

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Université Mohammed Seddik Ben yahia -jijel-
Faculté des sciences et technologies
Département de Génie Civil et Hydraulique



PROJET DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du Diplôme de MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie civil

Option : géotechnique

Thème

**Caractrisation des sédiments de dragage
du port de Djen Djen en vue
d'une valorisation en technique routière**

Réalisé par :

AMIRA Hakima

BOUTAGHANE Nour el houda

Encadre par :

Dr: ALOUI-LABIOD.Z

2019/2020

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail , nous remercions tout d'abord, notre Dieu le tous puissant qui nous a donné la force, la volonté et la patience pour accomplir notre travail.

Nous souhaitons adresser nos remerciements les plus sincères à notre encadreur Mme LABIOD ZEHOUR pour la confiance qu'elle nous a accordée, pour son soutien constant ainsi que pour ses précieux conseils qu'elle nous a donnés tout au long de ce travail.

Nous remercions s'adressent aussi aux membres de jury pour l'honneur d'évaluer notre Travail.

*Nous adressons également nos sincères remerciements au **Pr. Ghembaza s.** à université djillali liabés sidi-bel abbés pour l'assistance qui nous a été apportée*

Nous remercions également tous nos enseignants du département de Génie Civil et Hydraulique de l'Université de Jijel sans exception qui ont contribué à notre formation avec beaucoup de compétence et de dévouement.

Nous voudrions exprimer notre gratitude pour toute l'aide apportée, par l'équipe du laboratoire travaux publique Est

Nous remercions aussi Mr B.Riad et Mr Kh.walid pour leurs aides et leurs encouragements

Nos plus vifs remerciements s'adressent à toute personne ayant aidé de près ou de loin à la réalisation de ce travail



Dédicace

*A l'homme de ma vie, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, à toi mon père ; **Abd Al Hamid.***

*A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ; maman, **Fatima.***

Aucun mot sur cette page ne saurait exprimer ce que je vous dois, ni combien je vous aime.

*A mes chères sœurs, **Leila, Sonya, Amel, et Rima** .et à mes chers frères, **Walid et Ammar** pour leur appui et leur encouragement, sans oublié ma grand-père que j'aime, ceci est ma profonde gratitude pour ton éternel amour, que ce rapport soit le meilleur cadeau que je puisse t'offrir.*

*A les enfants de ma sœur, **Soudjoud et Sajid.***

A mes oncles et mes chers cousins et cousines.

*A toute ma famille et mes amies et à mon binôme **Nour elhouda.***

A tous ceux qui m'ont soutenu, qu'ils trouvent ici l'expression de mon Amour et profonde Gratitude.

Amira Hakima



Dédicace

*D'un sentiment plein d'amour, de sincérité et fidélité, je dédie
ce travail :*

*A mes chers parents : ma mère **Houria**
et mon père **Ali**.*

*A qui je dois ce qui je suis
Pour votre amour, votre compréhension, votre
patience et votre tendresse sont toujours pour
moi sans limite, vous m'avez soutenu le long de
mes études et vous avez tout sacrifié pour ma
réussite, que Dieu vous garde en bon santé.*

*A ma chère sœur **Manar**.*

*A mes chers frères : **Oussama** et **Nadjem Edine**.*

*Pour leurs soutiens infinis et leurs aides incessantes,
à qui je souhaite un meilleur avenir.*

A toute ma famille,

A mes très chères amies qui m'ont toujours encouragé :

***Somia, Sarah, Rania, Amina** et mon
binôme **Hakima** .*

A tous mes autres ami(e)s,

A tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment.

Merci

Boutaghane Nour elhouda

Résumé

En géotechnique environnementale, la valorisation des matériaux de dragage et leur utilisation dans la réalisation de certains ouvrages de travaux publics est une voie de plus en plus prospectée par les chercheurs ces dernières années, et constitue par conséquent un axe de recherche en harmonie avec le concept de développement durable.

Notre contribution à travers cette recherche, consiste à étudier la problématique engendrée par le dragage des sédiments en provenance d'un port. Et pour des raisons de proximité nous avons opté pour le port de Djen Djen où les sédiments dragués non contaminés ont été mis dans un dépôt terrestre.

L'objectif de notre projet de fin d'étude est de proposer une filière de valorisation pour permettre, d'une part, de gérer les grands volumes des sédiments du port de Djen Djen et, d'autre part, de diminuer les besoins en matériaux extraits des carrières.

L'approche expérimentale retenue dans cette étude pour valoriser les sédiments dragués du port de Djen Djen, consiste à évaluer l'Indice Portant Immédiat et les performances mécaniques après traitement aux liants hydrauliques en tenant compte du critère à satisfaire pour un matériau routier, à savoir, le critère de traficabilité ($R_c \geq 1MPa$). Cette approche présente une deuxième étape importante après la phase de caractérisation et avant toute utilisation en technique routière. Trois mélanges ont été étudiés pour améliorer, ces deux paramètres pour une utilisation en technique routière. Il s'agit du mélange F1 qui représente les sédiments prélevés traité avec 5% de ciment +1% de chaux, F2 qui représente les sédiments prélevés traité avec 7% de ciment, et de F3 qui représente les sédiments prélevés traité avec 7% de ciment +2% de chaux.

Les différentes formulations ont été analysées pour la valorisation en technique routière conformément aux recommandations des guides techniques GTR et GTS (LCPC-SETRA, 2000). Les résultats obtenus pour l'IPi et la résistance à la compression simple du mélange F3 vérifient bien les normes d'un matériau routier.

Mots clés :

Sédiments de dragage, filière de valorisation, technique routière, traitement, liants hydrauliques, portance, performance mécanique.

Abstract

In environmental geotechnics, the valuation of dredged materials and their use in the construction of certain public works works is a path that has been increasingly explored by researchers in recent years, and therefore constitutes a research axis in harmony with the concept. sustainable development.

Our contribution through this research is to study the problem generated by the dredging of sediments from a port. And for reasons of proximity, we opted for the port of Djen Djen where the uncontaminated dredged sediments were placed in a land deposit.

The objective of our end-of-study project is to offer a recovery channel to allow, on the one hand, to manage the large volumes of sediments in the port of Djen Djen and, on the other hand, to reduce the need for materials extracted from quarries.

The experimental approach adopted in this study to valorize the sediments dredged from the port of Djen Djen, consists in evaluating the Immediate Bearing Index and the mechanical performances after treatment with hydraulic binders taking into account the criterion to be satisfied for a road material, namely , the trafficability criterion ($R(C) \geq 1\text{MPa}$).

This approach presents a second important step after the characterization phase and before any use in road engineering. Three mixtures have been studied to improve these two parameters for use in road engineering. This is the mixture F1 which represents the sediment collected treated with 5% cement + 1% lime, F2 which represents the sediment collected treated with 7% cement, and F3 which represents the sediment collected treated with 7% of cement + 2% lime.

The different formulations were analyzed for the valuation in road technology in accordance with the recommendations of the GTR and GTS technical guides (LCPC-SETRA, 2000). The results obtained for the IPI and the simple compressive strength of the F3 blend meet the standards of a road material.

Keywords :

Dredging sediments, recovery process, road technique, treatment, hydraulic binders, bearing capacity, mechanical performance.

ملخص

في الجيوتقنيات البيئية , يعد تقييم المواد المجروفة واستخدامها في إنشاء مسار بعض الأشغال العامة تم اكتشافه بشكل متزايد من قبل الباحثين في السنوات الأخيرة , وبالتالي يشكل محور بحث متناغم مع مفهوم التنمية المستدامة .

مساهمتنا من خلال هذا البحث هي دراسة المشكلة الناتجة عن تجريف الرواسب من المئاء , ولأسباب القرب اخترنا ميناء جن جن حيث تم وضع الرواسب المجروفة غير الملوثة على الشاطئ .

الهدف من مشروع نهاية الدراسة الخاص بنا هو توفير قناة استرداد للسماح من ناحية بإدارة كميات كبيرة من الرواسب في ميناء جن جن , و من ناحية أخرى لتقليل الحاجة الى المواد المستخرجة من المحاجر .

يتمثل النهج التجريبي المتبع في هذه الدراسة في تثمين الرواسب التي تم تجريفها من ميناء جن جن , في تقييم مؤشر التحمل الفوري و الاداء الميكانيكي بعد المعالجة باستخدام روابط هيدروليكية مع مراعات المعيار الذي يجب استقائه لمادة الطريق , وهي معايير قابلية المرور ($RC \geq 1\text{Mpa}$).

قدم هذا النهج خطوة مهمة ثانية بعد مرحلة التوصيف و قبل اي استخدام في هندسة الطرق , تمت دراسة ثلاثة خلأط لتحسين هذه المعايير لاستخدامها في هندسة الطرق . هذا هو الخليط F1 الذي يمثل الرواسب المجمععة بالمعالجة ب 5% اسمنت + 1% كلس , F2 الذي يمثل الرواسب المجمععة بالمعالجة ب 7% اسمنت و F3 الذي يمثل الرواسب المجمععة بالمعالجة ب 7% اسمنت + 2% كلس.

تم تحليل الصيغ المختلفة للتقييم في تكنولوجيا الطرق وفقا لتوصيات الادلة الفنية ل GTR و GTS (LCPC - SETRA , 2000).

النتائج التي تم الحصول عليها من IPI و قوة الضغط البسيطة لمزيج F3 تفي بمعايير مواد الطريق .

الكلمات المفتاحية :

رواسب التجريف , عملية الاستعادة , تقنية الطرق , المعالجة , الروابط , الهيدروليكية , قوة التحمل , الاداء الميكانيكي .

SOMMAIRE

Remerciements

Dédicace

Résumé

Abstract

ملخص

Liste des figures.....	I
Liste des Tableaux	III
Liste des abréviations	V
Liste des symboles	VI

Introduction générale

Introduction général	1
----------------------------	---

CHAPITRE 1 : Etude bibliographique

1.1. Introduction	4
1.2. Définition et origine des sédiments marins	4
1.3. Composition des sédiments marins	6
1.4. Dragage portuaire	9
1.4.1 Définition du dragage maritime.....	10
1.4.2 Nécessité des opérations de dragage	10
1.4.3 Techniques de dragage des sédiments marins	11
1.5. Problématique des ports en Algérie	12
1.5.1 Présentation du port de Djen Djen	13
1.5.2 Les méthodes de dragage et le volume de sédiments extrait dans le port de Djen Djen	14

1.6. Généralités sur les filières de valorisation.....	17
1 .6.1 Valorisation des sédiments de dragage en technique routière.....	18
1 .6.1.1 Description d'une chaussée	18
1 .6.1.2 Différentes couches d'une chaussée	20
1 .6.2 Caractérisation et classification des sédiments selon le GTR	21
1 .7 Traitement des sédiments de dragage par des liants hydrauliques	27
1 .7.1 Traitement au ciment	28
1.7.2 Traitement à la chaux	32
1 .7.3 Effet de la matière organique sur le traitement aux deux liants hydrauliques..35	
1 .7.4 Travaux de recherche antérieurs	36
1 .8 Conclusion	38

CHAPITRE 2 : Caractérisation des sédiments de dragage du port de Djen Djen

2.1 Introduction.....	40
2.2 Caractérisation chimique	41
2.3 Caractérisation physique	42
2.3.1 Teneur en eau initiale (NF P 94-050)	44
2.3.2 Masse volumique absolue et apparent	44
2.3.3 Analyse granulométrique	45
2.3.4 Limites d'Atterberg (NF P 94-051)	48
2.3.5 L'essai au bleu de méthylène (VBS) NFP 94 068	51
2.3.6 Equivalent de sable (NF EN 933-8/2012)	54
2.4 Caractérisation géotechnique	55
2.4.1 Le compactage (NF P 94-093).....	56
2.4.2 Indice portant immédiat	57

2.5 Classification du sédiment du port Djen Djen selon le GTR (LCPC-SETRA, 2000) ...	58
2.6 Conclusion.....	59

CHAPITRE 3 : valorisation des sédiments du port de Djen Djen

3.1 Introduction	60
3.2 Synthèse des caractéristiques géotechniques des sédiments de dragage du port de Djen Djen	60
3.3 Matériaux et méthodes	61
3.3.1 La chaux	61
3.3.2 Le ciment	62
3.3.3 Les formulations retenues	63
3.4 Détermination de la densification et de la portance des formulations étudiées	64
3.5 Essai de compression	66
3.5.1 Confection des éprouvettes	68
3.5.2 Résultats et interprétations	68
3.6 Conclusion	72
Conclusion générale.....	73
Référence bibliographique	75
Les normes.....	81
Les annexes	83

Liste des figures

liste des figures

Fig 1 : Représentation imagée des différentes fractions constitutives d'un sédiment (Rusch, 2010).....	5
Fig 2 : Diagramme triangulaire utilisé pour les sols fins (Dégoutte et al. 2005) ...	8
Fig 3 : Formation des sédiments (Samara, 2007)	9
Fig 4 : Bassin de rejet et capture des sédiments de dragage	12
Fig 5 : Photo du port de Djen Djen	14
Fig 6 : Drague aspiratrice stationnaire	14
Fig 7 : Drague suceuse porteuse à élinde trainante	14
Fig 8 : Drague à benne	15
Fig 9 : Drague à penne	15
Fig 10 : Situation des zones de dragage du port Djen Djen (Daewwo,2014)...	16
Fig 11 : Zone de dépôt	17
Fig 12 : Schéma de fonctionnement d'une structure de chaussée sous l'application d'une charge roulante (Benaïssa, 2017)	19
Fig 13 : Les différentes couches d'une chaussée (Benaïssa, 2017)	20
Fig 14 : Coupe type d'une chaussée	21
Fig 15 : classification du matériau routier en fonction de leur nature (NF P 11-300)	22
Fig 16 : classification du Critère de l'IPI pour les différentes couches de la chaussée (NF P 98 115)	24
Fig 17 : Classification des matériaux traités aux liants hydrauliques (NF98 113)27	
Fig 18 : dépôt terrestre au port de Djen Djen	43
Fig 19 : prélèvement d'échantillons du dépôt terrestre du port de Djen Djen.....	43
Fig 20 : Analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie.....	46
Fig 21 : Courbe granulométrique des sédiments de dragage du port de Djen Djen.....	48

Fig 22: Etat physique des sols.....	49
Fig 23: Détermination de la limite de liquidité avec l'appareil de Casagrande.....	49
Fig 24 : limite de liquidité des sédiments de dragage du port de Djen Djen	50
Fig 25: Classification des sédiments de dragage du port de Djen Djen en fonction de VBS	53
Fig 26 : Eprovette de sable apres 20min	55
Fig 27 : Machine à secouer les éprouvettes d'Es	55
Fig 28: Courbe Proctor des sédiments de dragage du port de Djen Djen	56
Fig 29 : Matériel d'essais Proctor	57
Fig 30 : Classification du sédiment du port djen djen selon la classification du GTR (LCPC-SETRA, 2000).....	59
Fig 31 : Courbes Proctor Normale des mélanges	65
Fig 32: Presse mécanique de capacité utilisée	67
Fig 33 : Evolution temporelle de la résistance des mélanges à différents temps de cure.....	69
Fig 34 : Evolution de la résistance des mélanges à 14 jours de cure	70
Fig 35 : Evolution de la résistance des mélanges à à 28 jours de cure.....	71
Fig 36 : Evolution de la résistance des mélanges à 60 jours de cure	71

Liste des tableaux

liste des tableaux

Tableau 1 : Classement granulométrique des sédiments	7
Tableau 2 : Profondeur de dragage de quelques quais de ports Algériens (blog de Gildon- elmouja- la vague, 10)	13
Tableau 3 : Profondeurs des zones de dragage du port de Djen Djen	15
Tableau 4 : Volume de sédiments de dragage du port du Djen Djen	16
Tableau 5 : Classification des sols utilisés.....	23
Tableau 6 : Critère d'aptitude au traitement pour la classification des matériaux traités aux liants hydrauliques (NF P94-100)	25
Tableau 7 : Récapitulatif des critères de jugement pour l'utilisation d'un matériau traité en couche de chaussée.....	26
Tableau 8 : Désignation des différents types de ciment en fonction de leur composition dans la norme NF P 15-301, (1994).....	30
Tableau 9 : Spécification et valeurs garanties en fonction de la classe.....	31
Tableau 10 :Spécification de la chaux à usage routier (NF P 98-101) (Dehar, 2007)	35
Tableau 11 : Classification des matériaux en fonction du pourcentage massique en carbonate (NF P 94-048)	41
Tableau 12 : Présentation des essais géotechniques effectués sur les sédiments du port de Djen Djen	43
Tableau 13 : Classes granulométriques des matériaux (Tran .N, 2009)	45
Tableau 14 : Valeurs au bleu de méthylène attribuées aux minéraux argileux (Tran, 1981)	51
Tableau 15 : Classification des sols d'après Philipponat	52
Tableau 16 : Classification d'après Holtz et Gibbs	53
Tableau 17 : Classification des matériaux en fonction de l'équivalent de sable.....	54

Tableau 18: Résultats de l'essai Proctor – IPI sur les sédiments bruts.....	58
Tableau 19 : Synthèse des caractéristiques des sédiments marins de dragage du port Djen Djen	58
Tableau 20: Analyse chimique et minéralogique de la chaux (L.T.P.E)	62
Tableau 21: Analyse chimiques du ciment CPJ 42,5 (L.T.P.E)	63
Tableau 22: Formulation des mélanges étudiés	64
Tableau 23: Synthèse des paramètres Proctor- IPI à l'optimum des formulations	65
Tableau 24 : Paramètres de mise en œuvre des éprouvettes.....	68
Tableau 25: Résistance à la compression de différent traitement	69

liste des abréviations et les symboles

Liste des abréviations

- **LTPE** : laboratoire travaux public Est.
- **GTR** : Guide technique des Terrassements Routiers, Réalisation des remblais et des couches de forme.
- **GTS** : Guide du traitement des sols.
- **USCS** : Système de classification unifié des sols.
- **LCPC** : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- **SETRA** : Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes.
- **BTP** : Bâtiment et travaux publics.
- **CBR** : Californian Bearing Ratio.
- **CPA** : Ciment portland artificiel.
- **CPJ** : Ciment portland composé.
- **RN** : Route nationale.

Liste des symboles

- **IP** : Indice de plasticité.
- **WL** : limite de liquidité.
- **WP** : limite de plasticité.
- **ES** : Valeur Équivalent de Sable.
- **MO** : matière organique.
- **VBS** : Valeur du bleu de méthylène.
- **IPI** : Indice portant immédiat.
- **OPN** : Optimum Proctor Normale.
- **Rc** : Résistance à la compression simple.
- **IC.B.R.** : Indice CBR.
- **Gv** : Gonflement volumique.
- **Vb** : le volume du gaz dégagé .
- **E** : Module élastique.
- **R_{tb}** : Résistance en traction indirecte (brésilienne).
- **R_t** : Résistance à la traction directe.
- **Sst** : surface spécifique totale des particules du sol.
- **P** : Charge de rupture.

- **S** : Section transversale de l'éprouvette.
- **p** : la pression atmosphérique de la salle d'essai.
- **m** : la masse de l'échantillon.
- **W_{opt}** : teneur en eau optimale.
- **R_{cj}** : Résistance à la compression à jours.
- **H₁** : Hauteur de piston.
- **H₂** : Hauteur des sédiments.
- **C_U** : le coefficient d'uniformité.
- **C_C** : le coefficient de courbure.
- **d₁₀** : Diamètre de particules pour 10 % de passants cumulés.
- **d₃₀** : Diamètre de particule pour 30 % de passants cumulés.
- **d₆₀** : Diamètre de particule pour 60 % de passants cumulés.

- v : vitesse de décantation de la particule.
- r : rayon de la sphère.
- g : accélération.
- $\Delta(\rho)$ = différence de la masse volumique entre la particule et le fluide.
- μ : viscosité du fluide.
- θ_b : la température de la salle.
- ω : teneur en eau.
- γ_{dopt} : densité optimale.
- ρ_{dopt} : Masse volumique apparente maximale.
- **CaO** : monoxyde de calcium.
- **SiO₂**: dioxyde de silicium.
- **C₃A** : Aluminate tricalcique.
- **C₂S** : Aluminate tricalcique.
- **C₃S**: Silicate tricalcique.
- **C₄AF** : Alumino ferrite tétracalcique.
- **C** : Carbone.
- **Ca** : Calcium.
- **Al₂O₃**: oxyde d'aluminium.
- **Fe₂O₃** : oxyde de fer.
- **Na₂SO₄** : Sulfate de sodium.
- **O** : Oxygène.
- **Na** : Sodium.
- **K** : Potassium.

Introduction générale

Introduction générale

La croissance rapide du commerce mondial par les voies maritimes a entraîné, au cours des siècles, la transformation et le développement des ports côtiers. À partir du XXème siècle, les ports de plaisance ont proliféré le long des côtes des pays développés ; et les ports de commerce sont devenus d'immenses complexes industriels répondant aux exigences croissantes de la société. Ce développement rapide a engendré des problèmes, aussi bien au niveau technologique qu'au niveau environnemental.

La côte algérienne longe 1200km, partagée en quatorze wilayas maritimes. Soixante quatre sites de débarquements longent la côte algérienne dont trente deux ports et vingt trois plages d'échouage. Les gestionnaires des ports ont ainsi été rapidement confrontés à l'envasement. En effet, les sédiments entravent la circulation des navires qui traversent chaque jour les sites portuaires.

La survie d'un port dépend réellement de sa capacité à se rénover continuellement, et donc pour redonner la profondeur naturelle des opérations de dragage ont toujours été indispensables afin d'entretenir, approfondir ou aménager ces sites et assurer le bon fonctionnement du commerce par voies maritimes, à titre d'exemple le volume des sédiments dragués dans les bassins du port de Khemisti situé à Alger est de 140000 m³.

La construction du port de Djen Djen a été débutée en 1984 pour s'achever en 1992. Cet aménagement s'inscrit dans le cadre de l'accroissement des capacités portuaires de la région Centre/Est. Il partage un vaste hinterland avec les ports voisins à savoir le port de Bejaia et Skikda. Sa zone d'influence recouvre une grande région de l'Est et le Sud-Est qui comprend les Hauts plateaux avec son potentiel industriel et les plates-formes pétrolières du Sud. Vu l'importance de ce port, plusieurs dragage ont eu lieu, la mise en dépôt terrestre des sédiments non contaminés et le rejet en mer des sédiments contaminés étaient les seules solutions de gestion des matériaux de curage du port de Djen Djen.

La quantité des sédiments mise en dépôt est énorme, les gestionnaires des ports doivent trouver des réponses à la question du devenir des sédiments dragués.

La réutilisation des sédiments est indispensable pour rentabiliser les opérations de traitement, néanmoins en Algérie la valorisation des sédiments de dragage n'est qu'au stade de recherche. Il existe à ce jour très peu de filières de traitement adaptées sur le plan des volumes traitables. Il devient nécessaire et urgent d'apporter des solutions adaptées au développement durable, pour la gestion des sédiments de dragage portuaire, qui aujourd'hui sont quasiment orphelins de filières de traitement et de valorisation. L'Algérie n'a pas encore identifié de normes ou de critères pour évaluer la qualité des sédiments dragués de ses ports. Toutefois, le choix des solutions de gestion des sédiments est, dans certains cas, dicté par des contraintes économiques en dépit des risques écologiques.

Ce travail est lancé dans le but de trouver de nouvelles alternatives de gestion de sédiments dragués du port de Djen Djen, à savoir leur valorisation dans un matériau en génie civil. Il porte sur la caractérisation géotechnique des sédiments prélevés du dépôt terrestre du port de Djen Djen. Puis sur leurs traitement aux liants hydrauliques, dans le but d'évaluer leurs performances mécaniques en vue de les utiliser comme matériaux routiers.

Ce projet de fin d'étude est divisé en trois chapitres :

- Le premier chapitre concerne une étude bibliographique qui a permis de mettre en évidence l'origine et la constitution des sédiments marins. Il illustre les techniques de dragage portuaire. Il décrit par la suite la problématique des ports algériens et plus précisément le port de Djen Djen. Il traite des filières de valorisation et plus particulièrement la géotechnique routière. En dernier lieu ce chapitre est consacré aux traitements des sédiments de dragage par des liants hydrauliques qui améliorent les performances mécaniques des sédiments. Enfin cette recherche bibliographique présente quelques travaux de recherche focalisés sur l'utilisation des sédiments de dragage.

- Les techniques expérimentales mises en œuvre pour caractériser les sédiments prélevés du dépôt terrestre du port de Djen Djen ainsi que les résultats obtenus font l'objet d'un second chapitre. La description des

protocoles expérimentaux des essais réalisés pour déterminer les caractéristiques géotechniques de ce matériau hétérogène et complexe afin de comprendre son comportement. L'objectif de cette caractérisation est de permettre de classer les sédiments de dragage du dépôt terrestre du port de Djen Djen selon la norme NF P11-300 (Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières) et le GTR 2000 (Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme). Ce chapitre s'avère être primordiale, pour envisager une valorisation adaptée.

- Enfin, le troisième chapitre est dédié à la valorisation des sédiments du dépôt terrestre du port de Djen Djen dans les matériaux routiers. Ce matériau cimentaire représente une nouvelle filière de valorisation pour les sédiments marins étudiés qui devra permettre, d'une part, de gérer les grands volumes des sédiments du port de Djen Djen et, d'autre part, de diminuer les besoins en matériaux extraits des carrières. La fabrication de ces matériaux routiers à base de sédiments de dragage du port de Djen Djen s'inscrit dans une optique de développement durable.

Chapitre 1

Etude bibliographique

1. Etude bibliographique

1.1 Introduction

Dans la plupart des cas l'envasement est ressenti comme une entrave à la navigation ou une nuisance environnementale. Ce phénomène d'origine continentale ou marine peut empêcher l'accès des navires aux installations portuaires. Ainsi, l'envasement implique souvent la mise en œuvre de travaux de dragage onéreux et peu efficaces du fait de la très forte teneur en eau. La plus grande partie des sédiments dragués est rejetée en mer en eaux profondes, ou confinée à terre, occupant des sites sans aucune autre utilisation quand les matériaux sont trop pollués.

La contamination d'un sédiment résulte généralement d'un brassage de sources (industrielles, urbaines ou agricoles) véhiculées et dispersées par l'eau et les matières en suspension.

Sur le port de Djen Djen nous n'avons constaté aucun déversement d'émissaire urbain. Les sédiments de dragage de ce port ne sont donc pas contaminés puisqu'il n'existe pas de source de pollution.

