



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement supérieur  
Et de la Recherche Scientifique

**Université ABDERRAHMANE MIRA - BEJAIA –**  
Faculté de Technologie  
Département de Génie Civil

## Mémoire de fin d'étude

*En vue de l'obtention d'un diplôme de Master en Génie Civil*

**Option: Structures**

### ***Thème***

**Etude de la valorisation des sédiments de dragage dans  
les travaux routiers : application dans les matériaux  
auto compactant pour le remblayage des tranchées**

Réalisé par :

**BELADJAT ZAHIR  
GUENANA ABDELMOUMIN**

Promoteur :

**Mr. BANOUNE B.**

Devant le jury :

**Mme .DJERROUD T.  
Mr.OUDNI N.**

**PROMOTION : JUIN 2025**

# Remerciements

Tout d'abord, on remercie **DIEU** pour nous avoir accordé la patience, la volonté et la santé tout au long de notre parcours afin d'atteindre le master et de réaliser ce travail.

Ensuite on remercie notre encadrant, Monsieur **BANOUNE Brahim** d'avoir humblement accepté de nous encadrer, d'avoir partagé son expérience et ses connaissances avec nous, pour sa rigueur scientifique, son professionnalisme et sa patience qui nous ont permis de bien comprendre le raisonnement scientifique afin de mener à bien ce travail. Veuillez-trouvez ici l'expression de notre profonde gratitude.

On remercie le président du jury et l'examineur, pour l'honneur qu'ils nous ont fait, en acceptant d'examiner et d'évaluer ce travail, et on remercie les ingénieurs des laboratoires **MDS** et **MDC** et Monsieur **Agoun Lounis** de nous avoir accompagnés et aidé durant nos pratiques.

On remercie également, Monsieur **Yanis Lounas KECHA**, pour son aide précieuse durant la rédaction de ce mémoire et pour ses précieux conseils, pour le partage de son expérience et de ses connaissances scientifiques.

Enfin on remercie du fond du cœur chaque **enseignant** qui nous a enseigné durant notre cursus universitaire et chaque personne ayant contribué de près ou de loin à notre réussite et notre bien-être au sein de l'université.

BELADJAT Zahir et GUENANA Abdelmoumin

*Merci!*



*Je dédie ce travail à :*

Mes très chers parents, qui ont fait de leur mieux pour m'offrir un environnement propice au travail, des valeurs, une éducation et une famille unique. Merci pour votre temps, votre affection et votre soutien depuis toujours.

À mon cher frère aîné **Mohand** et à mes chères sœurs.

À toute ma famille paternelle et maternelle.

À la mémoire de ma grand-mère **Zahra**, mon grand-père **Tahar** (Ouali) et mon grand-père **Mohand Ameziane** ; Paix à leur âmes.

À tous mes amis et mes cousins, en particulier **Djalal**, **Abdou** et surtout **Lounas** pour n'avoir jamais hésité à répondre présents en cas de besoin.

À mon binôme et camarade **Abdelmoumin** pour son aide et sa participation précieuse dans la réalisation de ce travail.

À tous mes enseignants.

*BELADJAT Zahir*



Les mots manquent parfois pour exprimer ce sentiment de satisfaction face  
à un travail achevé, même imparfait.

Je ne peux m'empêcher de penser à mes chers parents, mon père [El Hachmi](#)  
(qu'Allah lui fasse miséricorde), ma mère [Magdouda](#), qui au prix d'énormes  
sacrifices, m'ont accompagné depuis ma naissance, se sont inquiétés pour mon  
avenir. Qu'ils trouvent ici le témoignage d'une reconnaissance éternelle et d'un  
amour indéfectible.

À mes frères bien-aimés, [Mohand Cherif](#), [Madani](#), [Youcef](#), [Abdeslam](#),  
[Abdelghani](#), ainsi qu'à mes sœurs adorées, [Zahia](#), [Hassina](#), [Lila](#) : merci pour  
vos conseils précieux tout au long de mes études.

