

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira de Bejaia
Faculté de Technologie
Département de Génie Civil

Mémoire de fin de cycle master 2

En vue de l'obtention du Diplôme de Master

Filière : Génie Civil

Option : Structure

Thème

Amélioration des caractéristiques physico-mécanique d'un sédiment marin

Présenté par :

Mme. SASI Mouna & Mme. MEHDI Katiba

Soutenu le 19/09/2024 devant le jury composé de :

Présidente	T. DJERROUD
Encadreur	KHEFFACHE Toufik
Examineur	L. BOUKEMOUCHE

Année Universitaire : 2023-2024

Remerciements

Suite à l'élaboration de ce travail, et avant toute chose nous tenons à remercier le bon dieu de nous avoir donné le courage, la volonté ainsi la patience pour mener ce travail jusqu'à sa fin.

Le présent travail n'est pas seulement le fruit de nos efforts, mais également celui de bien des personnes à qui nous devons l'expression de nos vifs remerciements.

*Nous adressons notre plus haut respect et notre sincère gratitude à notre promoteur **Mr KHEFFACHE Toufik** pour son soutien et ses conseils*

Nous voudrions également lui témoigner notre gratitude pour sa patience et son soutien qui nous a été précieux afin de mener notre travail à bon port.

Je remercie également les membres de jury d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

Nous voudrions aussi exprimer notre reconnaissance envers les amies et collègues qui nous ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de notre démarche.

Nous remercions également tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'achèvement de notre travail et à l'ensemble de personnel.



S.Mouna & M.Katiba -

Dédicaces

Je dédie ce mémoire a :

Au Mon père «Farid »

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour et le respect que j'ai toujours pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation, ma formation et mon bien être.

Ma très chère mère «salima»

Tu représentes pour moi la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi.

A mes très chers frères Ramzi et ramí»

Les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous.

A mes copines

Pour leurs aides et supports dans les moments difficiles.

A tous les étudiants de Génie Civil

 *- S.Mouna -*

Dédicaces

*Nous remercions le dieu qui nous a donné la force de
réaliser ce modeste travail à :*

*Nos chers parents dieu les protégé, ceux qui ont été
toujours là pour nous, c'est grâce à eux que nous sommes*

Nos sœurs et nos frères

*Tous nos amis que tous nos collègues de département de
génie civil en un mot, toutes nos familles et tous ceux qui
ont contribué de près ou de loin à notre formation*



- M.Katiba -

Sommaire

Sommaire

Remerciements

Dédicaces

Sommaire

Liste d'abréviation

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction Générale1

Chapitre I

Généralités sur les sédiments

Introduction4

I.1. Les sédiments4

I.1.1. Définition.....4

I.1.1.1. Composition des sédiments5

I.1.1.1.1. La phase eau5

I.1.1.1.2. La phase inorganique5

I.1.1.1.3. La phase organique5

I.1.2. Types de sédiments6

I.1.2.1. Sédiments fluviatiles6

I.1.2.2. Sédiments lacustres7

I.1.2.3. Sédiments marins (biogénique)7

I.1.2.4. Sédiments éoliens.....8

I.1.2.5. Sédiments glaciaires.....8

I.1.2.6. Sédiments chimiques.....8

I.1.2.7. Sédiments volcaniques8

I.1.3. Le cycle sédimentaire.....8

I.1.4. Caractéristiques des sédiments9

I.1.4.1. Taille des particules10

I.1.4.2. Composition chimique10

I.1.4.3. Texture10

I.1.4.4. Porosité et perméabilité10

I.1.4.5. Couleur10

I.1.4.6. Structure stratigraphique10

I.1.4.7. Origine et environnement de dépôt.....11

I.1.5. Caractéristiques géotechnique et mécanique11

Sommaire

I.1.6. La granulométrie des sédiments	11
I.1.6.1. Les sédiments grossiers	12
I.1.6.2. Les sédiments fins	12
I.2. L'amélioration et stabilisation des sédiments	13
I.2.1. L'amélioration des sols	13
I.2.2. Avantages de l'amélioration	14
I.2.3. La stabilisation du sol	14
I.2.4. Techniques de stabilisation du sol	14
I.2.5. Les liants hydrauliques Utilisés dans la stabilisation	15
I.2.5.1. Ciment	15
I.2.5.2. Chaux	15
I.2.5.3. Les liants hydrauliques routiers (LHR)	15
I.3. Conclusion	16

Chapitre II

Les méthodes de stabilisation et de traitement des sols et procédés

II.1. Introduction	18
II.2. La stabilisation des sols	18
II.2.1. Définition	18
II.2.1.1. Les sols à stabiliser	18
II.2.1.1.1. Les sols argileux	18
II.2.1.1.2. Les sols limoneux	19
II.2.1.1.3. Les sols sableux	19
II.2.1.1.4. Les sols organiques	20
II.2.1.1.5. Les sols saturés	20
II.2.1.2. Les méthodes de stabilisation	20
II.2.1.2.1. Stabilisation chimique	20
II.2.1.2.1.1. Objectifs de la stabilisation chimique	21
II.2.1.2.1.2. Condition d'application de la méthode de stabilisation chimique	21
II.2.1.2.1.3. Le procédé d'application de la stabilisation chimique	21
II.2.1.2.2. Stabilisation mécanique	22
II.2.1.2.2.1. Objectifs de la stabilisation mécanique	23
II.2.1.2.2.2. Condition d'application de la méthode de stabilisation mécanique	23
II.2.1.2.2.3. Le procédé d'application de la stabilisation mécanique	24
II.2.1.2.3. Stabilisation thermique	24

Sommaire

II.2.1.2.3.1. Objectifs de la stabilisation thermique	25
II.2.1.2.3.2. Conditions d'application de la stabilisation thermique	25
II.2.1.2.3.3. Le procédé de la stabilisation thermique.....	26
II.3. Le traitement des sols	26
II.3.1. Définition	26
II.3.2. Les méthodes de traitements	27
II.3.2.1. Traitement à la chaux.....	27
II.3.2.2. Traitement à la biologie des sols	27
II.3.2.3. Traitement à base de matériaux recyclés	28
II.4. Conclusion	28

Chapitre III

Caractérisation du sol à l'état Naturel

III.1. Introduction.....	30
III.2. Localisation du site de prélèvement	30
III.2.1.1. Caractérisation et identification du sédiment.....	32
III.2.1.1.1. Analyse granulométrique	32
III.2.1.1.1.1. L'essai Proctor.....	34
III.2.1.1.1.2. Le cisaillement.....	36
III.2.1.1.1.3. Essai CBR	38
III.2.1.1.1.4. La perméabilité	41
III.2.1.1.1.5. Essai œdométrique.....	43
III.2.1.1.2. Caractérisation minéralogiques et chimiques.....	45
III.2.1.1.2.1. Diffraction des rayons X (DRX)	45
III.2.1.1.2.2. Fluorescence X (FX).....	46
III.3. Conclusion	47

Chapitre IV

Traitement du sol avec du liant hydraulique

IV.1. Introduction	49
IV.2. Traitement du sédiment avec le liant hydraulique	49
IV.3. Etude de l'évolution de la granulométrie	50
IV.3.1.1. Le calcul des coefficients	50
IV.4. L'essai Proctor	55
IV.5. Cisaillement	59
IV.6. L'essai CBR.....	67

Sommaire

IV.6.1. La norme française (NF P 94-078)	67
IV.6.2. Indice portant immédiat (IPI)	67
IV.6.3. Indice CBR immédiat	68
IV.6.4. Indice CBR après immersion	69
IV.7. La perméabilité	71
IV.8. L'œdomètre	72
IV.9. Conclusion	73

Chapitre V

Amélioration du sol traités avec incompatible du sable

V.1. Introduction	75
V.2. Traitement du sédiment avec le liant hydraulique et le sable de carrière	75
V.3. L'analyse granulométrique du sable de carrière	75
V.4. Les essais effectués	77
V.4.1. Proctor	77
V.4.2. Cisaillement	80
V.5. Conclusion	87
Conclusion Générale	88
Références bibliographiques	90

Liste d'abréviation

Liste d'abréviation

Ai : l'aluminium	s-ici : sédiment indice CBR immédiat
As: arsenic	s-ipi : sédiment indice portance immédiat
Ca: calcium	s-ici : sédiment indice CBR immersion
Cr: chromium	SC2.24H : sédiment 2% de ciment après 24 heures
Cu: Le cuivre	SC4.24H : sédiment 4% de ciment après 24 heures
Nacl : le chlorure de sodium	SC6.24H : sédiment 6% de ciment après 24 heures
Fe : iron. (le fer)	SC2.7J : sédiment 2% de ciment après 7 jours
K: potassium	SC4.7J : sédiment 4% de ciment après 7 jours
Mg: magnésium	SC6. 7J : sédiment 6% de ciment après 7 jours
Mn: magnésium	SC2 : sédiment 2 % de ciment
Rb : rubidium	SC4 : sédiment 4% de ciment
S : sulfur	SC6 : sédiment 6% de ciment
Si: silice	
Sr: strontium	
Ti: titanium	
V: vanadium	
Y : yttrium	
Zn : zinc	
Zr: zirconium	

Liste des tableaux

Liste des tableaux

<i>Tableau I.1 : Compositions chimiques d'un sédiment</i>	6
<i>Tableau I.2 : Granulométrie d'un sédiment marin et fluvial.....</i>	12
<i>Tableau I.3 : Classe granulométrique d'un sédiment</i>	13
<i>Tableau III.1 : Tableau récapitulatif des taux d'envasement du port de Bejaia (EPB)</i>	31
<i>Tableau III.2 : Les coefficients de la granulométrie du sédiment</i>	34
<i>Tableau III.3 : Les paramètres Proctor du sédiment étudié</i>	35
<i>Tableau III.4 : Les caractéristiques Proctor du sédiment</i>	36
<i>Tableau III.5 : Classification de la portance des sols selon GTR.....</i>	39
<i>Tableau III.6 : Classification du sol selon les indices CBR.....</i>	39
<i>Tableau III.7 : Classification du Sédiment selon les indices CBR calculé</i>	40
<i>Tableau III.8 : Classification de type de sol par rapport au coefficient de perméabilité... </i>	43
<i>Tableau III.9 : Classification du sol selon Cc.....</i>	44
<i>Tableau III.10 : Classification du sol selon Cc.....</i>	46
<i>Tableau IV.1 : Les coefficients Cu et cc des échantillons après 24h.....</i>	52
<i>Tableau IV.2 : Les coefficients Cu et cc des échantillons après 7 jours.....</i>	54
<i>Tableau IV.3 : Les caractéristiques de sédiment + ciment après 24 h.....</i>	56
<i>Tableau IV.4 : Les caractéristiques du sédiment + ciment après 7 jours.....</i>	58
<i>Tableau IV.5 : L'angle de frottement et la cohésion après 24h (sédiment + ciment)</i>	64
<i>Tableau IV.6 : L'angle de frottement et la cohésion après 24h (sédiment + ciment) .</i>	Error!
Bookmark not defined.	
<i>Tableau IV.7 : Classification du sol selon IPI.....</i>	67
<i>Tableau IV.8 : Classification du sol selon les indices CBR immédiat</i>	68
<i>Tableau IV.9 : Classification du sol selon les indices CBR immersion</i>	69
<i>Tableau IV.10 : Classification de type de sol par rapport le coefficient de perméabilité</i>	Error! Bookmark not defined.
<i>Tableau IV.11 : Classification du sol selon la perméabilité</i>	71
<i>Tableau IV.12 : Les coefficients de consolidation (Cv)</i>	72
<i>Tableau IV.13 : L'indice de compressibilité (Cc)</i>	73
<i>Tableau V.1 : Les tamisats cumulés</i>	76
<i>Tableau V.2 : Les coefficients Cu et Cc du sable.....</i>	77
<i>Tableau V.3 : Les caractéristiques Proctor des sols.....</i>	78
<i>Tableau V.4 : Les caractéristiques cisaillements des sols.....</i>	84

Liste des figures

Liste des figures

<i>Figure I.1 : Bassin sédimentaire</i>	4
<i>Figure I.2 : Sédiment fluvial</i>	7
<i>Figure I.3 : Sédimentation marin</i>	8
<i>Figure I.4 : Le cycle sédimentaire</i>	9
<i>Figure I.5 : Sédiment de caractéristiques différentes</i>	11
<i>Figure II.1 : Sol argileux</i>	18
<i>Figure II.2 : Sol limoneux</i>	19
<i>Figure II.3 : Sols sableux</i>	19
<i>Figure II.4 : Agents chimiques</i>	20
<i>Figure II.5 : Compactage dynamique</i>	23
<i>Figure II.6 : Traitement thermique par chauffage par vapeur</i>	25
<i>Figure II.7 : Traitement du sol à la chaux</i>	27
<i>Figure II.8 : Granulats recyclés</i>	28
<i>Figure III.1 : Localisation de la zone de prélèvement</i>	31
<i>Figure III.2 : Dispositif utilisée dans les essais d'analyse granulométrique</i>	33
<i>Figure III.3 : Courbe granulométrique du sédiment à l'état naturel</i>	33
<i>Figure III.4 : Dispositif de l'essai Proctor.</i>	34
<i>Figure III.5 : La courbe Proctor du sédiment</i>	35
<i>Figure III.6 : Dispositif de cisaillement</i>	36
<i>Figure III.7 : La déformation anneau en fonction du temps</i>	37
<i>Figure III.8 : La contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte normal</i>	38
<i>Figure III.9 : Dispositif de l'essai CBR</i>	38
<i>Figure III.10 : La force en fonction de l'enfoncement I CBR immédiat</i>	40
<i>Figure III.11 : La force en fonction de l'enfoncement IPI</i>	40
<i>Figure III.12 : Courbe force en fonction de l'enfoncement (ICBR immersion)</i>	40
<i>Figure III.13 : Illustration du dispositif de mesure de Perméabilité</i>	41
<i>Figure III.14 : Diagramme de DRX du sédiment</i>	45
<i>Figure IV.1 : La courbe granulométrique du sédiment avec les pourcentages ciment (24h)</i>	51
<i>Figure IV.2 : La courbe granulométrique du sédiment traites</i>	52
<i>Figure IV.3 : La courbe granulométrique du sédiment avec les pourcentages ciment (7 jours)</i>	54
<i>Figure IV.4 : Courbe Proctor du sédiment+2% ciment</i>	55

Liste des figures

<i>Figure IV.5 : Courbe Proctor du sédiment+4% ciment</i>	55
<i>Figure IV.6 : Courbe Proctor du sédiment+6% ciment</i>	56
<i>Figure IV.7 : Courbe Proctor du sédiment+2% ciment (7 jours)</i> Error! Bookmark not defined.	
<i>Figure IV.8 : Courbe Proctor du sédiment+4% ciment (7 jours)</i>	57
<i>Figure IV.9 : Courbe Proctor du sédiment+6% ciment (7 jours)</i>	58
<i>Figure IV.10 : Variation du teneur en eau en fonction du dosage du ciment et le temps</i> ...	59
<i>Figure IV.11 : La boîte de cisaillement après essai</i>	60
<i>Figure IV.12 : La boîte de cisaillement après essai</i>	60
<i>Figure IV.13 : Déformation _ contrainte de cisaillement du sédiment +2% de ciment</i>	61
<i>Figure IV.14 : Déformation anneau en fonction de temps du sédiment+2% ciment</i>	61
<i>Figure IV.15 : Déformation _ contrainte de cisaillement du sédiment +4% de ciment</i>	62
<i>Figure IV.16 : Déformation anneau en fonction de temps du sédiment+4%ciment</i>	62
<i>Figure IV.17 : Déformation _ contrainte de cisaillement du sédiment +6% de ciment</i>	63
<i>Figure IV.18 : Déformations anneau en fonction de temps du sédiment+6% ciment</i>	63
<i>Figure IV.19 : Contrainte cisaillement du sédiment+2% ciment</i>	64
<i>Figure IV.20 : Contrainte cisaillement du sédiment+4% ciment</i>	65
<i>Figure IV.21 : Contrainte cisaillement du sédiment+6% ciment</i>	65
<i>Figure IV.22 : Contrainte cisaillement du sédiment+2% ciment</i> Error! Bookmark not defined.	
<i>Figure IV.23 : Contrainte cisaillement du sédiment+4% ciment</i> Error! Bookmark not defined.	
<i>Figure IV.24 : Contrainte cisaillement du sédiment+6% ciment</i> Error! Bookmark not defined.	
<i>Figure IV.25 : L'angle de frottement en fonction des dosages ciment</i>	66
<i>Figure IV.26 : Sédiment +4% de ciment après essai CBR (IPI)</i>	67
<i>Figure IV.27 : Déplacement horizontal des types de sédiment(IPI)</i>	68
<i>Figure IV.28 : Déplacement horizontal des types sédiments (I CBR immédiat)</i>	69
<i>Figure IV.29 : Déplacement horizontal des types de sédiments (I CBR immersion)</i>	70
<i>Figure IV.30 : Variation des indices CBR</i>	70
<i>Figure IV.31 : Essai L'œdomètre</i>	72
<i>Figure V.1 : La courbe granulométrique de la sable carrière</i>	77
<i>Figure V.2 : Courbe Proctor du sédiment+2% ciment+5%sable</i>	78
<i>Figure V.3 : Courbe Proctor du sédiment+4% ciment+5%sable</i>	79

Liste des figures

<i>Figure V.4 : Courbe Proctor du sédiment+6% ciment+5% sable</i>	<i>79</i>
<i>Figure V.5 : Variation du teneur en eau en fonction du type de sol</i>	<i>80</i>
<i>Figure V.6 : Déformation _ contrainte de cisaillement du sédiment +2% ciment +5% sable</i>	<i>81</i>
<i>Figure V.7 : Déformation anneau en fonction de temps du sédiment+2% ciment +5% sable</i>	<i>81</i>
<i>Figure V.8 : Déformation _ contrainte de cisaillement du sédiment +4% ciment +5% sable</i>	<i>82</i>
<i>Figure V.9 : Déformation anneau en fonction de temps du sédiment +4% ciment +5% sable</i>	<i>82</i>
<i>Figure V.10 : Déformation _ contrainte de cisaillement du sédiment +6% ciment +5% sable</i>	<i>83</i>
<i>Figure V.11 : Déformation anneau en fonction de temps du sédiment+6% ciment+5% sable</i>	<i>83</i>
<i>Figure V.12 : Contrainte cisaillement du sédiment +2 % ciment + 5% de sable</i>	<i>84</i>
<i>Figure V.13 : Contrainte cisaillement du sédiment + 4% ciment + 5% de sable</i>	<i>85</i>
<i>Figure V.14 : Contrainte cisaillement du sédiment +6 % ciment + 5% de sable</i>	<i>85</i>
<i>Figure V.15 : L'angle de frottement en fonction du type de sol</i>	<i>86</i>

Introduction Générale

La valorisation des sédiments dragués passe par une amélioration de leurs caractéristiques physico-mécaniques et géotechniques. L'amélioration de ces caractéristiques peut être effectuée par plusieurs méthodes. Le choix d'une méthode adéquate dépend de plusieurs facteurs à savoir des facteurs techniques, économiques et environnementaux. Aussi le choix de la méthode peut dépendre des objectifs visés en termes de résistance et durabilité.

L'étude du comportement d'un matériau passe par l'identification de sa structure et la définition de ses propriétés physiques, mécaniques et minéralogiques. La caractérisation des sédiments revêt à une importance capitale dans le domaine de la géotechnique, offrant des informations cruciales pour la conception et la réalisation de projets d'ingénierie. En comprenant les propriétés physiques et mécaniques des sédiments, les ingénieurs peuvent évaluer leur comportement sous contrainte, anticiper les risques géotechniques et concevoir des solutions efficaces pour la construction et la protection des infrastructures.

Dans ce travail on va présenter les résultats de l'étude expérimentale effectués sur le sédiment prélevé au niveau du port de Bejaia. En premier lieu une identification et caractérisation du sédiment marin utilisé dans cette étude est effectuée. Les résultats d'un ensemble d'essais effectués en laboratoire afin de déterminer la constitution du matériau étudiée et de définir ses caractéristiques sont présentés. L'objectif de ces essais de caractérisation est de définir un procédé d'un traitement par liant hydraulique. L'ensemble des essais effectués sont: les essais chimiques (DRX, FRX), essais physiques (Granulométrie par tamisage) et essais mécaniques (Proctor, cisaillement, œdomètre, CBR et la perméabilité). Par la suite une étude qui consiste en l'amélioration des caractéristiques géotechniques du sédiment en incorporant des fractions massiques d'un liant hydraulique qui est dans notre cas le ciment et des fractions de sable de carrière est effectuée. À chaque addition d'une fraction de ciment et/ou de sable on effectue une série d'essais afin de suivre l'évolution des différents paramètres. Les résultats obtenus ont montré une évolution significative des différentes caractéristiques du matériau.

Ce mémoire comporte une introduction générale, cinq chapitres et une conclusion générale. Le premier chapitre présente un contexte général et bibliographique sur les sédiments. Le deuxième chapitre expose les méthodes de stabilisation et traitement des sédiments. Le troisième chapitre est dédié à la caractéristique du sédiment étudié. Le

Introduction Générale

quatrième chapitre contient l'identifiant du sédiment avec un agent du liant hydraulique. Le cinquième chapitre présente l'amélioration du sédiment avec le sable de carrière.

Chapitre I
Généralité sur les sédiments

Introduction

Dans le domaine du génie civil, la compréhension des sédiments revêt d'une importance capitale.

Ces matériaux géologiques, transportés et déposés par l'action des agents géomorphologiques, jouent un rôle essentiel dans la conception, la construction et la maintenance des infrastructures. Que ce soit dans le cadre de la conception de fondations solides, de l'évaluation des risques géotechniques ou de la gestion des ressources hydriques, une connaissance approfondie des propriétés et des comportements des sédiments est indispensable.

I.1. Les sédiments**I.1.1. Définition**

Les sédiments sont des particules de roche, de minéraux, sable, de limon ou d'argile de tailles différentes qui se déposent au fond des cours d'eau, des lacs, des océans ou d'autres étendues d'eau, généralement par l'action de l'eau, du vent ou de la glace .ils peuvent former des couches de dépôts avec le temps, et sont souvent une source importante d'informations géologiques sur l'histoire environnementale d'une région .

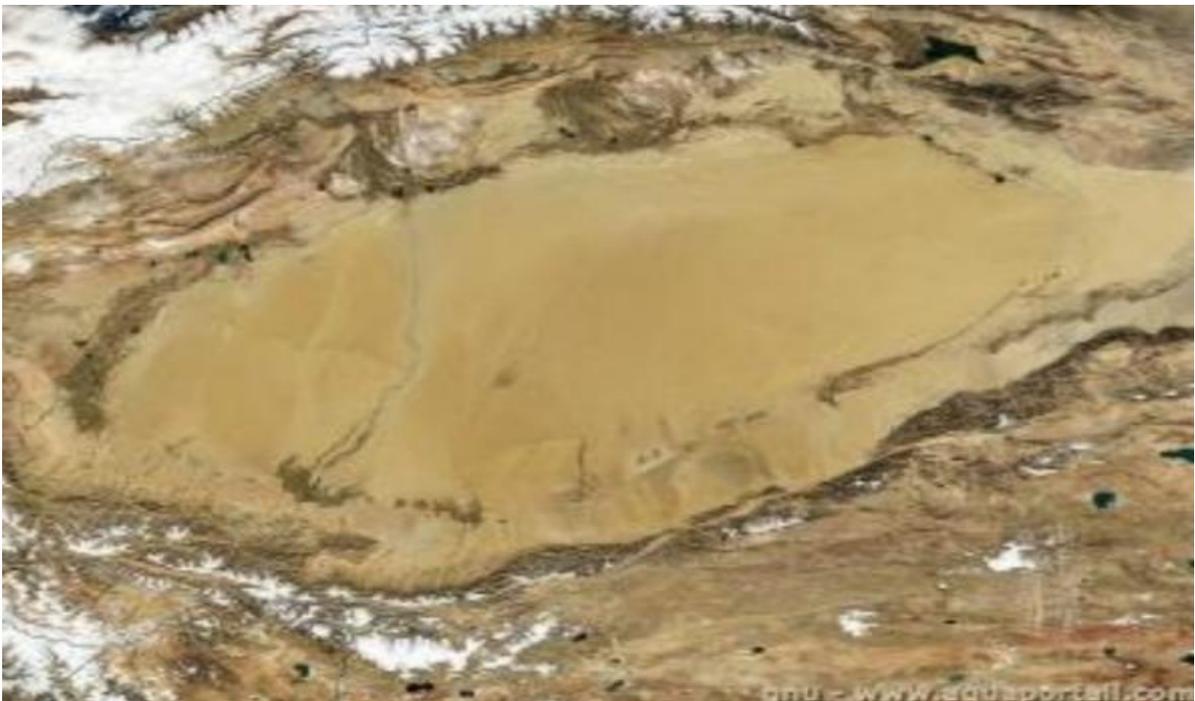


Figure I.1 : Bassin sédimentaire [1]

I.1.1.1. Composition des sédiments

La composition de la matrice sédimentaire est très hétérogène. C'est une des difficultés majeures pour l'étude des sédiments. Elle est constituée de matériaux détritiques inorganiques et organiques. Les sédiments de dragage sont constitués de trois phases:

I.1.1.1.1. La phase eau

C'est une fraction très variable dépendant de plusieurs facteurs, tels que les conditions de dragage et la position des dépôts. Généralement on peut distinguer l'eau libre, l'eau capillaire, l'eau colloïdale et l'eau pelliculaire. La teneur en eau par rapport à la matière sèche dans les vases varie de l'ordre de 50 à 300 %.

I.1.1.1.2. La phase inorganique

Cette fraction est principalement formée de minéraux provenant de l'écorce terrestre et de débris coquilliers. Elle se compose principalement d'argiles, de carbonates et de silicates. Les hydroxydes de fer, de manganèse et les substances organiques qui enrobent les particules inorganiques, leur procurent une grande capacité d'adsorption vis-à-vis des contaminants. Les principaux minéraux constituant sa matrice sont le quartz, le feldspath, et les argiles (dont les trois principaux constituants sont la kaolinite, l'illite et la smaltite).

I.1.1.1.3. La phase organique

Les composés organiques rencontrés dans les sédiments sont généralement d'origine naturelle. Ils proviennent, soit de débris végétaux, soit de micro-organismes, ou encore de colloïdes humiques. Cette phase est constituée de polymères naturels jouant un rôle important en tant que complexant. La phase comprend deux catégories:

- Les acides non humiques: Ce sont des composés classiques relativement connus ; les acides organiques, les acides aminés, protéines, glucides.
- Les acides humiques: Cette fraction constitue la majeure partie de la matière organique. Ils peuvent constituer entre 80 et 90 % de la fraction organique totale. On distingue deux grands groupes de substances humiques. Les acides humiques (insolubles dans l'eau mais solubles dans les milieux alcalins), et les acides fulviques représentant la fraction la plus importante, et sont solubles dans les acides et les bases.

Tableau I.1 : Compositions chimiques d'un sédiment [2]

Groupe de minéraux	Minéraux	Formule chimique
	Quartz Mica Feldspath Muscovite Albeit Or SILICATES hose	SiO ₂ K(Mg, Fe, Al) ₃ AlSi ₃ O ₁₀ (OH) ₂ (Na, Ca, K)AlSi ₃ O ₈ KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH,F) ₂ NaAlSi ₃ O ₈ KAlSi ₃ O ₈
ARGILES	Illite Montmorillonite Chlorite Kaolinite Vermiculites	KM Al ₂ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂ XMg Al O ₁₀ (OH) ₂ Mg ₅ Al ₂ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₈ Al ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄ (Mg,Ca) _{0,7} (Mg,Fe,Al) ₆ (Al,Si) ₈ O ₂₂ (OH) ₄ .8H ₂ O

I.1.2. Types de sédiments

Les sédiments sont classés en différents types en fonction de leur origine, leur composition, leur taille et leur mode de formation.

Voici quelque types de sédiments les plus courants :

I.1.2.1. Sédiments fluviaux

Transportés et déposés par les rivières et les cours d'eau.



Figure I.2 : Sédiment fluvial [1]

I.1.2.2. Sédiments lacustres

Se déposent au fond des lacs.

I.1.2.3. Sédiments marins (biogénique)

Se trouvent dans les océans et les mers, résultant de processus comme l'érosion côtière et le transport par les courants marins, tels que les coquillages coraux et les tests d'organismes microscopiques.



Figure I.3 : Sédimentation marin [3]

I.1.2.4. Sédiments éoliens

Transportés et déposés par le vent, souvent sous forme de sable ou de poussière.

I.1.2.5. Sédiments glaciaires

Déposés par les glaciers et les calottes glaciaires, comprenant des moraines, des tillites et d'autres matériaux transportés par la glace.

I.1.2.6. Sédiments chimiques

Ils se forment par précipitation de minéraux à partir de solutions aqueuses. Par exemple, les dépôts de calcaire résultent de la précipitation de carbonate de calcium dans l'eau.

I.1.2.7. Sédiments volcanique

Ils sont formés par l'accumulation de matériaux éjectés par les volcans, tels que les cendres et les scories.

I.1.3. Le cycle sédimentaires

Le cycle sédimentaire est un processus géologique qui implique la formation, la transformation et la destruction des sédiments

Il commence par la formation de sédiments à partir de l'érosion et de la fragmentation d'autres roches exposées à l'atmosphère terrestre. Ces sédiments sont transportés par l'eau, le vent ou la glace puis déposés dans des bassins sédimentaires où ils subissent un processus de vitrification pour former des roches sédimentaires comme les grès, le calcaire ou l'argile.

Au fil du temps, ces sédiments peuvent être soumis à des forces tectoniques comme la compression ou la subduction, les poussant à fondre pour former des roches magmatiques. Enfin, les sédiments peuvent être à nouveau, complétant ainsi le cycle en produisant de nouveaux sédiments. Ce cycle est crucial pour comprendre la dynamique de la surface de la terre et l'histoire géologique de notre planète.

