est recommandé d'une part, de dresser des fiches synoptiques de tous les ports algériens qui subissent de l'ensablement en vue d'évaluer la possibilité de leurs recyclages en techniques routières, et d'autre part la collaboration des gestionnaires des opérations de dragage, des écologistes et des industriels est indispensable, ils doivent investir dans des projets de recherches qui peuvent aboutir à des solutions économiques et écologiques.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

ABRIAK, N.E., GREGOIRE, P., BERNARD, F. (2003). *2nd International Symposium on Contaminated Sediments-posters*. Québec. France : Ecole des mines de Douai, 04 p.

ACHARD, R. (2013). *Dynamique des contaminants inorganiques dans les sédiments de dragage, Rôle spécifique de la matière organique* [en ligne]. Thèse de doctorat. Chimie de l'environnement. France : Université du Sud Toulon Var. Disponible sur le web : < <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00874422/document> >.

ACHOUR, Raouf (2013). *Valorisation et caractérisation de la durabilité d'un matériau routier et d'un béton à base de sédiments de dragage* [en ligne]. Thèse de Doctorat. Génie civil. France : Université de Mines de Douai. Disponible sur le web : <http://www.usherbrooke.ca/genie/fileadmin/sites/genie/documents/Intranet/theses_memoires/Achour_R_20140124.pdf>.

AFNOR (1990). *Granulats : Mesure de friabilité de sable*. NF P 18 - 576, 8 p.

AFNOR (1991). *Granulats : équivalent de sable*. NF P 18 - 598, 8 p.

AFNOR (1996). *Sols : reconnaissances et essais : détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux. Méthode par étuvage*. NF P 94 - 050, 8 p.

AFNOR (1998). *Sols, reconnaissance et essais - Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux - Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tâche*. NF P 94 - 068, 8 p.

AFNOR (1997). *Sols, reconnaissance et essais : essai de cisaillement rectiligne à la boîte, partie I, cisaillement direct*. NF P 94 071 - 1, 16 p.

AFNOR (1999). *Détermination des caractéristiques de compactage d'un sol : essai Proctor normal, essai Proctor modifié*. NF P 94 093, 20 p.

AFNOR (1995). *Sols, reconnaissance et essais : essai de gonflement à l'oedomètre, détermination des déformations par chargement de plusieurs éprouvettes*. XP P 94-091, 16 p.

AGOSTINI, F. (2006). *Inertage et valorisation des sédiments de dragage marins* [en ligne]. Thèse de doctorat. Génie civil. France : l'Ecole Centrale de Lille. Disponible sur le web : < <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00119833/document> >.

AISSAT, N., CHEIKH, O. (2013). *Evaluation de la qualité (microbiologie, métaux lourds, granulométrie et hydrocarbures) des sédiments de dragage de port de Sidi Fredj en vue d'une immersion*. Mémoire d'ingénieur. Aménagement du littoral. Alger : ENSSMAL, 69 - 70 p.