À notre encadrant, M. [Brahim Banoune](#), dont les orientations ont été  
indispensables.

À mes meilleurs amis, et à tous ceux qui me sont chers, merci pour votre soutien.

Enfin, une pensée spéciale pour mon ami et binôme, [Zahir](#), dont la présence et la  
collaboration ont été inestimables.

*GUENANA ABDELMOUMIN*

# Liste des Tableaux

Tableau 1 : Classification granulométrique des sols selon le guide GTR.....	4
Tableau 2: Charges Solides en suspension dans les crus de l'Oued Soummam (Banoune, 2016) .....	16
Tableau 3: Teneur en matière organique des sédiments Soummam (Banoune, 2016).....	20
Tableau 4 : Masse volumique des particules solides des sédiments (Banoune, 2016).....	21
Tableau 5 : Caractéristique physique des sédiments (Banoune, 2016).....	23
Tableau 6 : Paramètres granulométrique des sédiments (Banoune, 2016).....	23
Tableau 7 : Coefficients d'uniformité et de courbure des sédiments (Banoune, 2016).....	24
Tableau 8: Degré de plasticité des sols (Magnan, 1997).....	25
Tableau 9: Valeur des limites d'Atterberg et de l'indice de plasticité.....	28
Tableau 10 : (a): Potentiel de gonflement d'après snethen(1980) ; (b) Potentiel de gonflement selon le BRE(1980).....	29
Tableau 11: Classification des sols en fonction de la valeur au bleu de méthylène.....	29
Tableau 12: Valeur au bleu (VBS) des sédiments brut.....	31
Tableau 13: Synthèse sur les caractéristiques des sédiments brut.....	32
Tableau 14: Evolution de l'indice de consistance pour chaque ajout.....	45
Tableau 15: Résultats de l'essai de l'affaissement en fonction du taux de ciment.....	46

# Liste des Figures

Figure 1: processus de la sédimentation (Mazen Samara., 2007).....	3
Figure 2 : Exemples de courbes granulométriques. (1) Limon argileux, (2) Limon, (3) Argile sableuse, (4) Sable grossier mal gradué, (5) Sable alluvionnaire, (6) Grave alluvionnaire (Banoune, 2016).....	4
Figure 3 : Diagramme triangulaire des sols fins.....	5
Figure 3 : Diagramme de plasticité -Zones de classification.....	6
Figure 4 : Les états possibles d'un sol, (Léreau, 2006).....	7
Figure 5 :Relation entre les limites d'Atterberg et la teneur en matière organique (Husein et al., 1999).....	8
Figure 6 :Influence de la qualité de matière organique sur la caractéristique de compactage du sol (Hussein et al., 1999).....	8
Figure 7 : Les inconvénients des sédiments sur les milieux naturels (Mazen, 2007).....	10
Figure 8 : Image illustrant une tranchée de route.....	13
Figure 9 : Carte hydrogéologique de la wilaya de Bejaia (Mouni, 2004).....	16
Figure 10 : Observation des sédiments, photos prises avec un Microscope Electronique à Balayage (Banoune, 2016).....	17
Figure 11 : prélèvement manuel des sédiments.....	18
Figure 12 : Phases cristallines des sédiments (Banoune, 2016)	
Figure 13 : Courbe granulométrique de l'échantillon, S.A (Sable d'Aokas), S( Sediments).....	22
Figure 14: Positionnement des sédiments dans la classification des sols fins.....	24
Figure 15 : Limites d'Atterberg et indice de plasticité.....	26
Figure 16 : Fermeture de la rainure (Banoune, 2016).....	26
Figure 17 : Relation entre les Nombres de coups et la teneur en eau.....	27
Figure 18:Rouleau de sol fin (Banoune, 2016).....	27
Figure 19: Classification des sédiments de la soummam (S) selon casagrande.....	28
Figure 20:(a)Exécution de l'essai au bleu de méthylène;(b)Test de la tache;(c) Conclusion de l'essai (Banoune, 2016).....	30
Figure 21:Classification des sédiments selon GTR(2000).....	32
Figure 22 : Vue Satellite du site de prélèvement des sédiments.....	34
Figure 24 : Collection des sédiments.....	35
Figure 25 : Séchage a l'air libre.....	35
Figure 26 : Matériel d'analyse de la limite d'Atterberg.....	36
Figure 27 : Materiel de l'essai de l'affaissement : (1) Truelle, (2) Cone d'Abrams en acier galvanisé, (3) Reglet de mesure, (4) Plaque en acier, (5) Tige en Acier.....	37
Figure 28 : Appareil de testage CBR.....	38
Figure 29 : Tracés des courbes effort-pénétration.....	39
Figure 30 : Eprouvettes après moulage.....	40
Figure 31 : Tourneur fraiseur de moulage.....	40
Figure 32 : Eprouvettes a différentes dimensions.....	41
Figure 33 : Eprouvettes perforée pour le cas essorable.....	41
Figure 34 : courbe de WL(sédiments sans ajouts).....	42
Figure 35: courbe de WL (sédiments +2% de ciment).....	43
Figure 36 : courbe de WL (sédiments+4% de ciment).....	44
Figure 37: courbe de WL (sédiments+6% de ciment).....	44