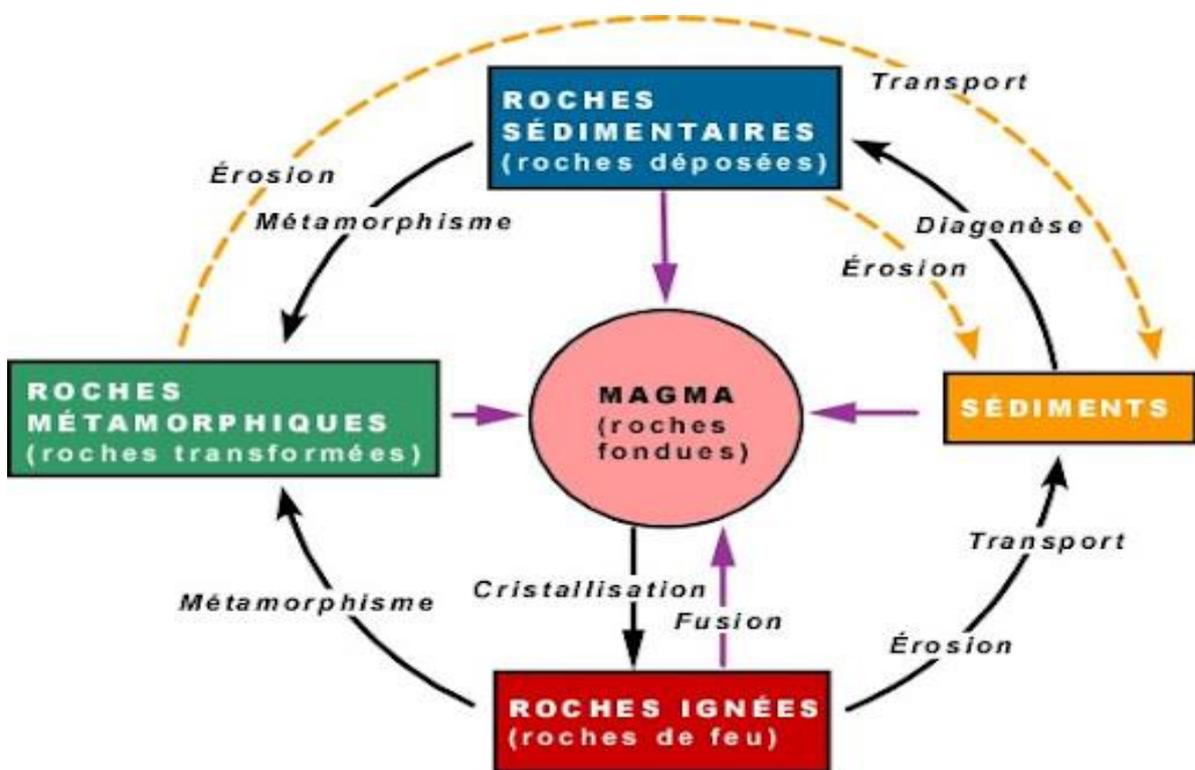


Figure I.4 : Le cycle sédimentaire [1]

I.1.4. Caractéristiques des sédiments

Les sédiments sont des particules solides qui se déposent au fond des plans d'eau (océans, lacs, rivières) ou qui s'accumulent sur terre. Leurs caractéristiques varient en fonction de différents facteurs, notamment leur origine, leur composition et leur taille. Voici quelques-unes des caractéristiques principales des sédiments :

I.1.4.1. Taille des particules

Les sédiments peuvent être classés en différentes catégories en fonction de leur taille, allant des particules grossières comme le sable et le gravier aux particules plus fines comme le limon et l'argile. Cette taille peut influencer divers aspects tels que la perméabilité, la capacité de rétention d'eau et la stabilité des sédiments.

I.1.4.2. Composition chimique

Les sédiments peuvent être composés de divers minéraux, de matière organique décomposée, de débris biologiques, de roches érodées, etc. Leur composition chimique peut varier considérablement en fonction de la géologie locale, des processus de transport et de la décomposition des organismes.

I.1.4.3. Texture

La texture des sédiments se réfère à la manière dont les particules sont agencées et compactées. Elle peut être homogène ou hétérogène, et elle est souvent influencée par les processus de transport et de sédimentation.

I.1.4.4. Porosité et perméabilité

La porosité des sédiments fait référence à l'espace vide entre les particules, tandis que la perméabilité se réfère à la capacité des sédiments à permettre le passage de fluides (comme l'eau). Ces propriétés sont importantes pour la filtration de l'eau, la recharge des nappes phréatiques et d'autres processus hydrologiques.

I.1.4.5. Couleur

La couleur des sédiments peut fournir des indications sur leur composition chimique et leur état de décomposition. Par exemple, les sédiments riches en matière organique peuvent avoir une couleur plus sombre, tandis que les sédiments riches en minéraux peuvent avoir une couleur plus claire.

I.1.4.6. Structure stratigraphique

Les sédiments peuvent former des structures stratifiées en couches, reflétant les variations dans les conditions environnementales et les processus de dépôt au fil du temps.

I.1.4.7. Origine et environnement de dépôt

Les sédiments peuvent être déposés dans une grande variété d'environnements, tels que les deltas, les plages, les fonds marins, les déserts, etc. Leur composition et leurs caractéristiques peuvent être influencées par ces environnements spécifiques.



Figure I.5 : Sédiments de caractéristiques différentes [1]

I.1.5. Caractéristiques géotechnique et mécanique

Des sédiments marins issus de dragages d'entretien, dragages curatifs et de dragages résultant de l'exploitation des granulats en mer ont fait l'objet d'une caractérisation géotechnique de base. Elle a porté sur la nature granulométrique (dimensions et nature des grains), sur les teneurs en eau initiales, sur les teneurs en matières organiques, carbonates de calcium et en argiles). Cette caractérisation géotechnique de base fournit les paramètres déterminants à l'entrée des filières de valorisation «matériau». Le scénario de valorisation des sédiments solidifiés/stabilisés en sous couche routière a été retenu avec suivi des indicateurs de résistance en compression et en traction directe. Selon les caractéristiques des sédiments marins, divers liants et ajouts avec des proportions variables ont été testés en vue d'améliorer les propriétés mécaniques des sédiments.

Dans le cadre de la valorisation de sédiments en technique routière, le module d'élasticité et la force de compression diamétrale ont été déterminés pour les sédiments prélevés après une expérimentation.

I.1.6. La granulométrie des sédiments

Les particules sédimentaires se propagent dans l'environnement avec les mouvements des masses d'eaux marines et continentales et se déposent par gravité sur le fond, en fonction de leur granulométrie et de la vitesse d'écoulement du courant. Les sédiments se

caractérisent essentiellement par une fraction minérale grossière (fraction sableuse) et une fraction plus fine (la vase).

I.1.6.1. Les sédiments grossiers

Contiennent essentiellement des particules d'un diamètre supérieur à 63 μm et sont principalement constitués de sable et de matériaux inorganiques silicatés. Les sédiments sableux présentent une faible cohésion, une petite surface de contact entre les différentes particules du sédiment et peu d'affinité pour les contaminants.

I.1.6.2. Les sédiments fins

Aussi appelés vases, sont composés de particules d'une taille inférieure à 63 μm et sont constitués d'argiles ayant un diamètre compris entre 0,2 et 2 μm et de silt ayant un diamètre compris entre 2 μm et 63 μm . Cette fraction fine contient généralement des minéraux argileux et de la matière organique. Les particules fines présentent une forte cohésion entre elles, la surface de contact est importante entre les particules. La prédominance des minéraux argileux, chargés négativement, donne un grand pouvoir adsorbant à la fraction fine des sédiments vis à vis des contaminants métalliques. Quant à la matière organique sédimentaire, elle est constituée de macromolécules hétérogènes présentant des sites hydrophiles qui facilitent sa fixation à la surface des particules minérales réactives (minéraux argileux) et la formation de nombreux complexes avec les contaminants métalliques et organiques.

Le tableau après présente la Granulométrie typique des sédiments marins et fluviaux (pour la fraction < 2mm) .

Tableau I.2 : Granulométrie d'un sédiment marin et fluvial [2]

Origine des sédiments	Marine			Fluviale		
	Argile (%) (0 < ϕ < 2 μm)	Limon (%) (2 < ϕ < 63 μm)	Sable (%) (63 < ϕ < 2000 μm)	Argile (%) (0 < ϕ < 2 μm)	Limon (%) (2 < ϕ < 50/63 μm)	Sable (%) (50/63 < ϕ < 2000 μm)
Statistiques sur sédiment sec						

Nombre de Données	710			1138		
Moyenne	8,1	60,0	31,9	14,4	47,4	38,2
Médiane	5,7	63,0	27,3	11,9	52,3	29,5
Minimum	0	0,1	0	0	0	0,01
Maximum	52,3	90,8	99,9	55,7	93,7	100

Tableau I.3 : Classe granulométrique d'un sédiment

Taille	Dénomination
> à 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)
< 2µm	Argiles

I.2. L'amélioration et stabilisation des sédiments

En raison du rôle important joué par le réseau de routes dans divers domaines, la recherche et le développement sont en cours pour trouver des moyens efficaces, afin de créer des routes de haute qualité et d'une plus grande durabilité, Parmi ceux-ci sont les méthodes d'amélioration et de stabilisation des sols.

I.2.1. L'amélioration des sols

Amélioration est une opération quasi instantanée qui consiste à améliorer les propriétés géotechniques du sol avec un ajout de liant à des teneurs variables (augmentation de la

portance, de la résistance à la pénétration, amélioration de l'aptitude du sol au compactage), alors que la nature du sol reste la même. Cette opération permet d'assurer la mise en œuvre du sol avec les ateliers traditionnels de terrassement

Les méthodes d'amélioration des sols sont l'un des outils dont dispose l'ingénieur pour résoudre les problèmes de stabilité ou de déformation qu'il rencontre lors de l'élaboration d'un projet.

I.2.2. Avantages de l'amélioration

- Empêcher le tassement excessif des terres renflouées quand elles sont utilisées pour la construction (routes, aéroports, ponts et autres fondations).
- Augmenter la rigidité du sol afin d'empêcher la liquéfaction et les dommages consécutifs aux structures dans des régions sismiques.
- Augmenter la résistance au cisaillement du sol afin d'empêcher les glissements de terrain.
- Augmenter la portance du sol ; immobiliser ou stabiliser les contaminants dans le sol dragué afin d'éliminer des incidences sur l'environnement.

Quelques méthodes d'amélioration peuvent également fournir des moyens rentables pour réduire la contamination des sols. L'assèchement des sols contaminés a un double effet. Une partie du sol amélioré peut être utilisée pour des projets de construction, éliminant la nécessité d'extraire de nouveau du sable de mine. Les quantités de sédiment inutilisable sont réduites, ce qui diminue l'espace requis pour le stockage, qui est toujours coûteux et problématique en termes d'environnement. En outre, quand des additifs tels que le ciment sont employés pendant l'amélioration du sol.

I.2.3. La stabilisation du sol

La stabilisation est une opération à moyen ou à long terme consistant à augmenter très sensiblement les caractéristiques mécaniques d'un sol avec un ajout de liant à des teneurs variables, de manière à conférer durablement au matériau un état définitif de stabilité à l'eau et au gel.

I.2.4. Techniques de stabilisation du sol

- Stabilisation par ajout des matériaux inertes: De nombreuses études scientifiques ont montré qu'on peut stabiliser les sols par ajout de matériaux inertes tels que les sables.

Cependant, il existe des cas pratiques de projets de stabilisation par ajout de sable rapportés dans la littérature.

- Stabilisation chimique des sols: Elle se base sur l'utilisation de produits chimiques ou de liants afin d'augmenter la concentration ionique de l'eau libre et de réduire les phénomènes d'échange indésirables.

I.2.5. Les liants hydrauliques Utilisés dans la stabilisation

Les liants hydrauliques les plus utilisés pour stabiliser les sols ou renforcer les matériaux sont, le ciment, la chaux, liants hydrauliques routiers (LHR) et les cendres volantes. Leur action résulte essentiellement de l'effet de prise et de la cristallisation de leurs constituants par hydratation. L'emploi de ces techniques s'est développé principalement en technique routière. Ces liants ont des réactions quelque peu différentes et exigent des conditions différentes pour se réaliser, cependant les effets de leur réaction sont fortement similaires.

I.2.5.1. Ciment

Le ciment est le plus vieux liant depuis l'invention de la technologie de stabilisation des sols dans les années 1960. Il peut être considéré comme un stabilisant primaire ou un liant hydraulique car il peut être utilisé seul pour provoquer l'action stabilisante nécessaire. La réaction du ciment ne dépend pas des minéraux du sol, et le rôle clé est sa réaction avec l'eau qui peut être disponible dans n'importe quel sol.

I.2.5.2. Chaux

La chaux constitue un moyen économique de stabiliser les sols. La modification de la chaux décrit une augmentation de la force apportée par la capacité d'échange de cations plutôt que l'effet de cimentation apporté par la réaction pouzzolanique. La stabilisation de la chaux peut se référer à la réaction pouzzolanique dans laquelle les matériaux de pouzzolane réagissent avec la chaux en présence d'eau pour produire des composés cimentaires. L'effet peut être apporté soit par de la chaux vive, du Cao ou de la chaux hydratée, Ca (OH) 2.

I.2.5.3. Les liants hydrauliques routiers (LHR)

Des liants spéciaux routiers (LHR) ont été étudiés et mis au point depuis plusieurs années pour le traitement des sols en place ou en centrale et pour la fabrication de matériaux d'assises de chaussées, le LHR concerné présente, pour un type de sol et une nature d'ouvrage

donnés, un comportement satisfaisant, mais toute extrapolation à d'autres paramètres de chantier comporte une part de risque qu'il convient d'évaluer pour chaque nouveau chantier.

I.3. Conclusion

En conclusion, il est essentiel de souligner l'importance de comprendre la dynamique des sédiments pour la conception et la gestion des infrastructures. En examinant les caractéristiques des sédiments, leur transport et leur dépôt, nous pouvons mieux anticiper les risques géotechniques et environnementaux, et développer des stratégies efficaces de prévention et de mitigation.

En intégrant ces connaissances dans nos pratiques d'ingénierie, nous pouvons contribuer à la durabilité et à la résilience des infrastructures faces aux défis futurs.

Chapitre II

Les méthodes de stabilisation et de traitement des sols et procédés

II.1. Introduction

Les sols constituent la base fondamentale de nombreuses infrastructures. Cependant, ils présentent souvent des propriétés mécaniques et géotechniques qui nécessitent une stabilisation ou un traitement pour répondre aux exigences de construction.

Dans ce chapitre, nous parlerons des différentes méthodes de stabilisation et de traitement des sols ainsi que les procédés associés.

II.2. La stabilisation des sols

II.2.1. Définition

La stabilisation des sols vise à améliorer les propriétés mécaniques du sol en augmentant sa résistance à la compression, sa résistance au cisaillement et sa durabilité.

II.2.1.1. Les sols à stabiliser

II.2.1.1.1. Les sols argileux

Ces sols sont riches en argiles, ce qui les rend souvent plastiques et sujets à un retrait et un gonflement importants en réponse aux variations de l'humidité. La stabilisation est souvent nécessaire pour améliorer leur résistance et leur durabilité.

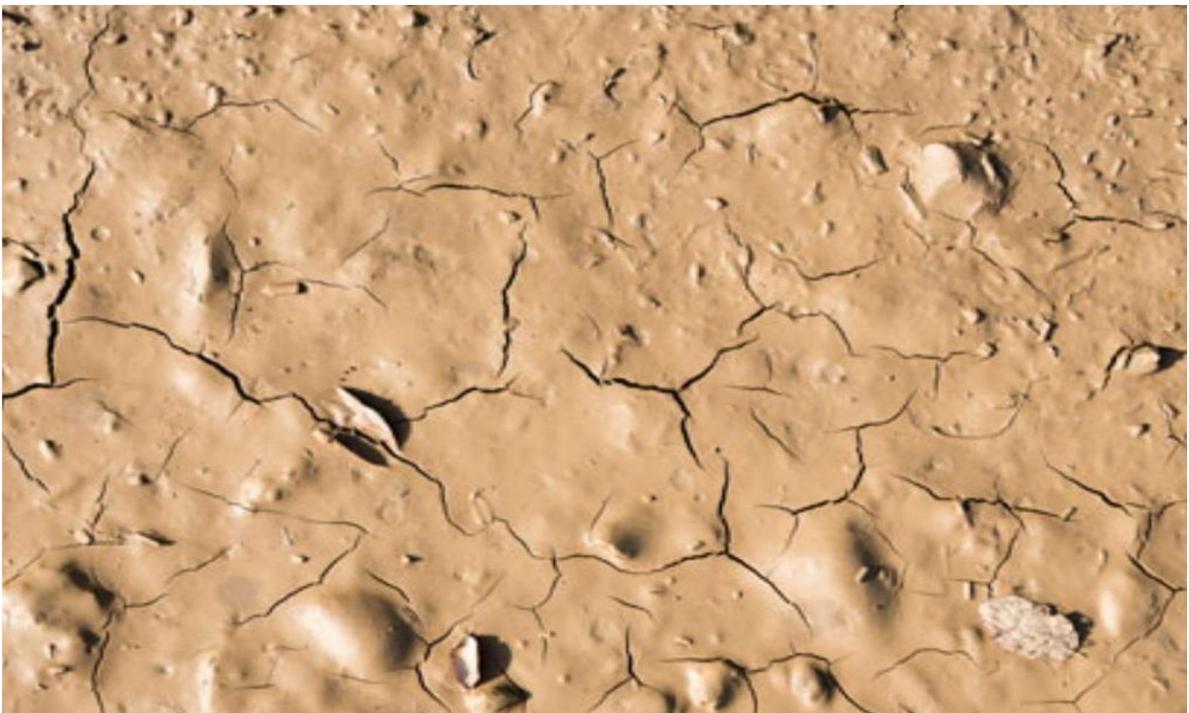


Figure II.1 : Sol argileux [3]

II.2.1.1.2. Les sols limoneux

Les sols limoneux contiennent une proportion significative de particules fines, mais sont moins plastiques que les sols argileux. Ils peuvent nécessiter une stabilisation pour renforcer leur structure et réduire leur susceptibilité à l'érosion



Figure II.2 : Sol limoneux [4]

II.2.1.1.3. Les sols sableux

Bien que les sols sableux aient une bonne capacité de drainage, ils peuvent manquer de cohésion et de résistance, en particulier lorsqu'ils sont saturés d'eau. La stabilisation peut être utilisée pour améliorer leur cohésion et leur capacité portante.



Figure II.3 : Sols sableux [5]

II.2.1.1.4. Les sols organiques

Les sols organiques sont riches en matières organiques, peuvent être instable et sujets à la décomposition.

II.2.1.1.5. Les sols saturés

Les sols saturés d'eau peuvent être instables et sujets à l'érosion. La stabilisation peut être utilisée pour améliorer leur résistance et réduire leur susceptibilité à l'érosion

II.2.1.2. Les méthodes de stabilisation

Les méthodes de stabilisation sont variées et adaptées aux caractéristiques spécifiques des sols et aux exigences des projets.

Voici quelques méthodes de stabilisation des sols, mettant en lumière leurs principes de fonctionnement et leurs applications courantes.

II.2.1.2.1. Stabilisation chimique

Cette méthode implique l'ajout de produits chimiques tels que le ciment, la chaux, ou les ajouts cimentaires (laitier, pouzzolane naturelle, cendres volantes et fumée de silice...). Pour modifier les propriétés du sol.

Ces réactions chimiques renforcent les liaisons entre les particules du sol, améliorant aussi sa stabilité.



Figure II.4 : Agents chimiques [6]

II.2.1.2.1.1. Objectifs de la stabilisation chimique

- Renforcement de la résistance: cette méthode peut être utilisée pour augmenter la résistance des sols, les rendant ainsi capables de supporter des charges plus importantes et de mieux résister aux contraintes mécaniques.
- Réduction de la plasticité: Les sols plastiques peuvent être stabilisés chimiquement pour réduire leur plasticité, ce qui diminue leur susceptibilité au retrait et au gonflement en réponse aux variations d'humidité.
- Amélioration de la cohésion: La stabilisation chimique améliore la cohésion des sols, les rendant moins susceptibles de s'éroder et de détériorer en présence d'eau

II.2.1.2.1.2. Condition d'application de la méthode de stabilisation chimique

- Type du sol: La nature du sol influence fortement le choix des agents chimiques et les méthodes de stabilisation. Par exemple les argiles peuvent être plus facilement stabilisées chimiquement que d'autre, comme les sols sableux
- Composition chimique du sol: La composition chimique du sol peut affecter sa réactivité aux agents stabilisants.
- Humidité du sol: La teneur en eau du sol peut influencer l'efficacité de la stabilisation chimique. Dans de nombreux cas, une certaine quantité d'eau est nécessaire pour activer les réactions chimiques entre les agents stabilisants et les sols.
- Température: La température peut jouer un rôle dans le processus de stabilisation chimique. Dans certains cas, des températures plus élevées peuvent accélérer les réactions chimiques et améliorer l'efficacité de la stabilisation. Cependant, des températures extrêmes peuvent également affecter négativement le processus.

II.2.1.2.1.3. Le procédé d'application de la stabilisation chimique

Le procédé d'application de la stabilisation chimique implique plusieurs étapes essentielles pour garantir l'efficacité du traitement

- Analyse du sol: Avant d'appliquer tout produit chimique, il est important de réaliser une analyse approfondie du sol pour déterminer sa composition, sa teneur en eau, et d'autres paramètres pertinents. Cette analyse permet de choisir le produit chimique approprié et de déterminer la quantité nécessaire pour atteindre les objectifs de stabilisation.
- Choix du produit chimique: En fonction des caractéristiques du sol et des objectifs du projet, un ou plusieurs produits chimiques peuvent être sélectionnés pour le traitement. Les

produits chimiques couramment utilisés dans la stabilisation chimique comprennent la chaux, le ciment, les liants hydrauliques et les polymères.

- Préparation du sol: Avant d'appliquer le produit chimique, le sol doit être préparé en le nivelant et en le compactant si nécessaire. Cela permet d'assurer une répartition uniforme du produit chimique et une efficacité maximale du traitement.
- Application du produit chimique: Le produit chimique est appliqué sur le sol à l'aide d'équipement spécifique. Il est important de veiller à une distribution homogène du produit chimique sur toute la surface traitée.
- Incorporation du produit chimique: Une fois appliqué, le produit chimique est incorporé dans le sol à l'aide de techniques de mélange, telles que le labourage ou le fraisage. Cela permet d'assurer une réaction efficace entre le produit chimique et le sol, et de garantir une stabilisation uniforme.
- Compactage: Après l'incorporation du produit chimique, le sol est compacté à l'aide de compacteurs pour améliorer sa densité et sa capacité portante. Le compactage aide également à assurer une répartition uniforme du produit chimique à travers le sol.
- Surveillance et contrôle: Tout au long du processus d'application, il est important de surveiller attentivement les conditions du sol, notamment sa teneur en eau et sa température, pour s'assurer que les objectifs de stabilisation sont atteints. Des ajustements peuvent être nécessaires en cours de route pour assurer l'efficacité du traitement.

II.2.1.2.2. Stabilisation mécanique

La stabilisation mécanique consiste à compacter le sol à l'aide de techniques telles que le compactage dynamique ou le traitement au rouleau lisse.

Ce processus réduit les vides entre les particules du sol, ce qui augmente sa densité et sa résistance



Figure II.5 : Compactage dynamique [7]

II.2.1.2.2.1. Objectifs de la stabilisation mécanique

- Renforcement de la portance: la méthode augmente la capacité portante des sols, c'est-à-dire leur capacité à supporter des charges sans subir de déformations excessives. Cela garanti la stabilité des structures construites sur le sol
- Réduction des tassements: En renforçant la structure du sol, la stabilisation mécanique peut réduire les tassements différentiels.
- Amélioration de la durabilité: En réduisant la sensibilité du sol aux variations environnementales, la stabilisation mécanique peut contribuer à prolonger la durée de vie des infrastructures en réduisant les risques de dommage et de défaillance prématurée.
- Diminution de la sollicitation de cisaillement dans le sol;

II.2.1.2.2.2. Condition d'application de la méthode de stabilisation mécanique

- Sol instable ou faible: La méthode est souvent utilisé dans des sols peu cohésifs ou avec une faible capacité portante, tels que les argiles molles ou les sables lâches
- Zones sujettes à l'érosion: Lorsque le sol est susceptible d'être emporté par l'eau ou le vent, la stabilisation mécanique peut être nécessaire pour prévenir les dommages.

- Présence de mouvement de terrain: Dans les régions d'où des glissements de terrain ou d'autre mouvement de terrain sont probables, la stabilisation mécanique peut renforcer les pentes ou les structures.
- Besoin de renforcement des sols: lorsque des fondations solides sont nécessaires pour supporter des charges lourdes, comme dans le cas de bâtiments, de routes ou de ponts, cette méthode peut être utilisée pour renforcer les sols.

II.2.1.2.3. Le procédé d'application de la stabilisation mécanique

- Le compactage du sol: utilisation de compacteurs pour comprimer le sol, augmentant ainsi sa densité et sa capacité portante.
- Consolidation: utilisation de techniques telles que le drain vertical pour réduire les mouvements de sol et augmenter sa stabilité
- Renforcement par géotextile: utilisation de géotextile ou de géo grilles pour renforcer les sols.
- Colonnes ballastées: Insertion de colonnes verticales dans le sol

II.2.1.2.3. Stabilisation thermique

Cette méthode utilise la chaleur pour modifier les propriétés du sol.

Le traitement thermique peut être effectué à l'aide de techniques telles que le chauffage par induction, le chauffage par vapeur ou le chauffage électrique.

Cela permet de dessécher le sol, d'améliorer sa résistance et de réduire sa susceptibilité aux mouvements.



Figure II.6 : Traitement thermique par chauffage par vapeur [8]

II.2.1.2.3.1. Objectifs de la stabilisation thermique

- Réduction de la teneur en eau: En éliminant l'excès d'eau du sol, on améliore sa capacité portante et sa résistance
- Amélioration de la portance du sol: En renforçant la structure du sol grâce à la chaleur
- Réduction du temps de construction: La stabilisation thermique peut accélérer le processus de préparation du sol en séchant rapidement les zones concernées.
- Contrôle de déformations: En stabilisant thermiquement les sols, on réduit les risques de tassement ou de gonflement du sol, ce qui peut prévenir les dommages aux infrastructures construites dessus.

II.2.1.2.3.2. Conditions d'application de la stabilisation thermique

- Humidité du sol: Pour obtenir des résultats optimaux, il est souvent nécessaire de réduire la teneur en eau du sol avant l'application de la chaleur. Des méthodes de drainage ou de déshydratation peuvent être nécessaires pour atteindre les niveaux d'humidité appropriés.
- Température et durée de chauffage: Ses deux paramètres du processus dépendent de la profondeur du traitement souhaité, de la composition du sol et des objectifs de stabilisation. Il est essentiel de surveiller attentivement la température du sol pendant le processus pour éviter tout dommage excessif.

- Équipement de chauffage: Le choix de l'équipement, tel que les systèmes de chauffages par induction, les générateurs de vapeur ou les éléments chauffants, dépendra de la taille du site, de la profondeur du traitement et d'autres considérations logistiques.
- Protection environnementale: Il est important de prendre en compte les impacts environnementaux potentiels de la stabilisation thermique, tels que la pollution de l'air ou la contamination des eaux souterraines. Des mesures de protection appropriées doivent être mises en place pour minimiser ces risques.

II.2.1.2.3.3. Le procédé de la stabilisation thermique

- Préparation du site: Avant de commencer le traitement thermique, le site est préparé en éliminant les obstacles et en assurant un accès adéquat pour les équipements de chauffage
- Analyse du sol: Une analyse approfondie du sol réalisée pour déterminer sa composition, sa teneur en eau et d'autres facteurs influençant le processus de stabilisation thermique.
- Réduction de l'humidité: Si nécessaire, des mesures de déshydratation peuvent être prises pour réduire la teneur en eau du sol, ce qui facilite le processus de chauffage et améliore l'efficacité de la stabilisation thermique.
- Application de la chaleur: Des équipements spécifiques sont utilisés pour chauffer le sol de manière contrôlée. Cela peut être réalisé à l'aide de diverses techniques, telles que le chauffage par induction, les générateurs de vapeurs, ou les éléments chauffants intégrés dans le sol.
- Surveillance continue: pendant le processus, la température du sol est surveillée.
- Refroidissement et consolidation: Une fois les objectifs atteints, le sol est progressivement refroidi. Pendant cette phase, des réactions de consolidation peuvent se réduire, renforçant ainsi la structure du sol.
- Evaluation des résultats

II.3. Le traitement des sols

II.3.1. Définition

Le traitement des sols vise à modifier les caractéristiques physiques, chimiques ou biologiques du sol pour répondre aux besoins spécifiques du projet de construction. Parmi les méthodes de traitement utilisées on trouve :

II.3.2. Les méthodes de traitements

Il existe plusieurs méthodes de traitement des sols, chacune adaptée à des conditions spécifiques et à des objectifs particuliers.

II.3.2.1. Traitement à la chaux

L'ajout de chaux au sol réagit chimiquement avec les particules d'argiles, augmentant la plasticité du sol et améliorant sa capacité portante.

Ce traitement est souvent utilisé pour stabiliser les sols argileux.



Figure II.7 : Traitement du sol à la chaux [9]

II.3.2.2. Traitement à la biologie des sols

Cette méthode utilise des micro-organismes tels que les bactéries, les champignons et les enzymes pour décomposer les contaminants organiques présents dans le sol.

Le traitement biologique peut être utilisé pour dépolluer les sols contaminés par des hydrocarbures ou d'autres substances toxiques.

II.3.2.3. Traitement à base de matériaux recyclés

Le recyclage des matériaux de construction, tels que les granulats recyclés peut être utilisé pour traiter les sols en remplacement partiel ou total des matériaux naturels.

Cela permet de réduire les coûts de construction et de minimiser l’empreinte environnementale.



Figure II.8 : Granulats recyclés [10]

II.4. Conclusion

Les méthodes de stabilisation et de traitement des sols offrent une gamme de solutions pour améliorer les propriétés des sols en vue de projet de construction.

En choisissant la méthode appropriée en fonction des caractéristiques du sol traité (granulométrie, composition, teneur en eau) et des exigences du projet. Il existe un grand nombre de procédés différents, le but est de trouver la solution la plus efficace et la plus économique. Il est possible de garantir la stabilité et la durabilité des infrastructures construites sur ces sols. S.

Chapitre III
Caractérisation du sol à l'état
Naturel

III.1. Introduction

L'étude du comportement d'un matériau passe par l'identification de sa structure et la définition de ses propriétés physiques, mécaniques et minéralogiques. La caractérisation des sédiments revêt une importance capitale dans le domaine de la géotechnique, offrant des informations cruciales pour la conception et la réalisation de projets d'ingénierie. En comprenant les propriétés physiques, et mécaniques des sédiments, les ingénieurs peuvent évaluer leur comportement sous contrainte, anticiper les risques géotechniques et concevoir des solutions efficaces pour la construction et la protection des infrastructures.