Références bibliographiques

- ALZIEU, C., BASSOULLET, P., BOUTIER, B. et al. (1999).** *Dragage et environnement marin : état de connaissance.* Plouzané : Ifremer. 221 p.
- ALZIEU, C., ANDRAL, C., BASSOULLET, P. et al. (2003).** *Bio évaluation de la qualité environnementale des sédiments portuaires et des zones d'immersion.* Plouzané : Ifremer. 15 p.
- ANGER, Baptiste (2014).** *Caractérisation de sédiments fins de retenues hydroélectriques en vue d'une orientation vers des filières de valorisation matière* [en ligne]. Thèse de doctorat. Génie civil. France : Université de Caen Basse-Normandie. Disponible sur le web : <<http://chercheurs.edf.com/fichiers/fckeditor/Commun/Innovation/theses/TheseAnger.pdf>>.
- AOUDJ, C., BOUAZIZ, T. (2014).** *Fonctionnement et dynamique morpho-sédimentaire du littoral Est de Béjaïa.* Mémoire d'ingénieur. Alger : ENSSMAL, 150 p.
- AZRARAK, R., BEGGAR, H. (2013).** *Le port de Sidi Fredj : quantités et devenir de sédiments dragage.* Mémoire d'ingénieur. Aménagement du littoral. Alger : ENSSMAL, 104 p.
- BA, M. (2008).** *Identification géotechnique de matériaux concassés-types en corps de chaussées et évaluation de leur qualité.* Mémoire d'ingénieur. Géotechnique et environnement. Sénégal : Université de Cheikh Anta Diop de Dakar <<http://www.memoireonline.com/08/09/2521/Identification-geotechnique-de-materiaux-concasses-types-en-corps-de-chaussees-et-evaluation-de.html>>
- BACHOUCHE, S. (2010).** *Les ports d'Alger et de Bouharoun : Etude des paramètres, granulométriques, biologiques et de pollution dans les sédiments et l'eau en vue d'une opération de dragage.* Thèse de Magister. Pollution marine et écotoxicologie. Alger : ENSSMAL, 105-106 p.
- BEKARI, M. ELGAZZAR, M., MAJDOUB, T. (2010).** *Outils d'aménagement des ports : gestion globale des sédiments marins : Dragage des ports.* Document non publié. France : Ecole des mines de Douai.
- BEL HADJ ALI, Imen (2013).** *Contribution à l'étude des sédiments marins tunisiens : cas des ports de Radès et de Gabès* [en ligne]. Thèse de doctorat. Génie civil. France : EC Lille. Disponible sur le web : <<http://www.theses.fr/2013ECLI0022>>.
- BELKACEMI, Soumia (2015).** *Impact des Infrastructures littorales sur l'évolution du trait de côte dans une zone soumise à un fort transit sédimentaire – Cas de Sidi Fredj.* Mémoire d'ingénieur. Aménagement du littoral. Alger : ENSSMAL, 31 p.
- BELKESSA, Rabah (2005).** *Ensemblement des ports algériens, pollution par les métaux lourds et sites de dépôts de sédiments.* Thèse de doctorat. Aménagement du littoral. Constantine : Université de Mentouri, 412 p.

Références bibliographiques

- BELLAHSEN, Y. (2002).** *Le port de Sidi Fredj : Dragage et site de dépôt des matériaux.* Mémoire d'ingénieur. Aménagement du littoral. Alger : ENSSMAL, 52 p.
- BELLSORT, B. (1993).** Étude bibliographique sur les rechargements de plage à l'aide des produits de dragage. Rapport d'études et recherches. Document publié. France : Sogreah.
- BEN ABDELGHANI, F., MAHEREZI, W., BOUTOUIL, M. (2014).** Caractérisation géotechnique des sédiments de dragage marins en vue de leur valorisation en techniques routières. *Déchets Sciences et Techniques*. N°66, 10 p.
- BEN OUAKHIR, A. H. (2015).** *Utilisation du sable de dunes en technique routière : Etude bibliographique* [en ligne]. Mémoire de Master 2. Voies et ouvrages d'art. Biskra : Université Mohamed Khider. Disponible sur le web : < <http://dspace.univ-biskra.dz:8080/jspui/bitstream/123456789/6675/1/637.pdf> >.
- BENZADA, K., DALI, K. (1995).** *Ensablement et dragage du port de Béni-Saf : conséquence et site de dépôt.* Mémoire d'ingénieur. Aménagement du littoral. Alger : ENSSMAL, 88 p.
- BERTRAND, M., DHERVILLY, P., LEVACHER, D. (2014).** *XIII^{èmes} Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil*. 2 - 4 juillet 2014 Dunkerque. France : Paralia, 8 p.
- BIMBARD, CHAUVIN, CORTE, et al. (2000).** *Traitement des sols à la chaux et / ou aux liants hydrauliques : applications à la réalisation des remblais et des couches de forme* [en ligne]. France : LCPC-SETRA. [Consulté le 26/03/2016]. Disponible sur le web : <<http://www.enrdd.com/documents/documents/ConstructionEcoconstruction/La%20Chaux/traitement%20des%20sols%20%C3%A0%20la%20chaux%20etou%20aux%20liants%20hydrauliques.pdf>>.
- BOUTIN, R. (2000).** *Dragage et rejets en mer : produits de type vase.* Paris : Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. 307 p.
- BOULVAIN, F. (2012).** *Une introduction aux processus sédimentaires.* Belgique : Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées. [Consulté le 18/02/2016]. Disponible sur le web : <<http://www2.ulg.ac.be/geolsed/processus/processus.htm>>.
- CABANE, N. (2004).** *Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques : Contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation* [en ligne]. Thèse de doctorat. Génie des procédés. France : Ecole nationale supérieure des mines. Disponible sur le web : <<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00010521/document>>.
- CAMPANAC, R. (1981).** *Equivalent de sable et mesure de la nocivité des sables concassés : Géotechnique routière.* Document publié. France. Laboratoire régional d'Aix-en-Provence.
- CARPENTIER, S. (2002).** *Bilans et impacts de la mise en dépôt de sédiments fluviaux urbains dans le bassin de la seine* [en ligne]. Thèse de doctorat. Sciences et Techniques de