Figure 38: Les limites de liquidité, de plasticité et l'indice de plasticité pour chaque formulation.....	45
Figure 39 : Illustration sur l'application de l'essai.....	47
Figure 40 : courbe d'IPI (2%C).....	48
Figure 41 : courbe d'IPI (4%C).....	49
Figure 42 : Courbe d'IPI (6%C).....	50
Figure 43 : Courbe d'IPI(6%C+20%S).....	51
Figure 44 : Représentation de l'évolution de la teneur en eau.....	52
Figure 45 : Observation de retrait.....	53
Figure 46 : Courbe contraintes-déformation (2%).....	54
Figure 47 : Courbe contraintes-déformation(4%).....	54
Figure 48 : Courbe contraintes-déformation(6%).....	55
Figure 49 : Variation de la contrainte maximale en fonction du pourcentage de ciment ajouté.....	56
Figure 50 : Variation de la déformation en fonction du pourcentage de ciment ajouté.....	57
Figure 51 : Courbe contrainte-déformation(2%).....	57
Figure 52 : Courbe contrainte-déformation (4%).....	58
Figure 53 : Courbe contrainte-déformation(6%).....	59
Figure 54 :Variation de la contrainte maximale en fonction du pourcentage de ciment ajouté.....	59
Figure 55 :rupture d'éprouvette.....	60
Figure 56 :appareil d'écrasement .....	60

# Liste des Abréviations

**Cc** : Coefficient de courbure.

**Cu** : Coefficient d'uniformité.

**D10** : Diamètre des grains à 10 % de passant.

**D30** : Diamètre des grains à 30 % de passant.

**D60** : Diamètre des grains à 60 % de passants.

**ps** : Masse volumique des particules solide

**IC** : Indice de consistance

**IP** : Indice de plasticité

**IPI** : Indice Portant Immédiat

**VBS** : Valeur au bleu de méthylène

**W** : Teneur en eau

**WL** : Limite de liquidité

**WP** : Limite de plasticité

**RC** : Résistance à la compression simple

**Rt** : Résistance à la traction

**GTR** : Guide des terrassements routiers

**GTS** : Guide du traitement des sols

**LCPC** : Laboratoire Central des Ponts et  
Chaussées

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

**MO** : Matières organiques

**Novosol®** : Procédé industriel de  
phosphatation (ajout d'acide phosphorique  
H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> pour stabiliser les métaux présents  
dans les sédiments) et calcination (à 650°C  
afin de dégrader la matière organique)