Cette recherche bibliographique présente en premier lieu l'origine et la constitution des sédiments marins. Elle illustre les techniques de dragage portuaire. Elle décrit par la suite la problématique des ports algériens et plus précisément le port de Djen Djen. Enfin elle est déviée vers les filières de valorisation et plus particulièrement vers la géotechnique routière. En dernier lieu ce chapitre est consacré aux traitements des sédiments de dragage par des liants hydrauliques qui améliorent les performances mécaniques des sédiments. Enfin nous achèverons cette bibliographique par présenter quelques travaux de recherche focalisés vers l'utilisation des sédiments de dragage.

1.2 Définition et origine des sédiments marins

Un sédiment est un milieu poreux constitué par une matrice solide et de vide, appelés pores (Rusch, 2010). Ces pores sont occupés par de l'eau de mer et

dans une moindre mesure par de l'air enrichi en CO₂ par l'activité respiratoire des micro-organismes. Lorsque le sédiment contient aucune fraction gazeuse, c'est-à-dire que les pores sont entièrement remplis d'eau, on dit que le milieu est saturé. La région d'origine et la nature du milieu aquatique (rivières, estuaires, zones côtières, etc.) du sédiment ont un impact non négligeable sur la représentation de ces différentes fractions. Les sédiments sont donc des milieux poreux constitués de trois fractions présentes en proportions variables (voir Fig 1) (Rusch, 2010).

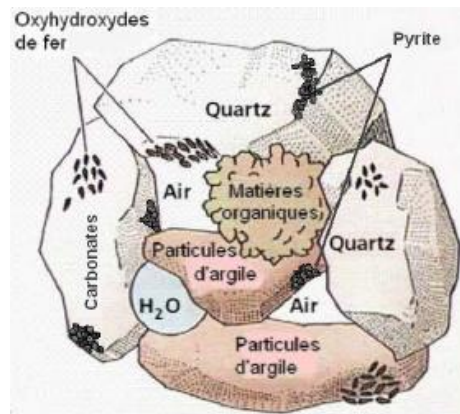


Fig 1 : Représentation imagée des différentes fractions constitutives d'un sédiment (Rusch, 2010)

La fraction solide des sédiments est un milieu complexe constitué de particules minérales et de substances organiques. Le quartz, les carbonates, les oxydes et hydroxydes métalliques et les argiles constituent les principales espèces minérales d'une matrice sédimentaire (Mechaymech, 2002). Les micro-organismes, les débris animaux et végétaux, les colloïdes humiques constituent quant à eux les substances organiques potentiellement présentes dans les sédiments.

Les particules qui composent les sédiments sont plus ou moins grosses et sont constituées de composés organiques et inorganiques provenant de quatre sources distinctes (Schneider, 2001):

- ✓ Une source **terrigenne**, signifiant que les particules proviennent de l'érosion des terres émergées. Cette source est enrichie par divers apports tels que les apports éoliens, volcaniques, glaciaires, sans oublier les apports fluviaux et/ou de ruissellement qui constituent à eux seuls l'apport cumulé le plus important. Dans le cas des sédiments

marins, l'apport lié à l'érosion propre des côtes doit être pris en considération.

- ✓ Une source **endogène**, désignant les particules qui proviennent du bassin de sédimentation comme les débris de microphytes (plantes aquatiques, microphytes) ou encore les fragments de coquilles des organismes.
- ✓ Une source liée à la **néoformation**, correspondant aux phénomènes d'altération, de transferts et de précipitations qui peuvent se produire dans le bassin de sédimentation ou à l'intérieur du sédiment durant la diagenèse ¹.
- ✓ une source anthropique qui peut être ex situ et in situ. Dans le premier cas, elle regroupe tous les rejets agricoles, industriels et domestiques qui se retrouvent dans les apports fluviaux. Ce fractionnement est riche en matière organique (MO), en nutriments, et en micropolluants. Il peut également apporter des matières en suspension. Dans le second cas, elle englobe toutes les activités humaines et industrielles portuaires (chargement de marchandise, pêche, ravitaillement en carburant, entretien du matériel de navigation). Généralement, cette dernière source est fortement contaminée, ce qui conduit à l'augmentation du taux de sédimentation.

1.3 Composition des sédiments marins

La composition chimique d'un sédiment est propre à son environnement et aux sources émettrices à proximité de la zone de dépôt.

La composition et les caractéristiques physiques des sédiments marins varient considérablement en fonction de la profondeur de l'eau, de la distance par rapport à la terre, des variations de la source de sédiments et des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques de leur environnement. Les sédiments contiennent une phase minérale dont la granulométrie s'étend des sables, aux argiles et aux colloïdes, une phase organique et une phase liquide (Romero and al., 2008).

¹Diagenèse : Processus de consolidation des sédiments, s'étendant depuis leur dépôt jusqu'au moment où ils sont transformés en une roche dure

La distribution granulométrique d'un sédiment constitue son empreinte physique, elle caractérise la taille des particules, constituant la phase solide du matériau. Pour l'obtenir, il est procédé à un tamisage mécanique.

Tableau 1 : Classement granulométrique des sédiments

Taille	Dénomination
> 20 cm	Blocs
2 cm à 20 cm	Galets et cailloux
2 mm à 2 cm	Graviers
63 µm à 2 mm	Sables (grossiers et fins)
2 µm à 80 µm	Limons (ou silt)
< 2 µm	Vases, boues argileuses

Les sédiments marins sont constitués de phases minérales, organiques et liquides. La composition minérale des sédiments diffère selon leur provenance (Schneider, 2001) :

- Les blocs, les cailloux, les graviers sont des sédiments terrigènes c'est-à-dire, issus de l'érosion des sols. Leur nature chimique dépend principalement des terrains érodés ;
- Les sables sont essentiellement quartzeux (Silice SiO₂) ou silicatés (mica, feldspath), souvent accompagnés de minéraux lourds (amphiboles, grenats, disthène...) qui dépendent de la nature des sols érodés. On trouve aussi des sables calcaires (ex : les sables de la Seine) ;
- Enfin, les particules les plus fines, limons, boues et vases, sont composées de minéraux argileux d'origine terrigène, et aussi des squelettes d'organismes d'origine endogène.

Les sédiments peuvent être classés selon le pourcentage des argiles, limons et sables en utilisant le diagramme triangulaire de classification des sédiments en fonction de leur texture (voir Fig 2).

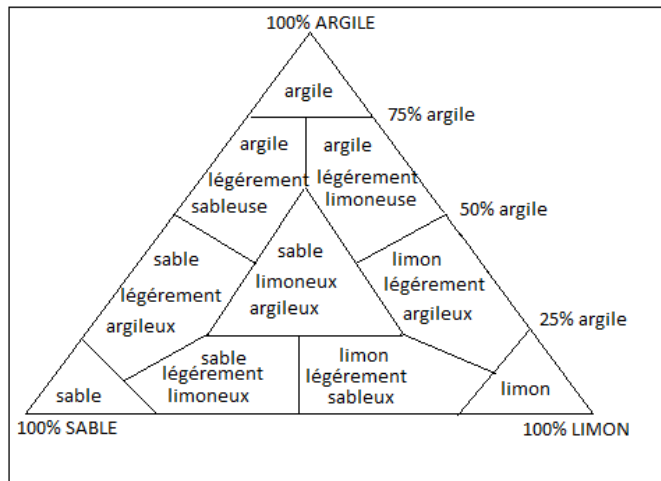


Fig 2 : Diagramme triangulaire utilisé pour les sols fins
(Dégoutte et al., 2005)

Ce diagramme est particulièrement adapté aux sédiments selon la taille et le pourcentage de chaque fraction. Les fractions fines, en particulier les argiles, sont responsables de la cohésion des sédiments en raison de leurs propriétés électriques et de leurs structures en feuillets et elles sont considérées comme l'élément majeur influençant le comportement plastique d'un sol.

La contamination des sédiments est principalement due aux rejets industriels, urbains et agricoles, entraînant l'apport d'un grand nombre de substances toxiques. Depuis les années soixante-dix, les substances toxiques sont considérés comme une destination finale vers les sédiments qui deviennent une réserve toxique potentiellement mobilisable.

Les polluants peuvent être de nature inorganique ou organique. Les polluants, de nature inorganique, dans les sédiments, sont: les métaux, certains sels (sulfates, phosphates, nitrates, chlorures et ammonium), ainsi que les cyanures (Labioud-Aloui, 2014).

La matière organique est issue soit de débris végétaux soit de micros organismes, ou encore de colloïdes humiques. Les substances humiques colorent les sédiments en noir et interagissent avec la partie minérale provoquant des agglomérations.

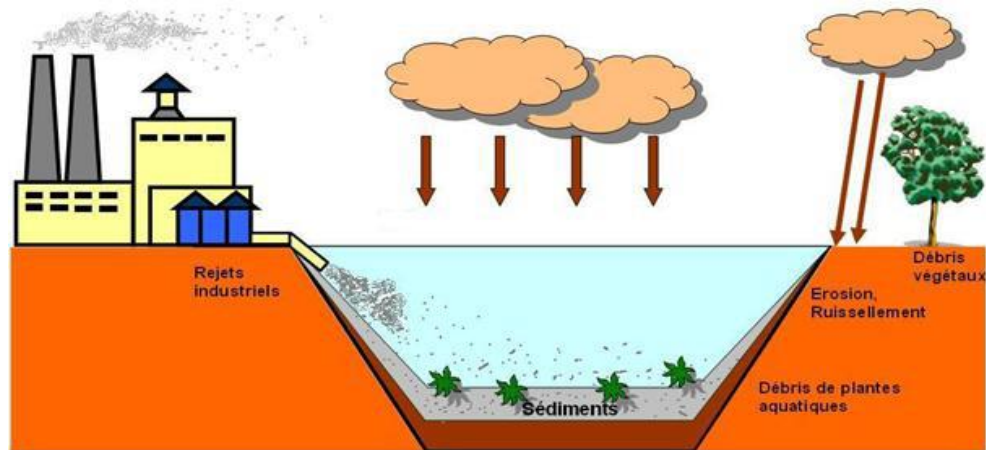


Fig 3 : Formation des sédiments (Samara, 2007)

De manière générale, les sédiments fins ont une teneur en matière organique élevée, et elles contiennent une quantité appréciable de sulfures et sont anoxiques. Par contre, les sédiments grossiers, qui sont généralement pauvres en matière organique, ont une faible capacité d'immobilisation des métaux et des polluants organiques (Alzieu et al., 1999).

La nature de l'eau contenue dans les sédiments (appelée eau interstitielle) peut être répartie en quatre catégories afin de la différencier de la colonne d'eau qui se trouve au-dessus.

- ❖ L'eau libre qui n'est pas liée aux fines.
- ❖ L'eau capillaire, liée aux fines par des forces de capillarité.
- ❖ L'eau colloïdale qui hydrate les colloïdes.
- ❖ L'eau adsorbée qui est liée à la surface des particules et constitue un film autour d'elles (Scordia, 2008).

1.4 Dragage portuaire

L'architecture des ports industriels ou de plaisances est pensée de manière à satisfaire à leur fonction première qui est l'amarrage des bateaux. Afin que l'amarrage des bateaux se fasse toute sécurité, le port protège ces derniers des vents, des courants et des tempêtes. À l'abri des remous et des vagues, les bassins portuaires sont similaires à des zones de stagnation. De ce fait, ces zones calmes connaissent naturellement des problèmes de sédimentation.

La sédimentation des matières en suspension d'origine continentale ou marine peut empêcher l'accès des navires aux installations portuaires.

Le dragage est à ce jour le seul procédé qui permet à moyen terme de remédier à cette problématique.

1.4.1 Définition du dragage maritime

Le dragage des sédiments est une opération indispensable pour maintenir la sécurité du transport par voie maritime et pour diminuer le risque de pollution de l'écosystème marin. Cette action, malgré son importance ne permet pas une résolution entière au problème. En effet, la gestion des sédiments dragués pose à son tour un problème écologique et économique à cause des grands volumes et de la pollution des sédiments. Les gestionnaires des opérations de dragage sont tenus à adapter la solution la moins dommageable pour l'environnement.

Les Solutions classiques sont le rejet en mer et la mise en dépôt terrestre avec ou sans confinement. De nouvelles alternatives sont en cours de développement visant le traitement et la valorisation des sédiments dans le but de rentabiliser les frais du dragage et éliminer les risques de la migration des polluants vers l'environnement. Le choix d'une alternative ou une autre commence par une évaluation de la qualité des sédiments (taux de pollution) et est dicté par les directives des textes réglementaires internationaux et nationaux.

La sédimentation des matières en suspension d'origine continentale ou marine peut empêcher l'accès des navires aux installations portuaires.

1.4.2 Nécessité des opérations de dragage

Trois besoins justifient les opérations de dragage :

1. Le dragage d'entretien consiste à évacuer ces matériaux afin d'assurer une hauteur d'eau suffisante pour le passage des bateaux. Ces opérations sont quasi permanentes dans les ports d'estuaires et périodiques dans les ports ouverts sur la mer.
2. Le dragage d'approfondissement est, quand à lui, motivé par l'évolution de la taille des navires qui suppose une modernisation des ports et en particulier l'adaptation du seuil de navigation pour les chenaux d'accès et les bassins.

3. Enfin, l'aménagement de nouvelles aires portuaires occasionne souvent le déplacement d'importants volumes de matériaux divers : roche, sable, terre, argile, graviers ou vase (Agostini, 2006).

1.4.3 Techniques de dragage des sédiments marins

Le dragage est une opération qui consiste à prélever des sédiments du fond de la mer. Les procédés de dragage changent selon les zones, le type des travaux et la nature du sédiment à draguer. On distingue trois types de dragage : Le dragage d'approfondissement, le dragage d'entretien et le dragage d'aménagement de nouvelles aires portuaires (Foucher, 2005).

- Le dragage d'approfondissement est entrepris lorsqu'il est nécessaire de moderniser des ports et d'adapter des seuils de navigation.
- Le dragage d'entretien périodique vise à extraire les sédiments qui se sont déposés et gênent la navigation dans les chenaux d'accès des ports maritimes et estuaires ainsi que les bassins à flots.
- Le dragage d'aménagement de nouvelles aires portuaires concerne le déplacement des volumes de matériaux divers (sables, argiles, graviers).

En matière d'équipements de travail, on distingue généralement les dragues mécaniques, hydrauliques et pneumatiques.

- Les dragues mécaniques sont utilisées dans des zones difficiles d'accès (bordures de quais, bassins étroits) et peuvent travailler jusqu'à des profondeurs de 25 m (drague à godets) à 30 m (drague à benne) (Foucher, 2005).
- Les dragues hydrauliques sont basées sur le principe de la pompe à eau centrifuge et opèrent par création d'un vide à l'entrée de la pompe. La pression atmosphérique dans l'eau oblige la mixture à suivre la conduite d'aspiration, seule trajectoire disponible (Foucher, 2005).
- La drague pneumatique est particulièrement adaptée au dragage des sédiments contaminés, et les matériaux sont ensuite évacués par chaland ou par conduite flottante (Foucher, 2005).

On constate que, pour les grands ports maritimes, la technique prédominante est le dragage hydraulique, représentant une proportion de 77,5 %.

1 .5 Problématique des ports en Algérie

La côte algérienne longe 1200km, partagée en quatorze wilayas maritimes. Chaque wilaya possède un certain nombre de ports, d'abris de pêche et de plages d'échouage. 64 sites de débarquements longent la côte algérienne: 32 ports ; 23 plages d'échouage.

Dernièrement l'ancien PDG du port de Bejaia a tiré la sonnette d'alarme sur l'état actuel des ports algériens. Depuis 50 ans les ports algériens contrairement aux ports si ce n'est que ceux de nos voisins marocains, les nôtres n'ont pas évolués, vieux, géographiquement mal situés, faibles en logistique et en capacité d'accueil et mal desservis par les moyens de communications. Techniquement depuis 30 ans les navires ont doublé de capacité, de dimensions et automatiquement bien sûr de tirant d'eau.

Les ports algériens n'ont pas été dragués depuis plusieurs années, ils ont perdu en moyenne 1 à 2 m de profondeur, ce qui les oblige à recevoir toujours des navires de faible tonnage et à faible tirant d'eau, d'où des coûts très élevés. Certains d'entre eux sont carrément obligés de s'alléger dans un port pour pouvoir accoster dans un autre. C'est le cas aujourd'hui des porte-conteneurs (1 000 EVP et +), vraquiers (panamax et capesize), pétroliers (vlcc, ulcc).



Fig 4 : Bassin de rejet et capture des sédiments de dragage

La survie d'un port dépend réellement de sa capacité à se rénover continuellement, et donc pour redonner la profondeur naturelle à ces ports les

responsables sont tenus de les curer régulièrement. Le volume des sédiments dragués dans les bassins du port de Khemisti situé à Alger est de 140000 m^3 , le devenir des déblais pose problème, le dépôt côtier est à écarter puisque toute la côte est à vocation touristique (Zéralda, Palme Beach, Moretti, Tipaza) (Belkessa et al, 07). Le tableau suivant résume les profondeurs et les dates de dragage de quelques ports algériens.

Tableau 2 : Profondeur de dragage de quelques quais de ports Algériens
(blog de Gildon- elmouja- la vague, 10)

Ports	Profondeurs de dragage(m)	Date de dragage
Quai de Conackry et Casablanca(Oran)	8 à 10	2010
Quai de Mostaganem	7 à 8.5	2009
Quai de Bejaia	15	2005

1 .5.1 Présentation du port de Djen Djen

Le port de Djen Djen est situé à l'Est de l'Algérie. Avec sa position géographique de $36^{\circ} 51'$ Nord et $005^{\circ} 54'$ Est, il bénéficie d'une place stratégique à moins de 50 miles de la route maritime reliant le canal de Suez au détroit de Gibraltar. Il est le dernier port commercial construit en Algérie après l'indépendance et est considéré comme le plus important ouvrage portuaire en Méditerranée en termes d'espaces et eau profonde. Sa construction décidée au cours de la décennie 70, a débuté en 1984 pour s'achever en 1992, s'inscrit dans le cadre de l'accroissement des capacités portuaires de la région Centre/Est. Il est à :

- 10 Km du chef lieu de la wilaya de JIJEL. 350 Km à l'Est d'Alger.
- 40 Km de la zone industrielle de BELLARA.
- 900 Km de Hassi Messaoud.

Il partage un vaste hinterland avec les ports voisins à savoir le port de Bejaia et Skikda. Sa zone d'influence recouvrant une grande région de l'Est et le Sud-est qui comprend les Hauts plateaux avec son potentiel industriel et les plates-formes pétrolières du Sud. C'est dans cette perspective, que la réalisation de la pénétrante (RN 77) communément appelée l'autoroute du port va favoriser l'extension de

l'hinterland du port jusqu'à des régions très éloignées. Cette position lui confère un rôle privilégié dans le futur terminal de transbordement de conteneurs qui est en cours de réalisation de jouer pleinement son rôle comme hub pour les trafics transcontinentaux.



Fig 5 : Photo du port de Djen Djen

Le port de Djen Djen se trouve aussi dans une zone excentrée adossée à une réserve foncière de plusieurs centaines d'hectares dédiée aux futures zones logistiques qui vont être érigées comme support de l'activité de transbordement.

1 .5.2 Les méthodes de dragage et le volume de sédiments extrait dans le port de Djen Djen

Le dragage du port de Djen Djen a débuté en 2015 jusqu'à la fin de 2019. Chaque zone de ce port a subit une méthode de dragage (voir Fig 10). L'excavation de la fondation du mur du quai et zone d'évitage a été effectuée au biais d'un dragage mécanique en utilisant une drague suceuse à couteau et benne preneuse, et l'extraction du bassin d'amarrage et chenal a été réalisé au biais d'un dragage hydraulique par une drague suceuse porteuse à élinde trainante (voir Fig 6, 7,8, et 9).



Fig 6 : Drague aspiratrice stationnaire

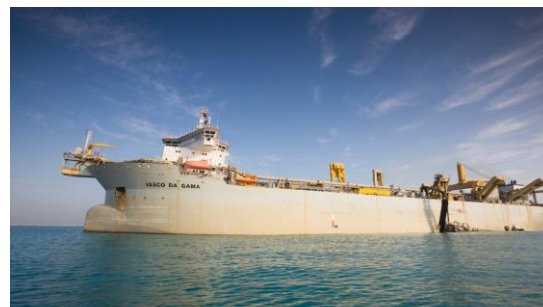


Fig 7: Drague suceuse porteuse à élinde trainante

Le dragage a été réalisé 3 à 4 fois en fonction de l'épaisseur des couches. Les sédiments ont été évacués par une conduite de décharge puis ont été déposés à terre.



Fig8 : Dragage à benne



Fig9 : Dragage à penne

La profondeur de dragage comprend la fondation, le bassin d'amarrage, la zone d'évitage, le chenal et la zone sableuse du Port Est (voir tableau 3).

Tableau 3 : Profondeurs des zones de dragage du port de Djen Djen

Zone de dragage	Profondeur du quai Ouest (en mètre)	Profondeur du quai Nord (en mètre)	Profondeur du quai Est (en mètre)
Dragage de fondation	(-) 19,1	(-) 19,1	(-) 16,1
Dragage du bassin d'amarrage	(-) 17,0	(-) 17,0	(-) 14,0
Zone d'évitage		(-) 18,0	
Dragage du chenal		(-) 19,0	
Port est		(-) 19,0 à (-) 4,0	

Le tableau ci-dessous illustre le volume de dragage dans chaque zone du port de Djen-Djen dans :

Tableau 4 : Volume de sédiments de dragage du port du Djen Djen

Catégorie		Volume (m ³)
Excavation de la fondation du mur de quai		896 000
Dragage	Bassin d'amarrage (A+B+C)	1 434 000
	Zone d'évitage (D)	364 000
	Chenal (E1+E2+F1+F2)	2 407 000
	Sous-total	4 205 000
Autres dragages	Zone remblayée du port est (G1)	1 049 000
	Zone remblayée du port est (G2)	413 000
	Sous-total	1 462 000
Total		6 563 000

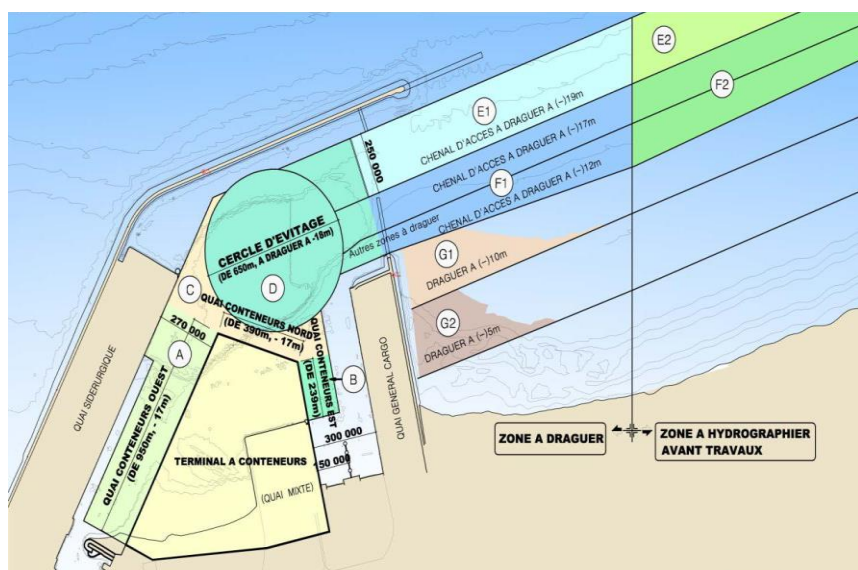


Fig 10 : Situation des zones de dragage du port Djen Djen (Daewwo, 2014)

La quantité de dragage totale a été de l'ordre de $6\,563\,000\text{ m}^3$ comprenant l'excavation de la fondation du mur de quai ($896\,000\text{ m}^3$) et la quantité de dragage ($5\,667\,000\text{ m}^3$), en différenciant la quantité de remblai pour l'aménagement du terrain et celle des sables destinés à être rejetés en haute mer.

Le dépôt à terre a été choisi pour l'évacuation des sédiments, puis ils ont été transportés pour être stockés dans le port de Djen Djen (voir fig 11).

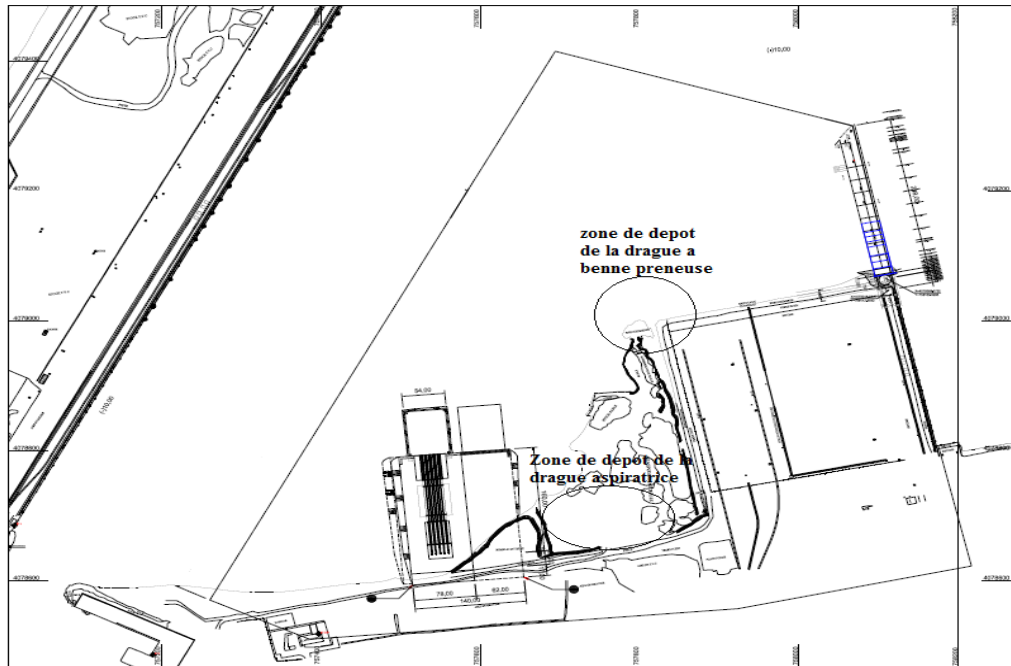


Fig 11: Zone de dépôt

La majorité des sédiments de dragage du port de Djen Djen mis en dépôt sont non contaminés. Les sédiments contaminés sont rejetés au large en haute mer tels que F1 et F2.