Le contenu de ce chapitre concerne l'identification et la caractérisation du sédiment marin utilisé dans cette étude. Il présente le résultat d'un ensemble d'essais effectués en laboratoire afin de déterminer la constitution du matériau étudié et de définir ses caractéristiques. L'objectif de ces essais de caractérisation est de définir un procédé de traitement par liant hydraulique. L'ensemble des essais effectués sont: les essais chimiques (DRX, FRX), essais physiques (Granulométrie par tamisage) et essais mécaniques (Proctor, cisaillement œdomètre, CBR et perméabilité).

III.2. Localisation du site de prélèvement et objectif :

Le matériau utilisé dans cette étude est un sédiment prélevé de dragage du port de Bejaïa. Ce port a une situation géographique privilégiée qui est, un relais entre l'Est et le Centre du pays, ainsi qu'une zone d'ouverture sur la mer pour l'arrière-pays. Le port de Bejaïa est accessible par un chenal extérieur large de 320 m et dragué à 13,50 m, il est composé de trois bassins.

Les matériaux choisis dans cette étude sont pris lors de la réalisation des travaux de dragage des bassins du port, dans le cadre du projet 'Travaux de protection maritime frontale du bout de piste seuil 26 Aéroport Bejaïa'. Le prélèvement d'échantillon de matériau issu du dragage à été effectué au niveau du stock constitué par l'entreprise sur le site du projet. L'identification de ce matériau a pour but de savoir s'il est réutilisable et quelle sont les différentes possibilités de son utilisation.

Le fait que le volume d'envasement des trois bassins du port de Bejaïa, selon le chiffre donné par le LEM (Laboratoire d'Etudes Maritimes), depuis 2005 est d'environ 800 000 m³, soit une perte d'une moyenne de 1,2 mètre de tirant d'eau, l'utilisation de ces matériaux sera une solution et un apport économique significatif.

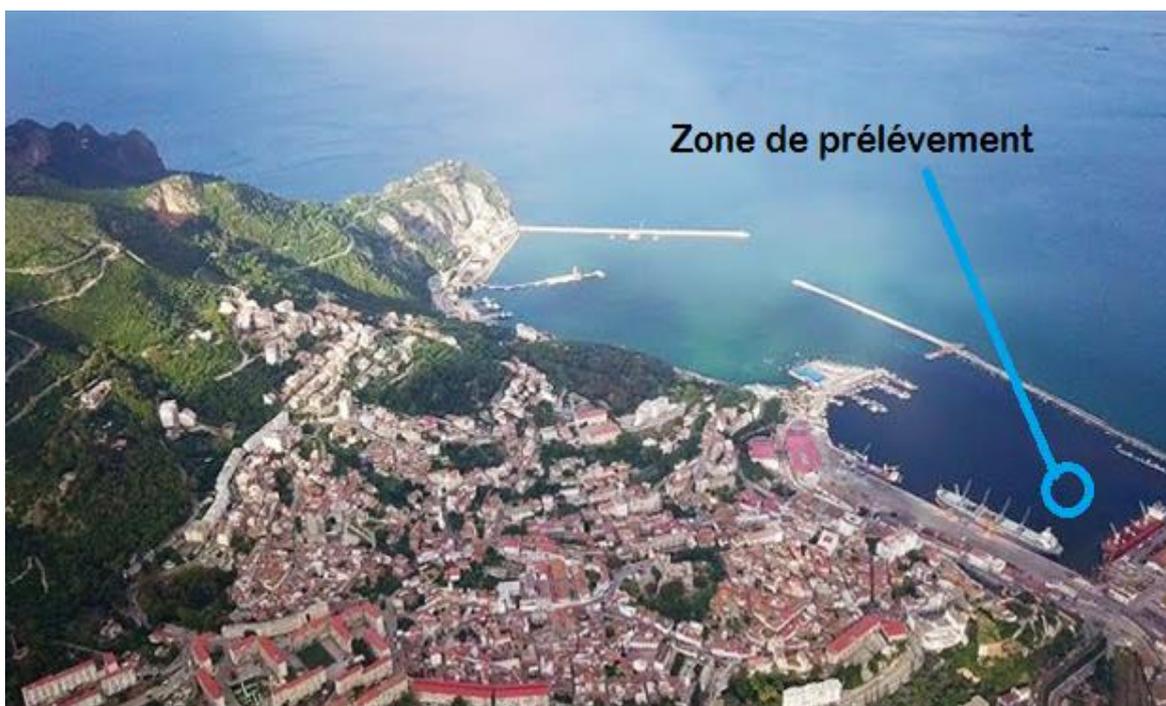


Figure III.1 : Localisation de la zone de prélèvement

Tableau III.1 : Tableau récapitulatif des taux d'envasement du port de Bejaia (EPB)

Zone de dragage	Cote nominale	Volume D'envasement	Surface totale de la zone à draguer (m ²)	Taux d'envasement de la zone à draguer
Passe d'entrée	- 12.00	56 517,33	75 793,30	0,75
Chenal d'accès	- 12.00	52 680,33	55 038,80	0,96
Arrière port	- 12.00	338 385,33	190 111,90	1,78
Quai de la gare et sud-ouest	- 10.50	150 523,33	80 112,30	1,88
Vieux port	- 8.50	84 437,33	128 939,40	0,65
Appontement Pétrolier	- 13.50	117 456,33	176 720,40	0,66
Total		800 000, 00	706 716,10	

III.2.1.1. Caractérisation et identification du sédiment

L'identification du sédiment étudié est dans le but de déterminer s'il est réutilisable directement et/ou de définir d'autres procédures et les différentes possibilités de son utilisation. Une série d'essais a été effectuée. Selon les normes, ces essais sont les suivants :

- Analyse granulométrique (norme XP P 94-091)
- Essai Proctor (Norme NF P 94- 093)
- Essai de Cisaillement défecte (NF 94- 071- 1)
- Essai de perméabilité (NF X 30- 418)
- Essai CBR
- Essai Œdométrique (XPP 94- 090-1)
- Analyse minéralogiques (DRX et FRX)

III.2.1.1.1. Analyse granulométrique

Cet essai a pour but la détermination de la granularité des granulates dont les dimensions sont comprises entre 80 μm et 80mm. La forme de la courbe granulométrique est aussi extrêmement importante, elle est caractérisée par deux coefficients qui sont le coefficient d'uniformité C_u (dit de Hazen) et le coefficient de courbure C_c . Ils servent à la description de la granulométrie et sont fonction de d_x (d_{10} , d_{30} , d_{60}) qui est par définition le diamètre du tamis dont le tamisât cumulé est égale à x % (10%, 30%, 60%)

➤ **Coefficient d'uniformité C_u :**

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

➤ **Coefficient de courbure C_c :**

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}}$$



Figure III.2 : Dispositif utilisé dans les essais d'analyse granulométrique.

La série de tamis a été choisie selon la norme XP P 94-091. Les tamis pris sont respectivement: 4mm, 2mm ; 1mm, 0,5mm, 0,25 mm, 0,125mm, 0,08mm, 0,063 mm (figure 3.2). Après séchage du sédiment à l'étuve pendant 24h à une température de 105°C on a procédé à l'analyse granulométrique de ce sédiment. Les résultats de l'analyse sont présentés sur la figure (3.3).

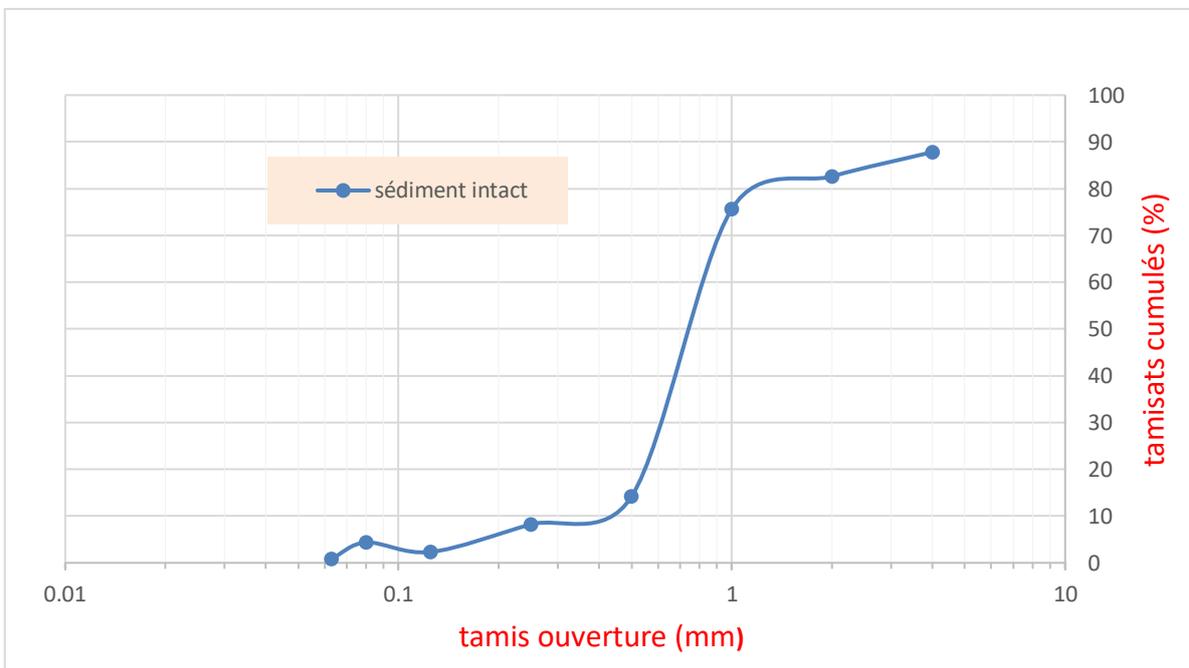


Figure III.3 : Courbe granulométrique du sédiment à l'état naturel

La courbe granulométrique de la figure 3.3 montre que le pourcentage des particules entre 0.063mm et 0.63mm atteint les 30%.

Les essais de compactage effectués sur les échantillons de sédiment, séchés à l'étuve pendant 24h humidifiés à différentes teneurs en eau ont donné les résultats montrés dans le tableau 3.3.

$$\gamma_d = \frac{\gamma_h}{1 + w} = \frac{p_h}{v(1 + w)}$$

γ_d : Poids volumique sec (kg/ m³)

γ_h : Poids volumique humide (kg/ m³)

w : Teneur en eau moyenne (%)

P_h : (masse du sol humide + moule) - (masse du moule vide)

V : le volume de moule

Tableau III.3 : Les paramètres Proctor du sédiment étudié

W moyennes (%)	4,8	9,85	10,73	11,26	14,24
γ_d (kg/ m ³)	1762,68	1784,61	1856,55	1857,23	1784,67

A partir des résultats obtenus on trace la courbe Proctor du sédiment:

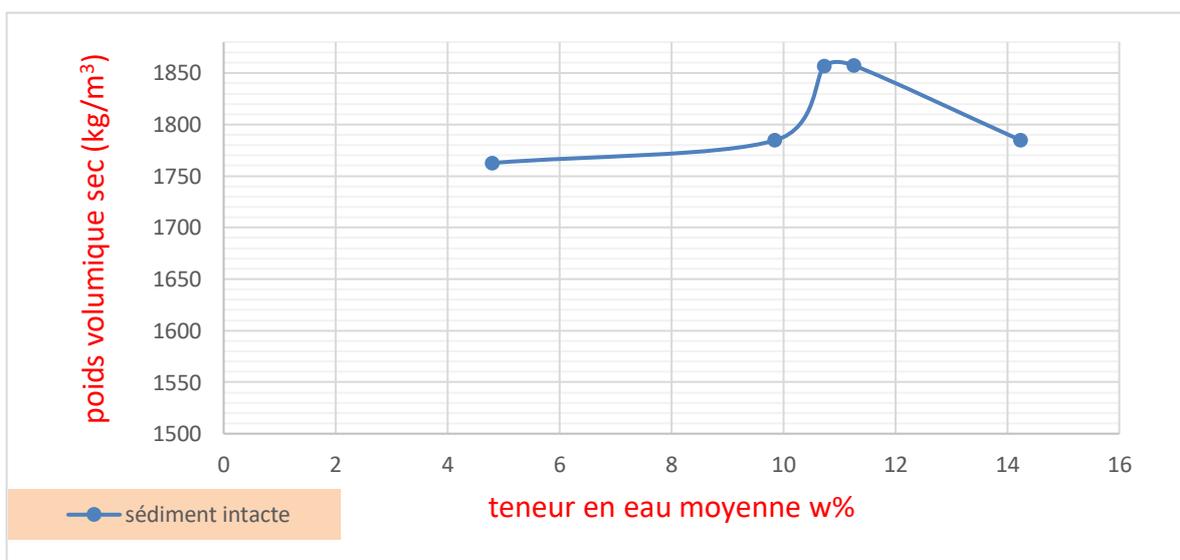


Figure III.5 : La courbe Proctor du sédiment

Donc les caractéristiques Proctor du sol selon la courbe de la (figure 3.5) sont:

Tableau III.4 : Les caractéristiques Proctor du sédiment

	γ_d (kg/m ³)	w optm (%)
Sédiment	1857,23	11,26

III.2.1.1.1.2. Le cisaillement

Pour la détermination des caractéristiques de cisaillement du matériau étudié on a utilisé le dispositif de cisaillement direct présenté sur la figure (3.6).



Figure III.6 : Dispositif de cisaillement

Le but de cet essai consiste à déterminer les caractéristiques de cisaillement du sédiment en procédant au cisaillement direct d'un échantillon sous charge constante. Pour les contraintes normales respectives de 0.5bar, 1bar, 2bars et 3 bars on trace les courbes contraintes tangentielles en fonction des déformations (figure 3.7) et déformation en fonction du temps (figure 3.8)

- Le type réalisé est d'essai non consolidé et non drainé (UU) et la vitesse est 1 (mm/ min)
- Les valeurs de $T_{max} = 10$ minet pour les différentes contrainte normales utilisées dans les essais.

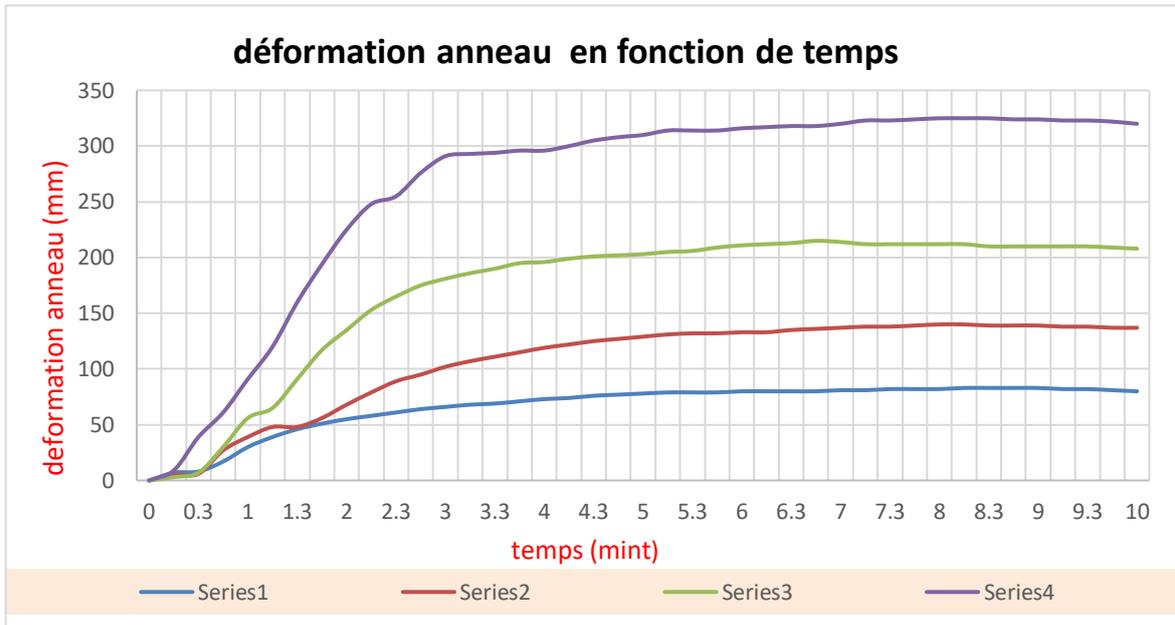


Figure III.7 : courbes déformation anneau en fonction du temps

A partir la figure 3.7, les résultats d'essai de cisaillement obtenus pour les différentes valeurs des contraintes normales, permet de tracer la courbe intrinsèque du sédiment étudié, et de déterminer son angle de frottement interne ϕ et sa cohésion C.

En fonction des contraintes normales (0,5/ 1 / 2 et 3 bars) on trace la courbe de la contrainte de cisaillement.

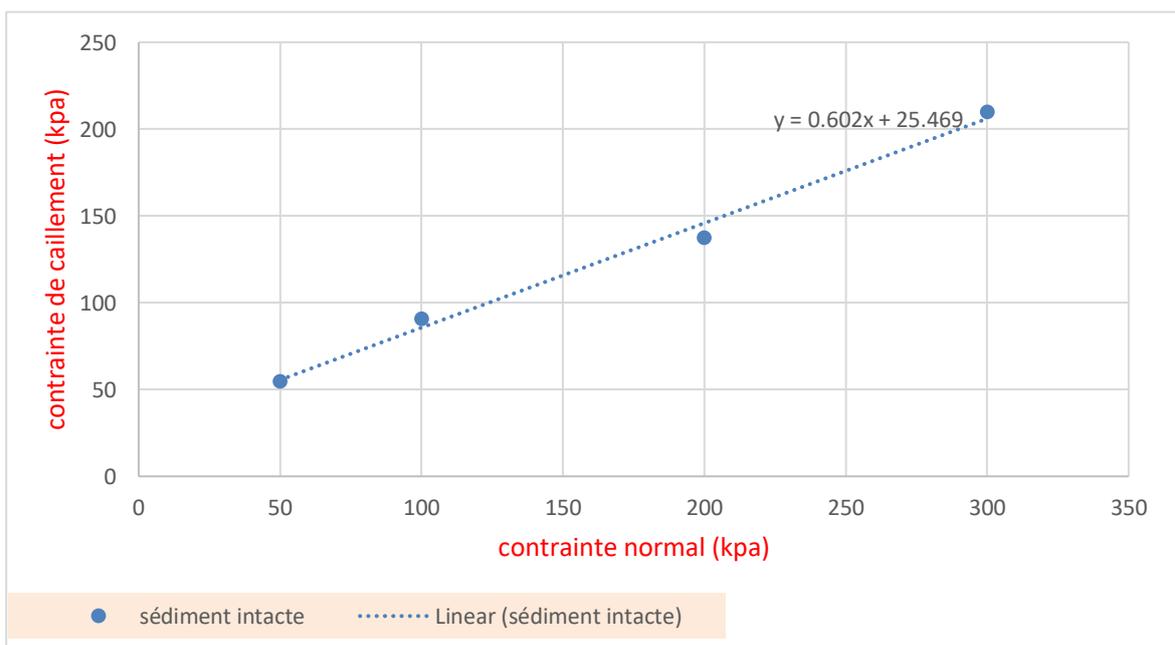


Figure III.8 : courbe contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte normal

De la courbe (figure 3.8) on détermine les paramètres de cisaillement (l'angle de frottement et la cohésion). Les résultats obtenus ont donné une valeur de 31.047° pour l'angle de frottement et une cohésion de 25,469 kpa.

III.2.1.1.1.3. Essai CBR

L'essai CBR est un essai de portance (aptitude des matériaux à supporter les charges) des remblais et des couches de formes compactées des ouvrages routiers. Il s'agit de déterminer expérimentalement des indices portants (IPI, CBR) qui permettent :

- D'établir une classification des sols (GTR) ;
- D'évaluer la traficabilité des engins de terrassement (IPI) sw ;
- Déterminer l'épaisseur des chaussées (CBR augmente \Rightarrow épaisseur diminue)

Cet essai en laboratoire destiné à déterminer par poinçonnement la portance du sédiment compacté dans les conditions de l'essai Proctor. L'objectif de l'essai est de définir la charge apportée par le pneu sur la chaussée, poinçonnant le sol de fondation. Ce poinçonnement est d'autant plus petit que l'épaisseur de la chaussée est grande.



Figure III.9 : Dispositif de l'essai CBR

Tableau III.5 : Classification de la portance des sols selon le GTR

Classes de portance	Portance	CBR [%]
S0	portance très faible	CBR < 3
S1	portance faible	3 < CBR < 6
S2	portance moyenne	6 < CBR < 12
S3	portance élevée	12 < CBR < 25
S4	portance très élevée	25 CBR

Tableau III.6 : Classification du sol selon les indices le CBR

Classe du sol support	S ₀	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄
Indice CBR	>40	25-40	10-25	05-10	< 05

La formule de indice portance immédiat :

$$IPI = \max \left(\frac{f(2,5)}{13,35} ; \frac{f(5)}{19,93} \right) * 100$$

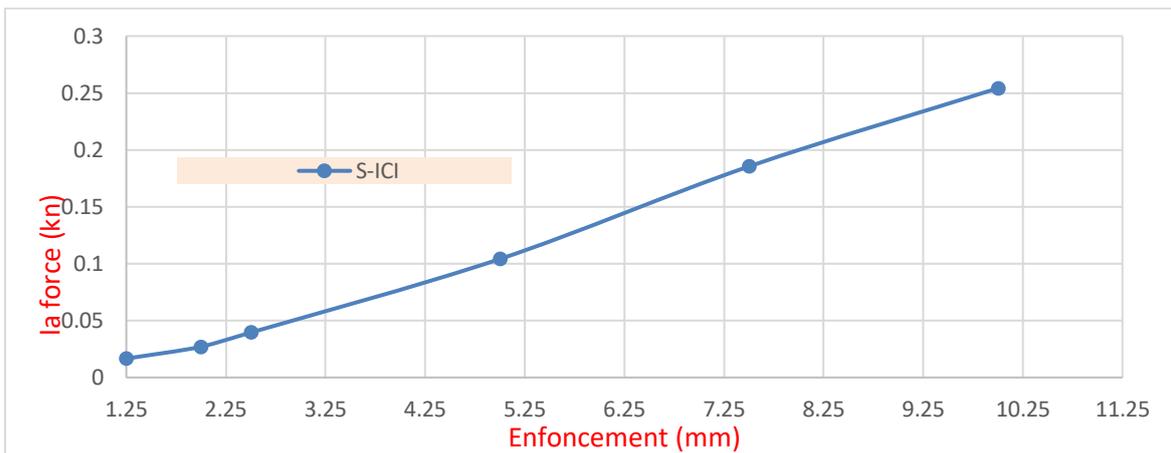


Figure III.10 : courbe de La force en fonction de l'enfoncement I CBR immédiat

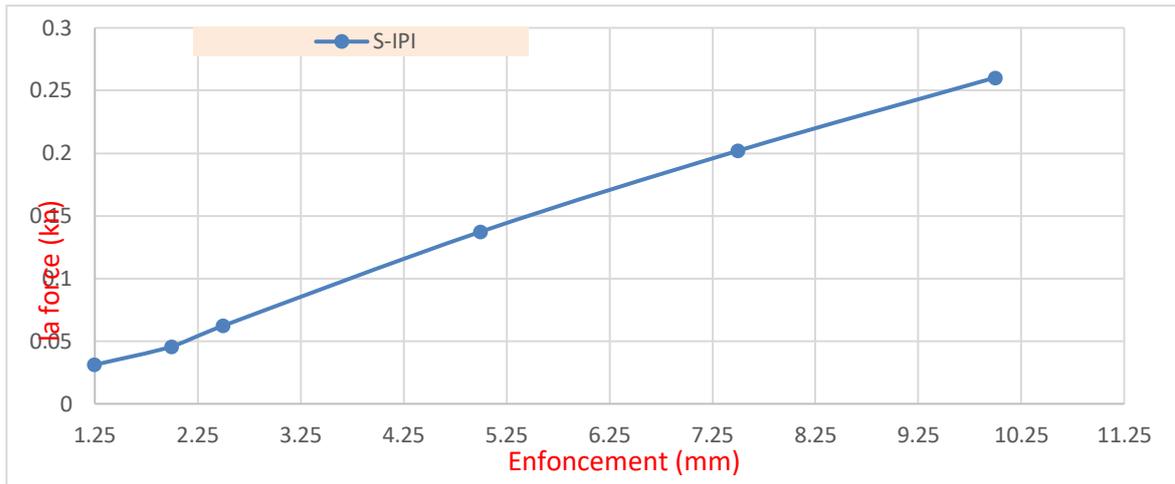


Figure III.11 : courbe force en fonction de l'enfoncement IPI

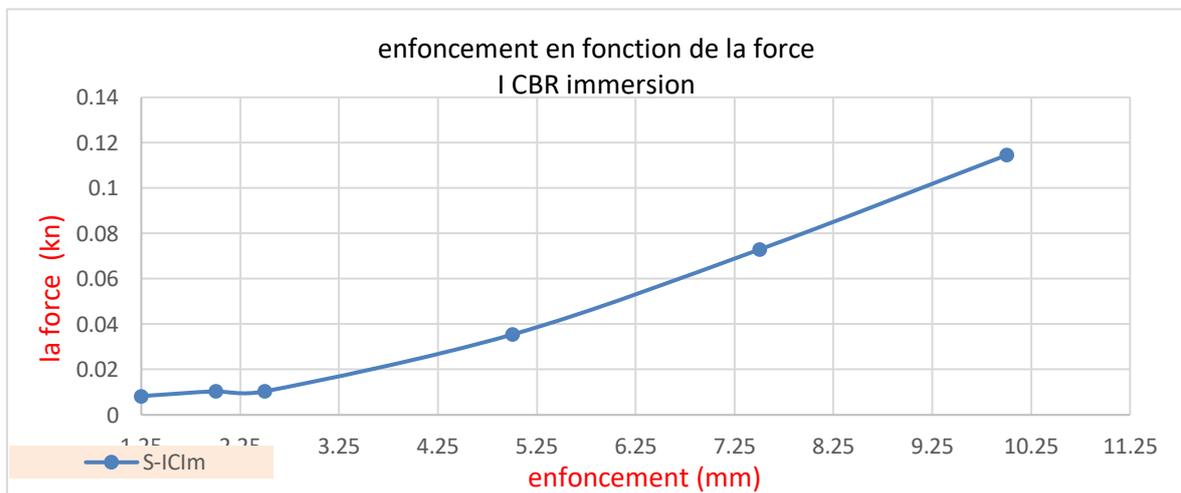


Figure III.12 : Courbe force en fonction de l'enfoncement (ICBR immersion)

Tableau III.7 : Classification du Sédiment selon les indices CBR calculé

Indice	IPI	I CBR immédiat	I CBR immersion	Portance du sol
Valeur	0,69	0,52	0,17	Portance très faible

Après le classement des résultats obtenus selon les tableaux des indices IPI, I CBR immédiat et I CBR immersion notre sol est classé comme un sol de portance très faible.

III.2.1.1.4. La perméabilité

L'essai a pour but de déterminer en laboratoire, le coefficient de perméabilité à l'eau, des sols. Ce coefficient encore appelé coefficient de Darcy, peut se déterminer suivant deux méthodes: à charge constante ou à charge variable décroissante. Le dispositif utilisé pour la mesure de la perméabilité est illustré sur la figure 3.13.



Figure III.13 : Illustration du dispositif de mesure de Perméabilité

Pour mesurer la perméabilité au l'laboratoire, on utilise généralement un appareil appelé perméamètre qui permet à faire des essais à charge constante ou à charge variable.

L'essai de perméabilité à charge constante est particulièrement adapté aux sols granulaires (sables et graviers) ayant une perméabilité relativement élevée ($k > 10^{-5}$).

Le principe de l'essai repose sur la loi de darcy, qui établit une relation linéaire entre la vitesse d'écoulement et le gradient hydraulique dans un milieu poreux saturé :

$$V = K \times I$$

Où :

V : vitesse d'écoulement (m/s)

K : coefficient de perméabilité (m/s)

I : gradient hydraulique (sans dimension)

Le coefficient de perméabilité à charge constante est donné par la relation suivante :

$$K = \frac{H}{t} \times \frac{V}{A \times h}$$

Où :

K : coefficient de perméabilité (m/s)

H : volume d'eau écoule (m³)

L : longueur de l'échantillon (m)

A : section de l'échantillon (m²)

h : différence de charge hydraulique (m)

t : durée de la mesure (s)

➤ Procédure d'essai de perméabilité à charge constante :

Préparation de l'échantillon :

Remplir le perméamètre avec l'échantillon sédiment intact en veillant à éviter la ségrégation des particules.

Saturer le sédiment intact en faisant circuler de l'eau de bas en haut pour éliminer l'air piégé.

Mise en place de l'essai :

Connecter le réservoir d'eau à niveau constant du perméamètre.

Etablir une différence de charge hydraulique constante entre l'entrée et la sortie du perméamètre.

Réalisation de l'essai :

Mesurer le volume d'eau écoulé (H) pendant un intervalle de temps (t).

Répéter la mesure plusieurs fois pour obtenir une valeur moyenne.

Tableau III.8 : Classification de type de sol par rapport au coefficient de perméabilité

Nature	Ordre de grandeur de k (m/s)	Degré de perméabilité	Méthode de mesure en laboratoire
Graviers moyen à gros	10^{-1} à 10^{-3}	Très élevée	Perméabilité à charge constante
Petits graviers, sable	10^{-3} à 10^{-5}	Assez élevée	
Sable très fin, sable limoneux	10^{-5} à 10^{-7}	Faible	Perméabilité à charge variable
Limon compact, argile Silteuse	10^{-7} à 10^{-9}	Très faible	
Argile franche	10^{-9} à 10^{-12}	Pratiquement imperméable	

D'un Selon le tableau de la classification des sols par rapport au coefficient de perméabilité obtenus pour le sédiment qui est de l'ordre de $2 \cdot 10^{-7}$ (m/S) alors le degré de perméabilité est faible, La nature de sédiment selon le coefficient K ressemble à c'elle d'un Limon compact ou d'un sable limoneux.

Le changement de classification du sol, passant d'un sable propre mal gradué à un sable limoneux, peut être directement lié à l'appareil utilisé en laboratoire et à la méthode de préparation de l'échantillon.