**ETM** : éléments traces métalliques

**HAP** : hydrocarbures polycycliques  
aromatiques

**PCB** : polychloro biphényle

**DDT** :dichlorodiphényl-trichloroéthane

**GIS** :Gestion Intégrée des Sédiments

**MCFR** : Matériaux contrôlé a faible  
résistance

**MAR** : matériaux  
autocompactants réexcavables



# Sommaire

Liste des Tableaux .....	
Liste des Figures .....	
Liste des Abréviations .....	
Sommaire .....	
Introduction.....	1
Chapitre 1: REVUE DE LA LITTERATURE	
1.1. Introduction.....	3
1.2. Définition et origine des sédiments de dragage.....	3
1.2.1. Composition des sédiments.....	3
1.2.2. Propriétés physique des sédiments.....	4
1.3. Problématique des sédiments de dragage.....	9
1.3.1. Dragage.....	9
1.3.2. Les polluants dans les sédiments.....	9
1.3.3. Gestion des sédiments.....	10
1.4. Domaines d'application.....	12
1.4.1. Matériaux auto compactant appliqués sur les remblayages des tranchées.....	12
1.4.2. Remblayage des tranchées.....	13
1.5. Conclusion.....	14
Chapitre 2 : CARACTERISATION DES SEDIMENTS	
2.1. Introduction.....	15
2.2. Bassin versant de l'Oued Soummam.....	15
2.3. Observation MEB.....	17
2.4. Caractérisation physico-chimique.....	18
2.5. Teneur en eau.....	18
2.6. Teneur en matière organique.....	19
2.6.1. Mode opératoire.....	19
2.7. Analyse minéralogique (Diffraction des rayons X).....	20
2.8. Masse volumique des particules solide (ps).....	20
2.8.1. Mode opératoire.....	21
2.9. Distribution granulométrique.....	21

2.9.1. Granulométrie par Tamisage.....	21
2.9.2. Analyse Sédimentométrique.....	22
2.10. Argilosité.....	24
2.10.1. Détermination des limites d'Atterberg.....	25
2.10.2 Essai du bleu de Méthylène.....	29
2.10.3 Mode opératoire.....	30
2.10.4 Classification selon le GTR.....	31
2.11 Conclusion.....	33
<b>Chapitre 3 : MATERIEL ET METHODES</b>	
3.1. Introduction.....	34
3.2. Description du site de prélèvement.....	34
3.3. Protocole d'échantillonnage et de préparation des sédiments.....	35
3.4. Limite Atterberg.....	36
3.4.1. But de L'essai.....	36
3.4.2. Matériel pour déterminer la limite de liquidité.....	36
3.4.3. Matériel pour déterminer la limite de plasticité.....	37
3.4.3.1. Mode opératoire.....	37
3.4.4. Déterminations l'affaissement au cône d'Abrams.....	37
3.4.4.1. Mode opératoire.....	37
3.5. Test CBR.....	38
3.5.1. Rapport de Portance de Californie.....	38
3.5.3. Traitement des résultats CBR.....	39
3.6. Réalisation et conservation des éprouvettes.....	40
3.6.1. Préparation des éprouvettes.....	40
3.6.1.1. Conditions de conservation.....	40
<b>Chapitre 4 : RÉSULTATS ET DISCUSSION</b>	
4.1. Introduction.....	42
4.2. limites d'atterberg.....	42
4.3. Test d'affaissement (cône d'Abrams).....	45
4.4. CBR (indice portant immédiat).....	47
4.5.1. Résultats des essais en compression simple.....	53
4.5.2. Résultats des essais en traction.....	57
Conclusion générale.....	61
Références .....	