1.6 Généralités sur les filières de valorisation

La valorisation consiste au réemploi, recyclage ou toute autre action visant à obtenir, à partir des déchets, des matériaux réutilisables ou de l'énergie.

La valorisation des sédiments de dragage constitue une issue pour le problème de gestion de ces matériaux. Nombreuses sont les voies possibles de valorisation des sédiments de dragage.

La valorisation des sédiments est souvent envisagée dans les matériaux de génie civil (mortier, béton, brique...) (Hamer et Karius, 2002 ; Dalton et al., 2004 ; Labiod et al., 2004) ou en travaux publics (Grosdemange, 2005 ; Samara et al., 2007) (barrière argileuse, remblais, régalage ou maintien des berges, assises de chaussée...) grâce aux propriétés assimilées à celles des matières premières (liant, sol, sable) (Colin, 2003 ; Semcha, 2005 ; Levacher et al., 2011 ; Aloui-Labiod et al., 2014 ; Benaïssa et al., 2016).

La valorisation des sédiments peut également intéresser d'autres domaines tels que l'agriculture par l'amendement des sols (sédiments fluviaux uniquement) (Labioud, 2000) et la réhabilitation de sites naturels (Alzieu et al., 1999).

Ces filières de valorisation ont pour principaux avantages de limiter les volumes mis en dépôt, de réduire les coûts de l'opération de dragage, et de répondre à un besoin en matériaux. L'intérêt d'envisager ces voies de valorisation pour les sédiments de dragage réside dans le devenir du stock de sédiments déjà mis en dépôt et à venir, mais également dans la demande importante en matières premières du secteur du BTP (Bâtiment et Travaux Publics). En effet, bien que les réserves de granulats (alluvionnaires ou massifs) soient quasiment illimitées, leurs prix sont en augmentation continue.

1.6.1 Valorisation des sédiments de dragage en technique routière

Les sédiments de dragage ont déjà fait l'objet de plusieurs études de valorisation (dans les mortiers, les bétons, briques...etc. nous nous intéresserons aux possibilités de valorisation des sédiments dans les matériaux routiers. L'objectif de cette recherche bibliographique est de donner :

- une description d'une chaussée.
- les différentes couches de la chaussée.
- et enfin de classer les sédiments selon le guide technique GTR.

1.6.1.1 Description d'une chaussée

La structure d'une chaussée routière doit avoir la possibilité de supporter diverses sollicitations, induites dans le sol de fondation comme la charge de trafic par les véhicules, et de supporter la déformation en flexion des couches de la structure qu'une charge roulante induit. Cette flexion entraîne des sollicitations en compression au droit de la charge et des sollicitations en traction à la base des couches d'enrobés (Fig 12).

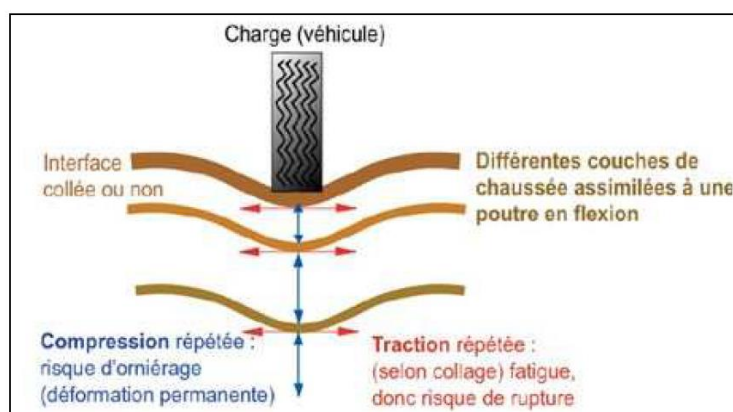


Fig 12 : Schéma de fonctionnement d'une structure de chaussée sous l'application d'une charge roulante (Benaissa, 2017)

Le rôle d'une chaussée est de répartir la pression exercée par le pneumatique pour l'amener à un niveau compatible avec ce qui peut être supporté par le sol support. Dans le dimensionnement de la chaussée, on utilise la structure multicouche constituée de trois parties principales qui ont chacune un rôle bien défini (Fig 13). Tout d'abord, le sol-support est surmonté généralement par une couche de forme. L'ensemble sol-support et couche de forme représente la plate-forme support de la chaussée (éventuellement compris la sous-couche). La couche de forme a une double fonction. Pendant les travaux, elle assure d'une part la protection du sol-support contre la pluie et les effets de cycle gel-dégel. D'autre part, elle permet 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. Ensuite, la couche de base et la couche de fondation forment le corps de chaussée proprement dit qui a le rôle de réception des charges produites par le trafic et les répartit sur la plate-forme support afin de maintenir les déformations à un niveau admissible. La couche de base, plus proche de la surface de la chaussée, subit des contraintes et des déformations notables; il est donc nécessaire qu'elle présente des caractéristiques mécaniques plus élevées que celles de la couche de forme. Enfin, la couche de surface se compose de la couche de roulement et éventuellement d'une couche de liaison. Elle a deux fonctions :

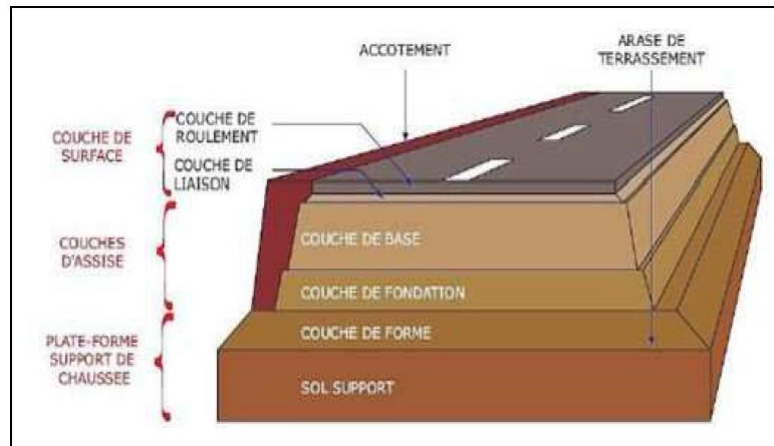


Fig 13 : Les différentes couches d'une chaussée (Benaissa, 2017)

D'une part, elle assure la protection du corps de chaussée vis-à-vis des infiltrations d'eau et d'autre part, elle reçoit directement la pression des pneus de véhicule et la transmet vers le corps de chaussée après avoir subi une déformation admissible.

1.6.1.2 Différentes couches d'une chaussée

La structure d'une chaussée routière, telle qu'elle apparaît à la (Fig 14), est constituée de 3 couches différentes. Chaque couche à différentes fonctions :

Couche de surface : elle est composée de deux couches la couche de roulement qui est la couche supérieure où s'appliquent les actions du trafic et du climat, et la couche de liaison qui lie la couche d'assise et qui assure la protection vis-à-vis des infiltrations des eaux et des sels et les pollutions en surface.

Couche d'assise : elle comprend deux sous-couches: la couche de fondation et la couche de base. Ces couches de la chaussée sont les plus importantes pour supporter la résistance mécanique et la déformation dans une limite admissible.

Couche de forme : pendant les travaux, elle contribue au nivellement du sol et garantit le déroulement du chantier. Elle permet d'homogénéiser les caractéristiques du sol support et de contrer le gel.

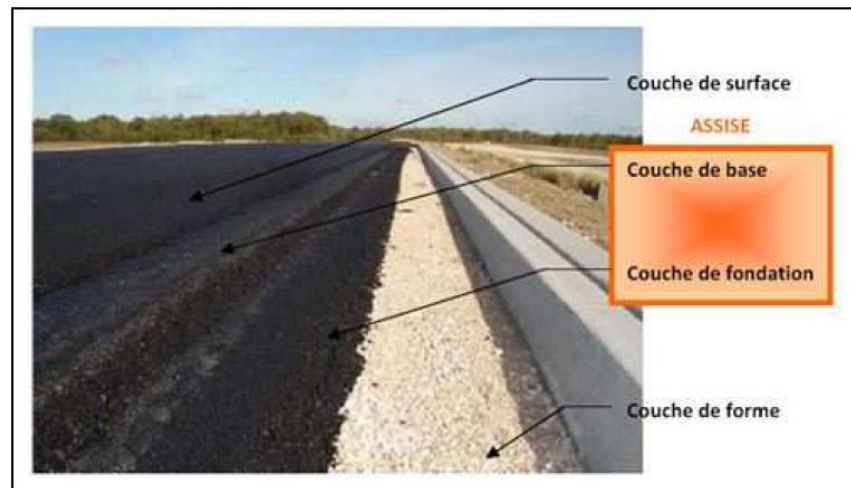


Fig14 : Coupe type d'une chaussée

Dans le massif de chaussée, de haut en bas, la distribution de la charge est de moins en moins importante. Cela permet d'utiliser des matériaux ayant des caractéristiques mécaniques variées en fonction de leur position dans la structure de la chaussée.

1 .6.2 Caractérisation et classification des sédiments selon le GTR

L'utilisation d'un matériau en couche de chaussée nécessite la connaissance de ses propriétés physiques et géotechniques. La classification peut se faire selon différentes approches.

Classification GTR : Le « Guide des Terrassements Routiers, réalisation des remblais et des couches de forme » [GTR] est un guide spécifique aux travaux routiers. Les paramètres d'entrées sont comme illustré dans la (fig 15). Ils sont essentiellement les caractéristiquement physiques du matériau. Ces paramètres sont la granulométrie, l'activité argileuse et la plasticité du matériau.

Caractérisation et classification des sédiments selon le guide technique GTR

Classification USCS : Le système de Classification Unifié des Sols (ou USCS) est un système de classification des sols utilisés dans la disciplines de la géologie et de l'ingénierie pour décrire la texture et la taille des grains d'un sol (Tableau 5).

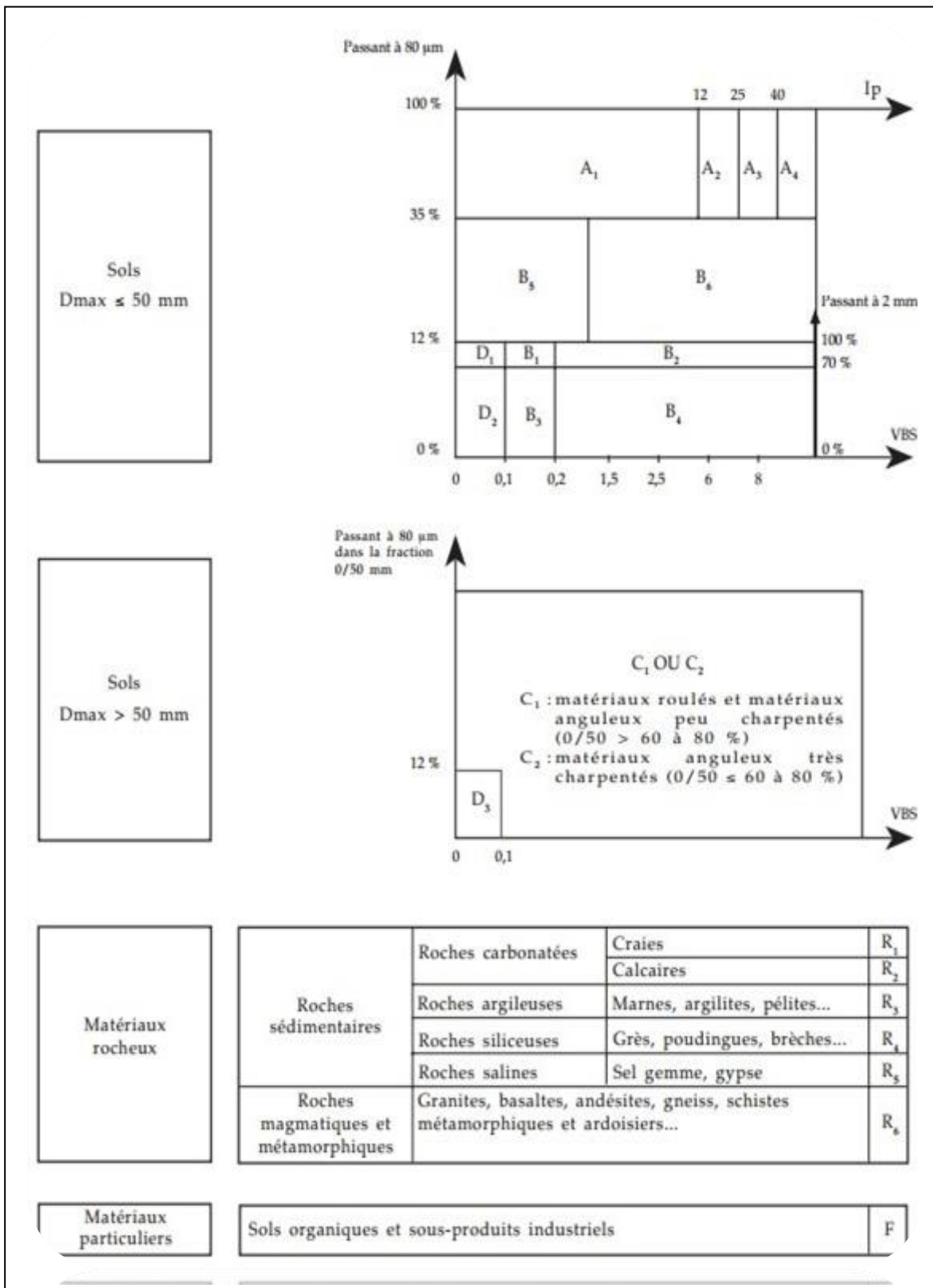


Fig 15 : Classification du matériau routier en fonction de leur nature (NF P 11-300)

Tableau 5 : Classification des sols utilisés

Grandes divisions			Symbole du groupe	Nom du groupe
Sol à grains Grossiers 50% >75µm	Gravier 50%>4.75 µm	Gravier propre	GW	Gravier bien classé
			GP	Gravier mal classé
		Gravier avec une proportion de fines>12%	GM	Gravier limoneux
			GC	Gravier argileux
	Sable 50% <4.75µm	Sable propre	SW	Sable bien classé
			SM	Sable mal classé
		Sable avec une proportion de fines>12%	SP	Sable limoneux
			SC	Sable argileux
Sols à grains Fins 50% <75µm	Limon et Argile WL <50	Inorganique	ML	Limon
			CL	Argile
		Organique	OL	Limon organique , Argile organique
	Limon et argile WL ≥50	Inorganique	MH	Limon très plastique , limon élastique
			CH	Argile de haute plasticité
		Organique	OH	Limon organique, Argile organique
		Sol très organique		

Dans les travaux routiers. Les principaux paramètres jugeant l'adéquation d'un matériau pour une utilisation en assise de chaussée sont l'Indice Portant Immédiat (IPI), la résistance en traction (Rt) et le module d'élasticité (E), et l'essai Proctor (Normal et Modifié) (NF P 94-093,1997) sont les essais les plus importants pour évaluer l'appropriation des sédiments comme matériaux routiers. Parmi les critères de classification des sédiments comme matériaux routiers on peut citer :

Critère de granulométrie : La granulométrie et la proportion en matières organiques représentent les facteurs clés de l'utilisation des sédiments en technique routière. Il est préférable que la proportion de sédiments ne soit pas voulue majoritaire afin d'opter à une couche de sol ayant un squelette granulaire constitué d'une matrice résistante à granulométrie étalée, et limiter les matières organiques et les éléments fins pour leur sensibilité à l'eau.

Critère de portance : La portance du matériau caractérisée par son indice portant immédiat (IPI) est évaluée à partir de l'essai Proctor. L'IPI permet d'évaluer

l'aptitude du matériau à supporter la circulation des engins (NF P 94-078,1999). Selon les valeurs de l'IPI, les caractéristiques des différentes couches sont présentées dans la (Fig 16) d'après les recommandations de la norme française (NF P98-115,1992). Les valeurs souhaitables de l'IPI ne doivent pas être inférieures à 25% pour la couche de forme, 35% pour la couche de fondation et 45% pour la couche de base. Selon Colin(2003), les sédiments dragués peuvent être utilisés comme les matériaux routiers pour la couche de fondation de la chaussée.

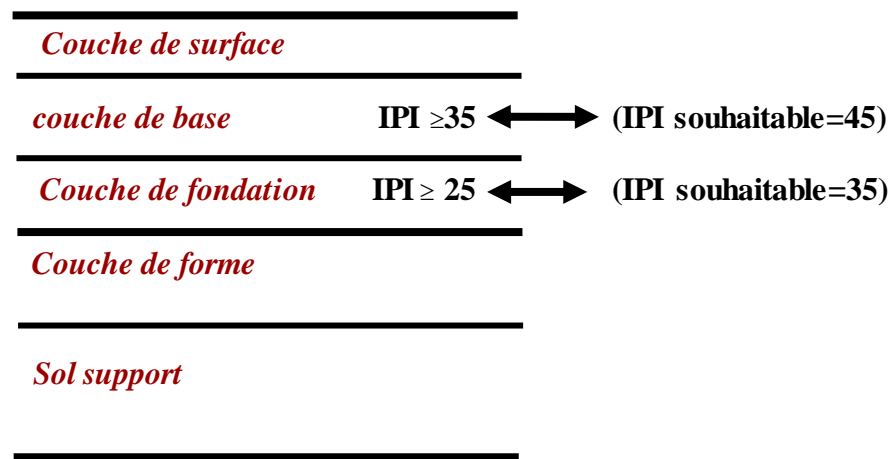


Fig 16 : Classification du Critère de l'IPI pour les différentes couches de la chaussée (NF P 98 115)

Critère de durabilité au jeune âge : Afin de déterminer la durabilité du traitement ainsi que le comportement de la couche en cas d'immersion aux jeunes âges. Le paramètre ICBR immersion 4jours/IPI est essentiel à vérifier car lorsqu'un sol fin est saturé en eau, il peut perdre totalement sa cohésion, notamment si le liant n'a pas débuté sa prise. La durabilité est jugée satisfaisante si ce paramètre ICBR immersion 4jours/IPI est supérieur à 1.

Critère de résistance : Pour les matériaux traités aux liants hydrauliques, le module d'élasticité et la résistance en traction sont mesurés grâce à l'essai de traction. Ces valeurs sont ensuite reportées sur le diagramme de classification afin d'évaluer la stabilité du matériau. La norme française (NF P98 113) a cité les 6 classes de S0 à S5 (Fig 17). Elle a également recommandé que les matériaux de classe inférieure à S2 ne soient pas utilisables en couche d'assise de chaussée.

En général, la classification des matériaux est effectuée en raison de la valeur de la résistance en traction à 360 jours. Si la période ne permet pas de mesurer la

résistance en traction à 360 jours et le module d'élasticité, on peut obtenir la résistance en traction et le module d'élasticité à 28 jours ou 90 jours.

La résistance en traction et le module d'élasticité à 360 jours sont déterminés à partir des équations empiriques suivantes, sachant que ces équations sont indiqués dans la norme française (NF P98-114-1). Ces derniers sont choisis en fonction de la nature du liant utilisé.

$$\frac{R_{t28 \text{ jours}}}{R_{t360 \text{ jours}}} = 0.60 ; \quad \frac{E_{t28 \text{ jours}}}{E_{t360 \text{ jours}}} = 0.65 \quad (\text{Eq 1})$$

$$\frac{R_{t90 \text{ jours}}}{R_{t360 \text{ jours}}} = 0.70 ; \quad \frac{E_{t90 \text{ jours}}}{E_{t360 \text{ jours}}} = 0.75 \quad (\text{Eq 2})$$

Critère d'aptitude des liants au traitement : L'essai d'aptitude au traitement, décrit dans la norme française (NF P94-100), Consiste à la détermination du gonflement volumique (Gv) et de la résistance à la traction (Rtb) du sol traité au liants hydrauliques qui doit être mesuré après 7 jours de cure à une température de 20°C sur des échantillons immergés dans une eau thermo statée. Dans le cas douteux, la technique de traitement proposée peut être justifiée à l'aide d'autres caractéristiques du chantier. Dans le cas inadapté, la solution choisie de traitement ne peut être appliquée. Le tableau indique les valeurs seuils retenues pour le choix des matériaux en structure routière en suivant ce critère.

Tableau 6 : Critère d'aptitude au traitement pour la classification des matériaux traités aux liants hydrauliques (NF P94-100)

Type de traitement	Aptitude du matériau au traitement	Paramètre considéré		
		Gonflement volumique Gv(%)		Résistance à la traction Rtb (MPa)
Traitement au liant hydraulique éventuellement associé à la chaux	Adapté	$Gv \leq 5$	Ou	$Rtb \geq 0,2$
	Douteux	$5 \leq Gv \leq 10$	Ou	$0,1 \leq Rtb \leq 0,2$
	Inadapté	$Gv \geq 10$	Ou	$Rtb \leq 0,1$
Traitement à la chaux seule	Adapté	$Gv \leq 5$	Paramètre non considéré du fait de la lenteur de la prise pouzzolanique	
	Douteux	$5 \leq Gv \leq 10$		
	Inadapté	$Gv \geq 10$		

Le tableau 6 résume les différents essais que nous venons de présenter les critères de jugement pour l'utilisation d'un matériau traité en couche de structure routière.

Tableau7 : récapitulatif des critères de jugement pour l'utilisation d'un matériau traité en couche de chaussée

Propriété considérée	Grandeur caractéristique	Exigence ou critère de jugement
Aptitude au traitement Gonflement	Gonflement volumique Gv d'éprouvettes immergées pendant 7 jours dans de l'eau à 40°C	$Gv \leq 5\%$: adapté $5\% \leq Gv \leq 10\%$: douteux $Gv \leq 10\%$: inadapté
Aptitude au traitement : Performance mécanique	Résistance en traction brésilienne Rtb d'éprouvettes immergées pendant 7 jours dans de l'eau à 40°C	$Rtb \geq 0,2 \text{ MPa}$: adapté $0,2 \text{ MPa} \geq Rtb \geq 0,1 \text{ MPa}$: douteux $Rtb \leq 0,1 \text{ MPa}$: inadapté
Portance et durabilité	Poinçonnement immédiat (IPI) et après 4j d'immersion (ICBR) sur une éprouvette compactée dans un moule CBR	$ICBR / IP \geq 1$
Gonflement de la couche traitée	Mesure du gonflement vertical lors de l'immersion pendant 4 jours de l'essai CBR	Comparatif entre les différents liants
Cinétique de prise	Evolution de la résistance en compression Rc jusqu'à 90 jours de maturation	Comparatif entre les différents liants
Age autorisant la circulation sur la couche traitée	Résistance en compression Rc	La couche de forme peut être circulée dès que $Rc \geq 1 \text{ Mpa}$
Performances Mécaniques	Résistance en traction Rt (estimée à partir de la résistance en traction brésilienne Rtb) et module élastique E à 28 et 90 jours	Le couple (Rt, E) conduit au minimum à un matériau de classe mécanique 5

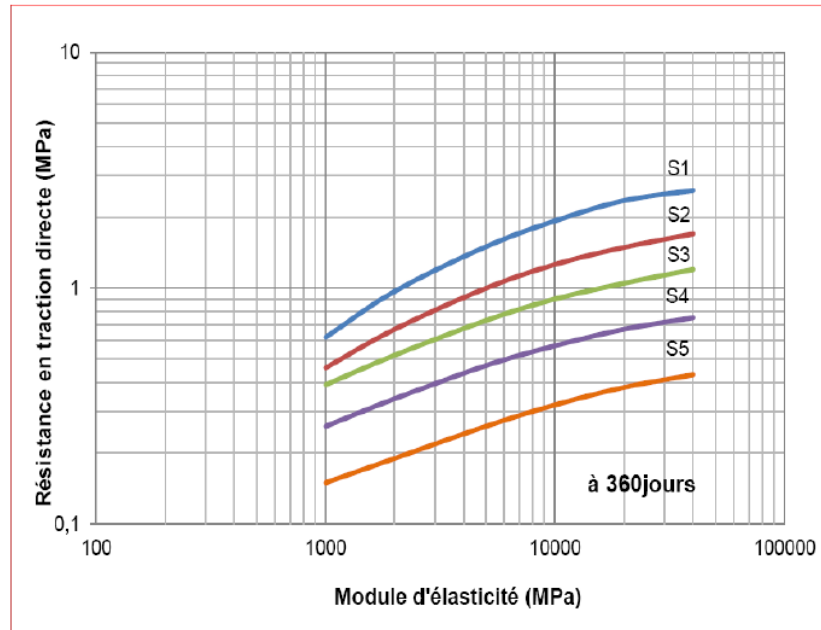


Fig 17 : Classification des matériaux traités aux liants hydrauliques (NF98 113)

1 .7 Traitement des sédiments de dragage par des liants hydrauliques

Le traitement consiste à mélanger les sédiments avec des liants hydrauliques.

Les liants hydrauliques sont des poudres fines, constituées de sels minéraux anhydres réactifs, qui se transforment en présence d'eau en un matériau compact, véritable roche artificielle (AFNOR, 1994 b). L'ajout de liants hydrauliques, dans un sol ou un sédiment, va donc modifier les propriétés minérales, physiques et chimiques du matériau de base. Le matériau résultant acquerra ainsi une cohésion permanente et des performances mécaniques accrues. Plusieurs liants hydrauliques existent et sont couramment employés tels que les ciments, les chaux hydrauliques, les cendres volantes, les laitiers de haut-fourneau, les fumées de silice, ou encore les schistes calcinés (AFNOR, 1994 b).

Les liants hydrauliques utilisés dans ce mémoire de fin d'étude en vue de traiter les sédiments sont le ciment et la chaux. A cet effet nous nous focaliserons dans cette recherche bibliographique sur ces deux liants.

1 .7.1 Traitement au ciment

Le ciment, bien connu pour sa grande capacité d'agglomération des particules inertes, est essentiel dans le domaine du Génie Civil. Il est aussi utilisé dans les formulations de matériaux traités en géotechnique routière.

Le constituant principal de ce liant hydraulique est le clinker. Celui-ci est obtenu à partir de la cuisson à haute température d'un mélange de calcaire et d'argile en proportion 80/20 (Deschamps et al., 2006). Le mélange est introduit en amont d'un four rotatif, dans lequel il progresse lentement par gravité.