Plusieurs raison peuvent expliquer ce changement, notamment :

- Méthode d'analyse et de classification
- Préparation de l'échantillon en laboratoire
- Variation dans la méthode d'échantillonnage sur site

III.2.1.1.1.5. Essai œdométrique

L'essai œdométrique a pour but de déterminer les caractéristiques de compressibilité d'un sol qui permettent d'estimer l'affaissement d'un massif de sol, sous une charge donnée comme le cas des chaussé et routes. Cet essai permet :

- D'établir la courbe de consolidation et la courbe de compressibilité de sol étudiée.
- De déduire le coefficient de consolidation (Cv) et l'indice de compressibilité (Cc).
 - Le coefficient de consolidation (cv) :

$$C_v = \frac{0,848 \times H^2}{4t_{90}}$$

- L'indice de compressibilité (C_c) :

$$C_c = 0,848 * H^2$$

Tableau III.9 : Classification du sol selon C_c

$C_c < 0,02$	Sol incompressible	Sable
$0,02 < C_c < 0,05$	Sol très peu compressible	
$0,05 < C_c < 0,1$	Sol peu compressible	
$0,1 < C_c < 0,2$	Sol moyennement compressible	Argile raide (Kaolinite)
$0,2 < C_c < 0,3$	Sol assez fortement compressible	Argile moyenne
$0,3 < C_c < 0,4$	Sol très compressible	
$C_c > 0,5$	Sol extrêmement compressible	Argile molle (montmorillonite)

L'essai consiste à exercer des cycles de chargement et de déchargement sur un échantillon drainé sur deux faces, à l'intérieur d'une cellule rigide.

$$M = 500g + 500g + 1kg + 2kg + 2kg$$

Les mesures de déplacement vertical sont faites avec un minimum de lectures effectuées au voisinage de la série suivante:

15s ; 30s ; 1min ; 2min ; 3min ; 4 min ; 8 min ; 15 min ; 30min ; 60min ; 2h ; 4h ; 24h

La hauteur de références pour chaque éprouvette est celle déterminée juste avant la mise en eau :

$$H_i = H_0 - \Delta H_i$$

H_i est la hauteur juste avant la mise en eau de l'éprouvette soumise à la contrainte d'essai.

H_0 est la hauteur de l'éprouvette après mise en place dans l'œdomètre et lorsqu'elle n'est soumise qu'à la contrainte verticale axiale appliquée à l'éprouvette, exprimée en newtons.

ΔHi est la variation de hauteur de l'éprouvette sous la contrainte d'essai avant tout apport d'eau.

Pour le sol à l'état naturel les résultats obtenus ont donné les valeurs de coefficient de Consolidation $C_v = 0.821 \times 10^{-3} \text{ (m}^2/\text{s)}$ et un indice de compressibilité $C_c = 0.09$ ce qui conduit à classer le sédiment comme étant un sol peu compressible.

III.2.1.1.2. Caractérisation minéralogiques et chimiques

La caractérisation minéralogique et chimique est une étape incontournable pour une valorisation en techniques routières. Elle permettra de comprendre les phénomènes d'hydratation lors d'un mélange des sédiments avec des liants hydrauliques, d'évaluer les taux de pollution des sédiments de dragage et de détecter les phases qui constituent les matériaux. Dans cette partie on a deux analyses: la diffraction des rayons X (DRX), la fluorescence X (FX) Plasma) ont été effectuées afin de décrire les différentes propriétés minéralogiques et chimiques du sédiment.

III.2.1.1.2.1. Diffraction des rayons X (DRX)

La diffraction des rayons X a été utilisée pour déterminer les phases cristallines des sédiments.

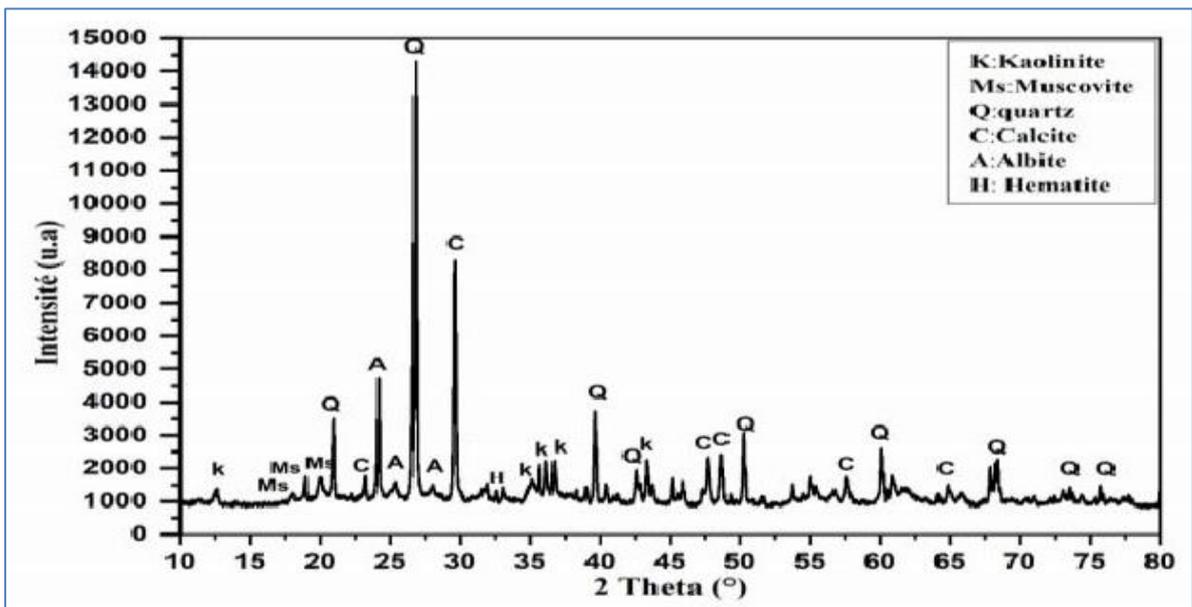


Figure III.14 : Diagramme de DRX du sédiment

L'analyse minéralogique déterminée par DRX présentée dans la figure (3.13) met en évidence la prédominance du Quartz (SiO_2), de la calcite (CaCO_3), de l'albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), de la kaolinite ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), de la muscovite ($\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH}, \text{F})_2$) et de l'hématite (Fe_2O_3). Les pics les plus importants de ces phases sont de 21,95, 23,05, 25,95, 12,65, 8,45 et 32,65 $^\circ 2\theta$ respectivement pour de quartz, calcite, albite, kaolinite, muscovite et l'hématite.

III.2.1.1.2.2. Fluorescence X (FX)

La spectrométrie de fluorescence X (FX ou XRF pour X-ray fluorescence) est une technique d'analyse élémentaire utilisant une propriété physique de la matière. D'une part elle permet de quantifier les éléments chimiques présents dans un échantillon et d'autre part elle vient en complément de la diffraction des rayons X en permettant de mieux identifier les phases majoritaires.

Tableau III.10 : Classification du sol selon Cc

El	32, 75%	Mg	1,85%
Al	8, 48%	Si	28,05%
S	0, 16%	K	1,07%
Ca	20, 54%	Ti	0,3359%
V	0, 01927%	Cr	0,01785%
Mn	0, 05085%	Fe	6,57%
Cu	0, 0032%	Zn	0,014%
As	0, 0028%	Rb	0,00465%
Sr	0,07349%	Y	0,00156%
Zr	0,0091%		

Les analyses par fluorescence aux rayons X (FRX) ont montré selon le (Tableau 3.10) que le sédiment contient respectivement 32,75%, 28,05%, 8,48% et 6,57% d'El, Si, Al et Fe, il représente les composantes les plus abondants dans le matériau.

III.3. Conclusion

L'identification du sédiment et la détermination de ses caractéristiques est une étape très importante. A partir du résultat obtenu on peut avoir une idée générale sur sa réutilisation soit directement soit après traitement.

Selon les résultats de caractérisation de sédiment nous remarquons que ce sol est un matériau sableux et graveleux avec fine. La caractérisation physique a montré que le matériau peut être considéré comme un sable (propre mal gradué). Sa fraction 0/2 (mm) est un sable silteux et argile Silteuse, peu compressible de perméabilité très faible, le sédiment est un matériau de faible portance. Le sédiment est inorganique (le taux de matière organique $M.org < 3\%$), avec un angle de frottement de 31,047.

Pour son utilisation comme matériaux de remblais ou dans les couches de chaussée il est préférable d'améliorer ses caractéristiques mécaniques par un traitement préalable.

Chapitre IV
Traitement du sol avec du liant
hydraulique

IV.1. Introduction

La valorisation des sédiments dragués du port passe par une amélioration de leurs caractéristiques physico-mécaniques et géotechniques. L'amélioration de ces caractéristiques peut être effectuée par plusieurs méthodes. Le choix d'une méthode adéquate dépend de plusieurs facteurs à savoir des facteurs techniques, économiques et environnementaux. Aussi le choix de la méthode peut dépendre des objectifs visés en termes de résistance et durabilité.

Dans cette partie de ce travail on va présenter les résultats de l'étude expérimentale effectués sur le sédiment prélevé au niveau du port de Bejaia. Cette étude consiste en l'amélioration des caractéristiques géotechnique du sédiment en incorporant des fractions massique d'un liant hydraulique qui est dans notre cas le ciment. À chaque adition d'une fraction de ciment on effectue une série d'essais afin de suivre l'évolution des différents paramètres. Les résultats obtenus ont montré une évolution significative des différentes caractéristiques du matériau.

IV.2. Traitement du sédiment avec le liant hydraulique

Le sédiment marin collecté au niveau du port de Bejaia a été pris à son état naturel. Le matériau en question a été séché naturellement pendant 15 jours à l'aire libre. Après sa caractérisation à l'état naturelle et la détermination des différents paramètres géotechnique un procédé de traitement a été définit. Pour le traitement du sédiment il a été opté pour l'incorporation de fractions massiques de ciments. Les fractions massiques utilisées sont respectivement 2%, 4% et 6%. Après incorporation de chaque fraction il à été procédé à effectuer des séries d'essais afin de montrer l'effet de l'ajout du liant hydraulique sur le sédiment traité.

Après séchage du matériau à l'état naturel, on a procédé à l'incorporation des différentes fractions de ciment séparément. Le mélange a été effectué à l'aide d'un malaxeur pour assure une homogénéité des échantillons. Après malaxage à l'état sec, une quantité d'eau équivalente à celle obtenue pour la teneur en eau optimale lors de l'essai Proctor normale sur le sédiment à l'état naturel est ajoutée pour le mélange ainsi obtenu. Pour favoriser les réactions chimiques entre les constituants minéralogiques du sol et du sédiment et permettre l'hydratation du ciment le mélange ainsi obtenues est l'essai à l'aire libre à une température ambiante pendant 24heures. Après séchage une série d'essais est effectuée sur les échantillons du matériau traité.

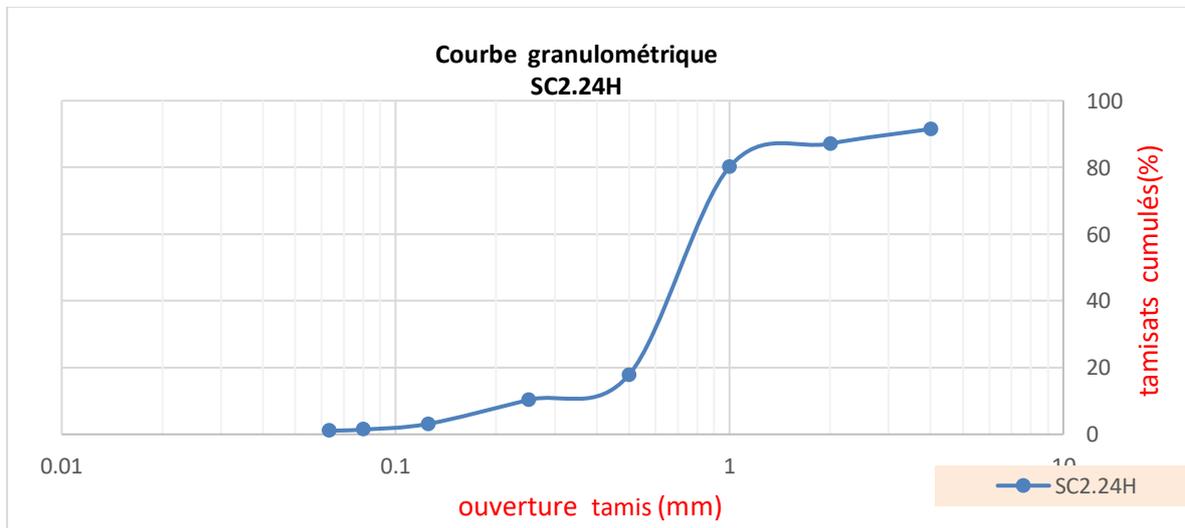
IV.3. Etude de l'évolution de la granulométrie

L'ajout du liant hydraulique au sédiment va conduire à la modification de sa granulométrie, d'où la nécessité d'effectuer l'analyse granulométrique à chaque fois qu'on ajoute une fraction de liants. L'essai de la granulométrie consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas, dans notre cas la série de tamis prise selon la (Norme française XP P 94-091) est (4 / 2 / 1 / 0,5 / 0,25 / 0,125 / 0,08 / 0,063) mm. L'échantillon est préparé par séchage à l'air libre. Après séchage, le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne de tamis pendant 30 min. Chaque refus de tamis est pesé à l'aide d'une balance de précision, préalablement stabilisée sur un plan parfaitement horizontal.

IV.3.1.1. Le calcul des coefficients

L'analyse granulométrique a été effectuée après ajout du liant et son humidification par une quantité d'eau qui correspond à la teneur en eau à l'optimum Proctor obtenu pour le sédiment à son état naturel. Les coefficients C_u et C_c sont calculés après 24h de l'ajout du ciment avec de l'eau.

Les résultats de l'analyse granulométrique sont présentés sur les figures (4.2) et 4.3)



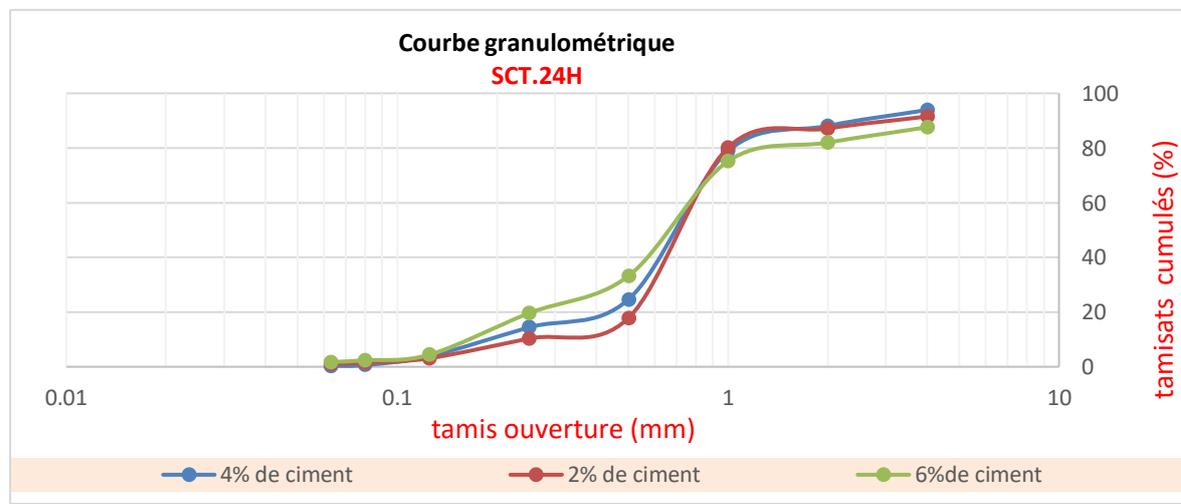
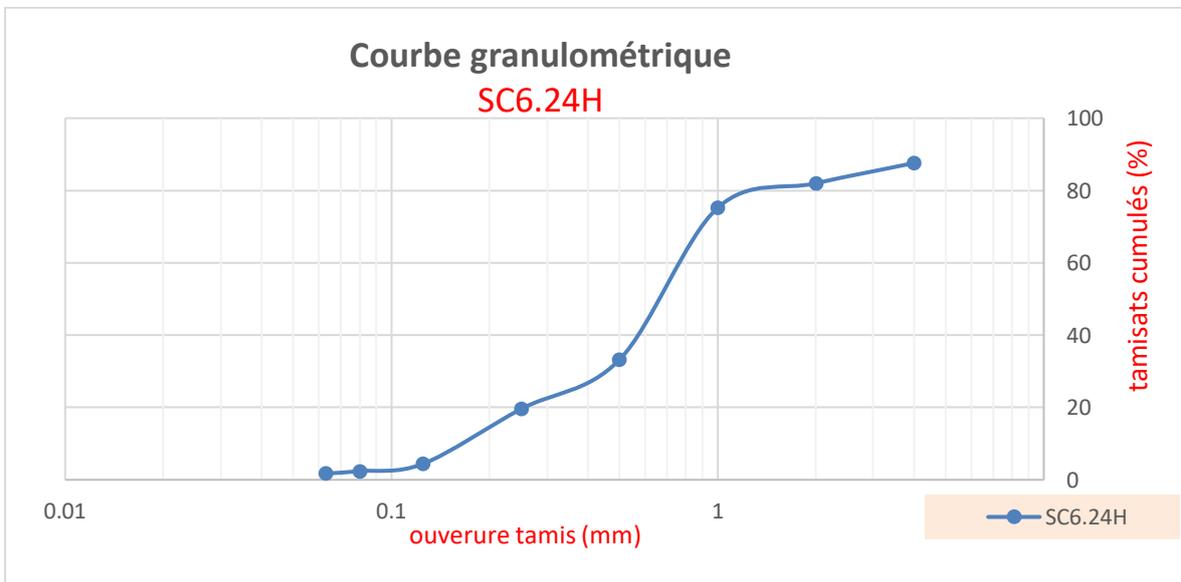
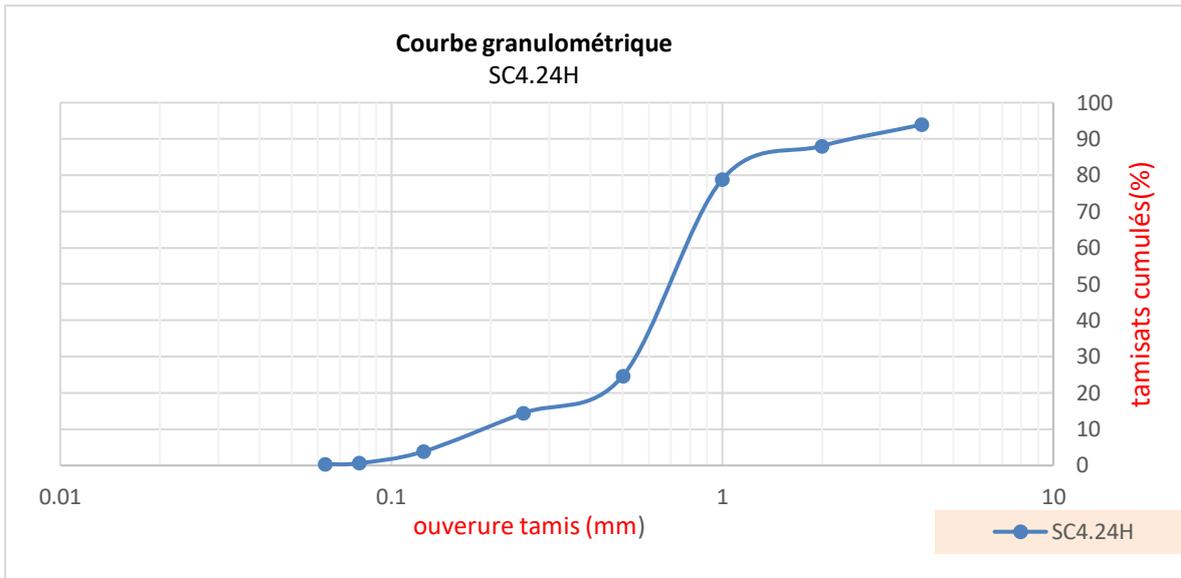


Figure IV.1 : La courbe granulométrique du sédiment avec les pourcentages ciment (24h)

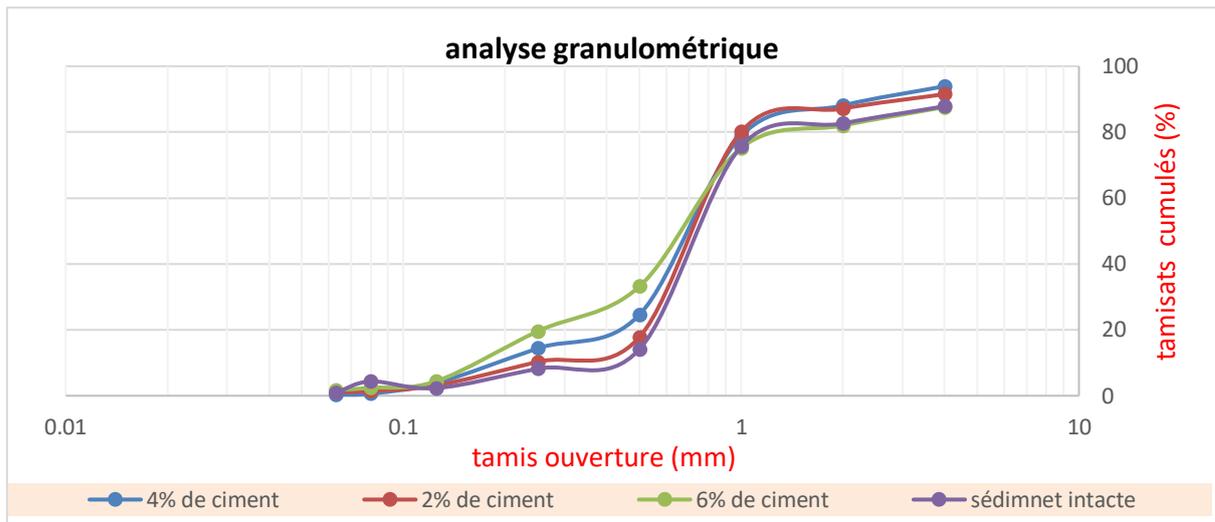


Figure IV.2 : La courbe granulométrique du sédiment traité

Tableau IV.1 : Les coefficients C_u et C_c des échantillons après 24h

	Coefficient de hazen C_u	Coefficient de courbure C_c	Classification de l'échantillon
Sédiment +2% de ciment	4	4	Sable propre mal gradué
Sédiment +4% de ciment	4	4	Sable propre mal gradué
Sédiment +6% de ciment	4	1	sable propre mal gradué

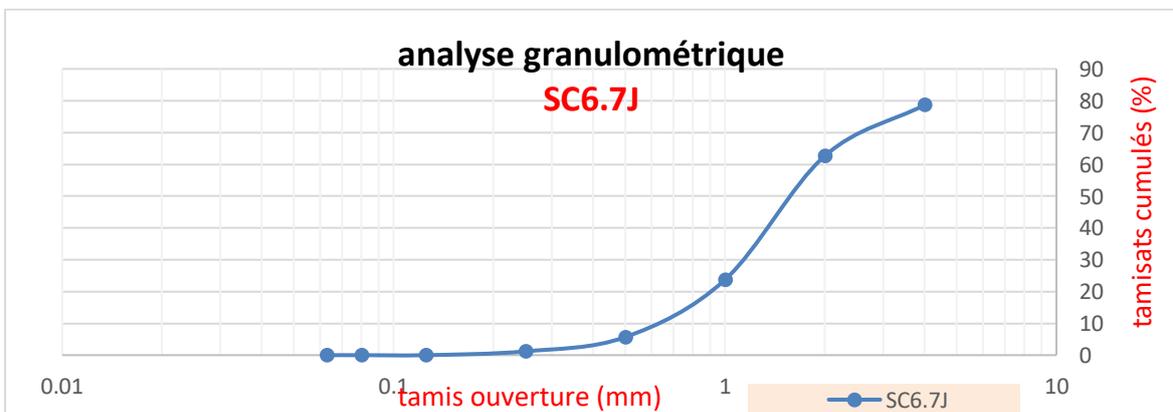
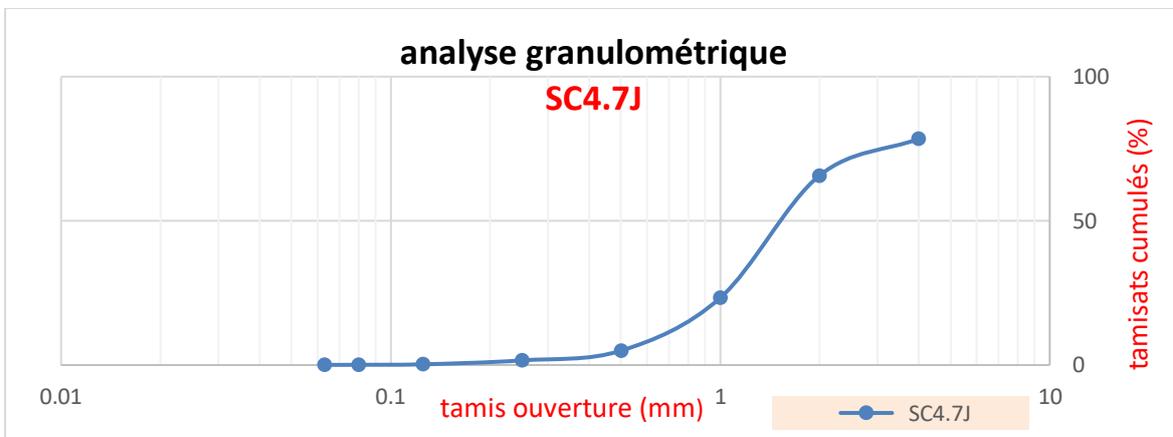
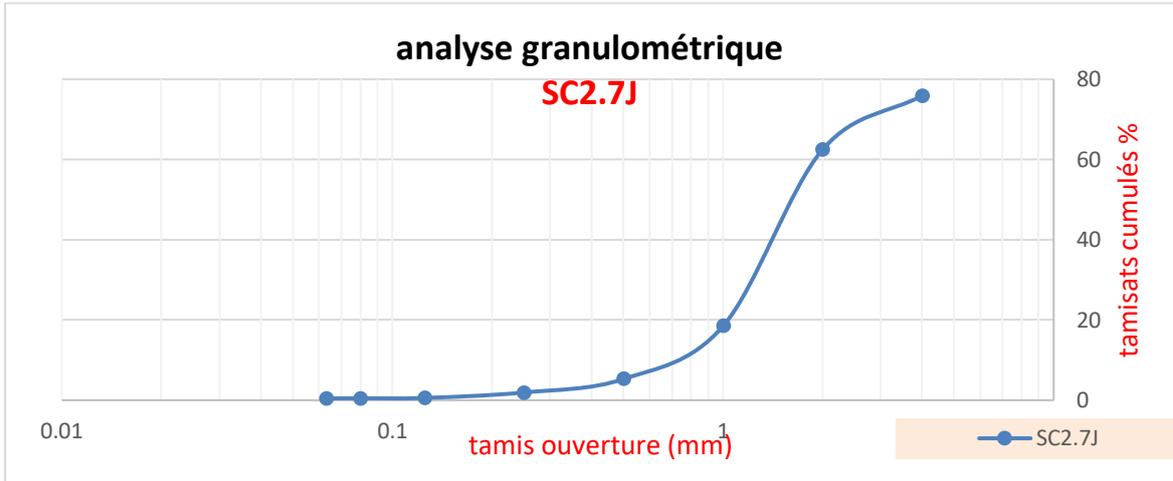
La comparaison des courbes granulométriques du sédiment à son état naturel et après incorporation de fractions massiques du liant hydraulique qui dans notre cas le ciment a montré une évolution des différentes fractions granulaires dans les échantillons testés. Il est très remarquable que pour l'évolution des tailles des grains augmentent de manière significative pour la fraction granulaire entre 0,063 mm et 1 mm et cela avec l'augmentation de la fraction massique du liant ajouté. Pour le pourcentage la fraction granulaire 0,63 à l'état naturelle été 1,76 et à 2% d'ajout on a obtenu la valeur de 1,04% et pour 4% on a obtenu 0,88% et pour 6% une valeur de 0,33%.

Cette évolution est due à l'effet de la réaction du liant hydraulique avec les constituants du sédiment, et il est très connu qu'après l'hydratation du ciment et sa réactivité conduit à une cristallisation. Cette cristallisation conduit à la formation de grumeaux et ce qui justifie l'évolution des courbes granulométriques.

L'ajout du liant hydraulique à montrer son effet sur la granulométrie du sédiment traité. Cet effet peut contribuer dans l'amélioration des performances géotechniques des sédiments traités et dans une éventuelle reclassification.

Evolution de la granulométrie après 07 jours du traitement

Les résultats de l'analyse granulométrique après 7 jours pour le sédiment traité avec des fraction massique du ciment sont présentés sur les figures (4.4) .



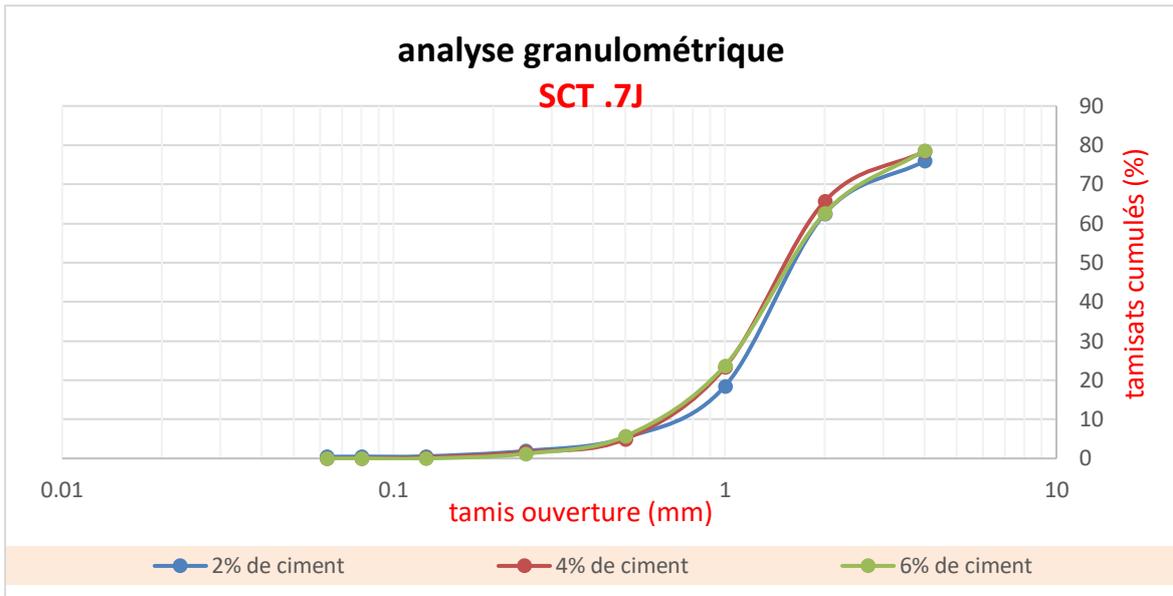


Figure IV.3 : La courbe granulométrique du sédiment avec les pourcentages du ciment (7 jours)

Tableau IV.2 : Les coefficients Cu et cc des échantillons après 7 jours

	Coefficient de hazen Cu	Coefficient de courbure Cc	Classification de l'échantillon
Sédiment +2% de ciment	2	2	sable propre mal gradué
Sédiment +4% de ciment	2	2	sable propre mal gradué
Sédiment +6% de sédiment	2	2	sable propre mal gradué

La comparaison des courbes granulométriques du sédiment à son état naturel et après incorporation de fractions massiques du liant hydraulique qui dans notre cas le ciment a montré une évolution des différentes fractions granulaires dans les échantillons testés.