Références bibliographiques

l'Environnement. France : Université Paris XII Val de Marne. Disponible sur le web : < <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00861382/document> >.

CHAMELEY, H., DECONNICK, J. F. (2011). *Bases de sédimentologie*. 3^e éd. Paris : Dunod, 69 p.

CHAPON, J. (1975). *Travaux maritimes : les ouvrages intérieurs des ports maritimes, Dégagement des accès et des plans d'eau des ports, tome 02*. 03 éd. Paris : Eyrolles. 215 p.

CHIKI, K. (2011). *Etude expérimentale des matériaux non saturés au cisaillement et à l'aédomètre* [en ligne]. Thèse de magister. Géotechnique et environnement. Tizi Ouzou. Université Mouloud Maammeri. Disponible sur le web : < http://www.ummt0.dz/IMG/pdf/memoire_cle037cfc.pdf >.

CIRIA, CUR, CETMEF (2009). *Guide enrochement : l'utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques*. 2^e éd. Compiègne : CETMEF. 968 p.

CORTE, J.F., EDME, S.H., FEVRE, A., et al. (2000). *Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme* [en ligne]. France : LCPC-SETRA. [Consulté le 27 Mars 2016]. Disponible sur le web : < <https://www.fichier-pdf.fr/2014/02/08/terrassements-routier-gtr/terrassements-routier-gtr.pdf> >.

COSTET, J., SANGLERAT.G. (1981). *Cours pratique de mécanique des sols : plasticité et calculs de tassements*. 3^e éd. Paris : Bordas, p. 32-37.

CTH, (2011). Etude de désensablement du Port de plaisance de Sidi Fredj : Dragage du port de Sidi Fredj. Document non publié. Alger : C.T.H.

DAMIDOT, D., ABRIAK, N. E., DUBOIS, V. et al. (2006). Guide technique régional relatif à la méthodologie de gestion des sédiments de dragage portuaire : Améliorer la valorisation des déchets industriels en BTP. Document publié. France : Université des mines de Douai.

DESODT, C., REIFFSTECK, P. (2015). *Géotechnique : Exercices et problèmes corrigés de mécanique des sols, avec rappels de cours*. Paris : Dunod. 15 p.

DIA, Moussa (2013). *Traitement et Valorisation de Sédiments de Dragage Phosphatés en Technique Routière* [en ligne]. Thèse de doctorat. Génie Civil et Environnemental. France : Université de d'Artois et des Mines de Douai. Disponible sur le web : < www.theses.fr/2013ARTO0206.pdf >.