Une fois que le clinker est refroidi, les cimentiers ajoutent généralement 3 à 5 % de gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, qui agit comme un régulateur de prise, pour obtenir du ciment Portland (Deschamps et al., 2006). En l'absence de gypse, la réaction d'hydratation des composés du clinker serait trop brutale et entraînerait une fausse prise du ciment.

L'hydratation du ciment peut se dérouler, si la quantité d'eau est suffisante (Moszkowicz et Barna, 2001) : « l'hydratation s'opère par dissolution des phases solides suivie d'une précipitation des hydrates qui conduit à un durcissement de la pâte de ciment et à la constitution d'une structure solide poreuse ».

Le ciment le plus couramment utilisé dans le secteur du BTP est le ciment Portland classique. Cependant, il en existe plusieurs types avec des propriétés particulières différentes.

Le ciment Portland artificiel (CPA), que l'on nomme CEM I, issu d'un mélange de calcaire et d'argile est constitué principalement de 50 à 70 % de silicate tricalcique (3CaO SiO_2 ou C_3S), de 10 à 25 % de silicate bicalcique (2CaO SiO_2 ou C_2S), de 5 à 15 % d'aluminate tricalcique ($3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$ ou C_3A), de 5 à 10 % d'alumino ferrite tétracalcique ($4\text{CaO Al}_2\text{O}_3 \text{Fe}_2\text{O}_3$ ou C_4AF). On trouve aussi, en très faibles quantités de la chaux libre (CaO) et des sulfates de sodium et de potassium ($\text{Na}_2 \text{SO}_4$ et K_2SO_4), (Moszkowicz et Barna, 2000). Plus il y a de C_3S , plus les résistances mécaniques sont bonnes, et moins il y a de C_3A , plus le ciment résistera aux eaux agressives (Venuat, 1989).

Les ciments couramment employés sont subdivisés en cinq types principaux en fonction de la nature des constituants qui entrent dans leur composition. La dénomination des ciments (CEM) est donc complétée par un chiffre romain : I, II, III, IV ou V indiquant le type de ciment.

Pour chaque type de ciment, la proportion des constituants peut être précisée. La teneur en clinker est indiquée par une lettre A, B ou C et les constituants, autres que le clinker, sont indiqués par la lettre L pour le calcaire, S pour le laitier de haut fourneau, D pour la fumée de silice, V pour les cendres volantes siliceuses, W pour les cendres volantes calciques, Z pour les pouzzolanes et T pour les schistes calcinés (voir tableau 8).

Les ciments sont également répartis en 3 classes de résistance. La résistance d'un ciment est la résistance mécanique à la compression mesurée à 28 jours, conformément à la norme NFEN 196-I.

Trois classes de résistance sont couvertes : 32.5, 42.5 et 52.5. Chacune de ces classes peut également être codée par une lettre R ou N. En effet, si le ciment présente une résistance au jeune âge (2 ou 7 jours) plus élevée que la classe normale correspondante (N) alors la lettre N sera remplacée par la lettre R (voir tableau 9).

Quand la poudre de ciment Portland est en contact avec l'eau, l'aluminate tricalcique (C_3A) réagit en premier, se dissout et se recristallise. Vient ensuite la réaction d'hydrolyse, de l'alite-Silicate tricalcique (C_3S) qui forme autour des grains une pellicule de gel et met en même temps des ions Ca^{2+} en solution.

L'hydrolyse et la recristallisation de (C_3A) sont rapides. Cette activité est si grande qu'il faut la retarder car elle conduirait à des prises trop rapides et rendrait le liant inutilisable sur le chantier.

Tableau 8 : Désignation des différents types de ciment en fonction de leur composition dans la norme NF P 15-301, (1994)

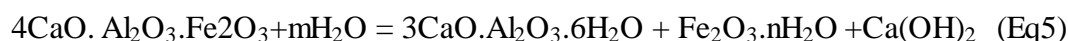
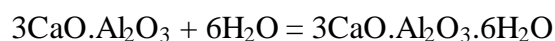
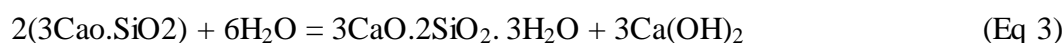
	Cim-Port-Land	Ciment portland cimpos		Ciment de haut fourneau			Ciment pozzolanique		Ciment au laitier et au oendres	
	CPJ-CEM I	CPJ-CEM II/A	CPJ-CEM II/B	CHF-CEM III/A	CHF-CEM III/B	CLK-CEM III/C	CPZ-CEM IV/A	CPZ-CEM IV/B	CLC-CEM V /A	CLC-CEM V /B
Clinker (K)	/95%	/80% ≤94%	/65% ≤79%	/35% ≤64%	/20% ≤34%	/5% ≤19%	/65% ≤90%	/45% ≤64%	/40% ≤64%	/20% ≤39%
Laitier (S)	*	6%≤	21%	/36% ≤65%	/66% ≤80%	/81% ≤95%	*	*	/18%≤30%	/31% ≤50%
Pozzolanes (Z)	*	Total	Total	*	*	*	10%≤ total	38%≤ total	18%≤ Total	31%≤ Total
Cendre Siliceuse (V)	*	≤20% (Fumée	≤35% (fumée	*	*	*	≤35% (fumée ≤10%)	≤55% (fumée ≤10%)	≤30%	≤50%
Fumée de Silice (D)	*	de	De	*	*	*			*	*
Cendres Calciques (W)	*	silice	silice	*	*	*	*	*	*	*
Schistes (T)	*	≤10%)	≤10%)	*	*	*	*	*	*	*
Calcaires (L)	*			*	*	*	*	*	*	*
Fillers (F)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

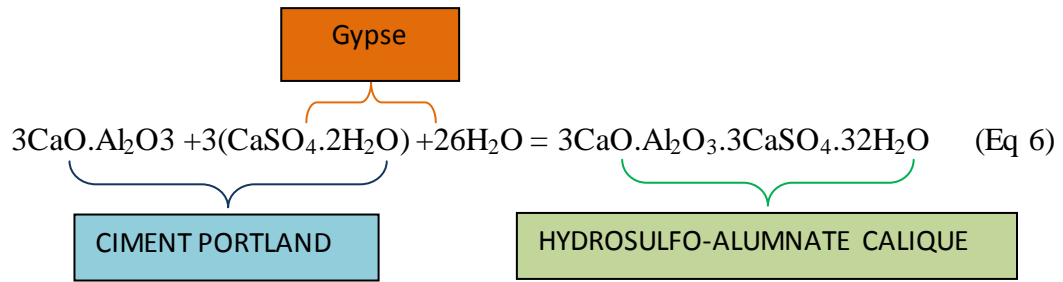
Tableau 9 : Spécification et valeurs garanties en fonction de la classe

Classe	Résistance à la compression(MPa) EN 196-1				Retrait à 28 jours	Début de prise	stabilité
	Au jeune âge		à 28 jours		P 15- 433	EN 196-3	EN 196-36
	2 jours	7 jours	mini	maxi	(µm/m)	(min)	(min)
32.5		(17.5)	/32.5(30)	≤52.5	≤800	/90	≤10
32.5 R	/13.5 (12)	/	/32.5 (30)	≤52.5	≤1000	/90	≤10
42.5	/12.5 (10)		/42.5 (40)	≤62.5	≤1000	/60	≤10
42.5 R	/20 (18)		/42.5 (40)	≤62.5	≤1000	/60	≤10
52.5	/20 (18)		/52.5 (50)			/60	≤10
52.5 R	/30 (28)		/52.5 (50)			/60	≤10

Grains une pellicule de gel et met en même temps des ions Ca^{2+} en solution. L'hydrolyse et la recristallisation de (C_3A) sont rapides. Cette activité est si grande qu'il faut la retarder car elle conduirait à des prises trop rapides et rendrait le liant inutilisable sur le chantier.

Quelques réactions chimiques





L'hydrolyse et la recristallisation de (C₃A) sont rapides. Cette activité est si grande qu'il faut la retarder car elle conduirait à des prises trop rapides et rendrait le liant inutilisable sur le chantier.

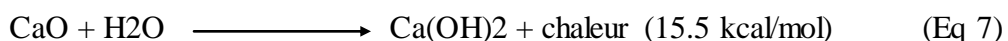
L'action du ciment sur le sol peut être diminuée ou annulée par la présence de certains composés dans le sol, tels que les sulfates et les nitrates (Olivier et al., 2008). La présence de matières organiques provoque une mauvaise liaison entre la matrice cimentaire et les particules de sol (Kribi, 2005).

1.7.2 Traitement à la chaux

La chaux naturelle est le résultat de la cuisson d'une roche calcaire à haute température (entre 800 et 1000 °C). L'utilisation de chaux dans les sols permet une calci-structuration du sol. Cela permet d'obtenir un assèchement du matériau, une floculation des argiles, et une amélioration de la portance du matériau, (Lelong, 2003). A la suite du contact de ces constituants avec l'eau, une réaction d'hydratation commence et permet la formation d'une matrice cimentaire et, d'un solide résistant. Elle sert aussi à modifier les caractéristiques du sol, ainsi elle agit pour solubiliser la silice et l'alumine contenues dans l'argile et former un silicate et aluminat de calcium. Le liant ainsi composé agglomère les composants du sol et augmente sa dureté.

En travaux publics, on utilise la chaux en stabilisation des sols et plus particulièrement dans le traitement des sols fins ayant des teneurs en argile non négligeables c'est-à-dire des sols argileux et limoneux. On constate une modification rapide des propriétés géotechniques, une floculation des argiles en quelques heures donnant au sol une structure granuleuse, stable et non collante.

Au contact de l'eau du sol, la chaux vive (CaO) avidement en eau va s'hydrater pour s'éteindre en formant de la portlandite (Ca(OH)₂), ce qui entraîne une consommation d'eau importante ainsi qu'un fort dégagement de chaleur.



L'évaporation favorisée par la réaction d'hydratation fortement exothermique a pour conséquence l'assèchement des sols fins argileux très imprégnés d'eau. La diminution totale de la teneur en eau peut être estimée à environ 1 % (en valeur absolue) par pourcent de chaux ajoutée (Cabane, 2004). L'abaissement de la teneur en eau est dû à l'évaporation favorisée par l'exothermicité de la réaction d'hydratation mais aussi à l'hydratation de la chaux vive en portlandite.

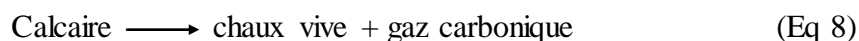
L'ajout de chaux dans un sol ou un sédiment provoque également, en quelques minutes, une modification de la qualité des argiles (floculation des argiles) par échange des cations alcalins (Na^+ , K^+ ...) avec des cations Ca^{2+} apportés par la chaux. Minéralogiquement, ce changement a pour conséquence la formation d'hydrates tels que les silicates de calcium hydratés (CSH) ou encore les aluminates de calcium hydratés (CAH). L'apparition de ces minéraux secondaires résulte des réactions pouzzolanique par combinaison de la chaux et des minéraux argileux.

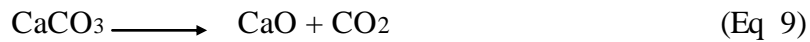
La nature et la composition de la roche calcaire peut conduire à la formation de deux types de chaux naturelles : des chaux dites aériennes constituées de calcaire pur ou des chaux dites hydrauliques constituées de calcaire argileux. Selon la proportion d'argile, entre 8 et 15 %, la chaux sera plus ou moins hydraulique et résistante. Les deux types de chaux auront des utilisations qui leur seront propres. En effet, chacune aura ses avantages et ses contraintes :

- la chaux aérienne est plus onéreuse que la chaux hydraulique. Elle durcit exclusivement à l'air par réaction avec le CO_2 atmosphérique. Sa prise est lente (pendant 9 à 12 mois) et elle reste perméable à la vapeur d'eau ;
- la chaux hydraulique durcit au contact de l'eau et de l'air. Bien que son temps de prise dépende de la proportion d'argile, elle reste plus rapide (2 à 4 semaines) que la chaux aérienne. La chaux hydraulique, présente une bonne perméabilité à la vapeur d'eau et offre une meilleure résistance mécanique.

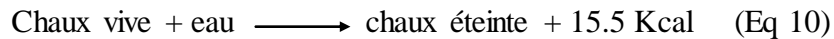
Les chaux utilisées en technique routière sont essentiellement les chaux aériennes. Elles se présentent sous deux formes:

Chaux vive : Constituée principalement d'oxyde de calcium CaO , généralement à plus de 90%. La calcination du calcaire (carbonate de calcium) entraîne la formation de chaux vive (oxyde de calcium) et de gaz carbonique (dioxyde carbonique).

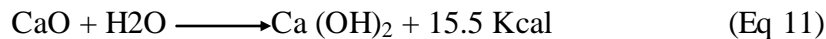




Chaux éteinte : Contient essentiellement de l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Elle est obtenue par extinction de la chaux vive selon la réaction d'hydratation suivante :



Au contact de l'eau, la chaux vive s'hydrate pour donner des chaux éteintes selon la réaction :



Cette réaction permet d'abaisser significativement la teneur en eau des sols, l'abaissement total de la teneur en eau est approximativement de 1% par pour cent de chaux vive introduite (GTS 2000).

La chaux vive ajoutée dans le sol a une réaction avec l'eau naturelle contenue dans le sol. Cette réaction d'échange cationique influence les limites d'Atterberg, (cabane, 2004), la limite de plasticité W_p augmente et la teneur en eau dans le sol diminue traité à la chaux augmente. Le changement d'indice de plasticité I_p est observé. La chaux peut donc modifier les propriétés géotechniques.

A long terme ; la chaux intervient pour démarrer une réaction pouzzolanique. Cette réaction se traduit par la formation de composés cristallins, à savoir des silicates et des aluminates de calcium hydratés à partir des éléments contenus dans l'argile. Cette cristallisation se produit pendant un temps assez long.

Dans le domaine routier, le tableau résume les spécifications de la chaux utilisée selon la norme française (NF P 98-101).

Plusieurs études effectuées montrent que les métaux lourds retardent l'hydratation du ciment Portland. On peut citer exemple :

Zhibo (ZHIBO 2008) et **Colin (COLIN. 2003)**, ont traité des sédiments fins avec du ciment et de la chaux. Les résultats montrent que les performances mécaniques évoluent proportionnellement avec augmentation du dosage du ciment.

(Bahar et al., 2004), ont traité un sol de la région de Tizi-Ouzou (Est d'Alger) avec du ciment. Ils ont constaté qu'avec l'augmentation du ciment, la résistance en compression simple des échantillons augmente. Ils ont lié ce phénomène au remplissage des pores par les produits cimentaires qui lient les particules du sol. Ils ont également conclu que la teneur en ciment a un effet sur la perméabilité des échantillons.

(Benaissa, 2017), a traité des sédiments fins issus du dragage du barrage Fergoug (willaya de Mascara) au ciment et à la chaux. Elle a démontré l'influence d'ajout de matériau granulaire et de liants hydrauliques en tant que correcteur à la fois granulométrique et mécanique afin d'améliorer les caractéristiques optimales de densification et de portance ainsi que leurs classes de résistances mécaniques.

1 .7.3 Effet de la matière organique sur le traitement aux deux liants hydrauliques

Dans le cas de la stabilisation des sols à la chaux, les matières organiques provoquent :

- une perturbation de l'action initiale de la chaux sur les argiles, c'est à dire la floculation.
- une inhibition de la réaction pouzzolanique.

Dans le cas de la stabilisation des sols au ciment, les matières organiques provoquent :

- un retard de la prise qui se traduit par une interférence entre les substances et les réactions chimiques se déroulant au cours de l'hydratation des ciments.
- une inhibition de la prise qui ne développe aucun durcissement du ciment.

Tableau 10:Spécification de la chaux à usage routier (NF P 98-101)

(Dehar, 2007)

Chaux vive	Chaux éteinte
Critères granulométriques	
Classe granulométriques 0-2mm Passant au tamis de 200µm 80% Passant au tamis de 80µm >50%	Passant au tamis de 80µm > 90%
Critères chimiques et réactivité	
Teneur en eau libre >80% Teneur en MgO < 8% Test de réactivité à l'eau : Température finale >60C° obtenue en moins de 25mn	Teneur en eau libre >50% Teneur en MgO < 6%
	Teneur en eau libre <2%

1 .7.4 Travaux de recherche antérieurs

La valorisation des sédiments figure parmi les recommandations dans de nombreuses études effectuées sur le devenir des sédiments dragués.

La valorisation, à chaque fois qu'elle est possible, confère aux produits de dragage une valeur incontestable une ample étude des travaux sur la valorisation a été détaillé dans la thèse de (ThanhBinh Nguyen, 2008).

Il y a 2 grands domaines possibles d'utilisation des sédiments : l'agriculture et le Génie Civil.

Dans le premier cas, ce sont les propriétés fertilisantes des sédiments que l'on cherche à exploiter en pratiquant l'épandage sur les sols cultivés. Dans le deuxième cas Il existe de nombreuses voies de valorisation: matériau de remplissage, de remblaiement, couche d'assise de chaussées, béton, brique. L'incorporation dans les produits de terre cuite et dans la céramique rouge est de nos jours une solution environnementale très prometteuse pour répondre au problème du devenir d'une grande variété de déchets solides.

En agriculture des quantités considérables de sédiments peuvent être exploitées directement. Des études en Algérie ont mis en évidence les possibilités d'utilisation de la vase du barrage Bouhanifia comme fertilisant (Labioud, 2000). Des sédiments extraits du barrage Bouhanifia ont été amendés à des sols salés des monts des Beni Chougrane (willaya de Mascara), puis à des sols sableux de Tighenif. La plante utilisée est du Ray-grass, la substitution de ces deux sols par des sédiments de dragage a donné des résultats satisfaisant (Labioud, 2000). Dans le domaine du bâtiment : les sédiments de dragage du barrage a aussi été utilisé pour la confection de la brique (Labioud, 2004), (Hamer et al., 2002), (Samara, 2007). L'exploitation de la vase comme liant hydraulique a offert une voie de valorisation concrète (Semcha, 2006). Les sédiments ont aussi été utilisés dans la composition des mortiers (Kaziaoual, 2011).

Les sédiments fins du barrage cheurffas (willaya de Mascara) ont été mélangés à différents pourcentage de Bentonite afin de confectionner une barrière étanche dans le but de limiter l'étendue de la Sebkhha d'Oran vers l'aéroport Ahmed Ben Bella (Aloui-Labioud, 2014).

En géotechnique routière: L'intérêt d'envisager des voies de valorisation réside d'abord dans la demande importante en matières premières. Le large éventail de technique et de qualité acceptables pour les matières premières dans le secteur des travaux publics permet à un sous-produit de trouver plus facilement un réemploi. Plusieurs études ont été réalisées dans le domaine de valorisation (Colin, 2000) (Abriak, 2007 : Mekerta , et al., 2009 : Anger, 2012 : Benaissa, 2017)...etc.

(Dermatas, 2003 : Bennert et al., 2001 : Boutouil, 1998) ont montré que les sédiments des ports de New York et New Jersey qui ont traité aux liants hydrauliques essentiellement (la chaux et/ ou le ciment) présentent une possibilité d'utilisation comme matériau de remblaiement qui permet d'améliorer leurs caractéristiques mécaniques et géotechniques. Ils ont constatés que ces améliorations se traduisent par une augmentation de la résistance à la compression et aux cisaillements, ainsi une augmentation des indices portants immédiats ou indices CBR et provoquent aussi une réduction de la plasticité par floculation. (Boubaker et Boutouil, 2006) ont effectués des essais de compactage et de compressibilité sur des sédiments fins de dragage afin d'étudier la possibilité de leur valorisation comme remblais. Ils ont démontré que le sédiment non traité présente une masse volumique sèche maximale de $1,30 \text{ g/cm}^3$ et une teneur en eau optimale située à environ 30%. Après traitement, ils ont constaté un déplacement de l'optimum Proctor vers une masse volumique sèche maximale plus faible ($1,11 \text{ g/cm}^3$) et une teneur en eau optimale de l'ordre de 38%. Les valeurs de l'indice portant immédiat obtenues ont confirmé que la valorisation des sédiments de dragage dans la réalisation des travaux type remblais est possible, notamment en France avec les sols de classe A3 qui nécessitent des indices portants immédiats supérieurs à 3 (GTS, 2000).

De façon générale, la résistance mécanique peut être améliorée par ajout d'un correcteur granulométrique comme des sédiments plus grossiers par exemple (Boubaker et Boutouil, 2006).

Bacot et KhamKhoeup, 2002 : ont travaillé sur la stabilisation des sédiments fins dragués dans les milieux estuariens et littoraux. Ces sédiments sont été traités avec un ajout de 6 % de chaux, 6 % de ciment et un mélange chaux-ciment (3 % + 3 %). Ils ont constaté que les résistances mécaniques ultimes du matériau traité à la chaux après maturation des éprouvettes à 60°C sont augmentées d'un facteur 4,4 et le traitement au ciment donne après 28 jours de maturation des résistances

maximales voisines de 0,8 MPa soit 5,9 fois les résistances du matériau non traité. Il est conseillé d'utiliser un traitement à la chaux ou mixte chaux-ciment pour améliorer l'ouvrabilité du matériau et assurer la durabilité des ouvrages. Les résultats obtenus permettent d'envisager l'emploi des sédiments traités dans les chaussées légères et les remblais.

(Colin, 2003 ; Sun, 2005), se sont intéressés à la comparaison de l'incidence d'ajout de sable dans le sédiment traité et conservé en moule hermétique. Ils ont montré la variation de la résistance à la compression pour un sédiment de Seine, traité avec 1% de chaux, 7% de ciment avec ou sans 30% de quartzite (ajout de correcteur). Ils ont remarqué que l'ajout de correcteur de sable fin augmente la valeur de la résistance à la compression.

1 .8 Conclusion

L'envasement des ports constitue un enjeu d'envergure nationale, et un facteur limitant au développement économique.

Le dragage des sédiments est une opération indispensable pour maintenir la sécurité du transport par voie maritime et pour diminuer le risque de pollution de l'écosystème marin. Cette action, malgré son importance ne permet pas une résolution entière du problème. En effet, la gestion des sédiments dragués pose à son tour un problème écologique et économique à cause des grands volumes et de la pollution des sédiments.

Le traitement et la valorisation des sédiments sont de nouvelles alternatives dans le but de rentabiliser les frais du dragage et éliminer les risques de la migration des polluants vers l'environnement.

En génie civil les travaux de recherche sur la valorisation étaient orientés : «matériaux routiers et matériaux de construction », les résultats obtenus sont très encourageants à titre expérimental.

La consommation importante et l'exploitation des matériaux de nature très variée dans le monde et particulièrement en Algérie, dans le domaine routier, nous orientent vers le traitement des sédiments aux liants hydrauliques. On doit noter que, quelques soient les voies de valorisation, le traitement des sédiments est obligatoire et doit satisfaire aux exigences environnementales, économiques et techniques.

Les ajouts les plus couramment utilisés sont le ciment et la chaux. Les sédiments présentent de faibles propriétés mécaniques, mais l'ajout de ciment et de chaux peut améliorer les performances mécaniques pour une application dans les travaux, grâce à la réaction pouzzolanique et la réaction d'hydratation.

Dans un contexte de développement durable, la valorisation des sédiments reste pour l'instant à explorer au stade de la recherche. Néanmoins avant toute proposition de filière de valorisation, une bonne connaissance de l'origine et la composition minéralogique, chimique, granulaire...etc. s'avèrent être primordial.

Chapitre 2

Caractérisation des sédiments de dragage du port de Djen Djen

2. Caractérisation des sédiments de dragage du port de Djen Djen

2.1 Introduction

La caractérisation s'inscrit dans une démarche de gestion globale des sédiments de dragage qui nécessite la connaissance des sédiments, en quelque sorte leur fiche d'identité (Levacher et al., 2011), ainsi avant toute utilisation les sédiments devront être caractérisés suivant la norme AFNOR, habituellement utilisés pour caractériser les sédiments.

Les sédiments sont des matériaux très hétérogènes constitués par la réunion de plusieurs composants naturels et anthropiques.

Le présent chapitre est consacré à la description des protocoles expérimentaux des différents essais et analyses réalisés pour caractériser les sédiments du port de Djen Djen. Les essais sont réalisés conformément aux normes européennes et françaises qui sont adoptées en Algérie. Ces essais ont été réalisés au laboratoire du département de Génie Civil de l'université de Jijel, puis ont été complétés au laboratoire des travaux publics Est (LTPE). La méthodologie adoptée dans cette étude, consiste à déterminer, en premier lieu, les propriétés physiques des sédiments. En deuxième étape, les propriétés géotechniques ont été caractérisées. La description des protocoles expérimentaux est présentée dans le même ordre.

Un certain nombre d'essais d'identification ont été réalisés sur les sédiments non contaminés prélevés du dépôt terrestre dans le port de Djen Djen permettant de classer nos sédiments selon la norme NF P11-300 (Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières) et le GTR 2000 (Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme).

Dans ce chapitre, les propriétés physiques et géotechniques mesurées sont en relation directe avec le secteur de valorisation envisagé pour ces matériaux. Ainsi, dans le domaine des travaux routiers, la détermination de la teneur en eau, la distribution granulométrique, la valeur au bleu méthylène (VBS), les limites d'Atterberg et l'équivalent de sable, le compactage et l'indice proctor

immédiat constituent un préalable. Au laboratoire LTPE de Constantine, nous avons pu déterminer les carbonates et les sulfates, malheureusement faute de moyen nous n'avons pu mesurer le taux de matières organiques.

La classification et la caractérisation géotechnique des sédiments marins prélevés du port de Djen Djen, va nous permettre une bonne compréhension et une analyse appropriés des résultats en vue d'une valorisation en géotechnique routière.

Ce chapitre s'avère être primordiale, en effet, la connaissance préalable du produit est nécessaire pour envisager une valorisation adaptée.

2.2 Caractérisation chimique

L'analyse chimique des sédiments de dragage du port de Djen Djen a été effectuée par Laboratoire LTPE de Constantine en aout 2020.