Cette évolution est due à l'effet de la réaction du liant hydraulique avec les constituants du sédiment, et il est très connu qu'après l'hydratation du ciment et sa réactivité conduit à une cristallisation. Cette Cristallisation conduit à la formation de grumeaux et ce qui justifie l'évolution des courbes granulométriques.

IV.4. L'essai Proctor

L'essai Proctor (La norme française NF P 94- 093) est une méthode utilisée pour évaluer les propriétés de compactages des sols. Les échantillons sont préparé et séché jusqu'à obtenir une humidité constante, ensuite on a ajouté des pourcentages d'eau (4% 8% 10% 12% 14%) au différent échantillon chaque mélange est ensuite compacté dans le moule Proctor normalisé en couches (3 couches de hauteurs spécifiques) avec 25 coups par couche.

➤ Après 24h de l'ajout

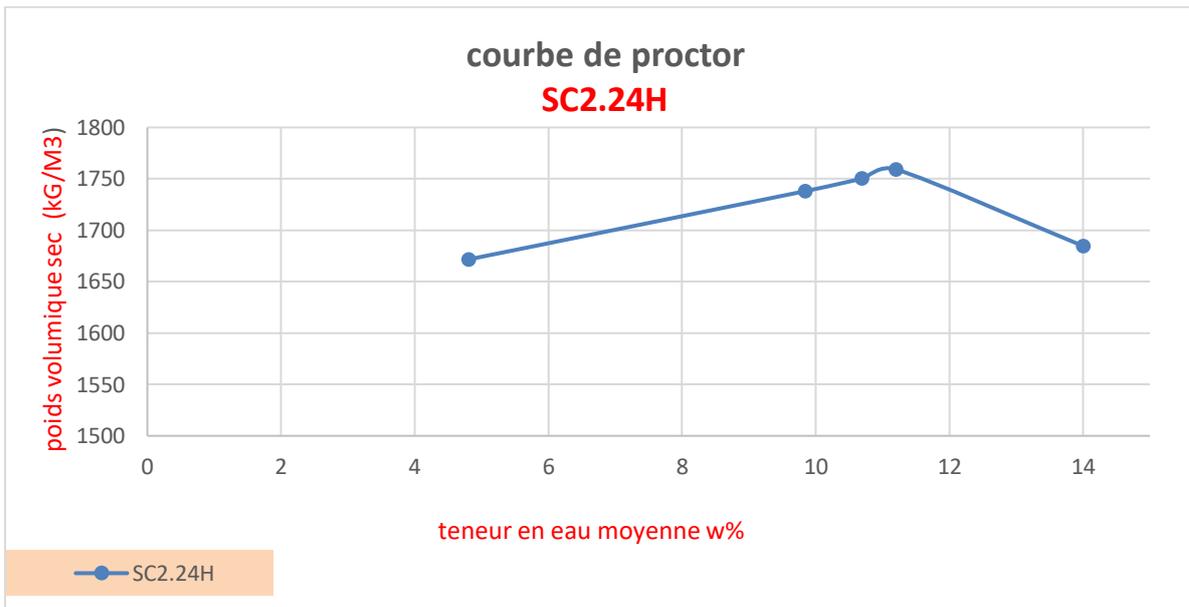


Figure IV.4 : Courbe Proctor du sédiment+2% ciment

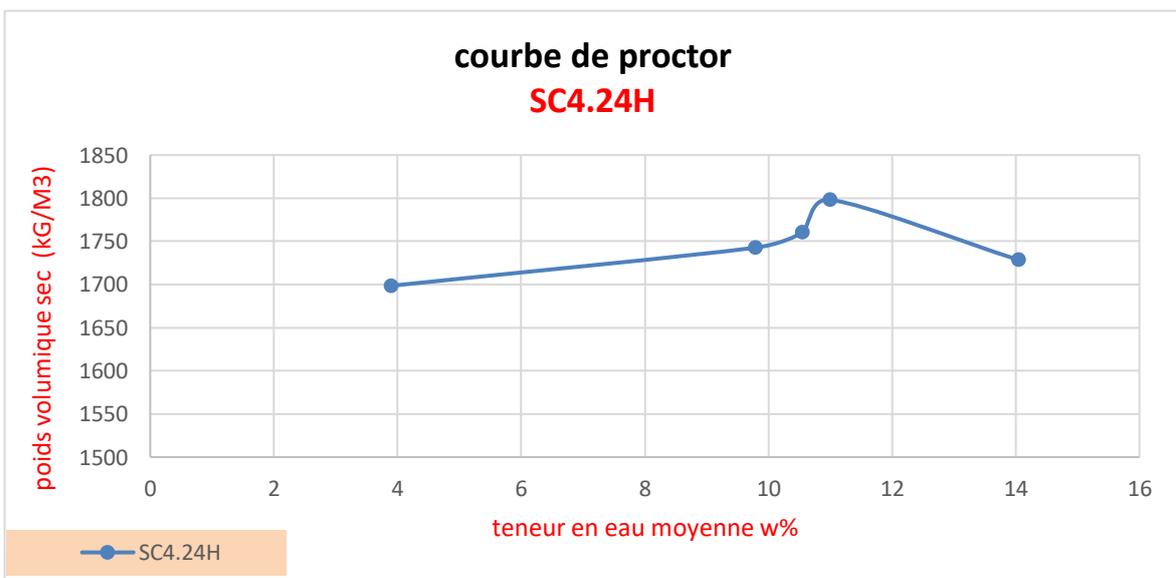


Figure IV.5 : Courbe Proctor du sédiment+4% ciment

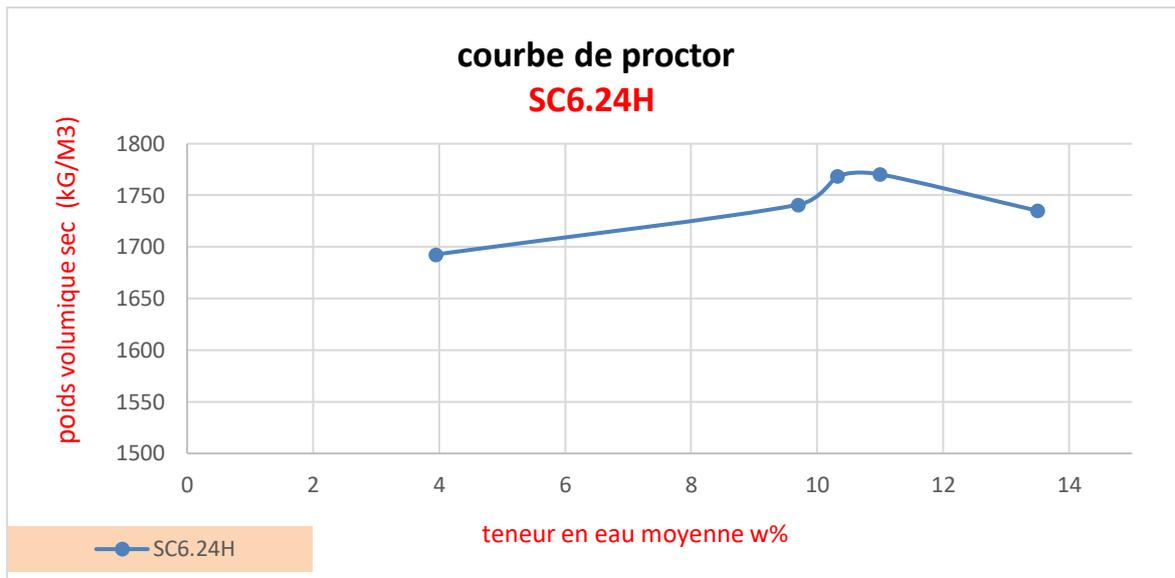


Figure IV.6 : Courbe Proctor du sédiment+6% ciment

Le tableau résume les caractéristiques des échantillons après 24h de l’ajout du différent pourcentage du ciment :

Tableau IV.3 : Les caractéristiques de sédiment + ciment après 24 h

	$\frac{\gamma_{dOPM}}{\gamma_w}$	ω_{OPM}
Sédiment+2% de ciment	1,76	11,20
Sédiment+4% de ciment	1,8	11
Sédiment+6% de ciment	1,77	10,99

➤ Après 7 jours de l'ajout

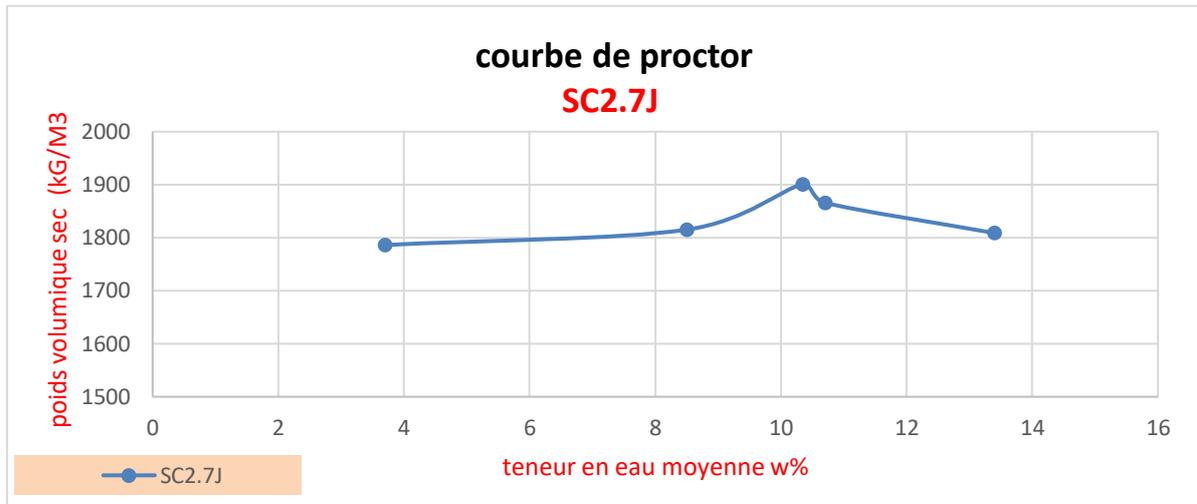


Figure IV.7 : Courbe Proctor du sédiment+2% ciment (7 jours)

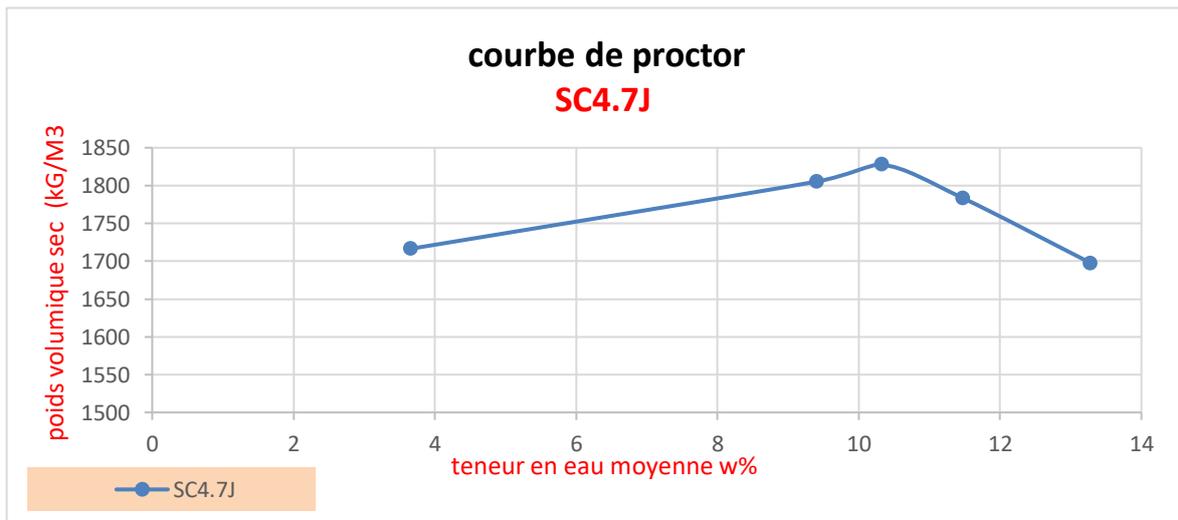


Figure IV.8 : Courbe Proctor du sédiment+4% ciment (7 jours)

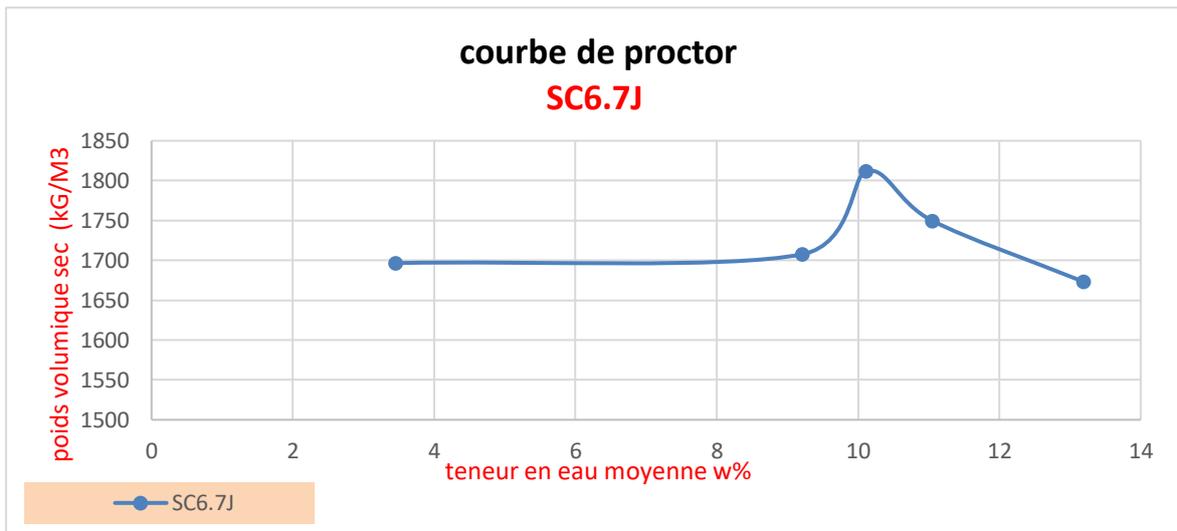


Figure IV.9 : Courbe Proctor du sédiment+6% ciment (7 jours)

Le tableau résume les caractéristiques des échantillons après 7 jours de l'ajout du différent pourcentage du ciment :

Tableau IV.4 : Les caractéristiques du sédiment + ciment après 7 jours

	$\frac{\gamma_{dOPM}}{\gamma_w}$	ω_{OPM}
Sédiment+2% de ciment	1,9	10,34
Sédiment+4% de ciment	1,83	10,32
Sédiment+6% de ciment	1,80	10,11

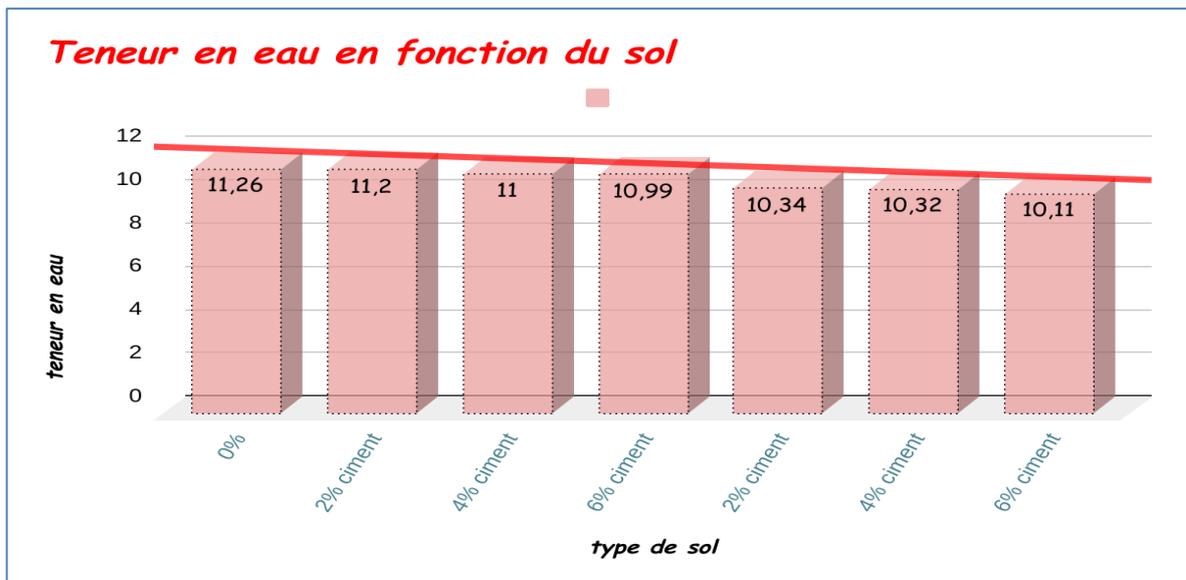


Figure IV.10 : Variation de la teneur en eau en fonction du dosage du ciment et le temps

D'après la figure 4-11: la comparaison entre les courbes Proctor du sédiment à son état initial et après traitement avec le ciment met en évidence une diminution significative des teneurs en eau avec l'augmentation du pourcentage de ciment.

Les teneurs en eau optimums sont (11,26 11,20 11 10,99) du ciment à son état naturel et après l'ajout du ciment avec 2%, 4% et 6% respectivement. Ces teneurs en eau diminuent encore après 7 jours après le traitement du sédiment.

Cette diminution témoigne de l'efficacité du ciment comme agent de stabilisation, où l'ajout du ciment agit comme un liant, réduisant les vides ce qui traduit par une réduction progressive de la quantité d'eau nécessaire pour atteindre la densité maximum.

Les résultats sont cruciaux pour la conception et la mise en œuvre de techniques de renforcement des sols, soulignant l'importance du ciment et le temps de réaction pour optimiser les propriétés géotechniques du sol.

IV.5. Cisaillement

Cet essai est effectué selon la norme française (NF P 94-071-1) est une méthode essentielle pour évaluer les propriétés de résistance au cisaillement des sols et des matériaux géotechniques. Le processus commence par la préparation des échantillons, on les plaçant dans une boîte de cisaillement. Pendant l'essai, on varie les contraintes appliquées sur les

échantillons (0,5 1 2 3) bars, pour chaque contrainte on mesure le déplacement et la déformation du matériau pendant 10 min avec une vitesse de 1 mm par minute.

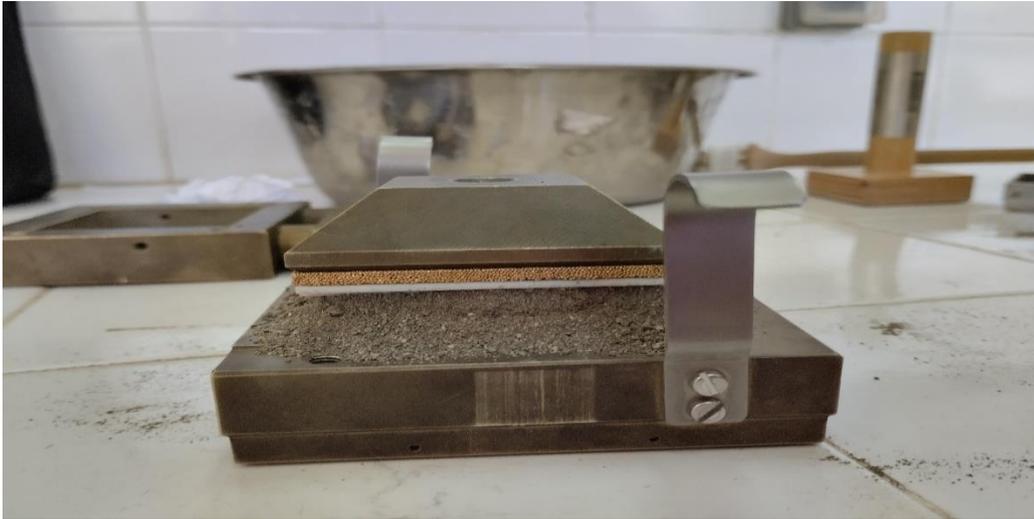


Figure IV.11 : La boîte de cisaillement après essai

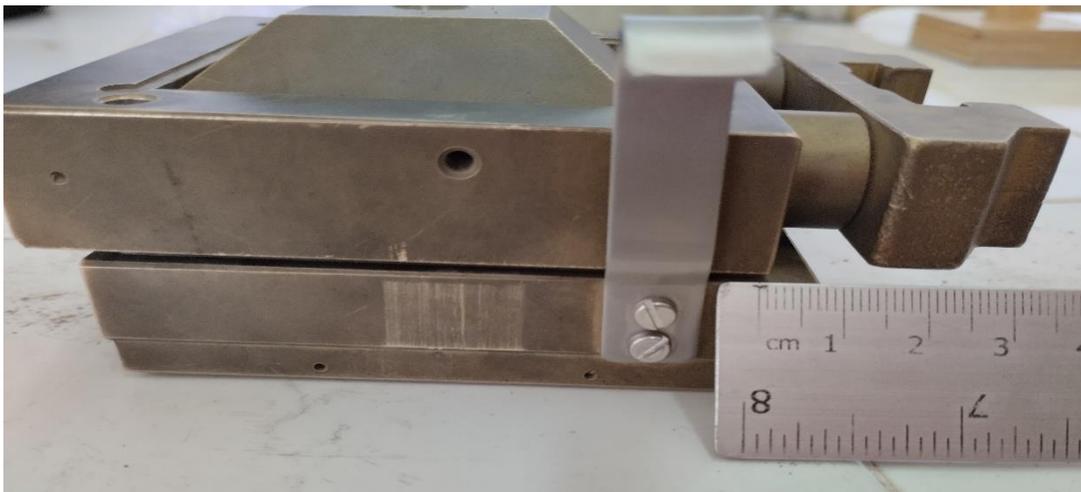


Figure IV.12 : La boîte de cisaillement après essai

Les graphiques suivant reprennent les déplacements horizontaux en fonction du temps :

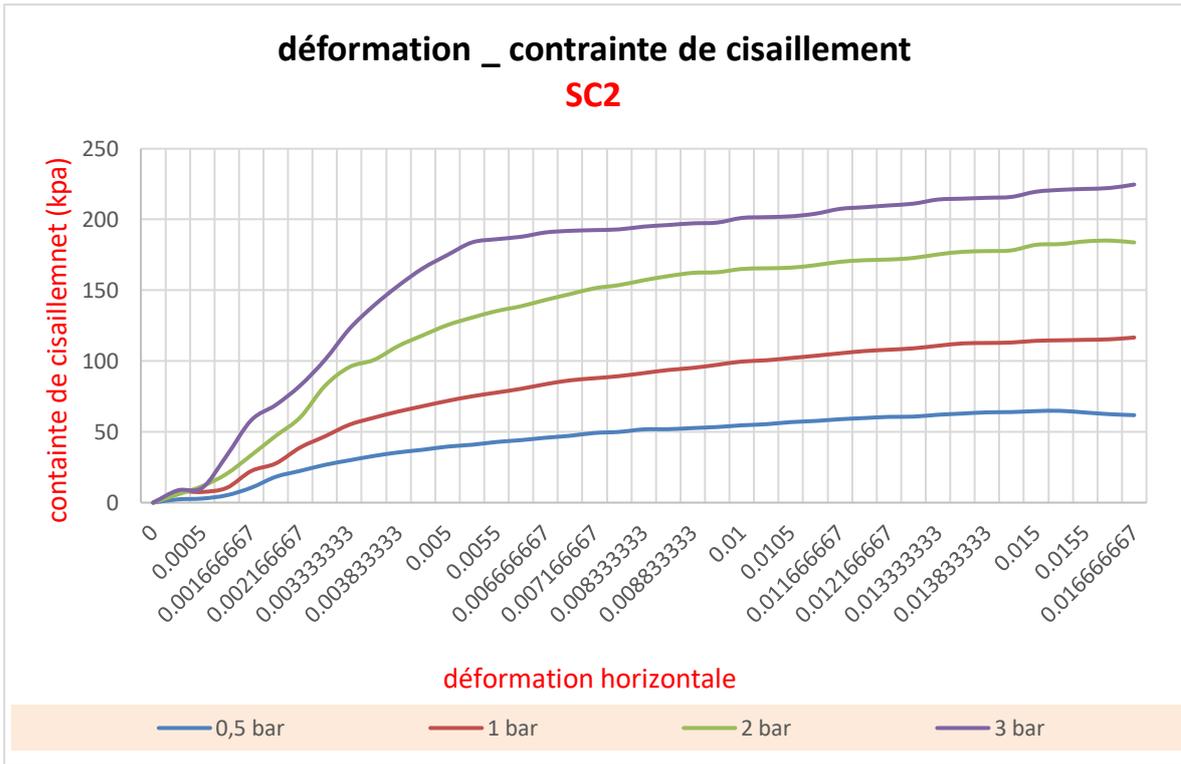


Figure IV.13 : Déformation _ contrainte de cisaillement du sédiment +2% de ciment

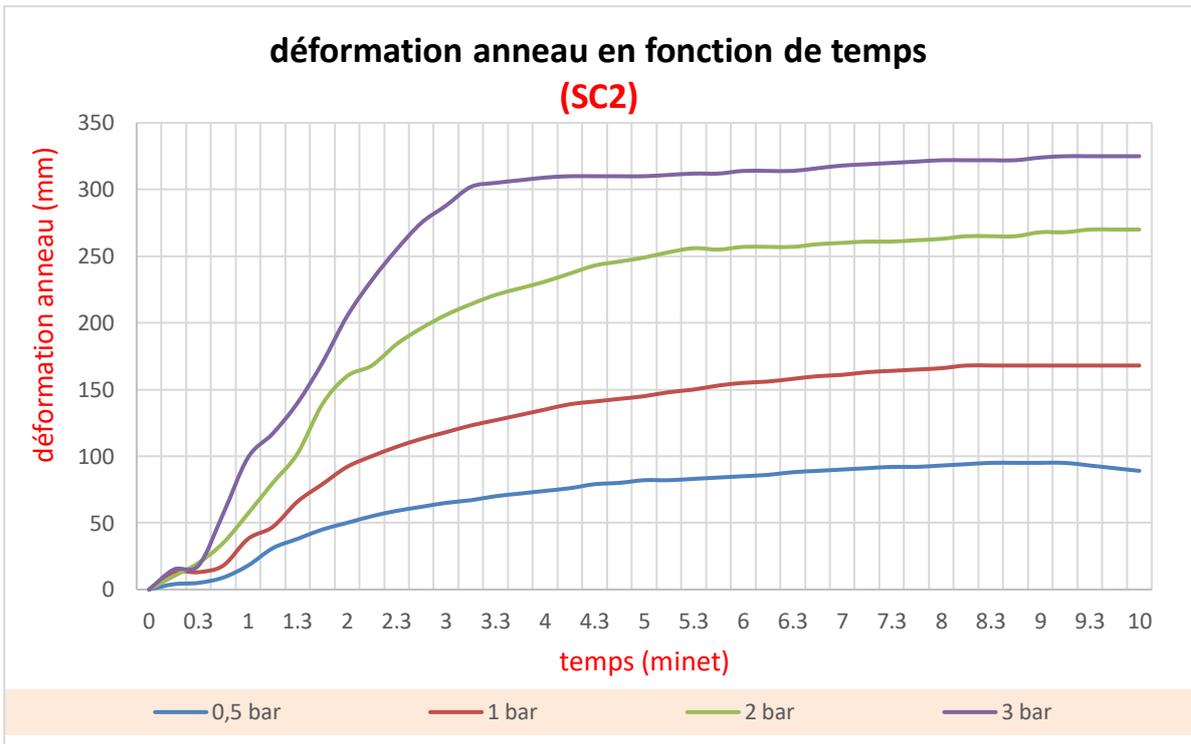


Figure IV.14 : Déformation anneau en fonction de temps du sédiment+2% ciment

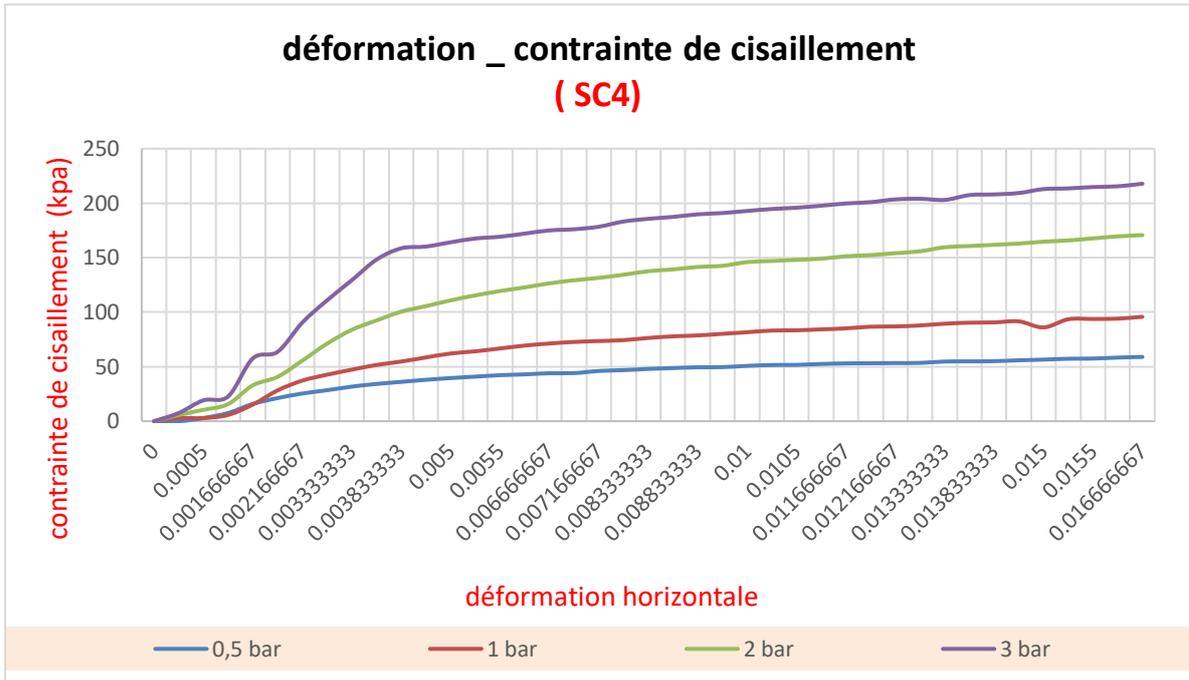


Figure IV.15 : Déformation _ contrainte de cisaillement du sédiment +4% de ciment