Références bibliographiques

- DJERAD, C. (2010).** *Evaluation de l'état de la pollution par les sels nutritifs et les métaux lourds dans l'eau et le sédiment superficiel de la baie de Bou-Ismaïl.* Mémoire d'ingénieur. Environnement marin. Alger : ENSSMAL, 51 p.
- DTP, (2012).** Direction des Travaux Publics. Travaux de dragage de port de Sidi Fredj : dragage du port de Sidi Fredj. Document non publié. Alger : D.T.P.
- ELGAROU, M., HOUICHITI M, A. (2010).** *Etude géométrique et géotechnique d'évitement de la ville de Berriane sur 10 km avec conception de deux carrefours.* Mémoire d'ingénieur. Travaux publics. Alger : ENSTP, 192 p.
- FOUCHER, J. (2005).** Valorisation des déblais sableux de dragage portuaire en France. Document publié. France : ENTPE.
- GEODE (2012).** Suivis environnementaux des opérations de dragage et d'immersion. Dragage des ports. Document publié. France : GEODE.
- GEODE (2014).** Rédaction des études d'impact d'opérations de dragage et d'immersion en milieu estuarien et marin. Etude d'impact d'opérations de dragage. Document publié. France : GEODE.
- GOUCEM, T., REBHI, M. (2011).** *Port de Sidi Fredj : Quantités de sédiments à draguer.* Mémoire d'ingénieur. Aménagement du littoral. Alger : ENSSMAL, 50 p.
- GROSDÉMANGE, D. (2005).** Guide pour la gestion des opérations de dragage : Dragage. Document publié. France : Fédération des ports de plaisance.
- HALLAILI, M., BOUKHENNAF, Y. (2010).** Apport de la télédétection pour la détermination du port et la plage du Sidi Fredj. Mémoire d'ingénieur. Aménagement du littoral. Alger : ENSSMAL, 105 p.
- IADC, AIHP (2010).** *Dredging for development* [en ligne]. Netherlands : Bray, n., Cohen, m. [Consulté le 10/04/2016]. Disponible sur le web : < <https://www.iadc-dredging.com/ul/cms/fck-uploaded/documents/PDF%20Publications/dredging-for-development-2010.pdf>>.
- IN VIVO, (2002).** Méthodes de gestion et de réutilisation des sédiments pollués. Inventaire détail technique et financier des méthodes de curage, de traitement et des usages possibles. Logiciel d'aide à la décision pour la gestion des sédiments. Gestion des sédiments. Document publié. France : Agence de l'eau Artois Picardie, Pôle de Compétence Sites et Sols Pollués.
- KRIBI, S. (2005).** *Décomposition des matières organiques et stabilisation des métaux lourds dans les sédiments de dragage* [en ligne]. Thèse de doctorat. Science et Technique du Déchet. Lyon : Ecole doctorale de Chimie Lyon. Disponible sur le web < <http://theses.insa-lyon.fr/publication/2005ISAL0064/these.pdf> >.

Références bibliographiques

- LERAU, J. (2006).** *La résistance au cisaillement – étude en laboratoire.* Toulouse : institut national des sciences appliquées. 15 p.
- LOUSTAU CAZALET, M. (2012).** *Caractérisation physico-chimique d'un sédiment marin traité aux liants hydrauliques – Évaluation de la mobilité potentielle des polluants inorganiques* [en ligne]. Thèse de doctorat. Sciences de l'environnement industriel et urbain : France. L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. Disponible sur le web : <<http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0012/these.pdf>>.
- MAE, (2007).** *Maes E., L'eau et l'environnement aquatique.* Chapitre 10. [En ligne]. Disponible sur le web : <<http://environnement.wallonie.be>>.
- MAHAREZI, W., SAUSSAYE, L., BOUTOUIL, M. (2012).** *XII^{èmes} Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil.* 12-14 juin 2012 Cherbourg. France : Paralia, 08 p.
- MIRAOU, M. (2010).** *Prétraitement et traitement des sédiments de dragage en vue d'une valorisation en génie civil* [en ligne]. Thèse de doctorat. Génie civil. France : Université de mines de Douai. [Consulté le 16/02/2016]. Disponible sur le web : <<https://ori-nuxeo.univ-lille1.fr/nuxeo/site/esupversions/abf20fdf-f4e4-433e-88b8-b5b050c8e307>>.
- NGUYEN, T. B. (2008).** *Valorisation des sédiments de dragage traités par le procédé NOVOSOL® dans des matériaux d'assises de chaussée – Comportement mécanique et environnemental* [en ligne]. Thèse de doctorat. Génie civil. Toulouse : Université de Toulouse. [Consulté le 21/03/2016]. Disponible sur le web : <http://thesesups.ups-tlse.fr/704/1/Nguyen_Thanh-Binh.pdf>.
- PLUMELLE, C., JAN CUI, Y., FOUCHE, O. et al. (2013).** *Théorie et pratique de la géotechnique.* Paris : Le Moniteur, p. 241- 275.
- SCHNEIDER, G. (2001).** *Boues de curage des cours d'eau.* France : Institut National R A. Disponible sur le web : <<http://www.inra.fr/dpenv/curage.htm#1A>>.
- SEGUI, P. (2011).** *Elaboration de liants hydrauliques routiers à base de pouzzolane naturelle ou de cendre volante de papeterie* [en ligne]. Thèse de doctorat. Génie civil. France : Université de Toulouse III. Disponible sur le web : <<http://thesesups.ups-tlse.fr/1390/1/2011TOU30154.pdf>>.
- TRAN NGOC, Thanh (2009).** *Valorisation de sédiments marins et fluviaux en technique routière.* Thèse de doctorat. Génie civil. France : Université d'Artois. Disponible sur le web : <<http://cdoc.ensm-douai.fr/theses/TRAN%20NGOC%20THANH.pdf>>.