Les mesures ont portées sur la teneur en carbonate de calcium et des sulfates

➤ La teneur en carbonate de calcium CaCO_3 (NF P 94-048)

En raison de sa faible solubilité, le carbonate de calcium présent dans l'environnement, se dépose sur les sédiments. C'est un composant naturel des sols qui n'est pas toxique. Sa décomposition libère les ions de calcium qui est un composant essentiel pour les organismes vivants et les ions de carbonates qui feront partie du cycle du carbone. Selon la teneur en CaCO_3 d'un sol, son comportement évolue de celui d'une argile à celui d'une roche (tableau 11). Ainsi, la présence de CaCO_3 dans les sédiments affecte leur sensibilité à l'eau (Belhadj, 2013).

Tableau 11: Classification des matériaux en fonction du pourcentage massique en carbonate (NF P 94-048).

Teneur en carbonate(%)	Classification	Exemple
< 10	Non calcaire	Argile, sable siliceux
10 à 29	Peu calcaire	Argile marneuse
30 à 69	Moyennement calcaire	Marne
70 à 89	Calcaire	Calcaire marneux
> 90	Fortement calcaire	Calcaire

La teneur en carbonate est déterminée par la méthode du calcimètre conformément à la norme NF P 94-048. Le principe de l'essai consiste à faire réagir un échantillon avec de l'acide chlorhydrique en excès. Le carbonate de calcium CaCO_3 , s'il existe dans l'échantillon, réagit suivant la réaction chimique :



Ainsi, la teneur en carbonate est déduite à partir du volume de dioxyde de carbone CO_2 . Elle est calculée à partir de l'expression :

$$\text{CaCO}_3 \% = \frac{1.2 \times V_b \times p}{m \times (\theta_b + 273)} \quad (\text{Eq 13})$$

Tels que V_b : le volume du gaz dégagé lors de l'essai exprimé en cm^3 ;

p : la pression atmosphérique de la salle d'essai en kPa, $p = 100$ kPa ;

m : la masse de l'échantillon en g, $m = 1$ g ;

θ_b : la température de la salle en degrés Celsius, $\theta_b = 20^\circ\text{C}$.

Avec une teneur en carbonates de 25.87 %, les sédiments de dragage du port de Djen Djen sont moyennement calcaires.

➤ Teneur en sulfates

Les sulfates provenant principalement de la dissolution du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et de l'oxydation des sulfures dans les déchets miniers et industriels affectent considérablement le comportement des sols et des sédiments.

Les sédiments de dragage du port de Djen Djen selon les essais effectués au LTPE ne contiennent que des traces de sulfates. Ce résultat est encourageant en vue d'un traitement de ces sédiments aux liants hydrauliques, puisque les sols contenant plus que 1% de sulfate ne peuvent être traités à l'aide d'un liant (Baryla et al., 2000) Le seuil de la teneur en sulfate d'un sol à traiter avec de la chaux est compris entre 0,03 et 1% (Perrin, 1992 ; Wild et al., 1999). Pour un traitement avec du ciment, le seuil varie entre 0,09% et 1% (Dunlap et al., 1975 ; DePuy, 1994).

2.3 Caractérisation physique

Les sédiments non contaminés ont été prélevés le premier Mars 2020 manuellement à partir d'un dépôt terrestre mis en place suite au dragage effectué en 2019.



Fig 18 : Dépôt terrestre au port de Djen Djen

Le prélèvement a été effectué en plusieurs points. Chaque échantillon a été soigneusement conservé dans un sac en plastique.



Fig 19 : Prélèvement d'échantillons du dépôt terrestre du port de Djen Djen. Avant de commencer les essais les échantillons ont été homogénéisée manuellement afin d'avoir un seul échantillon représentatif.

Un certain nombre d'essais d'identification ont été réalisé sur cet échantillon. Les propriétés physiques, et les normes correspondant à ces essais sont récapitulées dans le tableau 12.

Tableau 12 : Présentation des essais géotechniques effectués sur les sédiments du port de Djen Djen.

Essais d'identification	Normes
Teneur en eau initiale	NF P 94-050
Granulométrie	NF P94-056 et NF P94-057
Masse volumique absolue et apparente	(NF P 94-054) et (NF P94-061-3)
Limite d'Atterberg	(NF P94-051)
Equivalent de sable	NF EN 933-8/2012
Essai au bleu de méthylène	NF P 94 068

2.3.1 Teneur en eau initiale (NF P 94-050)

La mesure de la teneur en eau est un paramètre important et l'un des paramètres fondamentaux. En effet; la détermination de ce paramètre est nécessaire pour évaluer la quantité d'eau à éliminer pour pouvoir réutiliser les sédiments. La teneur en eau des sédiments dépend de leur capacité à absorber et adsorber l'eau et de la méthode de dragage utilisée.

Un dragage mécanique permet d'obtenir une teneur en eau supérieure à 50%. Par contre, l'utilisation d'une drague hydraulique conduit à des sédiments de teneur en eau de l'ordre de 20% (Mulligan et al., 2001).

La teneur en eau définit l'état hydrique du matériau et elle est désignée par ω et exprimée en % par le rapport de la masse sèche et de la masse humide du matériau.

La valeur de la teneur en eau s'obtient alors grâce à la formule 14 :

$$\omega = \frac{\text{masse eau}}{\text{masse sèche}} \times 100 \quad (\text{Eq 14})$$

Avec :

ω : Teneur en eau (en %) .

La mesure de la teneur en eau est évaluée par étuvage à 105°C jusqu'à masse constante en respectant un temps de séchage de 24h selon la norme NF P 94-050.

La teneur en eau des sédiments prélevés du port de Djen Djen (plus précisément du dépôt terrestre) est de l'ordre de 3.64%. Elle est assez faible et donc ce dépôt de sédiment paraît intéressant pour une valorisation.

2.3. 2 Masse volumique absolue et apparent

➤ Masse volumique absolue (NF P 94-054)

La masse volumique absolue d'un échantillon est déterminée selon la norme (NFP94-054). Elle correspond au rapport de la masse du solide sur son volume y compris les vides fermée contenus à l'intérieur des grains. Pour la mesurer on utilise un pycnomètre à liquide.

La masse volumique absolue des sédiments obtenue dans notre cas correspond à la moyenne des mesures effectuées sur trois échantillons de sédiments, elle est de l'ordre **2.9 g/cm³**. Etant donné que la masse volumique absolue ou la masse

volumique des particules solides d'un sol est en généralement comprise entre 2,6 g/cm³ et 2,8 g/cm³. Cette valeur est légèrement supérieure à la limite supérieure.

➤ **Masse volumique apparente (NF P94-061-3)**

La masse volumique apparente est le rapport entre la masse et le volume apparent de sédiments marins après étuvage à 40°C. Le remplissage du récipient de volume 1020,50 cm³ avec les sédiments marins est effectué au moyen d'un entonnoir muni de sa pige.

La masse volumique apparente est de l'ordre de **1.42g/cm³** sur une moyenne de trois essais. Ces valeurs sont inférieures aux ordres de grandeurs conventionnelles du sable (1,7 et 2,0 g/cm³) et des argiles de consistance moyenne (1,6 et 1,8 g/cm³). Ceci peut être dû à la présence de matière organique.

2.3.3 Analyse granulométrique

Le sédiment est une matrice relativement hétérogène constituée d'eau, de matériaux inorganiques et de composés anthropiques (Bonnet, 2000). Généralement le sédiment est décrit par sa composition minéralogique et sa structure.

Dans le secteur des travaux routiers, pour une classification des matériaux selon le « Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme » (GTR, 1992), la distribution granulométrique constitue le premier paramètre d'entrée dans les tables de classification.

L'analyse granulométrique est une caractéristique nécessaire pour la définition du matériau et pour caractériser la distribution des particules d'un sol. Elle permet d'identifier les différentes familles granulométriques (sable, limon, argile) afin de les associer à une texture. Les différentes classes granulométriques sont présentées dans le tableau 13.

Tableau 13 : Classes granulométriques des matériaux (Tran, 2009)

Diamètre	Dénomination
> 20 mm	Cailloux
2 mm à 20 mm	Graviers
63 µm à 2 mm	Sables (grossiers et fins)
2 µm à 63 µm	Limons (ou silt)
< 2	Argiles

L'analyse granulométrique a été réalisée par tamisage sec (NF P94-056, 1992), puis a été complétée par sédimentométrie (NF P94-057) pour la fraction inférieure à 80 μm (voir fig 20).

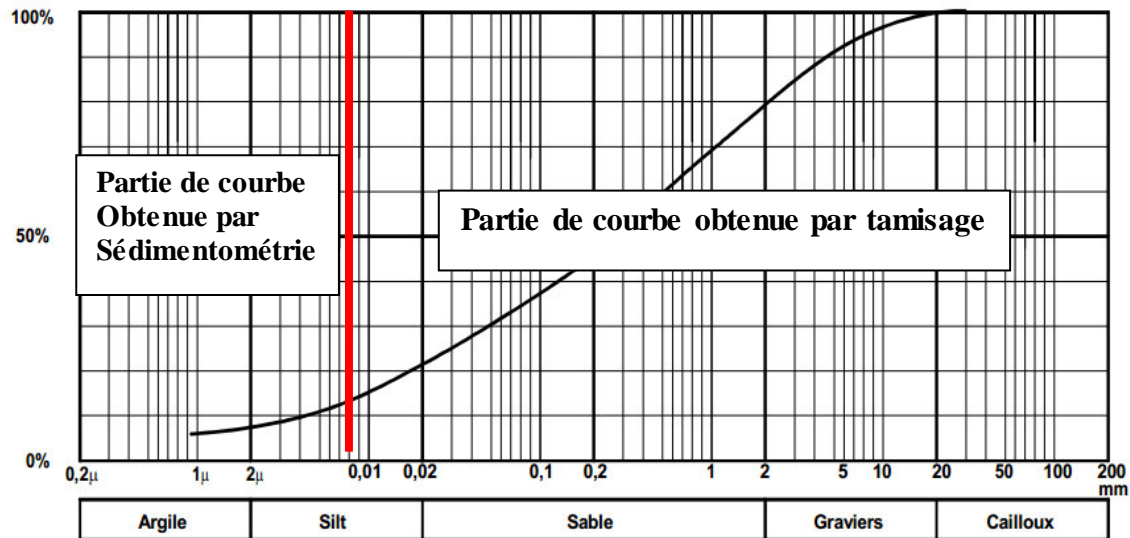


Fig 20: Analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie

Le tamisage pour des particules de dimensions $\geq 80\mu\text{m}$ (0.08mm), l'essai est effectué selon la norme NF P94-056 dans une colonne de tamis de diamètre décroissant. La sédimentométrie (NF P94-057) est basée sur la loi de Stokes qui permet de calculer la vitesse de chute d'un corps dans un fluide en fonction de la grosseur des grains du corps qui tombe, des masses volumiques du fluide et du corps, de la viscosité dynamique du fluide et de l'accélération de la pesanteur (Bel-hadj, I, 2013). La loi de Stokes exprime la relation qui existe entre la vitesse de décantation et le diamètre d'une particule sphérique, elle s'écrit sous la forme:

$$U = \frac{2g\Delta(\rho)r^2}{9\mu} \quad (\text{Eq 15})$$

U : vitesse de décantation de la particule (m/s) ;

r : rayon de la sphère (m) ;

g : accélération (m/s^2) ;

$\Delta(\rho) = dp - df$: différence de la masse volumique entre la particule et le fluide (Kg/m^3) ;

μ : viscosité du fluide (Pa.s).

La courbe granulométrique est le résultat de cette analyse, elle représente le poids des tamisât cumulés à l'échelle arithmétique en fonction du diamètre des particules solides à l'échelle logarithmique. A partir de cette courbe plusieurs indices peuvent être calculés qui décrivent le degré d'étalement et l'uniformité de la courbe granulométrique.

Le coefficient d'uniformité (de Hazen) (C_u):

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (\text{Eq 16})$$

Si $C_u < 2$ la courbe granulométrique est uniforme ;

Si $C_u > 2$ elle est étalée.

Le coefficient de courbure (C_c):

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{60} \times d_{10}} \quad (\text{Eq 17})$$

La courbe granulométrique est bien graduée si C_c est compris entre 1 et 3

d_x : représente le diamètre déduit à partir de la courbe granulométrique, tel que $x\%$ de l'échantillon ont un diamètre inférieur ou égal à d_x , $x=10, 30, 60$.

A partir de la courbe granulométrique nous pouvons obtenir aussi :

Tamisât 80 μ m : Pourcentage en fines du sol. Les fines sont sensibles à l'eau, selon leur proportion, elles vont donc influencer le comportement du sol.

Les Seuils retenus (par le GTR) sont :

> 35% : comportement du sol totalement régi par la fraction fine ;

< 12% : seuil conventionnel pour dire si un sol est pauvre ou riche en fine.

Tamisât 2 mm : distinction entre sols sableux et sols graveleux.

Seuil retenu selon GTR :

> 70% : sol tendance sableuse ;

< 70% : sol tendance graveleuse.

La figure ci-dessous (fig 21) représente la courbe granulométrique des sédiments de dragage du port de Djen Djen.

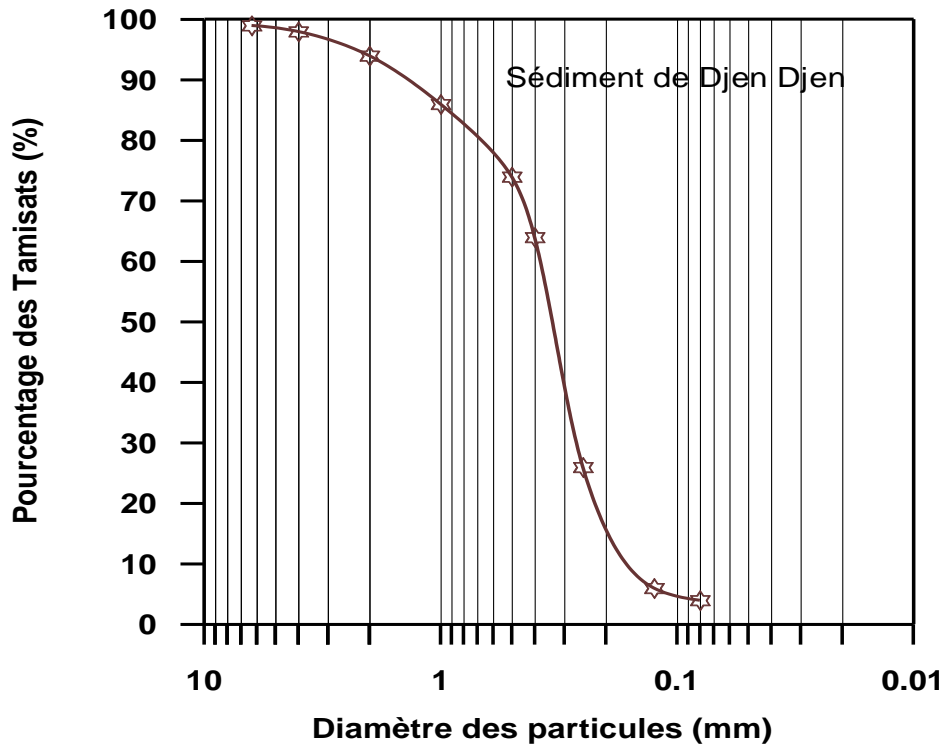


Fig 21 : Courbe granulométrique des sédiments de dragage du port de Djen Djen

L'analyse de la courbe granulométrique des sédiments du port de Djen Djen nous montre une distribution des particules caractérisant une granulométrie fine. Ces sédiments sont composés majoritairement de sable (Grains > 63 μm) avec un pourcentage de 96%, l'argile (Grains < 2 μm) et les limons (2 μm <Grains<63 μm) représentent 3.54%. Ces sédiments sont donc à prédominance sableuse avec une très faible quantité de fines particules.

Le coefficient d'uniformité obtenue c_u est de l'ordre de 2.6, la courbe granulométrique est étalée. Avec un coefficient de courbure c_c de 1.34, la courbe granulométrique est donc bien graduée.

2.3.4 Limites d'Atterberg (NF P 94-051)

Les limites d'Atterberg (limites de liquidité et de plasticité) sont les teneurs en eau pondérales correspondantes à des états particuliers d'un sol.

Ce sont des constantes physiques conventionnelles qui indiquent les seuils entre le passage d'un sol de l'état liquide à l'état plastique pour la limite de liquidité (WL), et le passage d'un sol de l'état plastique à l'état solide pour la limite de plasticité (WP).

- ❖ Limite de liquidité (W_L) : c'est la teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états liquide et plastique.
- ❖ Limite de plasticité (W_P) : c'est la teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre l'état plastique et solide.
- ❖ Indice de plasticité (I_P): c'est le domaine situé entre les états de liquidité et de plasticité. Il est déterminé par la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité : $I_P = W_L - W_P$

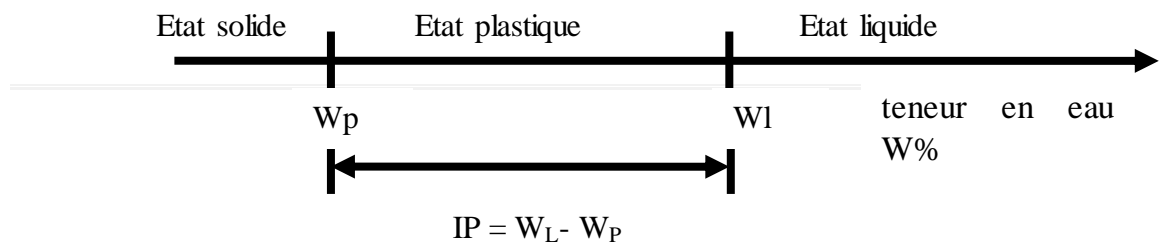


Fig 22: Etat physique des sols.

Avant toute opération de construction routière ; outre la valeur au bleu, les limites d'Atterberg qui s'expriment en pourcentage sont des paramètres indispensables afin d'évaluer l'argilosité des matériaux et de les classer.

La détermination des limites d'Atterberg a été réalisée conformément à la norme NF P94-051. Elle s'effectue en deux phases :

1. La limite de liquidité (W_L)

Cette limite est mesurée au biais de l'appareil de Casagrande selon la norme (NF P 94 051).



Fig 23 : Détermination de la limite de liquidité avec l'appareil de Casagrande

L'essai consiste à déterminer la relation entre la teneur en eau et le nombre de chocs imposés à une coupelle contenant le matériau. Par définition, la limite de liquidité est la teneur en eau qui correspond à la fermeture de la

rainure sur 1 cm de longueur en 25 chocs. L'échantillon doit être à une teneur en eau légèrement supérieure à la limite de liquidité, afin de pouvoir commencer l'essai avec une fermeture du sillon en 15 coups environ.

La limite de liquidité est déterminée à partir de la représentation graphique de la teneur en eau w , mesurée à chaque essai, en fonction du logarithme du nombre de coups correspondant.

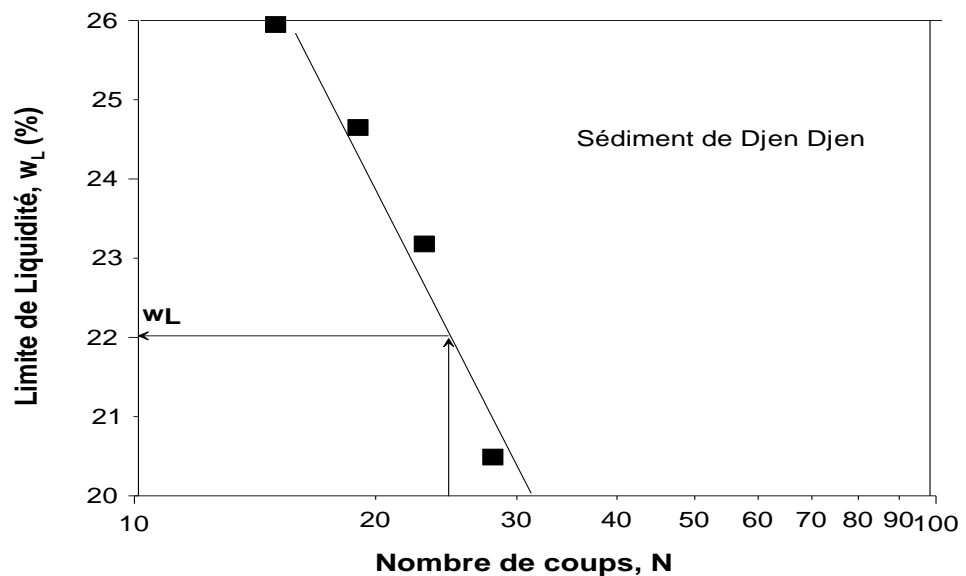


Fig 24 : limite de liquidité des sédiments de dragage du port de Djen Djen

La valeur de la teneur en eau correspondant à 25 chocs de la coupelle obtenue pour les sédiments de dragage du port de Djen Djen est d'environ 22% (voir fig 24).

2. La limite de plasticité (W_p)

Ce paramètre est déterminé par la méthode du rouleau (norme NF P 94 051). Par définition, la limite de plasticité est définie comme la teneur en eau du cylindre qui se brise en 2 ou 3 morceaux au moment où son diamètre atteint 3 mm.

La limite de plasticité pour les sédiments de dragage du port de Djen Djen est négligeable.

3. Indice de plasticité (I_p)

Est un des paramètres indispensable pour identifier un sol, il est exprimé en pourcent et est représenté par la différence entre les deux limites (de liquidité et de plasticité) :

$$I_p = W_L - W_p \quad (\text{Eq 18})$$

L'indice de plasticité indique dans quelle mesure des particules d'argile sont présentes dans un matériau, étant donné qu'elles peuvent avoir un impact négatif sur l'application d'un matériau en construction routière. Ce résultat peut être utilisé pour spécifier les domaines d'application.

L'indice de plasticité non mesurable parce que la limite de plasticité est négligeable (voir annexes).

2.3.5 L'essai au bleu de méthylène (VBS) NF P 94 068

L'essai au bleu de méthylène, dit essai à la tâche est réalisé (NF P 94 068) permet d'apprécier globalement l'activité de la fraction argileuse d'un sol en mesurant la surface interne et externe des grains argileux

Le bleu de méthylène à l'état aqueux est un colorant cationique qui peut être adsorbé sur les surfaces argileuses chargées négativement. Le tableau présenté par Tran donne quelques VBS attribuées aux minéraux argileux.

Tableau 14 : Valeurs au bleu de méthylène attribuées aux minéraux argileux
(Tran, 1981)

minéral	VBS
kaolinite	1
chlorite	3
illite	3.6
montmorillonite	3.1

L'essai consiste à introduire progressivement du bleu de méthylène dans une suspension de matériau maintenue en agitation. On prélève périodiquement, à l'aide d'une baguette de verre, une goutte de la suspension que l'on dépose sur un papier filtre. Dès qu'une auréole bleutée apparaît autour de la tâche, on considère que l'absorption du bleu de méthylène sur les particules d'argiles est terminée. L'excès du bleu se traduit par l'apparition dans cette zone d'une auréole d'un bleu clair. Le test est alors positif.

A partir du volume de bleu de méthylène absorbé et de la quantité de matériau utilisé, la valeur du bleu de méthylène « VBS » est définie par l'équation :

$$VBS = \frac{\text{volume de bleu de méthylène (cm}^3\text{)} \times 0.01}{\text{masse sèche de la prise d'essai (g)}} \times 100 \quad (\text{Eq 19})$$

Plus la quantité de bleu de méthylène adsorbée sera importante, plus l'activité argileuse sera importante, et donc le potentiel de gonflement et la capacité d'échange cationique des sédiments sont élevés.

Tableau 15: Classification des sols d'après Philipponat

La valeur de bleu (cm ³ /g)	Type de sol
$V_B < 0.2$	Sols sableux
$0.2 < V_B < 2.5$	Sols limoneux
$2.5 < V_B < 6$	Sols limoneux argileux
$6 < V_B < 8$	Sols argileux
$V_B > 8$	Sols très argileux

La valeur au bleu de méthylène est un paramètre qui intervient dans la classification du guide des terrassements routiers (GTR, 2000), pour caractériser les sols fins et pour distinguer les différentes familles de sols. Cette classification traduit la relation entre la valeur au bleu et la sensibilité du sol à l'eau. Cette quantité est en fait directement liée à la surface spécifique totale des particules du sol (Sst) (Yukselen et Kaya, 2010).

La surface spécifique (totale) représente la surface externe des particules (surface spécifique externe) et celle de l'espace inter foliaire accessible aux atomes et aux molécules (surface spécifique interne) par unité de volume du matériau. Il s'agit de déterminer toute la surface de chaque particule en considérant la porosité ouverte. La surface spécifique d'un minéral est liée à sa composition minéralogique. Plus le nombre de feuillets est grand, plus la surface spécifique est importante. Elle est en plus affectée par la présence de la matière organique et par la granulométrie du matériau (Yukselen et al., 2010). Les plus grandes valeurs de la surface spécifique caractérisent les

minéraux purs de type Smectite ($800\text{m}^2/\text{g}$), suivie d'illite ($80\text{ m}^2/\text{g}$) puis de chlorite ($80\text{ m}^2/\text{g}$) et enfin la kaolinite ($15\text{ m}^2/\text{g}$).

La surface spécifique peut être calculée par la formule qui a été mise en évidence par Gaillabaud et Cinot(1982) (Benaissa, 2017).

$$S_{st} = 21 V_B (0/2 \mu\text{m}) \quad (\text{Eq 19})$$

Avec une valeur au bleu de méthylène de l'ordre de 0.3%, les sédiments de dragage du port de Djen Djen sont peu ou pas sensible à l'eau, cette valeur est inférieure à la VBS d'une kaolinite (Tran, 1981) (voir tableau 15). Ceci indique la présence d'une fraction argileuse de faible activité électrochimique et de faible potentiel de gonflement. Selon Philipponat les sédiments étudiés sont limoneux. Et selon le « Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme » (GTR,1992), en fonction de la valeur au bleu de méthylène, les sédiments de dragage du port de Djen Djen sont placés dans le

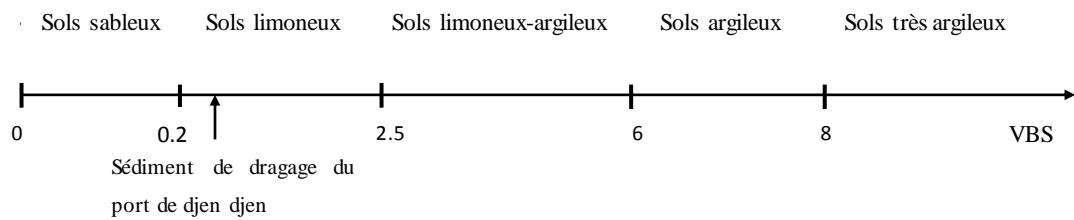


Fig 25: Classification des sédiments de dragage du port de Djen Djen en fonction de VBS

La surface spécifique obtenue pour les sédiments de dragage du port de Djen vaut $6.3\text{ m}^2/\text{g}$. D'après la classification de Holtz et Gibbs (Benaissa, 2017), nos sédiments peuvent être classés suivant leur surface spécifique selon le tableau 17 de Holtz et Gibbs en kaolinite.