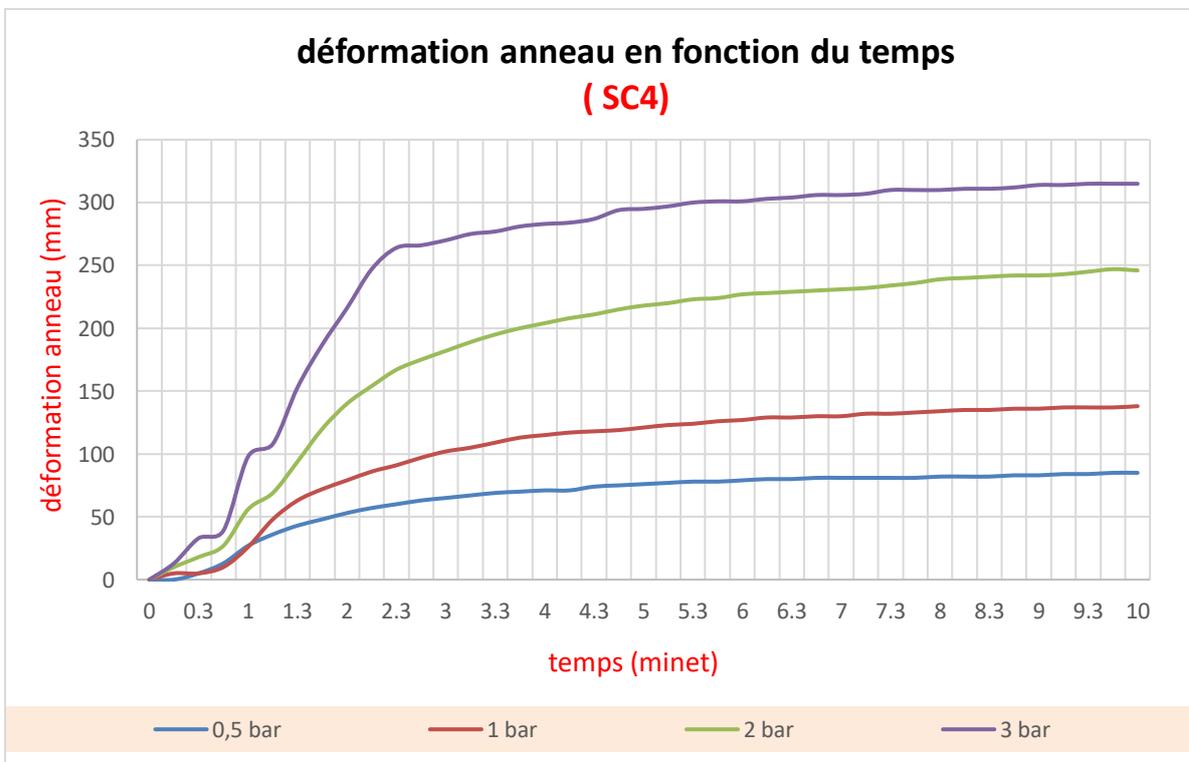


Figure IV.16 : Déformation anneau en fonction de temps du sédiment+4%ciment

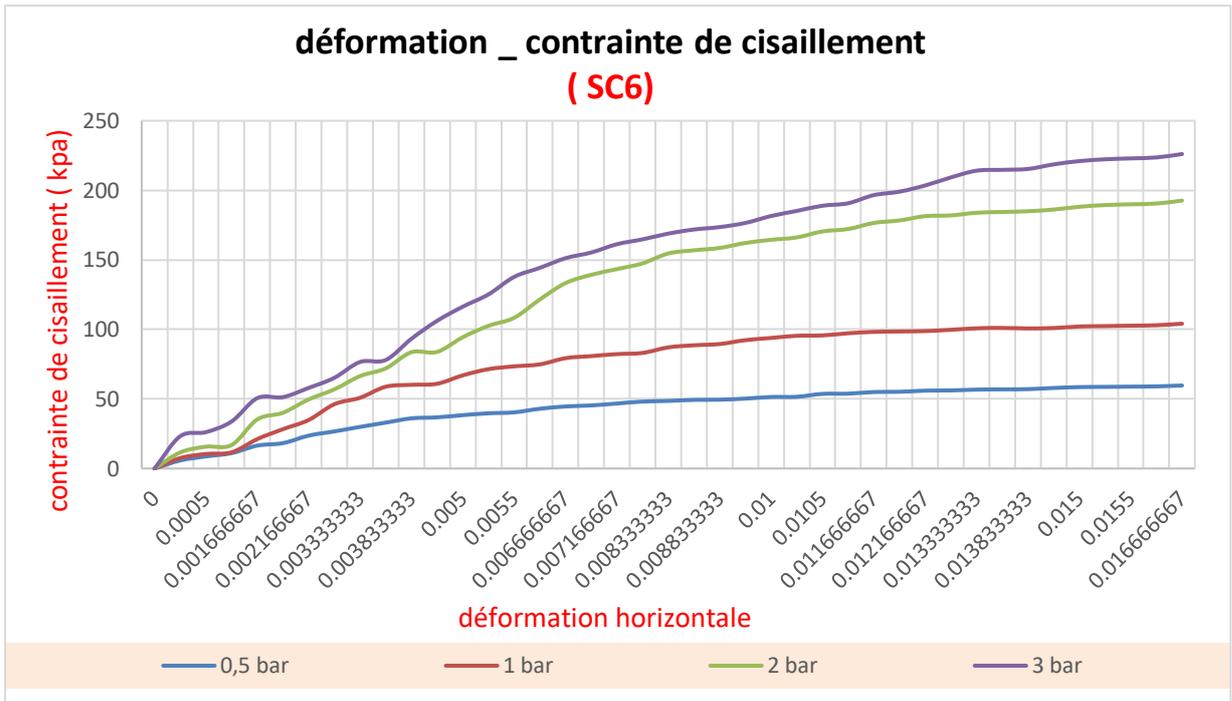


Figure IV.17 : Déformation _ contrainte de cisaillement du sédiment +6% de ciment

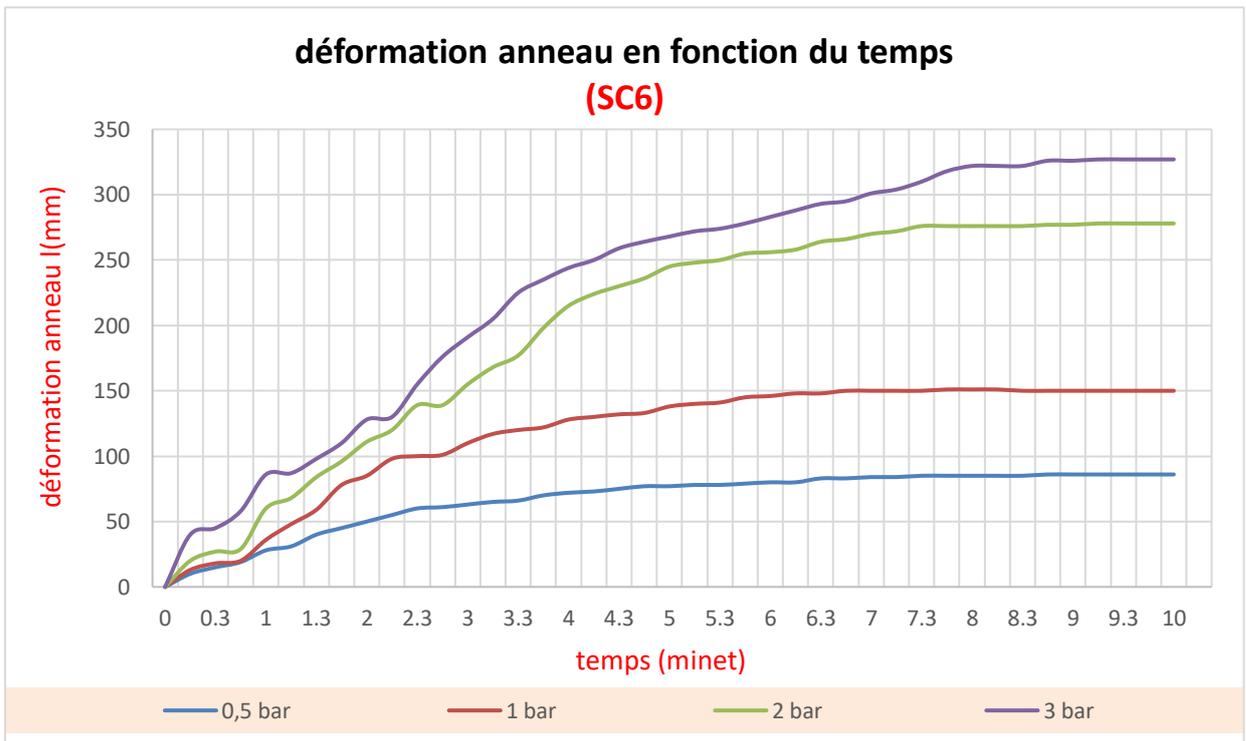


Figure IV.18 : Déformations anneau en fonction de temps du sédiment+6% ciment

Le tableau résume l'angle de frottement et la cohésion après 24h de l'ajout du différent pourcentage du ciment :

Tableau IV.5 : L'angle de frottement et la cohésion après 24h (sédiment + ciment)

	L'angle de frottement	La cohésion
Sédiment+2% de ciment	32,696	43,251
Sédiment+4% de ciment	32,756	31,259
Sédiment+6% de ciment	34,22	35,094

Les graphiques suivant reprennent la contrainte de cisaillement pour les différent pourcentage de ciment :

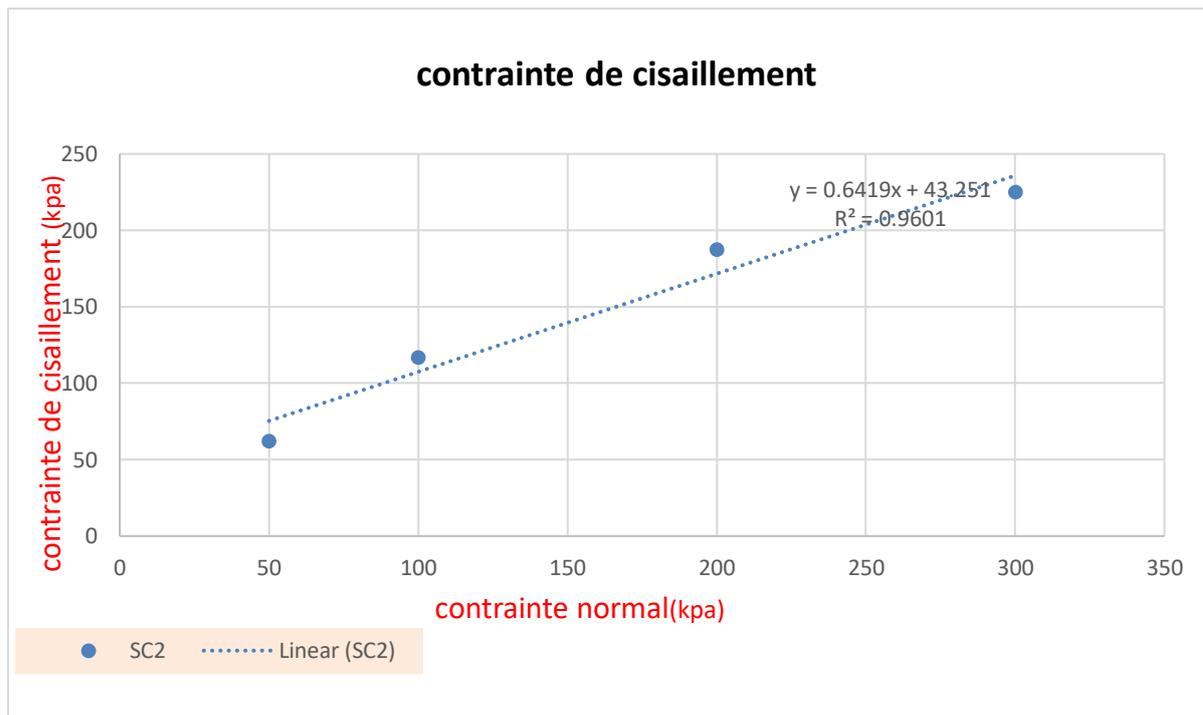


Figure IV.19 : Contrainte cisaillement du sédiment+2% ciment

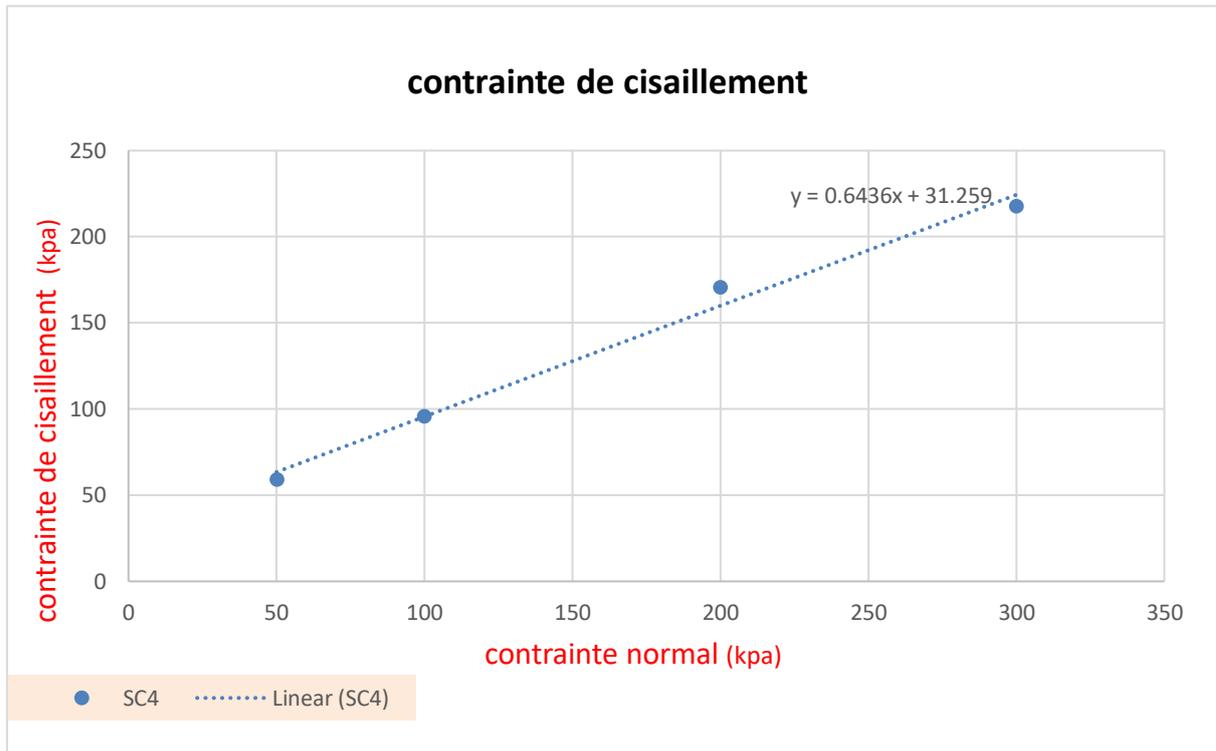


Figure IV.20 : Contrainte cisaillement du sédiment+4% ciment

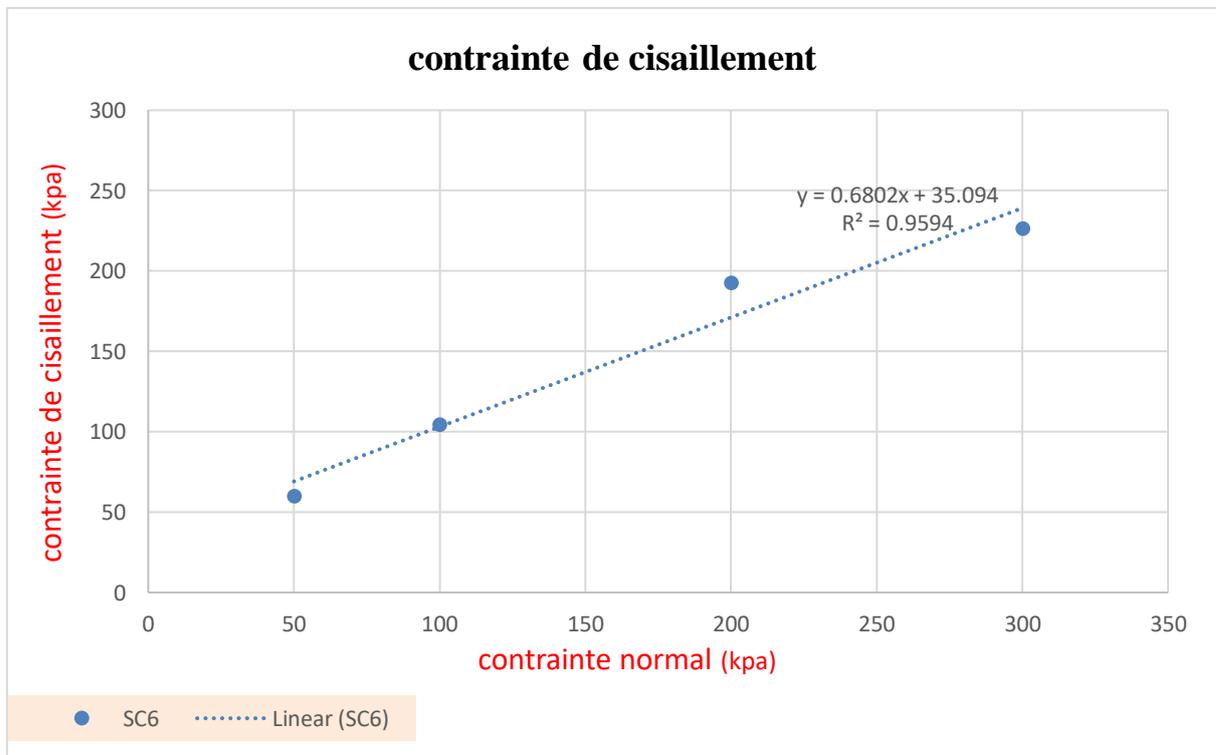


Figure IV.21 : Contrainte cisaillement du sédiment+6% ciment

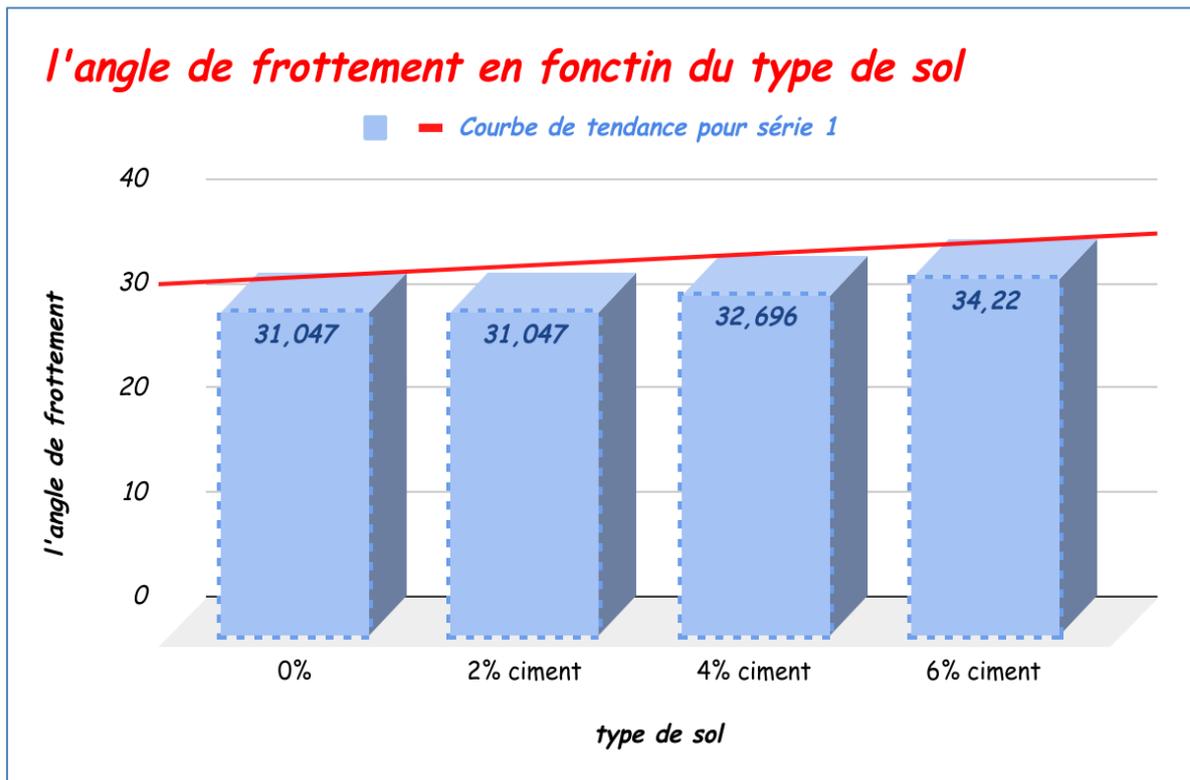


Figure IV.22 : L'angle de frottement en fonction des dosages de ciment (24H)

La figure 4-20: démontre de manière convaincante que l'angle de frottement augmente de manière significative à mesure que le pourcentage du ciment dans notre sol augmente.

L'angle de frottement du sédiment avant le traitement est de 31,047, il augmente à 32,756 après l'ajout de 2% de ciment et à 32,696 avec 4% de ciment jusqu'à ce qu'il arrive à 34,22 avec 6% de ciment.

Cette augmentation progressive est indicative de l'amélioration du sédiment, où elle est due à la formation de liaisons chimiques et mécaniques plus fortes entre les particules.

Ces résultats soutiennent l'idée que l'ajout du ciment est une stratégie efficace pour renforcer les propriétés mécaniques du matériau, en particulier sa capacité à résister aux forces tangentielles qui pourraient entraîner un mouvement relatif entre les surfaces.

IV.6. L'essai CBR

IV.6.1. La norme française (NF P 94-078)

Le principe général de l'essai, la norme française (NF P 94-078) consiste à mesurer les forces à appliquer sur un poinçon cylindrique pour le faire pénétrer à vitesse constante (1,27 mm / min) dans une éprouvette de matériel

IV.6.2. Indice portant immédiat (IPI)



Figure IV.23 : Sédiment +4% de ciment après essai CBR (IPI)

Tableau IV.6 : Classification du sol selon IPI

	IPI	Classe de portance
Sédiment	0,69 <3	Portance très faible
Sédiment+2% de ciment	2,82 <3	Portance très faible
Sédiment+4% de ciment	2,67 <3	Portance très faible
Sédiment+6% de ciment	3 < 3,67 <6	Portance faible

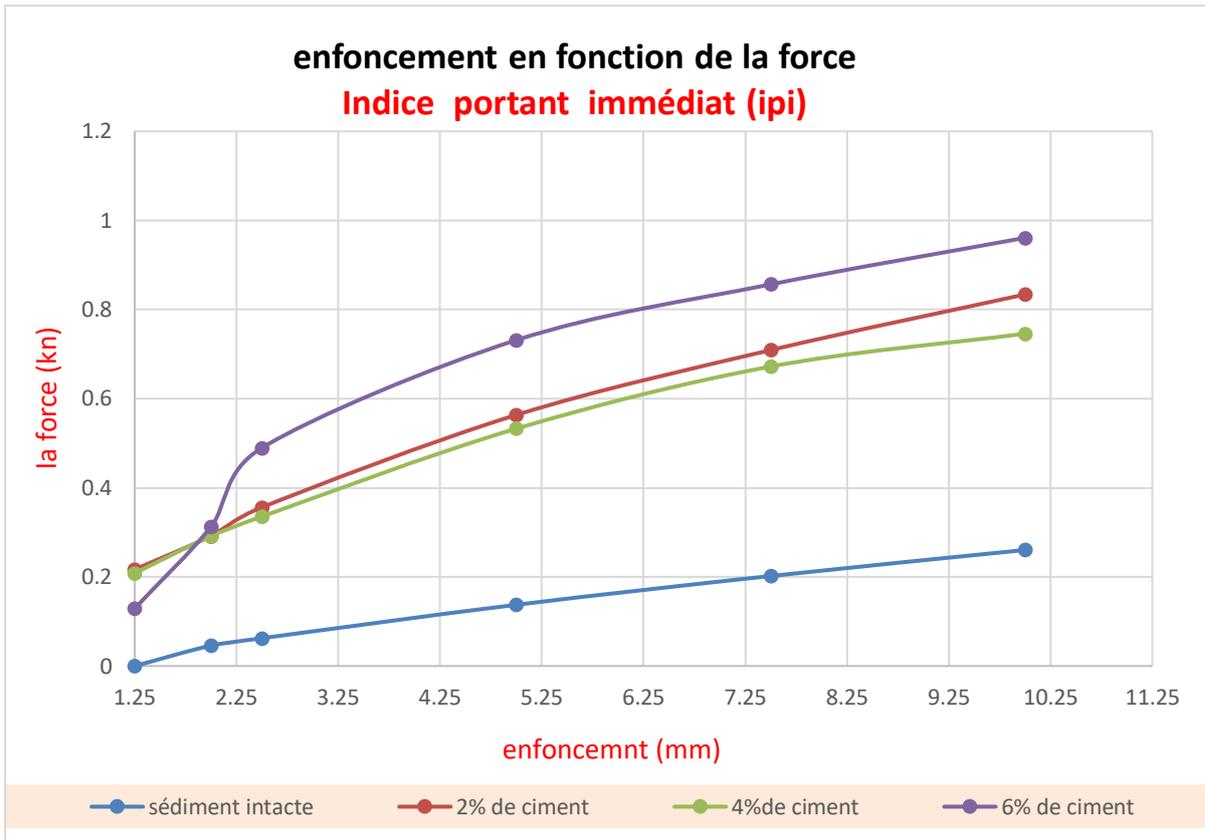


Figure IV.24 : Déplacement horizontal des types de sédiment (IPi)

IV.6.3. Indice CBR immédiat

Tableau IV.7 : Classification du sol selon les indices CBR immédiat

	I CBR I	Classe de portance
Sédiment	0,52<5	Portance très faible
Sédiment+2% de ciment	2,31<5	Portance très faible
Sédiment+4% de ciment	2,67<5	Portance très faible
Sédiment+6% de ciment	2,45<5	Portance très faible

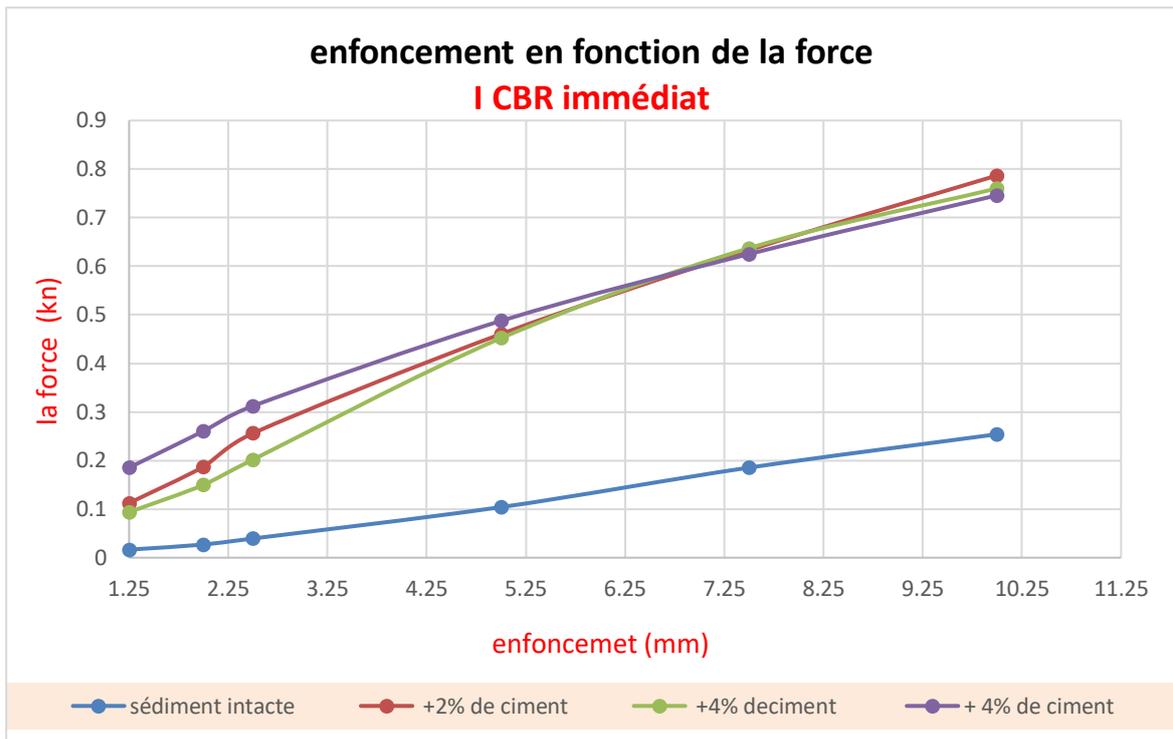


Figure IV.25 : Déplacement horizontal des types sédiments (I CBR immédiat)

IV.6.4. Indice CBR après immersion

Tableau IV.8 : Classification du sol selon les indices CBR immersion

	I CBR imm	Classe de portance
Sédiment	0,17<5	Portance très faible
Sédiment+2% de ciment	2,14<5	Portance très faible
Sédiment+4% de ciment	0,57<5	Portance très faible
Sédiment+6% de ciment	1,78<5	Portance très faible