# INTRODUCTION

## Introduction

L'accumulation de vase diminue la profondeur des cours d'eau, ce qui limite le débit et peut provoquer des débordements ou des inondations en période de crue. Cette vase en quantités importante résulte de l'accumulation de sédiments fins, comme les limons, argiles et matières organiques, transportés par les eaux de ruissellement jusqu'aux lits des cours d'eau. Cette entassement progressive entraîne plusieurs impacts négatifs. Tout d'abord, elle réduit la profondeur et la capacité d'écoulement des rivières, augmentant le risque de crues et d'inondations. Elle gêne également la navigation fluviale, notamment dans les zones portuaires ou les canaux utilisés pour le transport. Du point de vue écologique, l'envasement altère les habitats aquatiques : il recouvre les frayères, perturbe la vie benthique et diminue l'oxygénation des fonds, nuisant à la biodiversité.

Les sédiments peuvent aussi contenir des polluants issus des activités humaines (pesticides, métaux lourds), qui contaminent l'eau et les organismes vivants. L'envasement modifie également le régime d'écoulement, ce qui peut provoquer l'érosion des berges et fragiliser les infrastructures situées à proximité (**CEMAGREF., 2004**).

Les cours d'eau, sont essentiels aux écosystèmes mais subissent une forte pression liée à l'envasement, avec près de des quantités importante de sédiments accumulés chaque année, dont une partie est polluée. Ces sédiments contiennent des éléments polluants. Les causes anthropiques sont majeures : les rejets industriels introduisent dans les milieux aquatiques des métaux lourds et des hydrocarbures. L'agriculture intensive, quant à elle, contribue via les engrais et les pesticides, tout en accentuant l'érosion des terres. À cela s'ajoutent les effets de l'urbanisation, comme l'imperméabilisation des surfaces et la surcharge des réseaux d'assainissement, qui entraînent un apport supplémentaire de polluants. La compréhension des mécanismes de transfert et d'accumulation de ces polluants est essentielle pour orienter les politiques de gestion et de remédiation (**Berteau et al., 1993**).

Les sédiments issus du dragage des cours d'eau, souvent perçus comme des déchets, peuvent être transformés en ressources utiles dans le domaine du génie civil, en particulier pour les travaux routiers. Plusieurs études et projets pilotes ont démontré leur potentiel en tant que matériaux de construction, à condition qu'ils soient correctement caractérisés et traités (**IFSTTAR, 2015**).

Avant tout usage, ces sédiments doivent faire l'objet d'analyses géotechniques et environnementales pour évaluer leur composition, leur portance et leur niveau éventuel de contamination. Après stabilisation (par chaulage, ajout de liants hydrauliques ou traitement

mécanique), ils peuvent être réutilisés dans différentes couches de la structure routière : en remblai, en couche de forme ou en sous-couche de chaussée (**Projet SEDIMATERIAUX, CEREMA, 2020**).

Cette valorisation permet de réduire la pression sur les ressources naturelles, en substituant des granulats naturels par des matériaux recyclés, et de diminuer les coûts liés au transport et à l'élimination des sédiments. Elle Contribue ainsi à une approche d'économie circulaire dans les projets routiers, tout en répondant aux exigences de performance technique et de durabilité.

Toutefois, pour que cette réutilisation soit pérenne, elle doit être encadrée par des normes strictes, comme celles définies par le guide SETRA-LCPC sur l'utilisation des matériaux alternatifs dans les infrastructures routières (**SETRA, 2006**), garantissant une sécurité optimale et une compatibilité environnementale.

En résumé, la réutilisation des sédiments dragués dans les travaux routiers offre une solution durable, économique et techniquement viable, à condition d'une gestion rigoureuse des risques et d'un traitement adapté des matériaux.

L'objectif de ce mémoire est ainsi d'identifier une composition à base de sédiments fluviaux, capable d'assurer une portance suffisante et une mise en œuvre aisée, répondant aux contraintes du remblayage de tranchées routières. La problématique centrale repose donc sur la capacité à transformer un matériau fin, hétérogène et initialement peu performant en un matériau auto-compactant, stable et durable, par l'ajout de liants hydrauliques, tout en respectant les normes géotechniques et environnementales en vigueur.