Tableau 16: Classification d'après Holtz et Gibbs

Argiles	Surface spécifique (m^2/g)
Montmorillonite $\text{Ca}^{++} \text{Na}^{++}$	300 à 800
Illite	40 à 60
Kaolinite	5 à 20
Élément non argileux	1 à 3

2.3.6 Equivalent de sable (NF EN 933-8/2012)

L'équivalent de sable permet d'apprécier la qualité et la quantité des fines conformément à la norme (NF EN 933-8/2012). C'est un indicateur, utilisé en géotechnique qui caractérise la propreté d'un sable ou d'un grave (voir tableau 17).

L'équivalent de sable « E_S » indique la teneur en éléments fins, d'origine essentiellement argileuse, végétale ou organique à la surface des grains.

Il existe trois méthodes de détermination de l'équivalent sable.

Dans notre cas l'essai a été réalisé par la méthode par piston.

Tableau 17: Classification des matériaux en fonction de l'équivalent de sable

E_S en %	Nature et qualité du sable
$E_S < 60$	sable argileux risque de retrait ou de gonflement, à rejeter pour des bétons de qualité.
$60 \leq E_S < 70$	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour béton de qualité quand on ne craint pas particulièrement de retrait.
$70 \leq E_S < 80$	sable propre à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
$E_S > 80$	sable très propre l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

L'équivalent de sable selon la méthode précitée est le rapport de la hauteur de sable sur la hauteur totale exprimé en % par la formule (20).

$$E_S = \frac{H_2}{H_1} \times 100 \quad (\text{Eq 20})$$

Avec :

H_1 : Hauteur de piston (cm) ;

H_2 : Hauteur des sédiments (cm).



Fig 26 :Éprouvete de sable après 20min



fig 27 : Machine à secouer les éprouvettes d'Es

L'équivalent de sable mesure la propriété « E_s » de la fraction d'un sable inférieure à 2 mm sur un échantillon de 120g. On introduit une solution lavant dans une éprouvette jusqu'au trait puis on ajoute 120g de sol sec. Après 10 minutes, on agite l'éprouvette horizontalement pendant 30 secondes, soit 90 allé/retour. Enfin après avoir lavé avec le tube laveur en rinçant le bouchon et lavant les parois intérieures de l'éprouvette. Laver la masse du sable en y faisant remonter et descendre lentement le tube pour que les fines remontent en surface puis on laisse reposer 20 minutes en évitant toute vibration. Finalement on mesure à vue les hauteurs H_1 et H_2 .

Nous obtenons un équivalent de sable de l'ordre de 77.89, les sédiments de dragage du port de Djen Djen sont un sable propre à faible pourcentage de fines argileuses.

2.4 Caractérisation géotechnique

L'aptitude au compactage des sédiments est évaluée à travers l'essai Proctor normal (norme NF P 94 093). A partir de la relation établie entre la teneur en eau et la densité sèche, les caractéristiques de compactage (la densité sèche et la teneur en eau optimales) sont déterminées. En association avec cet essai, des mesures de poinçonnement sur les éprouvettes compactées sont réalisées afin d'estimer l'indice de portance immédiat (IPI) (norme NF P 94 078). Ce paramètre permet d'évaluer l'aptitude d'un matériau à supporter directement sur sa surface la circulation des engins de chantier.

2 .4.1 Le compactage (NF P 94-093)

Il existe deux types d'énergie de compactage et donc deux types d'essai Proctor : l'essai Proctor Normal et Modifié qui nécessite une énergie plus intense. En construction de remblai en grande masse, on se réfère plutôt à l'essai Proctor Normal ; en couches de chaussée, on se réfère à l'essai Proctor Modifié qui est réalisé avec une énergie de compactage supérieure.

Le principe de cet essai consiste à compacter le matériau à différentes teneurs en eau selon un processus et une énergie donnée. Pour chaque teneur en eau, on mesure la masse volumique humide et on détermine la masse volumique sèche du matériau. Si l'on fait varier la teneur en eau de l'échantillon et que l'on représente graphiquement la variation de $\gamma_d(g/cm^3)$ en fonction de ω (%), on obtient une courbe en cloche qui représente un point haut qu'on appelle « optimum Proctor ».

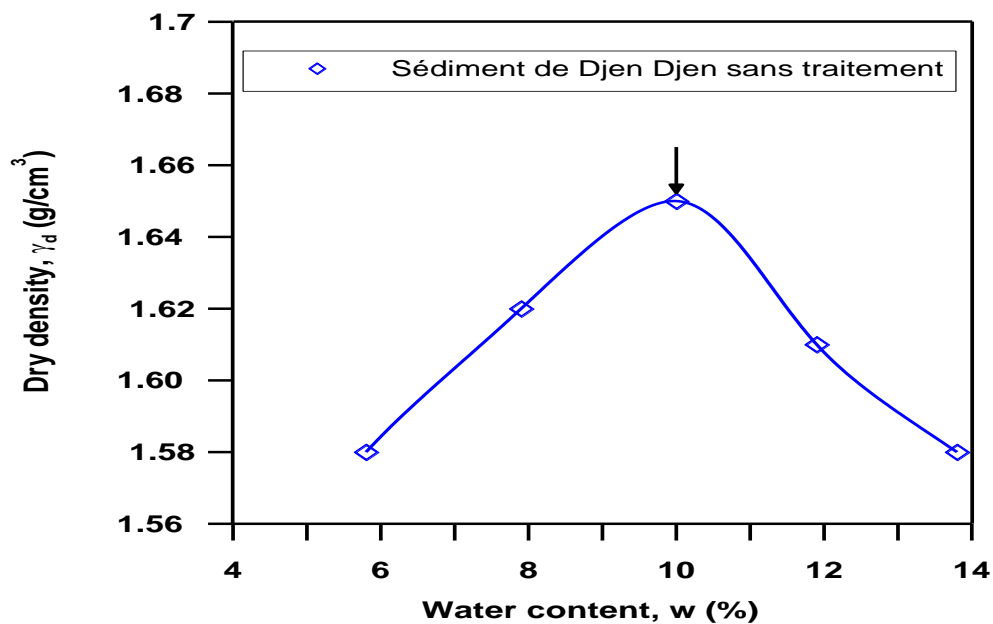


Fig 28: Courbe Proctor des sédiments de dragage du port de Djen Djen

La courbe tel que présenté en (fig 28) représente la courbe Proctor des sédiments de dragage du port de Djen Djen. A partir de cette courbe, on peut ressortir les paramètres fondamentaux de cet essai (paramètres du Proctor), qui sont la teneur en eau optimale qui de l'ordre de 10%, et la densité sèche maximale qui vaut $1.65g/cm^3$.

2.4.2 Indice portant immédiat

L'indice Portant immédiat (IPI) est mesuré à la teneur en eau sur un échantillon préalablement compacté, sans surcharge, à l'énergie de Proctor normal (pour un sol) ou modifié (pour assise de chaussée).

En association avec l'essai Proctor Normale et modifié, des mesures de poinçonnement sur les éprouvettes compactées sont réalisées afin d'estimer l'indice de portance immédiat (IPI) (norme NF P 94 078). Ce paramètre permet d'évaluer l'aptitude d'un matériau à supporter directement sur sa surface la circulation des engins de chantier. Par convention, l'IPI est la plus grande des 2 valeurs suivantes :

$$\text{IPI} = \begin{cases} \frac{(\text{Effort de pénétration à 2.5mm d'enfoncement}) \times 100 \text{ en KN}}{13.35} \\ \frac{(\text{Effort de pénétration à 5mm d'enfoncement}) \times 100 \text{ en KN}}{20} \end{cases}$$

L'essai de poinçonnement est effectué immédiatement après l'essai Proctor. Pour préparer l'échantillon, on retourne le moule CBR, on retire le disque d'espacement (ce qui permet d'obtenir une surface plane) et on remplace l'ensemble sur l'embase. Une fois l'échantillon correctement centré sur le plateau de la presse, le poinçon est mis en contact avec le matériau afin de régler le comparateur à zéro. Ensuite, le plateau de la presse est actionné à une vitesse constante et on relève les forces qui correspondent aux valeurs d'enfoncement de 2,5 mm et 5 mm.



Machine de compactage



Moule CBR



Presse pour la mesure de l'IPI

Fig 29 : Matériel d'essais Proctor

La valeur de l'indice de portance immédiat obtenue est de l'ordre 14 %. Ces résultats ont mis en évidence la difficulté de circulation des engins sur le chantier et qu'un mauvais compactage de ces matériaux est à craindre.

Tableau 18 : Résultats de l'essai Proctor – IPI sur les sédiments bruts

Matériau	W_{opt} (%)	$\gamma_{d_{opt}}$ (g/cm ³)	IPI à W_{opN} (%)
Sédiment de dragage du port Djen Djen	10	1.65	14

2.5 Classification des sédiments de dragage du port dDjen Djen selon le GTR (LCPC-SETRA, 2000)

Les caractéristiques physiques et géotechniques mesurées dans cette étude ont été choisies en fonction d'une valorisation en géotechnique routière. Les résultats obtenus sont synthétisés dans le (Tableau 19).

Tableau 19 : synthèse des caractéristiques des sédiments marins de dragage du port Djen Djen

	Matériau	unité	Sédiments de dragage du port Djen Djen
Paramètre d'identification	Masse volumique apparente	g/cm ³	1.42
	Masse volumique absolue	g/cm ³	2.9
	Valeur au bleu de méthylène VBS	cm ³ /g	0.3
	Limite de liquidité WL	%	22.2
	Limite de plasticité WP	%	0
	Grains <63µm	%	3.6
	Grains >63 µm	%	96.4
	W_{opt}	%	10
	$\gamma_{d_{opt}}$	g/cm ³	1.65
	IPI W_{opN}	%	14

les sédiments prélevés du port de Djen Djen présentent un diamètre maximal inférieur à 50 mm avec une proportion de fine (passant à 80 μm) inférieur à 12 %, 86% du passant à 2mm, la valeur du bleu étant de 0.3. Ainsi du point de vue granulométrique, selon le Guide français pour une classification des matériaux routiers (GTR. 1992, les sédiments prélevés du port de Djen Djen se positionnent dans la classe des sols sableux et graveleux avec fines plus précisément dans la sous classe B₂ (voir fig 30). Cette catégorie rassemble des sables argileux (peu argileux) (voir annexes).

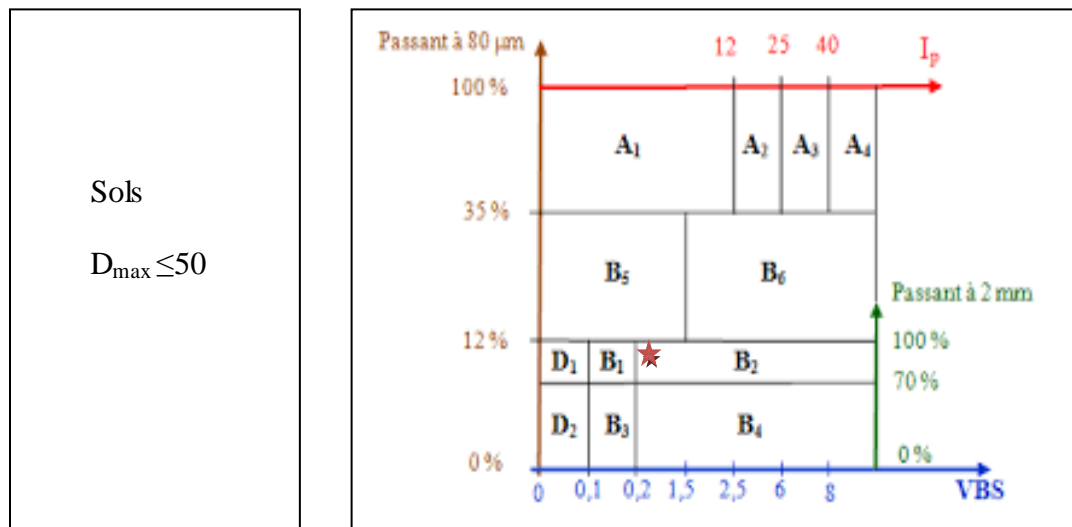


Fig 30 : Classification du sédiment du port djen djen selon la classification du GTR (LCPC-SETRA, 2000)

2.6 Conclusion

Issus de la phase de caractérisation (Tableau 19), les sédiments de dragage du port de Djen Djen se présentent comme des matériaux fins, principalement limoneux. Ils contiennent des limons et de l'argile sous forme de Kaolinite. La granulométrie est étalée. La teneur en eau initiale étant faible, la plasticité négligeable donc faible taux d'argile une valorisation s'avère être une voie intéressante. A cet effet, les sédiments du port Djen Djen ont été caractérisés selon le GTR, les sédiments appartiennent à la classe B (sol sableux et graveleux) et à la sous classe B₂. Vu que l'IPI est faible, ces sédiments peuvent être améliorés par un traitement aux liants hydrauliques, d'autant plus que ces sédiments ne contiennent que des traces de sulfates. Pour être utilisé en couche de fondation, un sol de classe B₂ doit présenter un IPI à l'optimum ≥ 35 (GTR.2000).

Chapitre 3

Valorisation des sédiments du port de Djen Djen

3. Valorisation des sédiments du port de Djen Djen

3.1 Introduction

L'utilisation rationnelle et le développement des matériaux dans le domaine des travaux publics constituent à l'heure actuelle une préoccupation majeure des producteurs et des utilisateurs, principalement dans le domaine routier. Il est entendu que tout matériau routier ou assimilé a pour application première les sous couches de toute structure routière. Mais par extension, ces matériaux peuvent être destinés à des couches de remblais, de plates-formes industrielles comme à des voies piétonnes, des pistes cyclables, chemins littoraux, ruraux, des aires de stationnement ...etc.

Dans cette étude, les sédiments de dragage du port de Djen Djen sont proposés pour être utilisés comme matériaux routiers. Ce matériau cimentaire représente une nouvelle filière de valorisation pour les sédiments marins étudiés qui devra permettre, d'une part, de gérer les grands volumes des sédiments du port de Djen Djen et, d'autre part, de diminuer les besoins en matériaux extraits des carrières. La fabrication de ces matériaux routiers à base de sédiments de dragage du port de Djen Djen s'inscrit dans une optique de développement durable.

3.2 Synthèse des caractéristiques géotechniques des sédiments de dragage du port de Djen Djen

La teneur en eau initiale des sédiments de dragage du port de Djen Djen est faible. La courbe granulométrique est étalée, elle est donc intéressante pour être utilisée en tant que sol support ou couche de structure. Ces sédiments sont à prédominance sableuse, leur plasticité est faible, ils contiennent une très faible quantité de fines particules ceci est confirmé par la valeur au bleu. Néanmoins ces sédiments présentent une faible portance.

Pour une valorisation en technique routière, il est nécessaire d'améliorer leurs performances au regard de la portance et de la résistance mécanique. L'utilisation des mélanges dans le domaine de l'engineering sont fréquentes et plus particulièrement dans le domaine routier. L'incorporation des liants hydrauliques

pourrait améliorer considérablement les performances mécaniques du matériau final utilisable en technique routière ; à cet effet, un traitement des sédiments marins étudiés à base de liants classiques à dosage économique a été entrepris.

L'ajout de liants hydrauliques, pour l'obtention du matériau routier final, va permettre d'une part de diminuer la teneur en eau, par les phénomènes d'hydratation et d'apports de matières sèches et d'autre part la mise en place de liens forts entre les particules, pour augmenter les résistances, et diminuer la porosité ouverte qui permet le passage de l'eau libre dans la structure (Abriak, 2007; SfarFelfoul et al., 2003). Pour cela, afin de renforcer la structure et d'améliorer les résistances mécaniques du matériau comportant du ciment seule ou, une combinaison de chaux et de ciment, sont choisis. Le traitement consiste en l'ajout de 5% de ciment +1% de chaux, 7% de ciment, et 7% de ciment+2% de chaux. La résistance à la compression simple est utilisée comme indicateur de l'intégrité physique du matériau traité.

3.3 Matériaux et méthodes

Les sédiments du port de djen djen sont séchés dans une étuve à 105°C, cette température dès que séchage est terminé, placés les sédiments dans les sacs plastiques hermétiques. Le matériau est ainsi prêt pour l'utilisation.

Le traitement des sédiments marins étudiés par des liants hydrauliques nécessitent une caractérisation des liants utilisés. Ceci nous amène donc à définir les différentes caractéristiques des liants utilisés dans le cadre de nos travaux.

3.3.1 La chaux

C'est un procédé qui est particulièrement adapté aux sols cohérents et argileux (sols fins), afin d'améliorer leurs caractéristiques géotechniques d'une part et diminuer leurs plasticités d'autre part (Andras.B).

La chaux, peut être employée seule ou avec d'autres additifs, pour son effet alcalin. L'addition de la chaux a pour effet à la fois de modifier la teneur en eau, de transformer les argiles potassiques ou sodiques en argiles calciques beaucoup moins plastiques et de produire par dissolution et recristallisation, des aluminates et silicates qui constituent une trame résistance (Cabane, 2004).

Ils existent plusieurs types de chaux, ce projet de fin d'étude nous avons utilisés de la chaux vive 0/2mm, que l'on emploie souvent dans les terrassements et techniques routiers. Elle produit les effets suivants :

- Assèchement du sol du fait de l'évaporation de l'eau due à la chaleur d'hydratation.
- diminution de la densité sèche maximale.
- augmentation du CBR.

L'analyse chimique de la chaux réalisée au laboratoire L.T.P.E donné les résultats récapitulés dans le tableau suivant.

Tableau 20: Analyse chimique et minéralogique de la chaux (L.T.P.E)

Composition Chimique	Pourcentage
Humidité	/
CaO	67.4%-73.25%
MgO	<0.4%
Fe ₂ O ₃	<2%
Al ₂ O ₃	<1%
SiO ₂	<2.2%
SO ₃	<1%
K ₂ O+NaO	<0.4%
CO ₂	<5%
CaCO ₃	<10%
Ca(OH) ₂	<80%
Constance volumique	Bonne
Insoluble	<0.35%

3.3.2 Le ciment

Le ciment choisi dans le cadre de cette étude est un ciment portland composé (CPJ-CEMII/A) 42.5. Ce ciment contient une grande quantité de pouzzolane, il est

obtenu par broyage simultané d'un minimum de 95 % de clinker Portland et d'une faible quantité de sulfate de calcium. Ce liant hydraulique est utilisé pour ses propriétés de résistance aux eaux agressives et sa bonne tenue au gel. Grâce à sa faible teneur en alumine et donc en aluminat tricalcique, ce ciment possède une haute résistance aux sulfates. (Benaïssa, 2017), ses caractéristiques chimiques sont présentées dans le tableau (tableau 21).

Tableau 21: Analyse chimiques du ciment CPJ 42,5 (L.T.P.E)

Insolubles%	2,16
SiO ₂ %	22,76
CAO%	63,43
MGO%	0,21
FE ₂ O ₃ %	3,57
AL ₂ O ₃ %	5,96
SO ₃ %	1,91
P.F %	2,37
Total	102.37
C _A O LIBRE %	0,27
C ₃ S %	33,50
C ₂ S %	38,60
C ₃ A %	9,75
C ₄ AF%	10,85

3.3.3 Les formulations retenues

En vue d'étudier l'effet de chaque liant hydraulique, ou encore leur combinaison, sur le comportement mécanique des sédiments de dragage du port de Djen Djen, quatre formulations ont été prises.

Ces mixtures sont présentées dans le tableau suivant (Tableau 22).

Tableau 22: Formulation des mélanges étudiés

	Sédiments [%]	Ciment 42,5CPJ CEMII/A [%]	Chaux (0/2mm) [%]
Sédiment sans traitement F0	100	0	0
Formulation 1 (F1)	94	5	1
Formulation 2 (F2)	93	7	0
Formulation 3 (F3)	91	7	2

3.4 Détermination de la densification et de la portance des formulations étudiées

Une campagne d'essais Proctor (NFP 94-093 AFNOR, 1998) a été effectuée sur les formulations de mélanges étudiés au laboratoire LTPE de Jijel que nous remercions pour leur accueil chaleureux malgré les risques de la pandémie régnant en cette période. Nous ne pouvions réaliser le même jour les essais de portance par manque de matériel au niveau de ce laboratoire, sachant que l'université était fermée. Il nous a fallu attendre la rentrée universitaire le 23 août 2020 pour compléter les essais de portance. A cet effet, nous ne pouvions réaliser que les IPI (NFP 94-078 AFNOR, 1998) correspondant à l'optimum Proctor au sein du laboratoire du département de Génie Civil, de plus les sédiments prélevés étaient presque totalement épuisés vu que nous avons confectionnés des éprouvettes 16 × 32 et il nous était impossible de ramener d'autre vu que l'accès au port était devenu interdit.

Les courbes de compactage des différents mélanges étudiés sont reportées sur la figure 31. Les paramètres optimaux des essais Proctor effectués, ainsi que les IPI correspondant aux points des densités optimales et aux teneurs en eau optimales de chaque formulation sont illustrés dans le tableau 23.

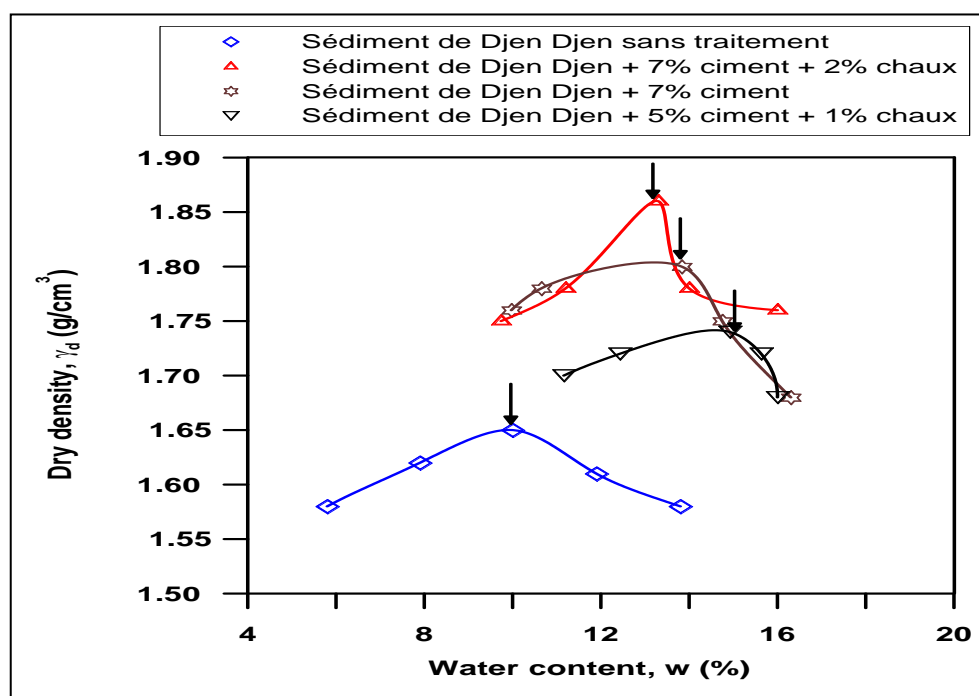


Fig 31 : Courbes Proctor Normale des mélanges

La courbe Proctor correspondant aux sédiments non traités présente un léger aplatissement au voisinage de l'OPN, ce qui constitue une diminution de la sensibilité à l'eau. Par contre celle correspondant à F3 (sédiments traités par 7% de ciment+2% de chaux) présente une forme en cloche au voisinage de l'OPN. La sensibilité à l'eau est plus accentuée.

A partir des résultats Proctor (tableau 24), nous constatons que l'ajout des liants hydrauliques a entraîné des changements significatifs au niveau des optimums Proctor.

Tableau 23: Synthèse des paramètres Proctor- IPI à l'optimum des formulations

	F0	F1	F2	F3
Wopt (%)	10	14.32	13.83	13.3
ρd_{Opt} (KN/m³)	16.5	17.4	18	18.6
IPI (%)	14	15.25	16.35	23

On constate que les poids (masse) volumique sec des échantillons de sédiments de dragage du port de Djen Djen, traités au ciment ou combinés avec un traitement à la chaux, augmentent lorsque on ajoute plus de pourcentage de ciment ou on ajoute 1 à 2% de chaux avec les mêmes dosages en ciment. Le poids volumique sec maximum augmente de 16,5kN/m³ à 18,6 kN/m³ pour un pourcentage de ciment variant de 0% à 7% ou ciment/chaux allant de 5% de ciment + 1% de chaux à 7%

de ciment + 2% de chaux. Ceci peut être comparé comme si on compacte le sol sans ajout à des énergies de plus en plus élevées. Ce phénomène peut être expliqué par le fait que l'incorporation du ciment avec ajout de 1% à 2% de chaux a permis de densifier le matériau en augmentant sa densité, suite à une hydratation du ciment qui forme des hydrates (phénomène de cristallisation). Cette augmentation est dû aussi au remplacement des particules de sédiments par le ciment qui est plus dense (3.1g/cm^3) et qui facilite le déplacement des particules des sédiments en les orientant de façon à former une structure rédigée, d'où l'intérêt du ciment qui joue le rôle d'un fluidifiant et la chaux comme séchage vu sa surface spécifique qui est plus grande que le ciment. On peut dire que le ciment va jouer un rôle important dans l'amélioration des caractéristiques optimales de compactage et par conséquent la durabilité par exemple de la couche de forme de la chaussée ou du remblai

Concernant la teneur en eau optimale, on note une augmentation de cette dernière jusqu'à un dosage de ciment de 5% avec 1% de chaux. Puis elle diminue légèrement pour un dosage de 7% de ciment seulement ou un dosage combiné de 7% de ciment et 2% de chaux. Ceci indique que le matériau traité sera plus facile à compacter efficacement, car acceptant plus d'humidité et rendu moins sensible aux variations de teneur en eau.