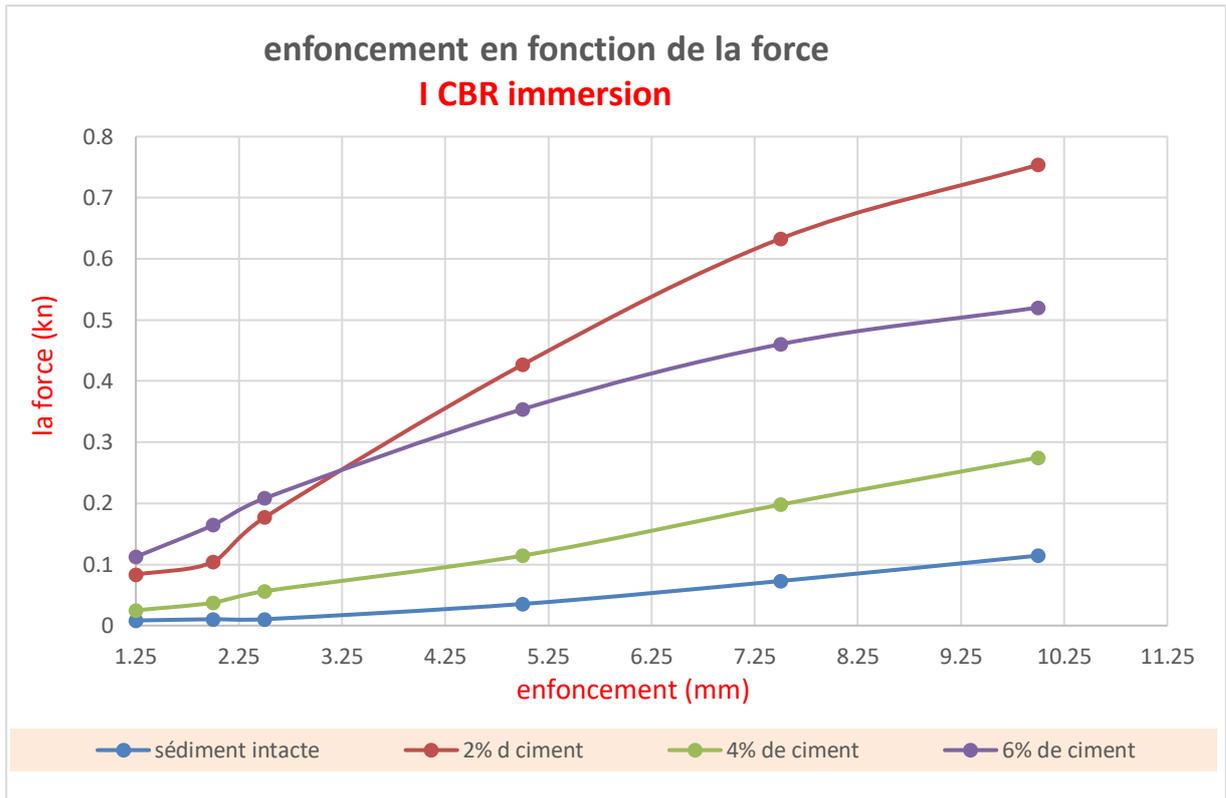


Figure IV.26 : Déplacement horizontal des types de sédiments (I CBR immersion)

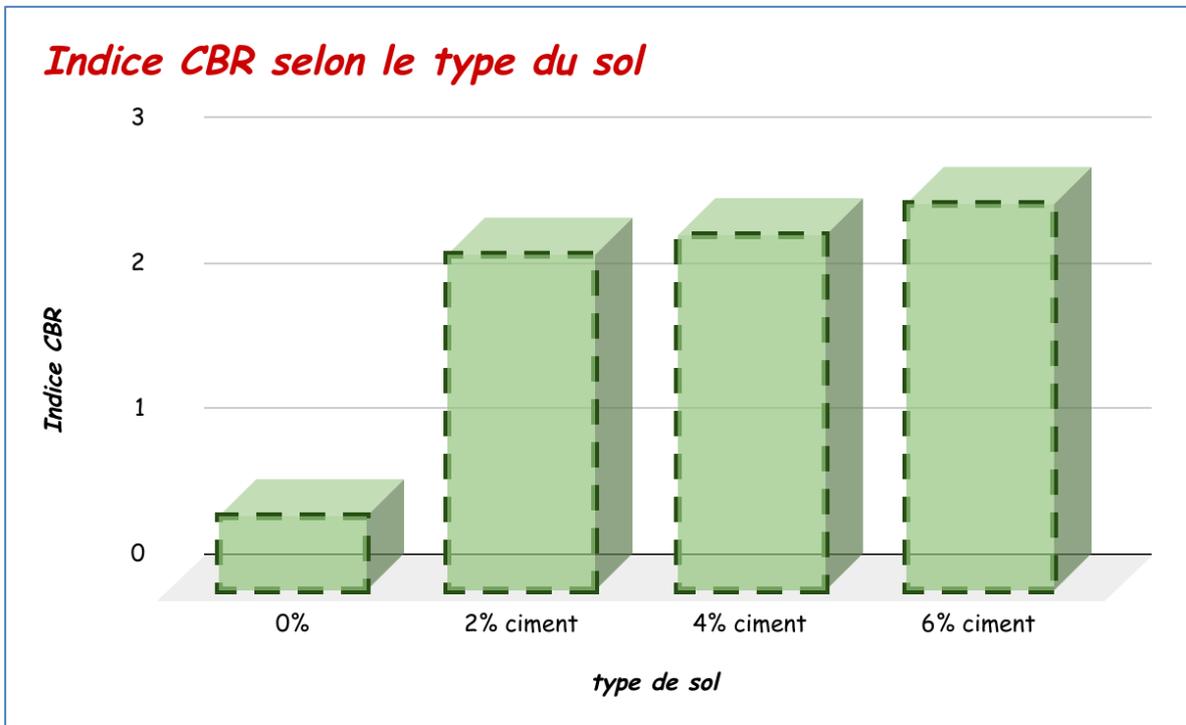


Figure IV.27 : Variation des indices CBR

Les figures 4-25: nous montrent que les dosages de ciment influent et améliore l'indice portant immédiat IPI, l'indice CBR immédiat et l'indice CBR immersion.

On remarque une tendance croissante des valeurs des indices CBR à mesure que le pourcentage du ciment dans le sédiment augmente.

Cette augmentation est le reflet de l'amélioration de la cohésion et de la résistance du sol traité, grâce à la formation de liaisons chimiques et mécaniques entre les particules de sol et le ciment.

Donc c'est remarquable l'efficacité du ciment sur le renforcement de la capacité portante et la résistance du sol.

IV.7. La perméabilité

L'essai a pour but de déterminer en laboratoire, le coefficient de perméabilité à l'eau, des sols saturés. Ce coefficient encore appelé coefficient de Darcy, peut se déterminer suivant deux méthodes: à charge constante ou à charge variable décroissante.

Le tableau montre la variation de l'indice perméabilité après l'ajout du ciment

Tableau IV.9 : Classification du sol selon la perméabilité

	Coefficient de perméabilité	Degré de perméabilité
Sédiment	$2 \cdot 10^{-9}$	Très faible
Sédiment+2% de ciment	$2 \cdot 10^{-9}$	Très faible
Sédiment+4% de ciment	$1,2 \cdot 10^{-7}$	Très faible
Sédiment+6% de ciment	$1,55 \cdot 10^{-7}$	Faible

IV.8. L'œdomètre

Le sol est placé dans une enveloppe rigide, on exerce sur sa partie supérieure une pression variable à l'aide d'un piston et on mesure les affaissements observés après stabilisation. On détermine ainsi la relation entre les contraintes effective set les déformations verticales



Figure IV.28 : Essai L'œdomètre

Après calcul on trouve les coefficients de consolidation (C_v) :

Tableau IV.10 : Les coefficients de consolidation (C_v)

Dosage de Ciment	Naturel Sol	Sol 2% Ciment	Sol 4% Ciment	Sol 6% Ciment
C_v (m^2/s)	0.821×10^{-3}	0.556×10^{-3}	0.252×10^{-3}	0.319×10^{-3}

L'indice de compressibilité (C_c):

Tableau IV.11 : L'indice de compressibilité (C_c)

Dosage de Ciment	C_c	Classification de sol
Sol naturel	0.09	Sol peu compressible
Sol 2% de Ciment	0.02	Sol très peu compressible
Sol 4% de Ciment	0.04	Sol très peu compressible
Sol 6% de Ciment	0.04	Sol peu compressible

Le ciment influe sur les coefficients œdométriques (C_v et C_c), ou les coefficients augmentent par rapport au sédiment intact après l'ajout des différents dosages de ciment.

Le sol à son état naturel était peu compressible et il est devenu très peu compressible après le traité avec le ciment.

Cela implique que le ciment agissant comme un liant hydraulique, se mélange avec avec les particules de sol pour former une matrice plus dense et cohésive, cette matrice renforcée réduit la mobilité des particules individuelles, limitant ainsi leur capacité à se tasser sous charge.

On conclut que le ciment est un liant important pour l'amélioration des sols, vu qu'il provoque une transformation significative du sol, le faisant passer d'un état peu compressible à un état très peu compressible.

IV.9. Conclusion

En conclusion, l'ajout du ciment à un sol entraîne une série d'effets bénéfiques sur ses propriétés géotechniques. L'augmentation des granulats gros, améliore la résistance mécanique du matériau, tandis que la diminution des teneurs en eau, le ciment augmente en parallèle les indices CBR ce qui indique une meilleur capacité portante, et provoque une amélioration des angles de frottement et des coefficients de perméabilité.

Ces résultats démontrent l'efficacité du ciment comme agent de stabilisation, renforçant la cohésion, la résistance et la durabilité du matériau traité.

Chapitre V

Amélioration du sol traités avec incompatible du sable

V.1. Introduction

Le traitement de sol est une pratique essentielle dans le domaine de l'ingénierie géotechnique et de la construction. Il englobe un ensemble de techniques visant à améliorer les propriétés mécanique, physique ou chimique du sol, afin de répondre aux exigences spécifiques d'un projet. Cette pratique permet non seulement de renforcer la capacité portante du sol, mais aussi de contrôler la perméabilité, de réduire la compressibilité et d'améliorer la stabilité des structures construites sur ce sol.

On présente dans cette partie les résultats de l'étude expérimentale effectuée sur le sédiment. L'amélioration des caractéristiques géotechnique du sédiment dans cette partie en incorporant une fraction massique de sable de carrière sur le sédiment intact et sur les échantillons traité déjà avec les différent fraction massique du ciment, on effectue une série d'essais afin de suivre l'évolution des différents paramètres.

V.2. Traitement du sédiment avec le liant hydraulique et le sable de carrière

Le sédiment marin collecté au niveau du port de Bejaia a été pris à son état naturel. Le matériau en question a été séché naturellement pendant 15 jours à l'aire libre. Après sa caractérisation à l'état naturelle et la détermination des différents paramètres géotechnique un procédé de traitement a été défini.

après le traitement on a laissé le matériau à l'air libre pendant 7 jours pour assurer le séchage de l'eau ajoutée, afin de faire une récupération du matériel sédimentaire avec les différentes fractions massiques de ciment 2%, 4% et 6%, puis traité une autre fois avec un pourcentage de 5% de sable de carrière. Après incorporation de sable de carrière on va procéder à des séries d'essais afin de montrer l'effet de l'ajout de l' incompatible de sable sur les matériaux récupérés.

V.3. L'analyse granulométrique du sable de carrière

- **La granularité (norme française XP P 94-091)**

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas, dans notre cas la série de tamis prise selon la (Norme française XP P 94-091) est (4 /2 /1/ 0,5/ 0,25/ 0,125/0,08/ 0,063) mm. L'échantillon est préparé par séchage à l'air libre. Après séchage, le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne de

tamis pendant 30 min. Chaque refus de tamis est pesé à l'aide d'une balance de précision, préalablement stabilisée sur un plan parfaitement horizontal.

Sable de carrière

Tableau V.1 : Les tamisats cumulés

Tamis ouverture (mm)	Tamisats cumulés %
4	97,2
2	63,6
1	40,24
0,5	27,12
0,25	16,48
0,125	6,8
0,08	4,352
0,063	2,8
Fond	0,16

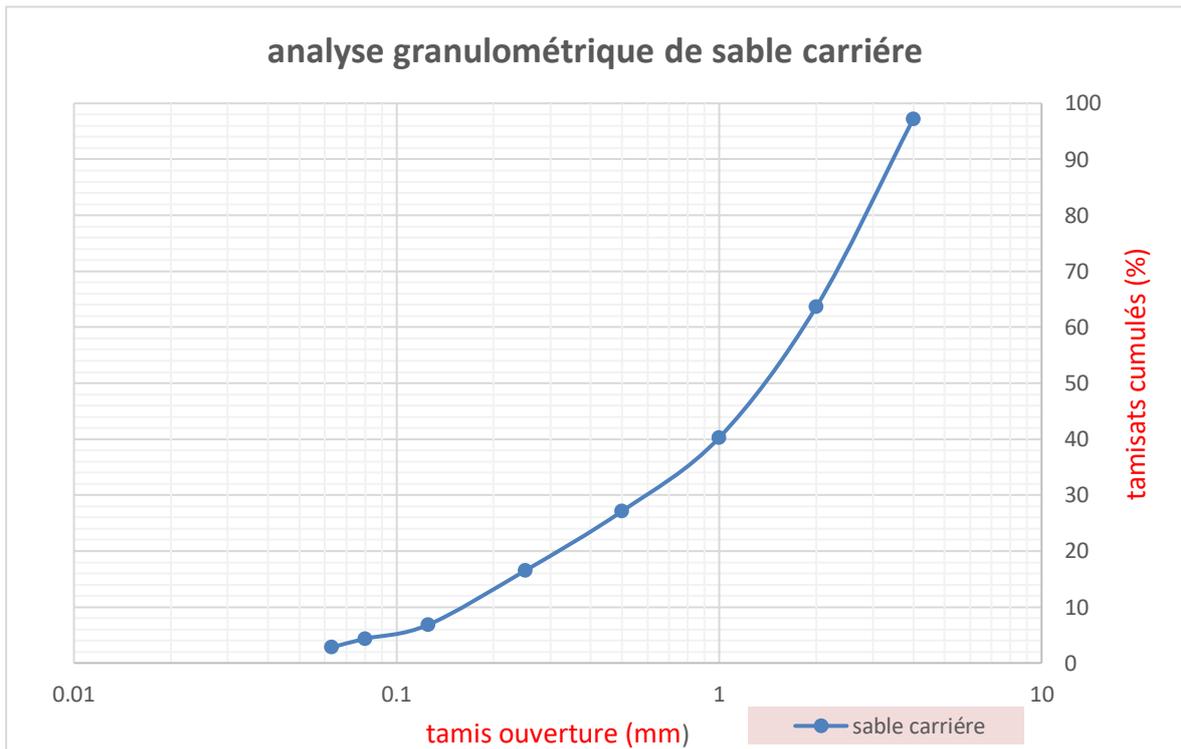


Figure V.1 : La courbe granulométrique de la sable carrière

Tableau V.2 : Les coefficients Cu et Cc du sable

	Coefficient de hazen Cu	Coefficient de courbure Cc	Classification de l'échantillon
Le sable de carrière	7	2	sable bien gradué

V.4. Les essais effectués

V.4.1. Proctor

L'essai Proctor (La norme française NF P 94- 093) est une méthode utilisée pour évaluer les propriétés de compactages des sols. Les échantillons sont préparés et séchés jusqu'à obtenir une humidité constante, ensuite on a ajouté des pourcentages d'eau (4% 8% 10% 12% 14%) aux différents échantillons chaque mélange est ensuite compacté dans le moule Proctor normalisé en couches (3 couches de hauteurs spécifiques) avec 25 coups par couche.

Tableau V.3 : Les caractéristiques Proctor des sols

	$\frac{\gamma_{dOPM}}{\gamma_w}$	ω_{OPM}
Sédiment+2% de ciment+5% de sable	1,82	8,49
Sédiment+4% de ciment+5% de sable	1,9	7,97
Sédiment+6% de ciment+5% de sable	1,8	7,89

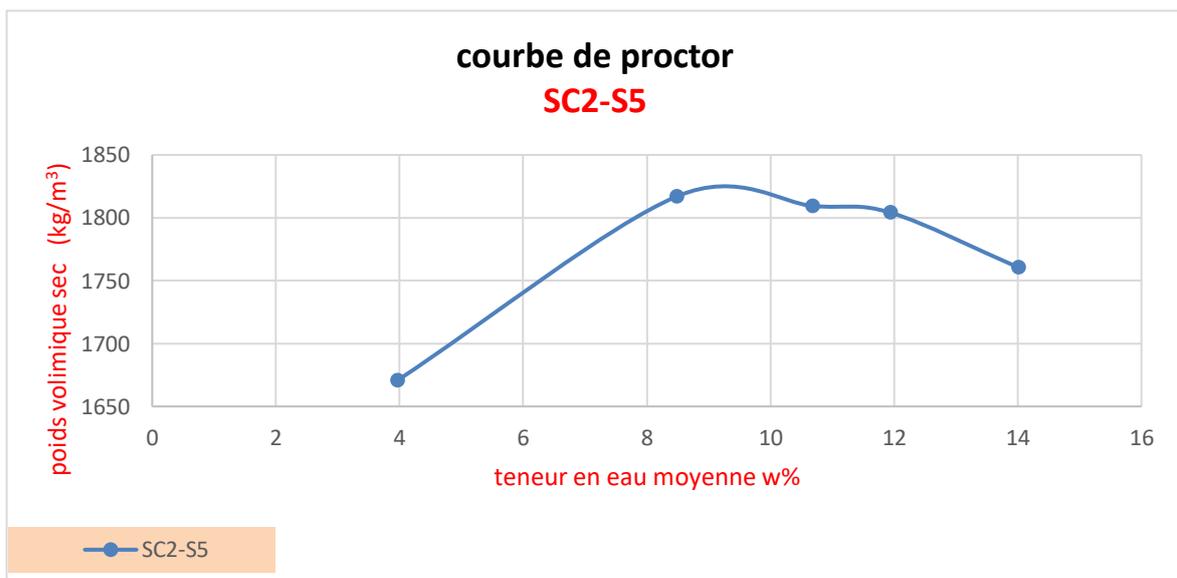


Figure V.2 : Courbe Proctor du sédiment+2% ciment+5% sable

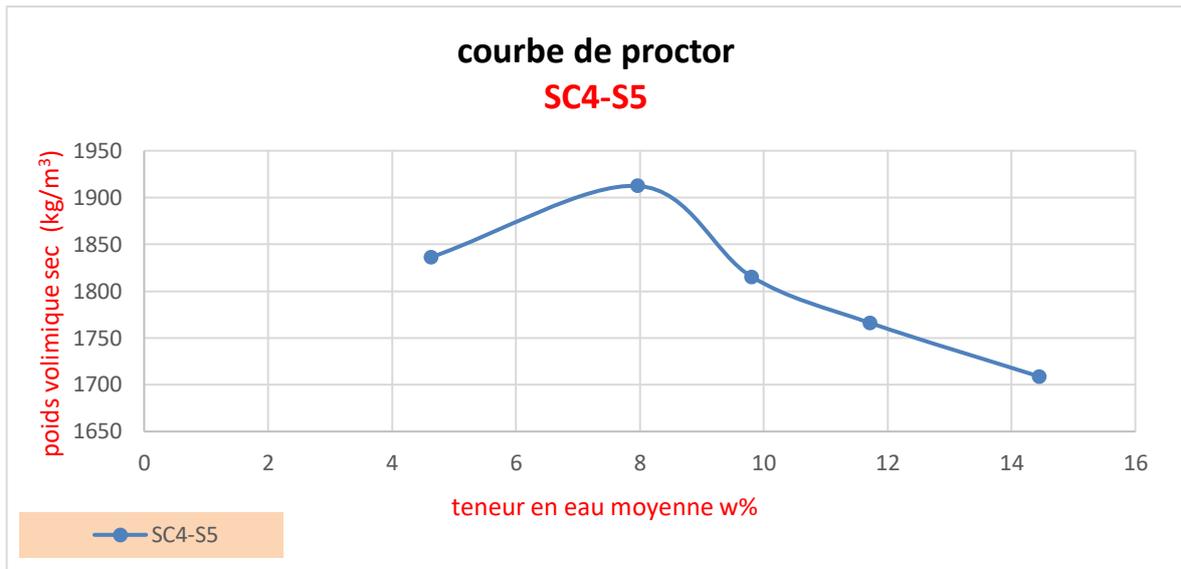


Figure V.3 : Courbe Proctor du sédiment+4% ciment+5%sable

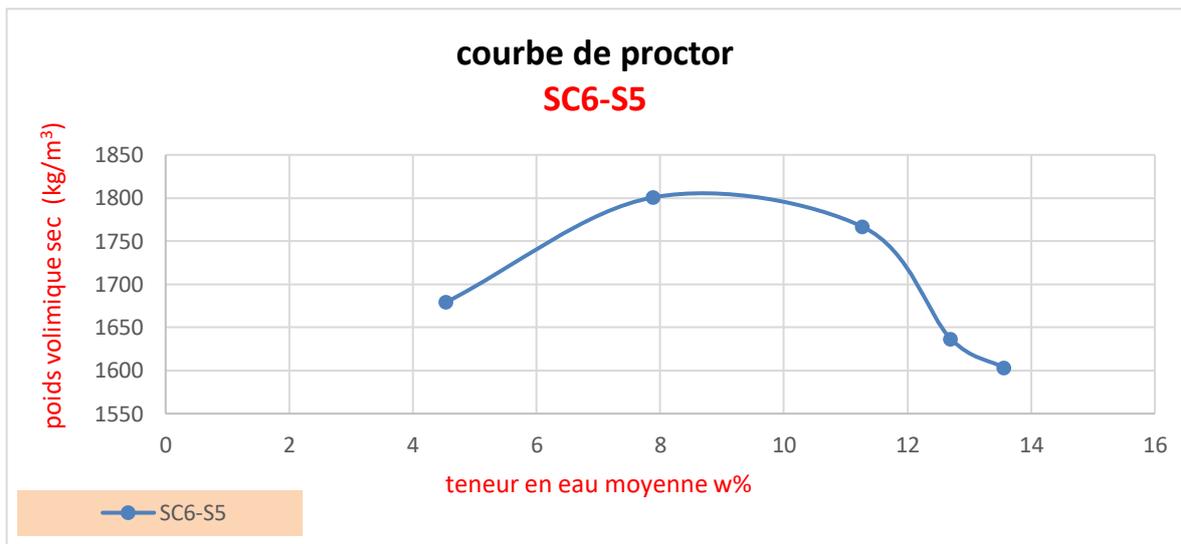


Figure V.4 : Courbe Proctor du sédiment+6% ciment+5%sable

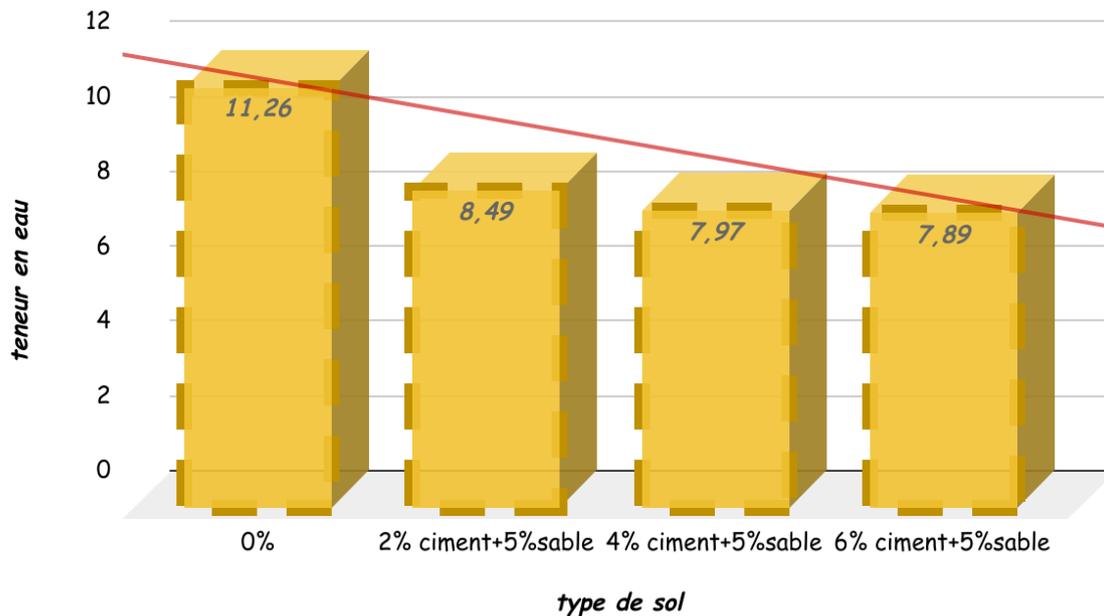
teneur en eau en fonction type de sol

Figure V.5 : Variation de la teneur en eau en fonction du type de sol

La figure 5-5: Montre la diminution des teneurs en eau avec l'ajout du sable à différents échantillons.

La teneur en eau du sol à son état naturel est 11,26 et elle diminue jusqu'au 7,89 pour le sédiment traité avec 6% de ciment et 5% de sable. La figure montre l'efficacité d'ajout du mélange ciment + sable pour le sédiment.

La diminution des teneurs en eau observées après l'ajout de sable de carrière aux différents échantillons indiquent clairement que le sable agit efficacement comme un agent.

Donc on peut suggérer que l'incorporation de sable de carrière peut être bénéfique pour améliorer la capacité de drainage des sols.

V.4.2. Cisaillement

Le processus commence par la préparation des échantillons, on les plaçant dans une boîte de cisaillement. Pendant l'essai, on varie les contraintes appliquées sur les échantillons (0,5 1 2 3) bars, pour chaque contrainte on mesure le déplacement et la déformation du matériau pendant 10 min avec une vitesse de 1 mm par minute.