# C HAPITRE 1

**REVUE DE LA**

**LITTÉRATURE**

## 1.1. Introduction

Le dragage des sédiments fluviaux est une opération d'entretien ou de restauration hydraulique visant à enlever les matériaux accumulés dans le lit des cours d'eau ou au bord de la rivière, principalement constitués de limons, sables, graviers ou matières organiques. Cette intervention permet de maintenir les caractéristiques morphologiques et hydrauliques des chenaux de navigation. Bien que souvent perçus comme des déchets, ces matériaux présentent un fort potentiel de valorisation, notamment dans le domaine du génie civil, où ils peuvent être réutilisés dans diverses applications telles que le remblai.

## 1.2. Définition et origine des sédiments de dragage

### 1.2.1. Composition des sédiments

Les sédiments, et en particulier ceux issus des opérations de dragage, sont des matériaux très hétérogènes. Ils proviennent à la fois de processus naturels, comme l'érosion des continents, et de sources anthropique, telles que les rejets industriels, domestiques ou agricoles. Ces particules, majoritairement fines, sont transportées par des agents naturels tels que le vent, les cours d'eau ou encore la gravité, avant de se déposer dans les milieux aquatiques, notamment les fonds marins et les lits de rivières. On distingue ainsi les sédiments marins et les sédiments fluviaux.

Selon **Schneider., (2001)**, les sédiments peuvent être classés selon deux origines principales : endogène, lorsqu'ils sont issus du milieu lui-même (par exemple la décomposition des macrophytes ou des débris animaux), et exogène, lorsqu'ils proviennent d'apports extérieurs, tels que la précipitation des poussières atmosphériques ou le ruissellement des eaux. Ces derniers peuvent également être d'origine naturelle (érosion des sols, dégradation de matière végétale) ou résultent des activités humaines.

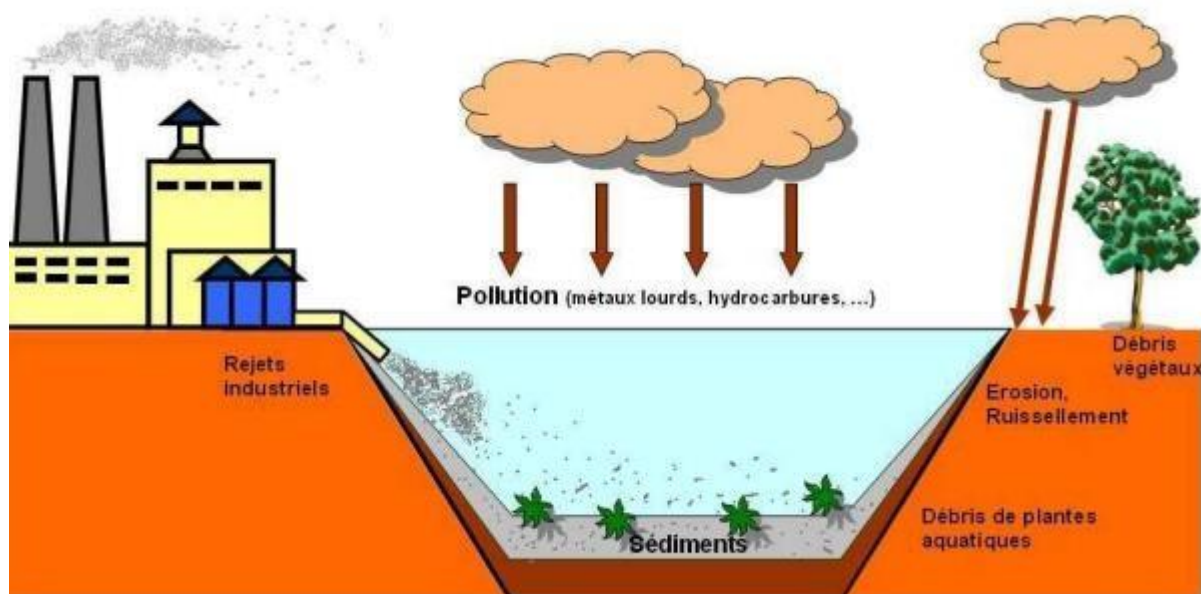


Figure 1 : processus de la sédimentation (Mazen Samara., 2007)