Références bibliographiques

TRIBOUT, Christelle (2010). *Valorisation des sédiments traités en techniques routières : contribution à la mise en place d'un protocole d'acceptabilité.* Thèse de doctorat. Génie civil. France : Université de Toulouse. Disponible sur le web : < <http://thesesups.ups-tlse.fr/1277/1/2010TOU30167.pdf> >.

WANG, Dongxing (2011). *Solidification et valorisation de sédiments de port de Dunkerque en travaux routiers* [en ligne]. Thèse de doctorat. Génie civil. France : Université des mines de Douai. [Consulté le 12/01/2016]. Disponible sur le web : <<http://www.cfmr-roches.org/sites/default/files/jngg/JNGG%202010%20pp%20345-352%20Wang.pdf>>

YAKHLEF, A., ZAOUL, S. (2013). *Les paramètres physico-chimiques et la pollution dans l'eau et le sédiment dans le port de Sidi Fredj.* Mémoire d'ingénieur. Environnement. Alger : ENSSMAL, 28 p.

ZEMENZER, S. (2004). *Ensablement du port par transport sédimentaire simulation et application du modèle de Gao et Collins (1994) au port de Sidi Fredj.* Mémoire d'ingénieur. Aménagement du littoral : Alger : ENSSMAL, 36 p.

Texte législatif

Arrêté du 23 décembre 2009 complétant l'arrêté du 9 août 2006 relatif aux niveaux à prendre en compte lors d'une analyse de rejets dans les eaux de surface ou de sédiments marins, estuariens ou extraits de cours d'eau ou canaux (http://www.ineris.fr/aida/consultation_document/4189)

Sites d'internet :

Ghent Dredging (2016). *Drague à pelle* [en ligne]. UK : Ghent Dredging. [Consulté le 02/12/2015]. Disponible sur le web : <<http://www.ghentdredging.be/view/nl/index.html>>.

[Consulté le 12/02/2016]. Disponible sur le web : <<http://www.planete-tp.com/amenagement-r125.html>>.

IFREMER (2015). *Ifremer environnement* [en ligne]. France : Ifremer. [Consulté le 12/12/2015]. Disponible sur le web : <[http://envlit.ifremer.fr/content/view/full/24836/\(offset\)/3190](http://envlit.ifremer.fr/content/view/full/24836/(offset)/3190)>

CFGI, CFMR, CFMS, (2016). *Géotechnique francophone* [en ligne]. France : CFGI, CFMR, CFMS. [Consulté le 27/03/2016]. Disponible sur le web : <<http://www.geotech-fr.org>>.

Etude du comportement physique et mécanique des sédiments de dragage du port de Sidi Fredj pour leur valorisation en techniques routières

« Cas du port de Sidi Fredj »

Résumé :

Le port de plaisance de Sidi Fredj subit chaque année un ensablement important au niveau de la passe d'entrée, Ce phénomène est une problématique majeure pour les gestionnaires du port qui s'est vu obligé d'effectuer des opérations de dragage pour garantir manœuvre du port.