On peut dire que les changements des caractéristiques à l'Optimum sont significatifs à des pourcentages inférieurs à 5% de ciment avec 1% de chaux. En revanche, ces changements sont minimes à des pourcentages supérieurs à 5% de ciment +1% de chaux.

L'indice Portland Immédiat (IPI) optimale est faible pour les sédiments sans traitement, cette valeur de l'IPI implique une difficulté de circulation des engins sur le chantier (GTR, 2000). Par contre nous constatons une augmentation des IPI en fonction de l'augmentation des teneurs en liants hydrauliques (ciment ou ciment + chaux) par rapport aux sédiments sans traitement. L'IPI de la formulation F3 atteint une valeur qui peut permettre d'assurer la circulation des engins sur chantier et vérifie les conditions pour une utilisation en couche de forme (GTR, 2000).

3.5 Essai de compression

Les essais de résistance à la compression simple (RC) (NFP98-230-2) sont effectués au laboratoire LTPE sur des éprouvettes cylindriques.

La détermination de cette résistance a pour but d'étudier l'effet des liants hydrauliques utilisés sur les résistances mécaniques à trois temps de maturation : 14jours, 28jours et 60jours. Ceci aboutira à caractériser le comportement du sol traité à court et long terme et permettra de savoir par la suite l'âge autorisant la circulation des engins sur la couche traitée.

Le test de compression a été réalisé à l'aide d'une presse mécanique de capacité maximale de 2000KN asservie en force avec une vitesse de chargement de 2.4KN/sec (fig 32). La charge de rupture correspond à la charge maximale enregistrée au cours de l'essai.



Fig 32: Presse mécanique de capacité utilisée

Pendant les essais, on enregistre la force de rupture, à l'aide d'un comparateur, et par la suite on calcule les contraintes afin de déterminer les résistances à la compression simple. La charge de rupture correspond à la charge maximale enregistrée au cours de l'essai.

La résistance à la compression à « j » jours, R_{cj} en MPa est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette (voir l'équation).

$$R_{cj} = \frac{P}{S} \quad (\text{Eq 21})$$

Avec :

R_{cj} : Résistance à la compression à « j » jours ;

P : Charge de rupture en N ;

S : Section transversale de l'éprouvette en mm².

3.5.1 Confection des éprouvettes

En raison de la finesse du matériau à étudier ($D_{max} < 6,3$ mm) et en suivant la norme (NF P 98-114-3) relative à l'étude des matériaux traités aux liants hydrauliques, L'essai de la résistance à la compression avec des éprouvettes cylindriques de 16 cm de diamètre et de 32cm de hauteur (élancement 2), confectionnées à une teneur en eau et une densité à l'OPN. Les moules utilisés sont en aciers et sont de formes cylindriques de dimensions (16 x 32). Le coulage est fait en cinq couches. Chaque couche est compactée par une dame de masse 4.54 kg avec 56 coups répartis sur toute la surface avec une hauteur de chute égale à 457mm. Pour chaque liant, nous avons confectionné 3 éprouvettes, dont la répartition en fonction des essais est précisée au tableau 24.

Au total, 12 éprouvettes ont été fabriquées pour l'ensemble de ce travail expérimental, puis ils ont été placés dans un bassin vide. Le démoulage est effectué après 24h.

Tableau 24 : Paramètres de mise en œuvre des éprouvettes

Formulation	Type de moule	Volume (cm ³)	Masse (g)	W _{OPN} %
F0			1.65 x volume	10
F1			1.74 x volume	14.32
F2	16 x 32	6430.72	1.80 x volume	13.83
F3			1.86 x volume	13.3

3.5.2 Résultats et interprétations

Les résultats obtenus après écrasement en compression simple sur des éprouvettes compactées à des caractéristiques optimales de l'essai Proctor normale sont reportés dans le tableau 25.

Tableau 25: Résistance à la compression de différent traitement

La résistance à la compression			
Formulation	14 jours	28 jours	60 jours
F0	0.1	0.1	0.1
F1	0.7	1.9	1.5
F2	1.07	2.4	2.45
F3	2.23	2.5	2.12

Il apparaît nettement sur les figures 33, 34, 35,36 que l'ajout du ciment ou ciment+chaux améliore les performances mécaniques des sédiments de dragage du port de Djen Djen en fonction du dosage du liant utilisé, et de la durée de durcissement.

L'évolution temporelle des résistances mécaniques à la rupture obtenues pour F2 augmente de 1.07 à 2.45 MPa. Elle varie de 2.12 à 2.5 MPa pour F3, et de 0.7 à 1.9 MPa pour F1 (Fig 33). Le seuil de 1 MPa est dépassé pour tous les mélanges retenus à différents temps de maturation, excepté pour le mélange F1 à 14 jours de maturation, ce mélange qui correspond à 5% de ciment+1% de chaux atteint une valeur maximale à 28 jours puis diminue légèrement à long terme à 60 jours (voir Fig 33).

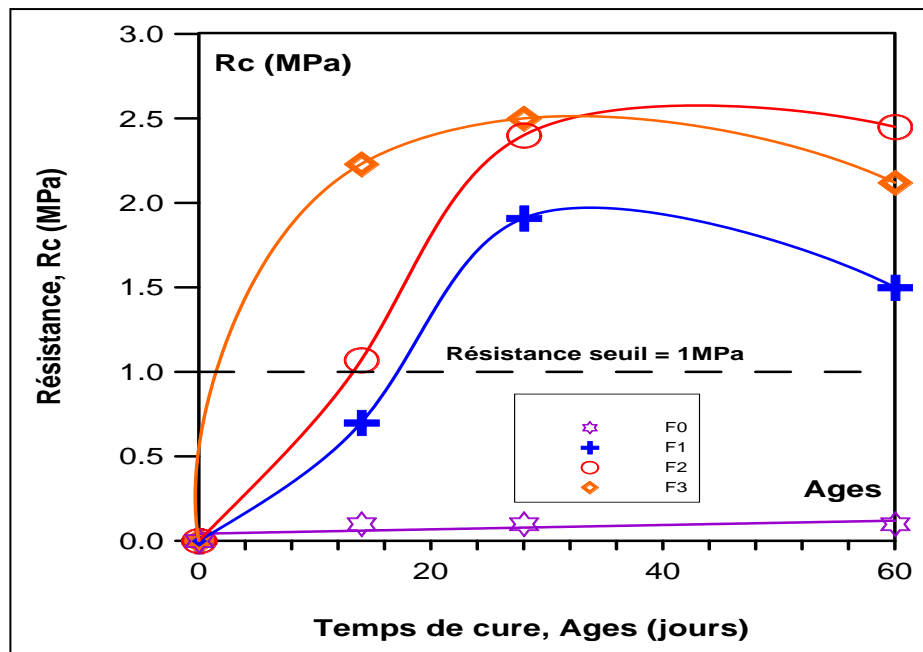


Fig 33 : Evolution temporelle de la résistance des mélanges

à différents temps de cure

Idem pour le mélange F3 (sédiments traités avec 7% ciment +2% chaux) à 60 jours la résistance diminue légèrement mais elle dépasse le seuil admissible de 1MPa. Les sédiments de dragage du port de Djen Djen sans traitement (F0) présente une très faible résistance à la compression, elle est très lointe de la résistance seuil autorisant la circulation sur la couche traitée à différents temps de cure.

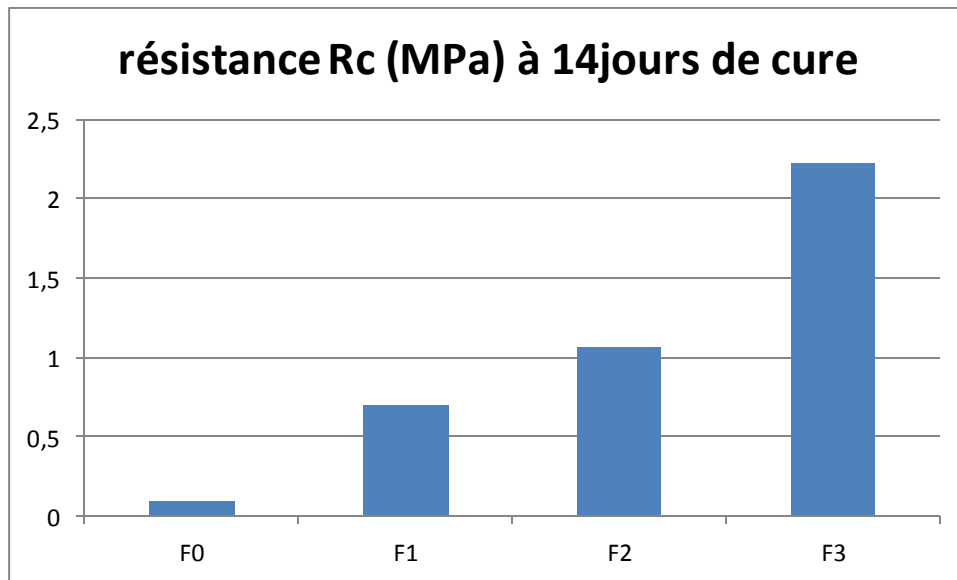


Fig 34 : Evolution de la résistance des mélanges à 14 jours de cure

Dés 14 jours de cure, l'ajout du ciment est remarquable pour les différentes formulations, et plus particulièrement le traitement à 7% de ciment+2% de chaux où la résistance à la compression atteint 2.23MPa (cas de F3). F3 développe à court terme des résistances mécaniques très satisfaisantes (voir fig 34).

A 28 jours de cure, le seuil de 1 MPa est dépassé pour toutes les formulations. L'étendue de résistance à 28 jours va de 0,1 à 2.5 MPa, le développement des résistances semble plus rapide. La résistance mécanique à 28 jours (R_{c28}) est légèrement meilleure pour la formulation F3 avec un dosage à 7% de ciment+2% de chaux que la formulation F2 avec un dosage de 7% ciment. Toutefois les résistances des formulations F1 F2 et F3 dépasse la résistance seuil autorisant la circulation sur la couche traitée, dès 28jours de durcissement. À 28jours de maturation la chaux a un effet bénéfique (voir fig 35).

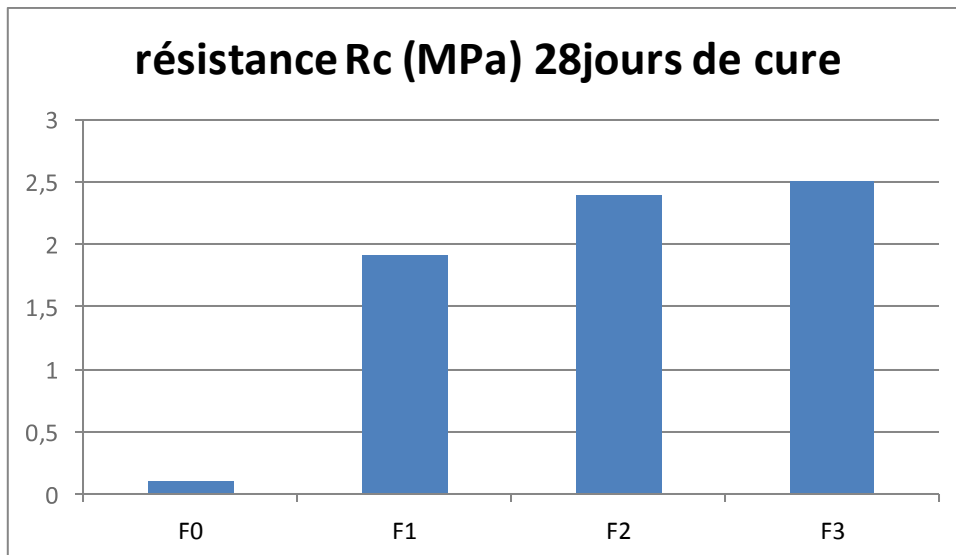


Fig 35 : Evolution de la résistance des mélanges à 28 jours de cure

A long terme (60 jours de cure) le seuil de 1 MPa, résistance seuil autorisant la circulation sur la couche traitée est dépassée pour toutes les formulations étudiées.

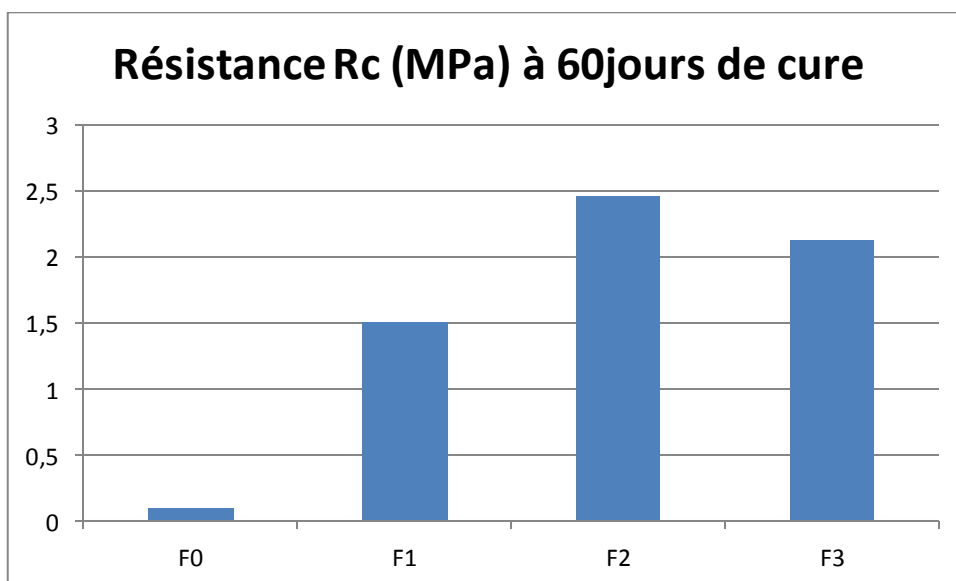


Fig 36 : Evolution de la résistance des mélanges à 60 jours de cure

La résistance mécanique à la compression simple à 60jours (R_{c60}) est légèrement meilleure pour la formulation F2 avec un dosage à 7% de ciment que la formulation F3 avec un dosage de 7% ciment+2% de chaux. Il semble que l'addition de la chaux au ciment diminue la résistance à la compression à long terme, c'est-à-dire à 60 jours (cas de F1 et F3), par contre le traitement des sédiments au ciment seul (F3) donne une meilleure résistance à long terme (voir fig 36).

La diminution de la résistance à la compression des mélanges de la formulation F1(5%ciment+1%chaux) et F3(7%ciment+2%chaux) à 60 jours de maturation

peut être expliqué par la faible liaison intergranulaire due aux hydrates qui se forment, c'est-à-dire la chaux libre au niveau des ciments qui constitue une cristallisation. La chaux a un effet pouzzolanique très faible.

Pour éclaircir ce phénomène, il est recommandé de passer aux essais de microstructure (Microscope Electronique à Balayage).

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre la possibilité d'utiliser les sédiments de dragage du port de Djen Djen en couche de forme d'une chaussée a été étudiée. De par la sensibilité à l'eau et la faible valeur de l'indice portant immédiat des sédiments non traités, un traitement par le ciment seul et ciment +chaux ont été proposés comme solution pour améliorer ces performances.

L'approche expérimentale retenue dans cette étude pour valoriser les sédiments dragués du port de Djen Djen, consiste à évaluer leurs performances mécaniques après traitement aux liants hydrauliques en tenant compte du critère à satisfaire pour un matériau routier, à savoir, le critère de traficabilité ($R_c \geq 1MPa$). Cette approche présente une deuxième étape importante après la phase de caractérisation et avant toute utilisation en technique routière.

L'ajout du ciment, augmente la résistance en compression simple des échantillons. Ce phénomène est probablement lié au remplissage des pores par les produits cimentaires qui lient les particules du sol. Ce liant hydraulique est un produit qui, en présence d'eau s'hydrate en donnant naissance à des espèces cristallines insolubles et résistantes qui agglomèrent les éléments granulaires du sol. L'addition de la chaux au ciment diminue la résistance à la compression à long terme, son effet pouzzolanique est très faible.

L'IPI du mélange de la formulation F3 (7%ciment°2%chaux) atteint une valeur qui peut permettre d'assurer la circulation des engins sur chantier et vérifie les conditions pour une utilisation en couche de forme. Le seuil de 1 MPa est dépassé pour ce mélange à 14, 28 jours et à 60 jours (GTR, 2000).

Le mélange de la formulation F3 (7%ciment°2%chaux) peut être retenu comme meilleure formulation pour être utilisé en couche de forme.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les travaux de recherche entrepris dans cette étude s'inscrivent dans une problématique de gestion des sédiments, en particulier les sédiments du port de Djen Djen qui représentent un problème économique et environnemental majeur. La méthodologie générale de valorisation décrite dans cette étude a pour objectif l'utilisation des sédiments de dragage prélevé du dépôt terrestre du port de Djen Djen situé à l'Est algérien dans une formulation de matériau routier, en particulier dans une couche de forme.

S'agissant d'un matériau nouveau, il a été nécessaire de commencer par une caractérisation des propriétés physico-chimiques et géotechniques des sédiments. A cet effet, nous avons mené une série d'analyses physiques, chimiques et mécaniques sur des échantillons de sédiments prélevés du dépôt terrestre du port de Djen Djen (wilaya de Jijel) au niveau des laboratoires L.T.P.E et de Génie-Civil de l'université Mohammed Seddik Ben Yahia. Les caractéristiques géotechniques définies en fonction du secteur de valorisation choisi ont permis de classer ce sédiment naturel selon le guide technique GTR (LCPC, SERTA, 2000) en classe B (sol sableux et graveleux) et en sous classe B2, qui comporte une majorité de particules minérales supérieures à 80 μm et une valeur de bleu méthylène ($\text{VBS} = 0.3$). Le poids volumique sec maximum augmente de $16,5 \text{ kN/m}^3$ à $18,6 \text{ kN/m}^3$ pour un pourcentage de ciment variant de 0% à 7% ou ciment/chaux allant de 5% de ciment + 1% de chaux à 7% de ciment + 2% de chaux. Ceci peut être comparé comme si on compacte le sol sans ajout à des énergies de plus en plus élevées. Ce phénomène peut être expliqué par le fait que l'incorporation du ciment avec ajout de 1% à 2% de chaux a permis de densifier le matériau en augmentant sa densité, suite à une hydratation du ciment qui forme des hydrates (phénomène de cristallisation). Cette augmentation est dû aussi au remplacement des particules de sédiments par le ciment qui est plus dense (3.1 g/cm^3) et qui facilite le déplacement des particules des sédiments en les orientant de façon à former une structure rédige, d'où l'intérêt du ciment qui joue le rôle d'un fluidifiant et la chaux comme séchage vu sa surface spécifique qui est plus grande que le ciment. On peut dire que le ciment va jouer un rôle important dans l'amélioration des caractéristiques optimales de compactage et par

conséquent la durabilité par exemple de la couche de forme de la chaussée ou du remblai. L'indice Portland Immédiat (IPI) optimale est faible pour les sédiments sans traitement, cette valeur de l'IPI implique une difficulté de circulation des engins sur le chantier (GTR, 2000). Par conséquent, nous constatons une augmentation des IPI en fonction de l'augmentation des teneurs en liants hydrauliques (ciment ou ciment + chaux) par rapport aux sédiments sans traitement. L'IPI de la formulation F3 (7% ciment+2%chaux) atteint une valeur qui peut permettre d'assurer la circulation des engins sur chantier et vérifie les conditions pour une utilisation en couche de forme (GTR, 2000).

A partir des résultats de la résistance à la compression nous remarquons que l'augmentation du ciment, augmente la résistance en compression simple des échantillons. Ce phénomène est probablement lié au remplissage des pores par les produits cimentaires qui lient les particules du sol. Les liants hydrauliques sont des produits qui, en présence d'eau s'hydratent en donnant naissance à des espèces cristallines insolubles et résistantes qui agglomèrent les éléments granulaires du sol.

La formulation F3 donne la meilleure résistance en compression simple à différent temps de cure, et la meilleure valeur de l'indice Portland Immédiat (IPI) optimale c'est pourquoi nous proposons un traitement des sédiments de dragage du dépôt terrestre du port de Djen Djen à 7% ciment et 2% chaux pour une utilisation en couche de forme.

Au terme de ce travail, nous espérons avoir contribué à ouvrir un axe de recherche vers des filières de valorisation afin de proposer une solution au devenir de ce dépôt terrestre résultant du dragage du port de Djen Djen et dont le volume risque d'augmenter de jour en jour.....

Référence bibliographique

Référence bibliographique

Abriak, N.E. (2007). Améliorer la valorisation des déchets industriels en BTP, Guide Technique Régional Relatif à la méthodologie de gestion des sédiments de dragage portuaire, Démarche PREDIS Nord Pas de Calais, Groupe de travail n°5, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Douai.

Aloui-Labioud, Z.(2014). Etude de l'amélioration des caractéristiques physico-chimiques de la Sebkhia d'Oran en vue d'arrêter son étendue. Université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès, Faculté de Technologie, Département de Génie Civil, Laboratoire de Génie Civil & Environnement LGCE.

Alzieu, C. A., Abarnou, P., Bassoullet, B., Boutier, J.-F., Chiffolleau, I., Crenn, A., Derrien, E., Erard-Le Denn, M., Gourmelon, J.-F., Guiliaud, R., Silva Jacinto, P., Le Cann, F., Le Guyader, P., Le Hir, J. L'Yavanc, J.-L., Mauvais, D., Menard, P., Michel, Y., Monbet, M., Pommeupuy and F., Quiniou. (1999). Dragage et environnement marin : état des connaissances. IFREMER .

Andras, B. routes II. « Les structures des chaussées, la construction et l'entretien des routes ». Professeur à l'université des sciences et de la technologie d'Oran (U.S.T.O).

Anger, B. (2012). pour une caractérisation minimale des sédiments fins : application d'une démarche pour leur valorisation en matériaux routiers XIIème journées nationales Génie côtier –Génie civil Cherbourg ,12-14 juin 2012. Editions Paralia.

Agostini, F.(2006). "Inertage et Valorisation Des Sédiments de Dragage Marins."Thèse de doctorat, école centrale de Lille.

AFNOR (1994 b). Association Française de normalisation. Liants Hydrauliques : Définition, Classification et Spéciation des Ciments, NF P 15-301. Paris (France).

Bacot, J., Kham Khoeup, A. « Essais de stabilisation de vases estuariennes à l'aide de liants hydrauliques en vue d'une utilisation en construction routière ». INSA de Rennes, LGCGM – Equipe Géologie de l'Ingénieur et de l'Environnement, INSA de Rennes, Département GCU.

Belkessa, (2007).« Aménagement des Ports de Pêche de Bouharoun et Khemisti »Alger, 2007, mémoire online.

Benaissa,A.(2017). « Valorisation de la vase pour l'utilisation dans la technique routière Composition ».thèse de doctorat en science (université de djillali liabes, sidi bel abbes),150p

Boutouil, M.(1998). « Traitement des vases de dragage par stabilisation/solidification à base de ciment et additifs ». Thèse de doctorat, Université du Havre, 245p.

Boubaker, R., Boutouil, M.(2006).« Etude de la compressibilité et de microstructure d'un sédiment de dragage traité au liant hydraulique ». IXèmes Journées Nationales Génie Civil – Génie Côtier, 12-14 septembre 2006, Brest

Baryla, J.-M., Chenais, V., Gavois, L., Havard, H. (2000). « Effet de sulfates et sulfures sur desmarnes traitées à la chaux et au liant routier sur un chantier autoroutier ». Bulletin desLaboratoires des Ponts et Chaussées n°224. pp 39-48.

Bennert, T.A., Maher, M.H., Jafari, F., Gucunski, N. (2000). « Use of dredged sediments from Newark Harbor for geotechnical applications ». Geotechnics of high water content materials, ASTM STP 1374, T. B. Edil and P. J. Fox, Eds., ASTM, West Conshohocken, p. 153-164

Bonnet, C.(2000). Développement de bio-essais sur sédiments et applications de l'étude, enLaboratoire, de la toxicité de sédiments dulçaquicoles contaminés. Thèse del'Université de Metz, 326 p.

Belhadj, I.(2013). « Contribution à l'étude des sédiments marins tunisiens : cas des ports de Radés et de Gabès ». Thèse de doctorat, l'école centrale de Lille(Université Lille Nord-de-France), p218.

Benaissa, A ., Aloui, Z ., Moulay, S., Ghembaza., Daniel Levacher and Yahia Sebaibi. (2016) .Behavior of sediment from the dam FERGOUG in road construction .advances in concrete construction,vol4, pp 015-026.

COLIN, D. (2003).Valorisation de sédiments fins de dragage en technique routière. Thèse de doctorat de l'Université de Caen,181.

Colin, D. (2000) (Abriak, N.E.2007). Amélioration de la performance mécanique des sédiments marins pollués pour une valorisation en technique routière (conférence invitée), colloque SOMAPRO 2007 sols et matériaux à problème, TUNISIE,9-11février 2007,pp255-262.

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. Thèse, Université Jean Monnet - École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne

Dalton, J.L., Gardner, K.H., Seager, T.P., Weimer, M.L., Spear, J.C., Magee, B.J. Properties of Portland cement made from contaminated sediments. Resources, conservation and recycling 2004; 41: 227-241.

Dehar, S.(2007). « Contribution à l'étude du comportement mécanique de la vase du barrage Chorfa, valorisation en technique routière ». Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en génie civil, Mascara

Daewoo,(2014).Rapport technique proposé par Daewoo Engineering and construction co,ltd .pour la réalisation du projet « étude et réalisation d'un terminal à conteneurs dans le port de Djen Djen.

DePuy, G.W., (1994).Chemical Resistance to Concrete. Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete Making Materials, ASTM 169C, in: Kileger, P., Lamond, J. (Eds.), ASTM West Conshohocken, pp. 263–281.

Dermatas, D., Dutko, P., Balorda-Barone, J., Moon D. (2003). « Evaluation of engineering properties of cement treated Hudson River dredged sediments for reuse as fill material ». Journal of marine environmental engineering, 7, p. 101-123.

Degoutte, G., Royet, P. 2005. “Aide-mémoire de mécanique des sols”. 98p

Deschamps, T., M.Benzaazoua, B., Bussière, T., Belem and M. Mbonimpa. (2006). Mécanismes de rétention des métaux lourds en phase solide : cas de la stabilisation des sols contaminés et des déchets industriels. Vertigo – La revue en sciences de l'environnement 7 (2), 1-11.