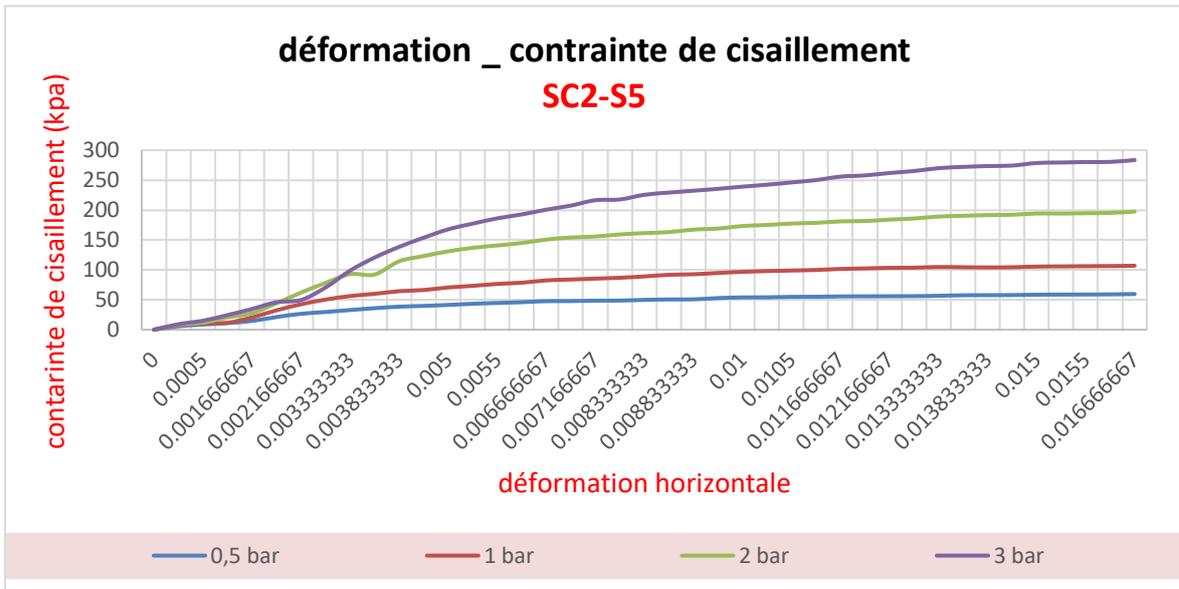


Figure V.6 : Courbes de déformation _ contrainte de cisaillement du sédiment +2% ciment +5% sable

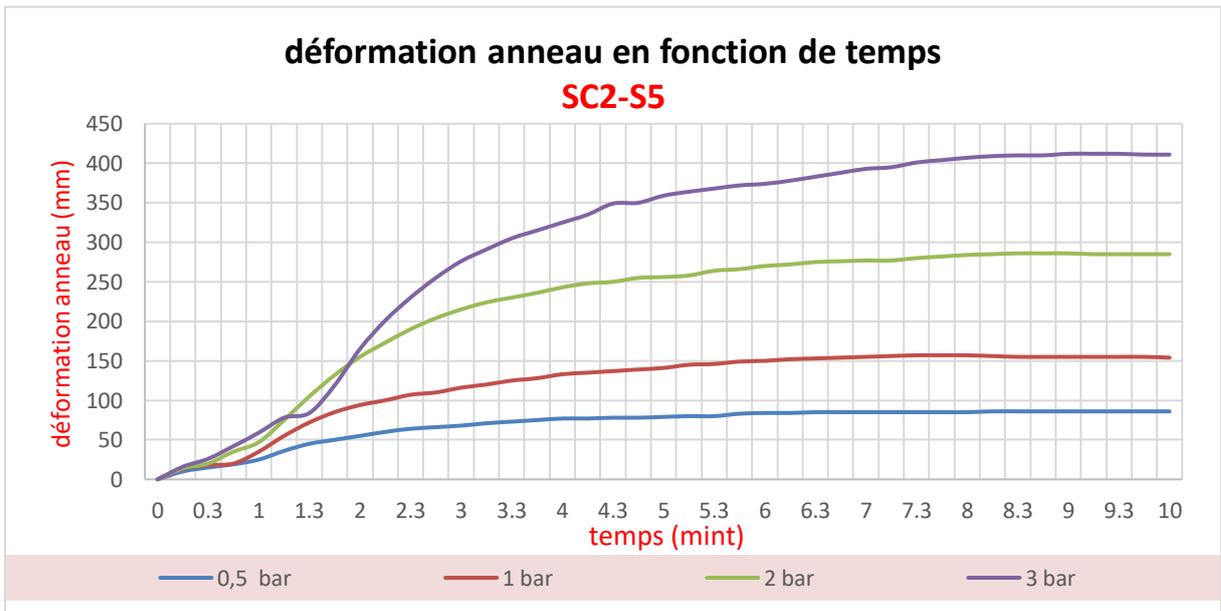


Figure V.7 : Courbes de déformation anneau en fonction de temps du sédiment+2% ciment +5% sable

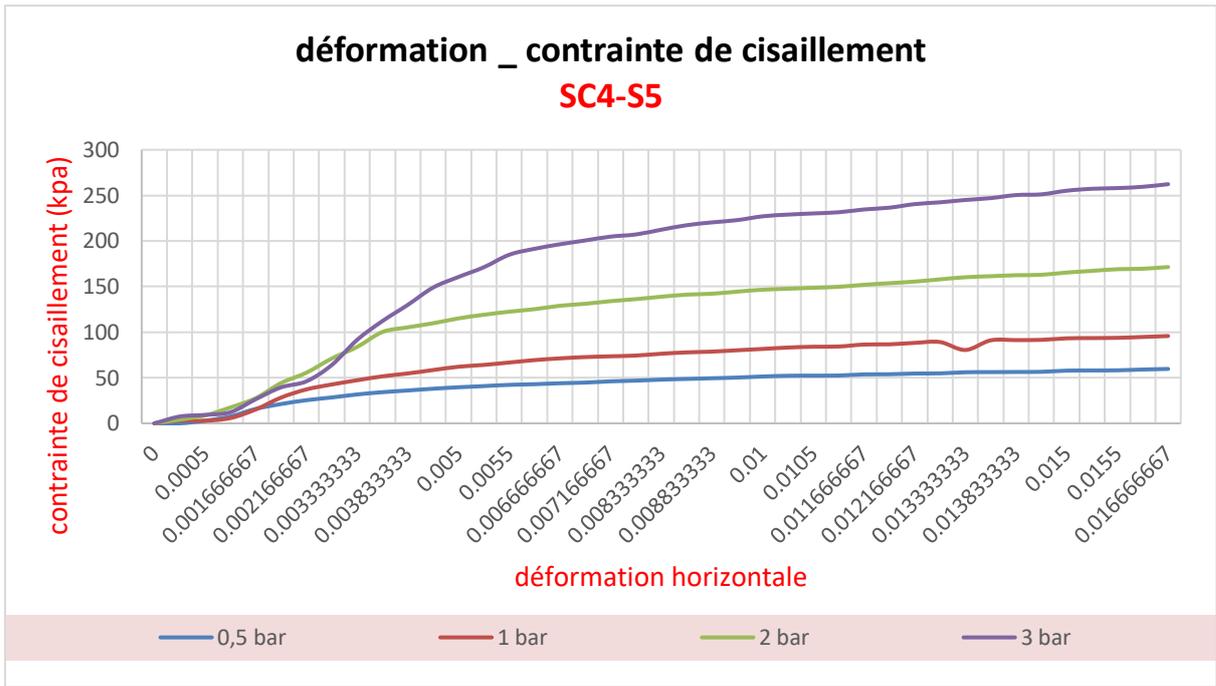


Figure V.8 : Courbes de déformation _ contrainte de cisaillement du sédiment +4% ciment +5% sable

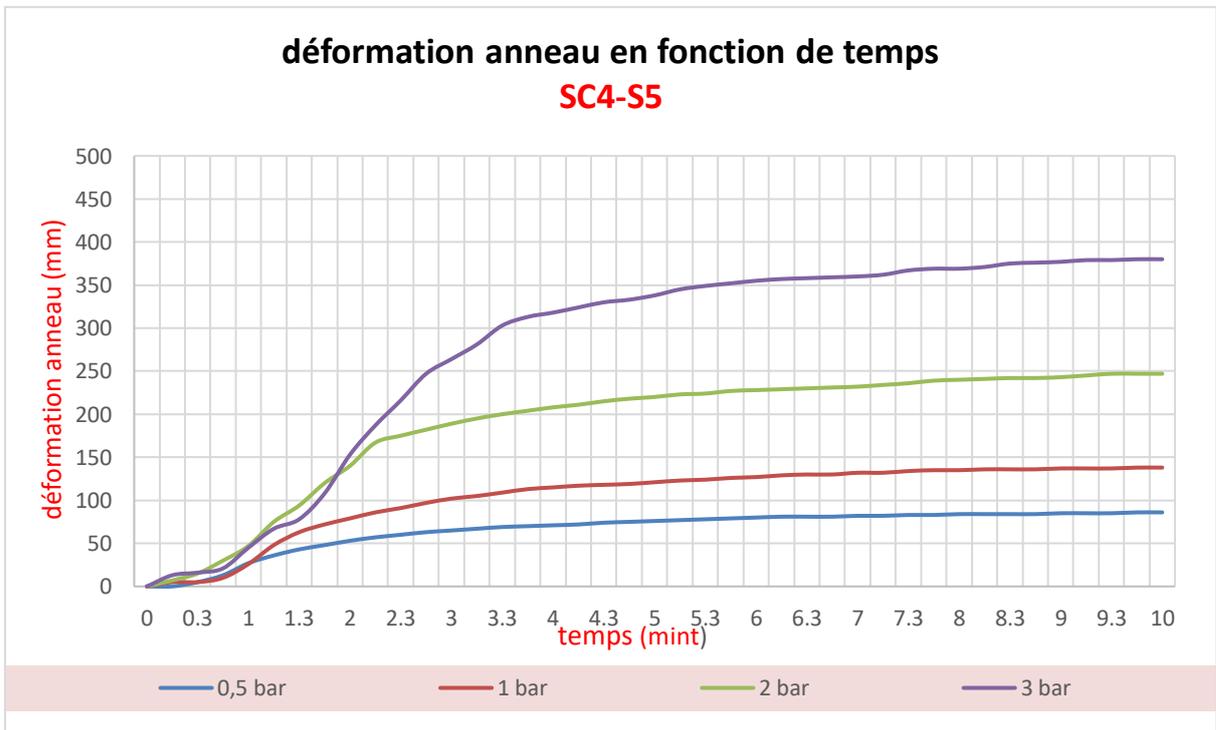


Figure V.9 : Courbes de déformation anneau en fonction de temps du sédiment +4% ciment +5% sable

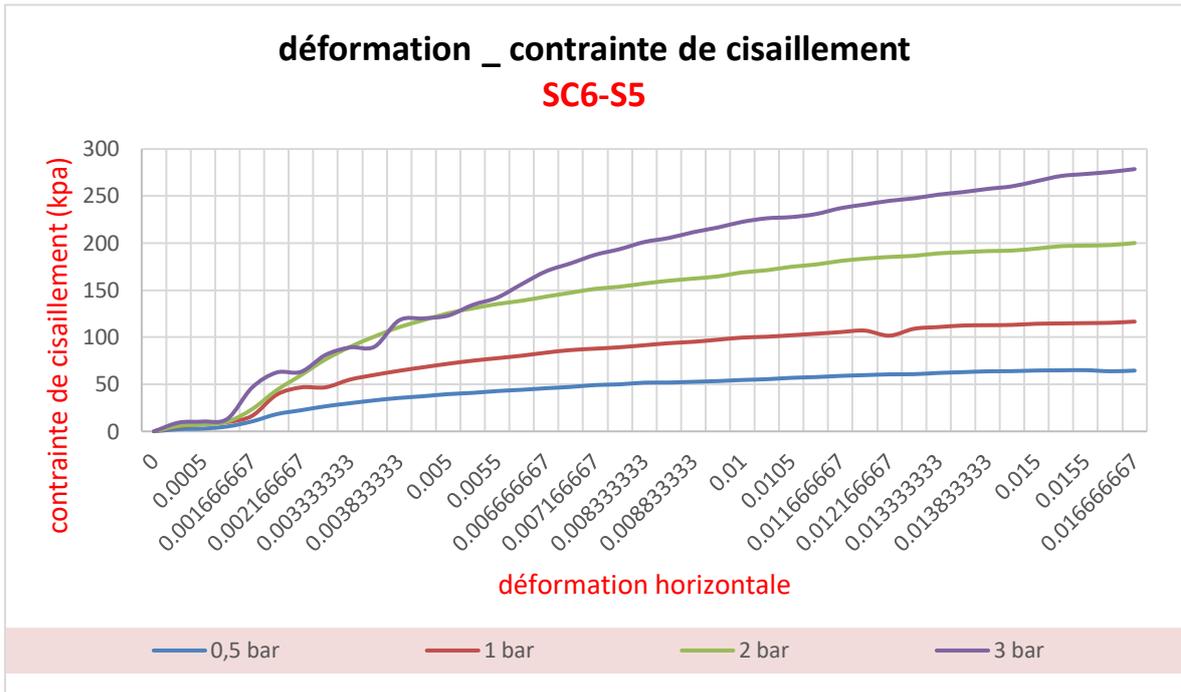


Figure V.10 : Courbes de déformation _ contrainte de cisaillement du sédiment +6% ciment +5% sable

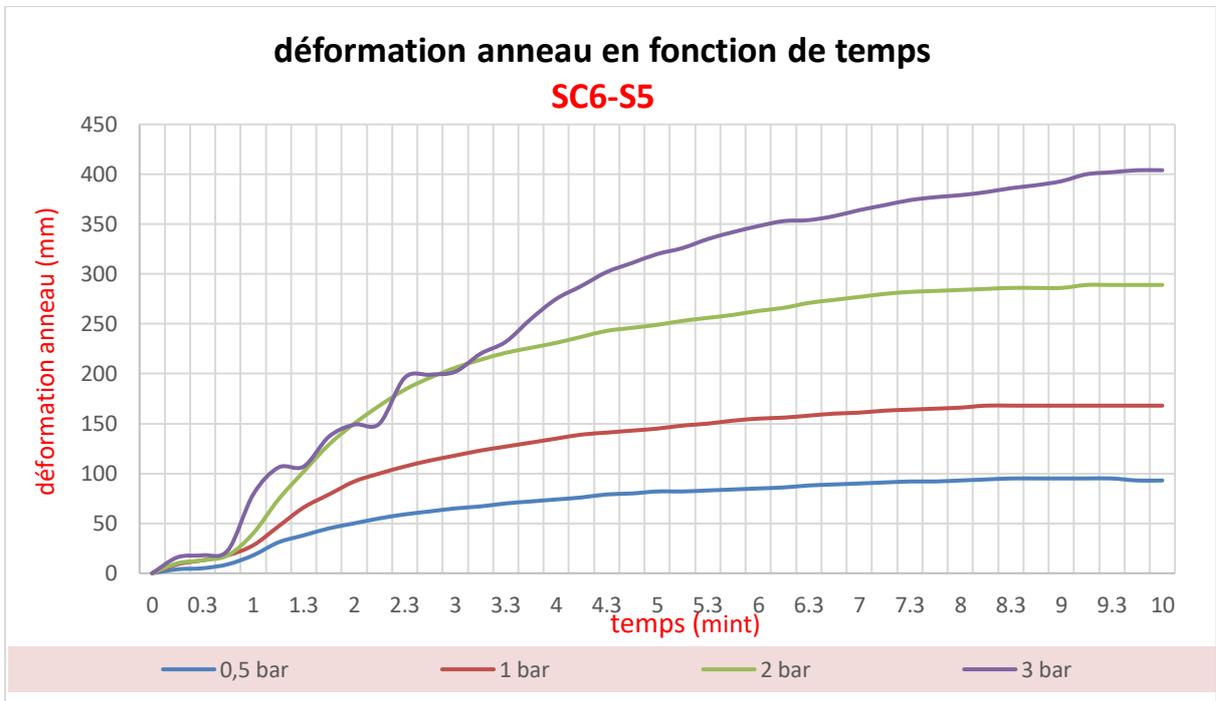


Figure V.11 : Courbes de déformation anneau en fonction de temps du sédiment +6% ciment +5% sable

Tableau V.4 : Les caractéristiques cisaillements des sols

	L'angle de frottement	La cohésion
Sédiment+2% de ciment +sable	38,93	16,4
Sédiment+4% de ciment +sable	40,297	27,202
Sédiment+6% de ciment +sable	41,309	16,4

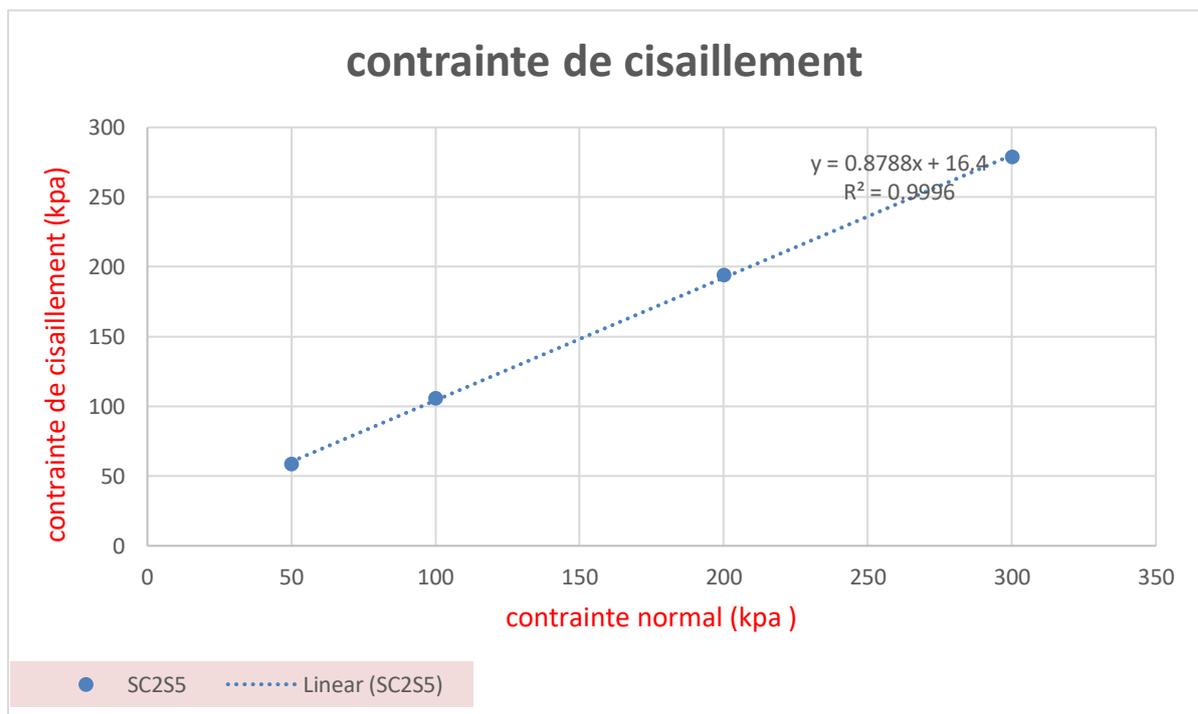


Figure V.12 : Courbe contrainte cisaillement du sédiment +2 % ciment + 5% de sable

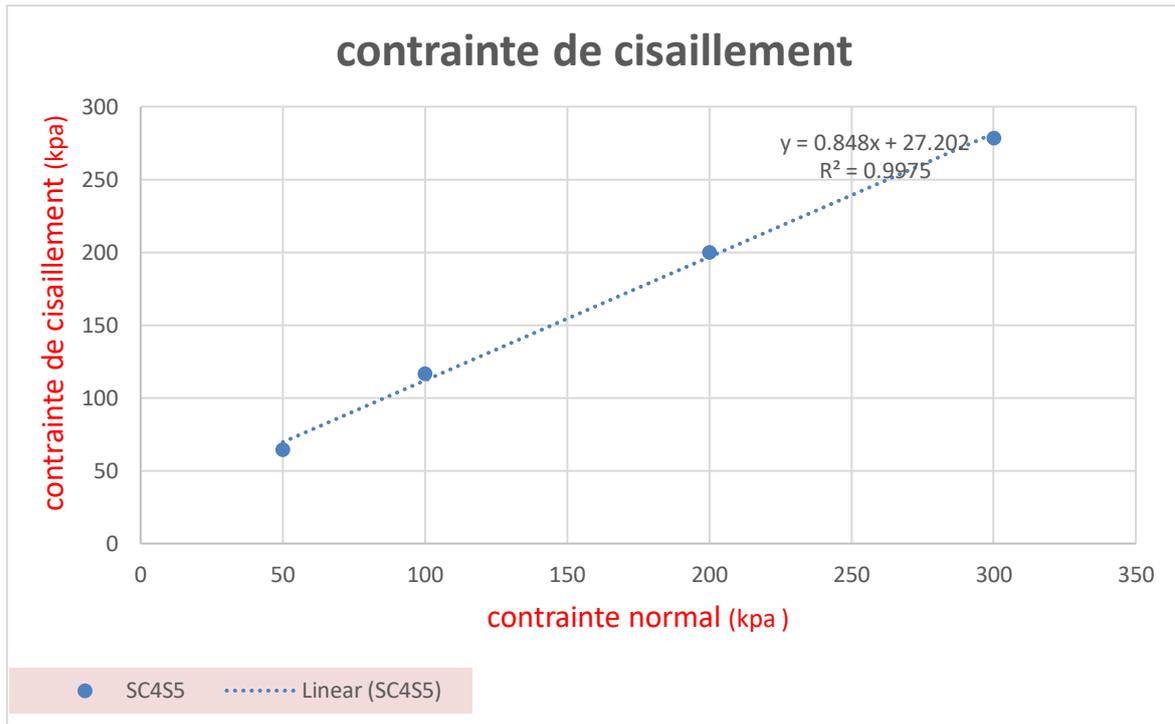


Figure V.13 : Courbe contrainte cisaillement du sédiment + 4% ciment + 5% de sable

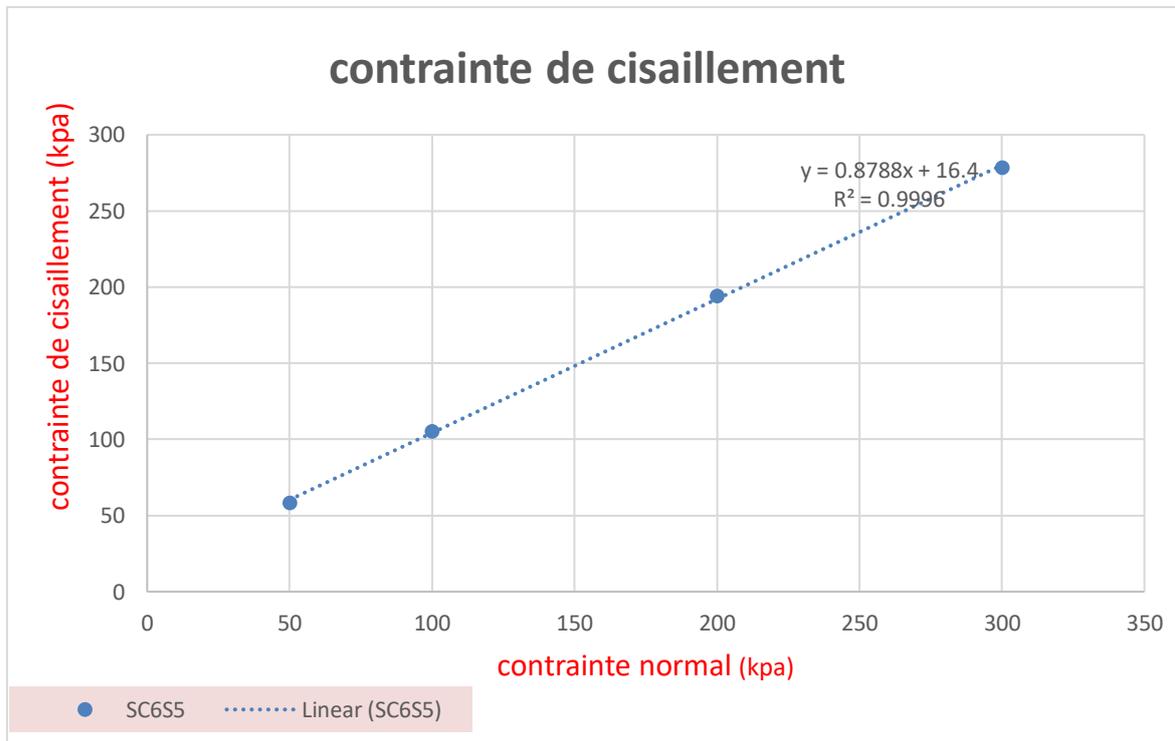


Figure V.14 : Courbe contrainte cisaillement du sédiment +6 % ciment + 5% de sable

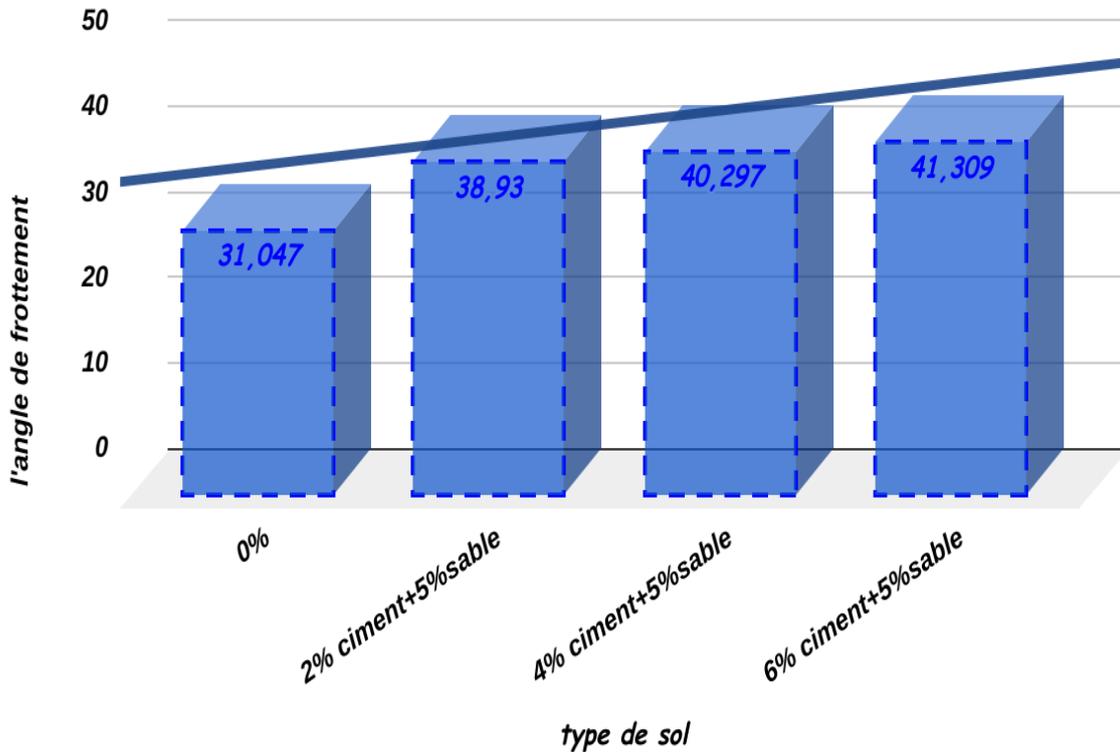
l'angle de frottement en fonction du type de sol

Figure V.15 : L'angle de frottement en fonction du type de sol

La figure 5-12 démontre de manière convaincante que l'angle de frottement augmente de manière significative à mesure que le pourcentage du sable est ajouté aux différents échantillons.

L'angle de frottement du sédiment avant le traitement est de 31,047, il augmente à 38,93 après l'ajout de 5% de sable à l'échantillon qui a 2% ciment et à 40,297 avec 4% de ciment jusqu'à il arrive à 41,309 avec 6% de ciment+5% de sable de carrière

L'augmentation des angles de frottements après l'ajout du sable de carrière aux différents échantillons indique que le sable de carrière joue un rôle dans la stabilité et la résistance des matériaux, ce dernier peut améliorer significativement les propriétés mécaniques des échantillons, ce qui peut être avantageux dans des applications dans la construction et l'ingénierie géotechnique.

V.5. Conclusion

En conclusion, l'ajout du sable de carrière à un sol entraîne une série d'effets bénéfiques sur ses propriétés géotechniques. Améliore la résistance mécanique du matériau, tandis que la diminution des teneurs en eau.

Ces résultats démontrent l'efficacité du sable et le mélange de sable plus le ciment comme agent de stabilisation.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

L'étude présentée dans ce travail a pour objectif d'évaluer l'efficacité du traitement au ciment et le mélange entre le ciment et le sable de carrière pour un type de sol du port de Bejaia. La caractérisation du sédiment marin étudié dans ce travail a montré que ce dernier présente des caractéristiques géotechniques faibles qui ne permettent pas son utilisation dans le domaine de la construction. À partir des résultats de la caractérisation il a été constaté qu'une amélioration pour sa valorisation s'impose.

Des essais au laboratoire ont été effectués afin de déterminer les caractéristiques du sédiment à l'état naturel après traitement. Les résultats ont été déterminés pour le sol naturel sans additive et pour les sols traités aux trois différents pourcentages du ciment: 2%, 4% et 6% le mélange 5% de sable de carrière avec différents pourcentages du ciment, le mélange entre les deux utilisés pour évaluer l'influence du traitement. s

L'analyse granulométrique par tamisage on conduit à conclure que le sédiment est un sable propre mal gradué. L'ajout du ciment au sol à améliorer la granulométrie du sol en augmentant les gros granulats.

L'ajout des fractions massiques de ciment et de sable ont montré que plus le pourcentage de ciment incorporé est important plus la teneur en eau optimale diminue et les paramètres de compactage améliorent. Les teneurs en eau ont diminué de plus après 7 jours de l'ajout.

Pour ce qui concerne le paramètre de cisaillement, l'ajout du ciment et l'ajout du ciment et le sable (ciment + sable) ont provoqué une amélioration de ces derniers par l'augmentation des angles de frottement. Les résultats ont montrés aussi que l'ajout des fractions du ciment influe sur les indices CBR immédiat, immersion et l'indice portant immédiat. Le ciment a donné une amélioration remarquable sur les coefficients œdométriques, en transformant le sol du peu compressible à très peu compressible aussi les coefficients des perméabilités ont été améliorés.

Le traitement du sédiment par l'ajout de fractions massiques de ciment et de sable de carrière a donnés des résultats satisfaisants en termes d'amélioration des caractéristiques géotechnique de ce matériau. Les études à long terme sont nécessaires pour évaluer plus précisément l'efficacité à long terme du traitement au ciment et au sable de carrière.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1].Raouf Achour « valorisation et caractérisation de la durabilité d'un matériau routier et d'un béton à base de sédiments de dragage » thèse doctorat, Lille 1, 11 décembre 2013.
- [2].Vincent Dubois « Etude du comportement physico-mécanique et caractérisation environnementale des sédiments marins» thèse doctorat, Université d'Artois, 31 janvier 2006.
- [3].Anger B « Caractérisation de sédiments fins de retenues hydroélectriques en vue d'une orientation vers des filières de valorisation matière » Thèse de doctorat, Caen, 2014.
- [4].Zentar R, Abriak N, Tran N, « Caractérisation et étude de l'impact sur l'environnement de sédiments dragués dans le nord de France » vol 2 ,2009.
- [5].Le Grenel de la Mer. Les sédiments de dragage (Groupe n°11). 2011.
- [6].Boutouil, M., Traitement des vases de dragage par stabilisation solidification à base de ciments et additifs 1998 Université du Havre. p. 245.
- [7].Colin, C., Valorisation de sédiments fins de dragage en technique routière 2003, Université de Caen p. 181.
- [8].Dubois, V., Etude du comportement physico-mécanique et caractérisation environnementale des sédiments marins - Valorisation en technique routière. 2006, Mines Douai. p. 291.
- [9]. Scordia, P., Caractérisation et valorisation de sédiments fluviaux pollués et traités dans les matériaux routiers. 2008. p. 189
- [10].M. Bouassida. Amélioration des sols en place. « Introduction à la géotechnique. Université Tunis El Manar Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis 2018.
- [11]. Natacha Sertier, Jean Charles Bourdeau, Alain Assina. Amélioration des cours de sols cours. Université de la Réunion. 2006.
- [12].Joseph ABDO. Le retraitement en place à froid aux liants hydrauliques

L'amélioration des caractéristique physico-mécanique d'un sol

Résumé

L'amélioration des sols par la technique de stabilisation chimique est largement utilisée dans le domaine de la géotechnique routière

Dans notre travail, nous avons étudié le comportement d'un sédiment de la région de Bejaïa traitée avec les ajouts qui sont le ciment et le sable de carrière. Notre démarche de travail s'est basée sur des essais :

- Comportement chimique à partir de l'essai bleu méthylène, DRX et FRX.
- Comportement physique à partir des granulométriques par tamisage.
- Comportement mécanique réalisés au laboratoire (compactage examiner par l'essai de Proctor, cisaillement à la boîte, essai de CBR et perméabilité).

Nous sommes arrivés à montrer à travers les essais de laboratoire pour les différents pourcentages des ajouts, y a des améliorations de la masse volumique sèche, la résistance, des caractéristiques de cisaillement et la perméabilité.

Abstract

The improvement of soils through the chemical stabilization technique is widely used in the field of road geotechnics. In our work, we studied the behavior of a sediment from the Bejaïa region treated with additives, which are cement and quarry sand. Our approach was based on the following tests:

- Chemical behavior using the methylene blue test, XRD, and XRF analysis.
- Physical behavior through particle size distribution by sieving.
- Mechanical behavior tests performed in the laboratory (compaction examined by the Proctor test, shear box test, CBR test, and permeability).

Through laboratory tests for different percentages of additives, we were able to demonstrate improvements in dry density, strength, shear characteristics, and permeability.

المخلص

إن تحسين التربة باستخدام تقنية التثبيت الكيميائي يستخدم على نطاق واسع في مجال الجيوتكنيك الطرقي. في عملنا، قمنا بدراسة سلوك الرواسب من منطقة بجاية التي تمت معالجتها بإضافات تشمل الإسمنت ورمل المحاجر، استندت منهجية عملنا على الاختبارات التالية:

- السلوك الكيميائي باستخدام اختبار أزرق الميثيلين، وDRX وFRX.
 - السلوك الفيزيائي باستخدام التحليل الحبيبي عن طريق الغربلة.
 - السلوك الميكانيكي الذي تم اختباره في المختبر (الدمك باستخدام اختبار بروكتور، اختبار القص بالصندوق، اختبار CBR والنفاذية).
- أظهرت الاختبارات المخبرية لنسب مختلفة من الإضافات تحسينات في الكتلة الحجمية الجافة، المقاومة، خصائص القص والنفاذية.