Ces opérations génèrent des quantités importantes de sédiment d'où la nécessité de la recherche de voie de valorisation pour leurs bonne gestion.

Dans le contexte du développement durable, le devenir des sédiments est géré en fonction de leur impact sur l'environnement. Généralement, ces sédiments peuvent faire l'objet d'une immersion, ou d'un stockage à terre pour les plus pollués. Mais ces solutions sont confrontées à une réglementation de plus en plus rigide en termes de protection de l'environnement. Face à cette problématique, de nouvelles voies alternatives de gestion s'imposent, comme la construction routière.

Notre travail consiste à faire une caractérisation des sédiments de la passe d'entrée afin de les valoriser en couche de forme, cette étape est effectuée à travers une série d'essais physiques et mécaniques. Les résultats des différents essais géotechniques ont permis de déduire à l'aide de la classification GTR que les sédiments de la passe d'entrée sont des matériaux alluvionnaires insensibles à l'eau résistant à la friabilité et peu traficable en raison de la finesse des grains, faiblement compressible, leur utilisation en couche de de forme nécessite la prise de certaines mesures telles que le traitement, l'arrosage et la protection superficielle.

Mots clés : dragage, sédiments, comportement physique, comportement mécanique, classification GTR, couche de forme, valorisation.

Abstract:

The port of Sidi Fredj undergoes every year a significant silting at the inlet pass; this phenomenon is a major issue for the port handler that was forced to perform dredging operations to ensure access of ships. These operations generate significant amounts of sediment from this port, where the reflection of the best management of these sediments. In the context of sustainable development, the future of sediment is managed according to their

impact on the environment. Generally, these sediments may be a dip or a land storage for the most polluted. However, these solutions are facing a regulatory increasingly rigid in terms of environmental protection. Faced with this problem, new alternative ways of management are required, such as road construction. This study is carried to make a characterization of entry pass's sediments for enhancement in the shape layer, this step is carried out through a series of physical and mechanical tests. The results of various geotechnical tests have deduced using the GTR classification that sediments of the entrance channel of the alluvial materials are insensitive to water resistant and present lowly compressibility and friability due to the fineness of the grains, their use shaped layer requires taking certain measures such as treatment, irrigation and surface protection.

Keywords: dredging, sediments, physical behavior, mechanical behavior, GTR classification, the shape layer, valorization.

الملخص

يتعرض مدخل ميناء سيدي فرج كل سنة الى ظاهرة ترسب الرمال، هذه القضية تعتبر مشكلا عويصا للمستعملين مما أدى الى اجراء عمليات الجرف من اجل ضمان وصول السفن.

هذه العمليات تولد كميات كبيرة من الرمال مما يدعو الى التفكير الجاد في كيفية استعمال هذه الرمال.

في سياق التنمية المستدامة فان مستقبل استعمال الرمال يتحدد وفق تأثيرها على البيئة، عموما ما تكون هذه الرمال محل الرمي او التخزين في الارض للأكثر تلوثا، لكن هذه الحلول تواجه أنظمة قانونية صارمة الغاية منها حماية البيئة، وفي مواجهة هذه القضية هناك حلول بديلة لاستعمال هذه الرمال كبناء الطرقات.

ان عملنا هذا يقوم على اجراء وصف لرمال مدخل الميناء بهدف استعمالها في الطبقة التحتية للطريق وهذا من خلال سلسلة من التجارب الفيزيائية والميكانيكية، مختلف نتائج التجارب الجيوتقنية سمحت لنا من خلال ت. ا. ح. ط. ان نستنتج بان رمال مدخل رمال الميناء هي عبارة عن مواد غير حساسة للماء ضعيفة الضغط و مقاومه للهشاشة وضعيفة السيورورة وهذا بسبب دقة الحبوب. ان استعمال هذه الرمال في الطبقة التحتية للطرق يستدعي معالجة، سقي وحماية السطح

الكلمات الدالة

الجرف، رمال، تصرف فيزيائي، تصرف ميكانيكي، ت. ا. ح. ط، الطبقة التحتية، اعادة الاستعمال