Dunlap, W.A., Epps, J.A., Biswas, B.R., Gallaway, B.M. (1975). United States Air Force Soil Stabilization Index System: A Validation. Report No. AFWL-TR-73-150, Air Force Weapons Laboratory, Kirtland Air Force Base, New Mexico.

Foucher, J.(2005). « Valorisation des déblais sableux de dragage portuaire en France Métropolitaine ». TFE, Edition Ifremer, 64p.

Grosdemange, D. (2005).Guide pour la gestion des opérations de dragage. Fédération Française des Ports de Plaisance.

GTS, (2000).Traitement des sols à la chaux et aux liants hydrauliques-Guide technique, LCPCSETRA, 240p

GTR, (1992).Guide Technique pour la Réalisation des remblais et des couches de forme.Fascicule I, principes généraux, 100 p.

GTR, (2000). Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme. Editions duSETRA-LCPC, Fascicules I & II, 98 p. et 102 p.

Hamer, K., Karius, V. (2002). Brick production with dredged harbour sediments. An industrial-scale experiment. Waste Management, Vol 22, No. 5, pp. 521–530.

Kazi aoual, F.(2011).Durabilité des mortiers à base des sédiments de dragage du port d'Oran conférence Méditerranéenne côtière et maritime Edition 2,Tanger,Maroc.

Kribi, S.(2005). « Décomposition des matières organiques et stabilisation des métaux lourds dans les sédiments de dragage ». Thèse de l'Université de Lyon, 2005, 220 p.

Labiod, Z. (2000) .Utilisation de la vase du barrage de BOUHANIFIA comme fertilisant. Séminaire national sur la microirrigation-SNMB2000.Blida.

Labiod, Z.(2004).Traitement de la vase du barrage Bouhanifia en vue de sa valorisation Larhys Journal, ISSN 1112-3680, n° 03.pp7-12.

Labiod-Aloui, Z., Trouzine, H., Ghembaza, M-S., Nouioua ,T., Sebaibi, Y.

(2014).Experimental investigation of mixtures of bentonite and dredged sediments from Chorfa dam in Algeria.

Lelong, V. (2003). "Valorisation des matériaux d'excavation par traitement à la chaux", Lhoist France S.A.S., TP Tech. Paris. 2003.

Levacher, D., Sanchez, M., Duan, Z., Jigorel, A., Proulhac, N. (2005). Etudes physico-mécaniques des matériaux de dragage du port de Cherbourg en vue d'une réutilisation en remblais.Rapport IDRA Rennes, 135 p.

Levacher, D., Sanchez, M., DUAN, Z., LIANG, Y. (2011). Valorisation en unité pilote de sédiments méditerranéens : étude des caractéristiques géotechniques et de la perméabilité. Revue Paralia, Vol. 4 (2011), pp 4.1-4.20.

Magnan, J.P. (1997). Description, identification et classification des sols. Techniques de l'ingénieur, Construction, fascicule C208.

Mechaymech, A. (2002). Valorisation des boues de dragage - Application : Port autonome de Dunkerque. Mémoire pour l'obtention du Diplôme d' Études Approfondies (DEA), Université d'Artois.

- Mekerta, B., Semcha, A., Benaissa, A., Kazi-Aouel-Benslafa, F. (2009)**
 .Comportement mécanique des sédiments de dragage pour leur valorisation en technique SBEIDCO – 1st International Conférence on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Alegria) - Octobre 12-14.
- Moszkowicz, P., Barna, R.(2001).** "Stabilisation - solidification des déchets", Techniques de l'ingénieur, Article G 2 080, Vol. G. 04 / 2001.
- Mulligan, C.N., Raymond, N. Yong and Bernard, F Gibbs. (2001).** An evaluation of technologies for the heavy metal remediation of dredged sediments, Journal of Hazardous Materials, Vol. 85, Issues 1-2, P 145-163.
- 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. Thèse, Université Paul Sabatier, Toulouse.
- Olivier,J.P., Maso,J.C., Bourdette,B. (1995).**Interfacial Transition Zone in Concrete. Advanced Cement Based Material, 2 (1995), pp.30-38
- Perrin, L.(1992).** « Expansion of lime treated clays containing sulfates ». Proc. 7 conf. OnExpansive soils New York,Vol. 1, pp 409-414.
- Rusch, B. (2010).** Étude spectroscopique en conditions hydrodynamiques contrôlées du transfert des espèces organiques à l'interface minéral/solution. Thèse, Université Henri Poincaré, Nancy 1.
- Romero, M., Andrès, A., Alonso, R., Viguri, J., Rincón, J.M. (2008).**Sintering behavior of ceramic bodies from contaminated marine sediments.Ceramics International, vol. 34, pp 1917-1924.
- Semcha,A .(2006).**Thèse doctorat Université de Reims Champagne-Ardenne France.
- Sfar Felfoul, H., Rahali, L., Mahmoudi, M.A., Chedly, S.** « Traitement des sols à la chaux et au ciment en technique routière tunisienne : présentation d'un exemple », Séminaire International de Géomatériaux, M'silla, 10-11 mars 2003, Algérie, p. 55-66.
- Schneider, G. 2001.** Boues de curage des cours d'eau. CE, 43, 146-147. Source : <http://www.inra.fr/dpenv/curage.htm>.
- Samara, M. (2007)** .Valorisation des sédiments fluviaux pollués après inertage dans la brique cuite. Thèse de doctorat, l'école Centrale de Lille, France. p115.
- Scordia.(2008).** « Caractérisation et valorisation de sédiments fluviaux pollués et traités dans les matériaux routiers ». Thèse de doctorat, l'école centrale de Lille, 2008

Semcha, A.(2005).« Etude des propriétés géomécaniques des sédiments d'envasement de barrage et leur valorisation ».Thèse de doctorat (université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf).

Sun, L. (2005).Traitements des sédiments fins de dragage-influence des matières organiques sur la stabilisation .rapport de master 2 Recherche génie côtier, université de Caen, p50.

Tran, N. T. (2009). Valorisation de sédiments marins et fluviaux en technique routière. Thèse, Université d'Artois.

Tran, Ngoc. Lan. (1981).Utilisation de l'essai au bleu de méthylène en terrassement routier. Issue Number: 111. Pp 5-15.

VENUAT, M.(1989). "La pratique des ciments, mortiers et bétons. Tome 1. Caractéristiques des liants et des bétons. Mise en œuvre des coulis et mortiers", Deuxième édition, Editions du moniteur, 284 p.

Wild, S., Kinuthia, J. M., Jones, G. I., Higgins, D.D. (1999). Suppression of swelling associated with ettringite formation in lime stabilized sulphate bearing Clay soils by partial substitution of lime with ground granulated blastfurnace slag. Engineering geology n°51. pp 257-277.

Yukselen-Aksoy, Y., Kaya, A. (2010).Prediction of swelling Behavior of soils from specific surface area.Proceedings of Institution of civil Engineers Geotechnical Engineering .163(4).229-238(DOI 10.1680 / geng .2010.163.1.1.).

Yukselen-Aksoy, Y., Khodadoust, A.P., and Reddy, K.R. (2010).Destruction of PCB44 in spiked Subsurface soils Using Activated Persulfate Oxidation .Water, Air, and soil pollution, 209,419-427(DOI 10.1007/s11270-009-0210-x).

Zhibo, D.(2008). Caractérisation, stabilisation et solidification de sédiment marin. Thèse de doctorat, Université de Caen, 145p.

Les normes

NF EN 196-1, Septembre 2016 : Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances mécanique.

NF EN 933-8, Mars 2012. Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 8 : évaluation des fines - Équivalent de sable.

NF P 11-300, (1992) : Exécution des terrassements. Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières. 21 p.

NF P 15-301, juin 1994. Liants hydrauliques – Ciments courants – Composition, spécifications et critères de conformité.

NF P 98-101, juillet 1991 : assises de chaussées - chaux aérienne calcique pour sols et Routes - spécifications.

NF P 98-113, Novembre 1994. Assises de chaussée. Sables traités aux liants Hydrauliques et pouzzolanique. Définition – Composition – Classification.

NF P98-114-1, Décembre 2016 : Assises de chaussées - Méthodologie d'étude en laboratoire des matériaux traités aux liants hydrauliques - Partie 1 : graves traitées aux liants hydrauliques

NF P 98-114-3 : Assises de chaussées - Méthodologie d'étude en laboratoire des matériaux traités aux liants hydrauliques- Partie 3: Sols traités aux liants hydrauliques éventuellement Associés à la chaux.

NF P98-115, Mai 2009 : Assises de chaussées - Exécution des corps de chaussées - Constituants - Composition des mélanges et formulation - Exécution et contrôle.

NF P98-230-2, Août 1993 : Essais relatifs aux chaussées - Préparation des matériaux traités aux liants hydrauliques ou non traités - Partie 2 : fabrication des éprouvettes de sables ou de sols fins par compression statique.

NF P94-100, Aout 1999. Sols : reconnaissances et essais – Matériaux traités à la chaux et/ou au liant hydraulique – Essai d'évaluation de l'aptitude d'un sol au traitement.

NFP 94-068, Novembre 1993. Sols: reconnaissance et essai - Mesure de la quantité 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 tache.

NF P 94-048 Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination de la teneur en carbonate – Méthode du calcimètre. 2ème tirage janvier 2003.

NF P 94-050, septembre 1995. Sols: reconnaissance et essai - Détermination de la teneur en eau Pondérale des sols. Méthode par étuvage

NF P 94-054, octobre 1991. Sols: reconnaissance et essai - Détermination de la masse volumique des particules solides des sols. Méthode du pycnomètre à eau.

NF P 94-056, mars 1996. Sols: reconnaissance et essai - Analyse granulométrique. Méthode par Tamisage à sec après lavage.

NF P 94-057, mai 1992. Sols: reconnaissance et essai - Analyse granulométrique des sols. Méthode par sédimentation.

NF P 94-061-3, avril 1996. Sols: Reconnaissance et Essais - Détermination de la masse volumique d'un matériau en place - Partie 3 : Méthode au sable.

NF P 94-093, septembre 1997. Sols : reconnaissance et essais - Détermination des références de compactage d'un matériau - Essai Proctor normal. Essai Proctor modifié.

NF P 94-051. (1993) : Sols : reconnaissance et essais – Détermination des limites d'Atterberg – Limite de liquidité à la coupelle - Limite de plasticité au rouleau.

NF P 94-078. (1997) : Sols : reconnaissance et essais – Indice CBR après immersion – Indice CBR immédiat – Indice Portant Immédiat – Mesure sur échantillon compacté dans le moule CBR.

LCPC-SETRA, 2000, Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques (GTS) - Application à la réalisation des remblais et des couches de forme - Guide technique, 240 p.

les annexes

Classification selon GTR

Classe **A**

Tableau 1 - **Classification des sols fins**

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	Paramètres d'état	Sous classe fonction de l'état	
D _{max} ≤ 50 mm et Tamisat à 80 μm > 35%	A	VBS ≤ 2,5^(*) ou I_p ≤ 12	A₁ Limos peu plastiques, loess, silt alluvionnaires, sables fins peu pollués, arènes peu plastiques...	IPI^(*) ≤ 3 ou w_n ≥ 1,25 w_{OPN}	A ₁ th	
				3 < IPI^(*) ≤ 8 ou 1,10 ≤ w_n < 1,25 w_{OPN}	A ₁ h	
				8 < IPI ≤ 25 ou 0,9 w_{OPN} ≤ w_n < 1,1 w_{OPN}	A ₁ m	
				0,7 w_{OPN} ≤ w_n < 0,9 w_{OPN}	A ₁ s	
				w_n < 0,7 w_{OPN}	A ₁ ts	
		12 < I_p ≤ 25^(*) ou 2,5 < VBS ≤ 6	A₂ Sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques arènes...	IPI^(*) ≤ 2 ou I_c^(*) ≤ 0,9 ou w_n ≥ 1,3 w_{OPN}	A ₂ th	
				2 < IPI^(*) ≤ 5 ou 0,9 ≤ I_c^(*) < 1,05 ou 1,1 w_{OPN} ≤ w_n < 1,3 w_{OPN}	A ₂ h	
				5 < IPI ≤ 15 ou 1,05 < I_c ≤ 1,2 ou 0,9 w_{OPN} ≤ w_n < 1,1 w_{OPN}	A ₂ m	
				1,2 < I_c ≤ 1,4 ou 0,7 w_{OPN} ≤ w_n < 0,9 w_{OPN}	A ₂ s	
				I_c > 1,3 ou w_n < 0,7 w_{OPN}	A ₂ ts	
		25 < I_p ≤ 40^(*) ou 6 < VBS ≤ 8	A₃ Argiles et argiles marneuses, limons très plastiques...	IPI^(*) ≤ 1 ou I_c^(*) ≤ 0,8 ou w_n ≥ 1,4 w_{OPN}	A ₃ th	
				1 < IPI^(*) ≤ 3 ou 0,8 ≤ I_c^(*) < 1 ou 1,2 w_{OPN} ≤ w_n < 1,4 w_{OPN}	A ₃ h	
				3 < IPI ≤ 10 ou 1 < I_c ≤ 1,15 ou 0,9 w_{OPN} ≤ w_n < 1,2 w_{OPN}	A ₃ m	
				1,15 < I_c ≤ 1,3 ou 0,7 w_{OPN} ≤ w_n < 0,9 w_{OPN}	A ₃ s	
		I_p > 40^(*) ou VBS > 8	A₄ Argiles et argiles marneuses, très plastiques...	Valeurs seuils des paramètres d'état, à définir à l'appui d'une étude spécifique		A ₄ th
						A ₄ h
				A ₄ m		
				A ₄ s		

⁽¹⁾ Paramètres dont le choix est à privilégier

Classe **B**

Tableau 2 - **Classification des sols sableux ou graveleux, avec fines**

← CLASSIFICATION A UTILISER POUR LES REMBLAIS →							
← CLASSIFICATION A UTILISER POUR LES COUCHES DE FORME →							
Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique		Classement selon le comportement	
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Paramètres d'état	Sous classe fonction de l'état	Paramètres de comportement	sous classe fonction du comportement
D _{max} ≤ 50 mm et Tamisat à 80 μm ≤ 35%	B Sols sableux et graveleux avec fines	tamisat à 80 μm ≤ 12% tamisat à 2 mm > 70% 0,1 ≤ VBS ≤ 0,2	B₁ Sables silteux...	Matériaux généralement insensibles à l'eau		FS ≤ 60	B ₁₁
						FS > 60	B ₁₂
		tamisat à 80 μm ≤ 12% tamisat à 2 mm > 70% VBS > 0,2	B₂ Sables argileux (peu argileux)...	IPI ⁽¹⁾ ≤ 4 ou w _n ≥ 1,25 w _{OPN}	B ₂ th	FS ≤ 60	B ₂₁ th
						FS > 60	B ₂₂ th
				4 < IPI ⁽¹⁾ ≤ 8 ou 1,10 w _{OPN} ≤ w _n < 1,25 w _{OPN}	B ₂ h	FS ≤ 60	B ₂₁ h
						FS > 60	B ₂₂ h
				0,9 w _{OPN} ≤ w _n < 1,10 w _{OPN}	B ₂ m	FS ≤ 60	B ₂₁ m
						FS > 60	B ₂₂ m
		0,5 w _{OPN} ≤ w _n < 0,9 w _{OPN}	B ₂ s	FS ≤ 60	B ₂₁ s		
				FS > 60	B ₂₂ s		
		w _n < 0,5 w _{OPN}	B ₂ ts	FS ≤ 60	B ₂₁ ts		
				FS > 60	B ₂₂ ts		
tamisat à 80 μm ≤ 12% tamisat à 2 mm > 70% 0,1 ≤ VBS ≤ 0,2	B₃ Graves silteuses...	Matériaux généralement insensibles à l'eau		LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₃₁		
				LA > 45 et MDE > 45	B ₃₂		

⁽¹⁾ Paramètres dont le choix est à privilégier

Classe **B** (suite)

Tableau 2 - **Classification des sols sableux ou graveleux, avec fines**

← CLASSIFICATION A UTILISER POUR LES REMBLAIS →									
← CLASSIFICATION A UTILISER POUR LES COUCHES DE FORME →									
Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique		Classement selon le comportement			
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Paramètres d'état	Sous classe fonction de l'état	Paramètres de comportement	sous classe fonction du comportement		
D _{max} ≤ 50 mm et Tamisat à 80 μm ≤ 35%	B	tamisat à 80 μm ≤ 12% tamisat à 2 mm ≤ 70% VBS > 0,2	B₄ Graves argileuses (peu argileuses)...	IP _I ⁽¹⁾ ≤ 7 ou w _n ≥ 1,25 w _{OPN}	B ₄ th	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₄₁ th		
						LA > 45 et MDE > 45	B ₄₂ th		
				7 < IP _I ⁽¹⁾ ≤ 15 ou 1,10 w _{OPN} ≤ w _n < 1,25 w _{OPN}	B ₄ h	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₄₁ h		
						LA > 45 et MDE > 45	B ₄₂ h		
				0,9 w _{OPN} ≤ w _n < 1,10 w _{OPN}	B ₄ m	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₄₁ m		
						LA > 45 et MDE > 45	B ₄₂ m		
				0,6 w _{OPN} ≤ w _n < 0,9 w _{OPN}	B ₄ s	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₄₁ s		
						LA > 45 et MDE > 45	B ₄₂ s		
				w _n < 0,6 w _{OPN}	B ₄ ts	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₄₁ ts		
						LA > 45 et MDE > 45	B ₄₂ ts		
				tamisat à 80 μm compris entre 12 et 35% tamisat à 2 mm ≤ 70% VBS < 1,5⁽¹⁾ ou I _p ≤ 12	B₅ Sables et graves très silteux...	IP _I ⁽¹⁾ ≤ 5 ou w _n ≥ 1,25 w _{OPN}	B ₅ th	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₅₁ th
						LA > 45 et MDE > 45	B ₅₂ th		
	5 < IP _I ⁽¹⁾ ≤ 12 ou 1,1 w _{OPN} ≤ w _n < 1,25 w _{OPN}	B ₅ h	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45			B ₅₁ h			
			LA > 45 et MDE > 45			B ₅₂ h			
	12 < IP _I ⁽¹⁾ ≤ 30 ou 0,9 w _{OPN} ≤ w _n < 1,10 w _{OPN}	B ₅ m	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45			B ₅₁ m			
			LA > 45 et MDE > 45			B ₅₂ m			
			0,6 w _{OPN} ≤ w _n < 0,9 w _{OPN}	B ₅ s	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₅₁ s			
					LA > 45 et MDE > 45	B ₅₂ s			
					w _n < 0,6 w _{OPN}	B ₅ ts	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₅₁ ts	
							LA > 45 et MDE > 45	B ₅₂ ts	
			tamisat à 80 μm compris entre 12 et 35% VBS > 1,5⁽¹⁾ ou I _p > 12	B₆ Sables et graves argileux à très argileux	IP _I ⁽¹⁾ ≤ 4 ou w _n ≥ 1,3 w _{OPN} ou I _c ≤ 0,8	B ₆ th			
		4 < IP _I ⁽¹⁾ ≤ 10 ou 0,8 < I _c ≤ 1 ou 1,1 w _{OPN} ≤ w _n < 1,3 w _{OPN}			B ₆ h				
		10 < IP _I ⁽¹⁾ ≤ 25 ou 1 < I _c ≤ 1,2 ou 0,9 w _{OPN} ≤ w _n ⁽¹⁾ < 1,1 w _{OPN}			B ₆ m				
		0,7 w _{OPN} ≤ w _n ⁽¹⁾ < 0,9 w _{OPN} ou 1,2 < I _c ≤ 1,3			B ₆ s				
				w _n ⁽¹⁾ < 0,7 w _{OPN} ou I _c > 1,3	B ₆ ts				

⁽¹⁾ Paramètres dont le choix est à privilégier

Classe **C**

Tableau 3 - **Classification des sols comportant des fines et des gros éléments**

Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique et le comportement																																			
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature																																				
<p>$D_{max} > 50$ mm et tamisat à $80 \mu m > 12\%$</p> <p>ou</p> <p>si le tamisat à $80 \mu m \leq 12\%$ la VBS est $> 0,1$</p>	C	<p>Matériaux anguleux comportant une fraction $0/50 \text{ mm} > 60$ à 80% et matériaux roulés.</p> <p>La fraction $0/50$ est un sol de classe A</p>	<p>C₁A_i</p> <p>Argiles à silex, éboulis, moraines, alluvions grossières...</p>	<p>Le sous-classement, en fonction de l'état hydrique et du comportement des sols de cette classe, s'établit en considérant celui de leur fraction $0/50 \text{ mm}$ qui peut être un sol de la classe A ou de la classe B</p> <p>* <u>1^{er} exemple</u> : un sol désigné C₁A₂h est un sol qui est :</p> <ul style="list-style-type: none"> ● soit entièrement roulé, ● soit entièrement ou partiellement anguleux; sa fraction $0/50$ représente plus de 60 à 80% de la totalité du matériau. <p>Dans les deux cas, sa fraction $0/50 \text{ mm}$ appartient à la classe A₂ avec un état hydrique h.</p> <p>* <u>2^{ème} exemple</u> : un sol désigné C₁B₄₂m est un sol qui est :</p> <ul style="list-style-type: none"> ● entièrement ou partiellement anguleux; sa fraction $0/50 \text{ mm}$ représente moins de 60 à 80% de la totalité du matériau. <p>La fraction $0/50 \text{ mm}$ est un sol de la classe B₄₂ se trouvant dans un état hydrique m.</p> <p>Les différents sous-classes composant la classe C sont :</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>C₁A₁</td> <td>C₁A₃</td> <td>C₂A₁</td> <td>C₂A₃</td> <td rowspan="2">Etat th, h, m, s ou ts</td> </tr> <tr> <td>C₁A₂</td> <td>C₁A₄</td> <td>C₂A₂</td> <td>C₂A₄</td> </tr> <tr> <td>C₁B₁₁</td> <td>C₁B₃₁</td> <td>C₂B₁₁</td> <td>C₂B₃₁</td> <td rowspan="2">Matériaux généralement insensibles à l'état hydrique</td> </tr> <tr> <td>C₁B₁₂</td> <td>C₁B₃₂</td> <td>C₂B₁₂</td> <td>C₂B₃₂</td> </tr> <tr> <td>C₁B₂₁</td> <td>C₁B₅₁</td> <td>C₂B₂₁</td> <td>C₂B₅₁</td> <td rowspan="4">Etat th, h, m, s ou ts</td> </tr> <tr> <td>C₁B₂₂</td> <td>C₁B₅₂</td> <td>C₂B₂₂</td> <td>C₂B₅₂</td> </tr> <tr> <td>C₁B₄₁</td> <td>C₁B₆</td> <td>C₂B₄₁</td> <td>C₂B₆</td> </tr> <tr> <td>C₁B₄₂</td> <td></td> <td>C₂B₄₂</td> <td></td> </tr> </table>	C ₁ A ₁	C ₁ A ₃	C ₂ A ₁	C ₂ A ₃	Etat th, h, m, s ou ts	C ₁ A ₂	C ₁ A ₄	C ₂ A ₂	C ₂ A ₄	C ₁ B ₁₁	C ₁ B ₃₁	C ₂ B ₁₁	C ₂ B ₃₁	Matériaux généralement insensibles à l'état hydrique	C ₁ B ₁₂	C ₁ B ₃₂	C ₂ B ₁₂	C ₂ B ₃₂	C ₁ B ₂₁	C ₁ B ₅₁	C ₂ B ₂₁	C ₂ B ₅₁	Etat th, h, m, s ou ts	C ₁ B ₂₂	C ₁ B ₅₂	C ₂ B ₂₂	C ₂ B ₅₂	C ₁ B ₄₁	C ₁ B ₆	C ₂ B ₄₁	C ₂ B ₆	C ₁ B ₄₂		C ₂ B ₄₂	
		C ₁ A ₁	C ₁ A ₃		C ₂ A ₁	C ₂ A ₃	Etat th, h, m, s ou ts																																
		C ₁ A ₂	C ₁ A ₄		C ₂ A ₂	C ₂ A ₄																																	
		C ₁ B ₁₁	C ₁ B ₃₁		C ₂ B ₁₁	C ₂ B ₃₁	Matériaux généralement insensibles à l'état hydrique																																
C ₁ B ₁₂	C ₁ B ₃₂	C ₂ B ₁₂	C ₂ B ₃₂																																				
C ₁ B ₂₁	C ₁ B ₅₁	C ₂ B ₂₁	C ₂ B ₅₁	Etat th, h, m, s ou ts																																			
C ₁ B ₂₂	C ₁ B ₅₂	C ₂ B ₂₂	C ₂ B ₅₂																																				
C ₁ B ₄₁	C ₁ B ₆	C ₂ B ₄₁	C ₂ B ₆																																				
C ₁ B ₄₂		C ₂ B ₄₂																																					
Matériaux anguleux comportant une fraction $0/50 \text{ mm} > 60$ à 80% et matériaux roulés. <p>La fraction $0/50$ est un sol de classe B</p>	<p>C₁B_i</p> <p>Argiles à silex, argiles à meulière, éboulis, moraines, alluvions grossières...</p>																																						
Matériaux anguleux comportant une fraction $0/50 \text{ mm} \leq 60$ à 80% . <p>La fraction $0/50$ est un sol de classe A</p>	<p>C₂A_i</p> <p>Argiles à silex, argiles à meulière, éboulis, biefs à silex...</p>																																						
Matériaux anguleux comportant une fraction $0/50 \text{ mm} \leq 60$ à 80% . <p>La fraction $0/50$ est un sol de classe B</p>	<p>C₂B_i</p> <p>Argiles à silex, argiles à meulière, éboulis, biefs à silex...</p>																																						

Classe **D**

Tableau 4 - **Classification des sols insensibles à l'eau**

← CLASSIFICATION A UTILISER POUR LES REMBLAIS →					
← CLASSIFICATION A UTILISER POUR LES COUCHES DE FORME →					
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%	D₁ Sables alluvionnaires propres, sables de dune...	FS ≤ 60	D ₁₁
				FS > 60	D ₁₂
		D _{max} ≤ 50 mm et tamisat à 2 mm ≤ 70%	D₂ Graves alluvionnaires propres, sables...	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	D ₂₁
				LA > 45 et MDE > 45	D ₂₂
		D _{max} > 50 mm	D₃ Graves alluvionnaires grossières propres, dépôts glaciaires,...	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	D ₃₁
				LA > 45 et MDE > 45	D ₃₂