## 1.2.2. Propriétés physique des sédiments

### 1.2.2.1. Granulométrie

La distribution granulométrique constitue un paramètre essentiel dans la caractérisation physique des sédiments. Elle vise à déterminer la taille des particules présentes et à analyser leur répartition au sein de la phase solide. Cette analyse permet d'appréhender les propriétés mécaniques et le comportement hydrodynamique du matériau. La phase solide est ainsi définie par les dimensions des grains et leur proportion relative dans l'ensemble du sédiment (Banoune, 2016).

Tableau 1 : Classification granulométrique des sols selon le guide GTR.

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

80  $\mu$ m  
Vase  
↓

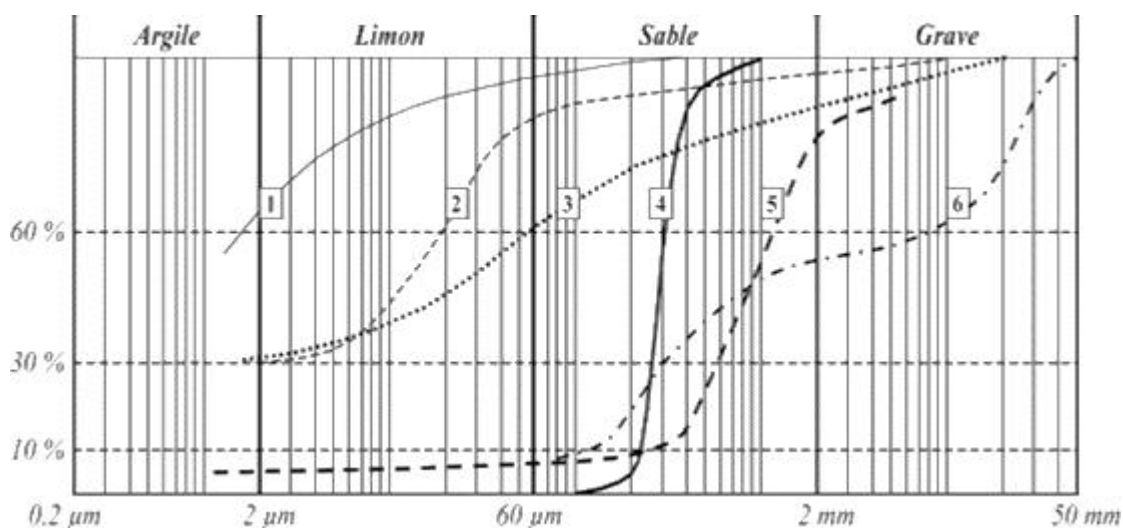


Figure 2 : Exemples de courbes granulométriques. (1) Limon argileux, (2) Limon, (3) Argile sableuse, (4) Sable grossier mal gradué, (5) Sable alluvionnaire, (6) Grave alluvionnaire (Banoune, 2016)



La taille des particules d'un sol détermine sa texture. En effet, l'analyse granulométrique permet d'estimer les proportions de sable, de limon et d'argile qu'il contient. Elle permet aussi de calculer un coefficient d'uniformité, qui donne une idée de la régularité de la taille des grains.

$$= \text{---}$$

$d_{60}$ : Ouverture du tamis laissant passer 60 % du poids des grains

$D_{10}$  : Est appelé diamètre efficace.

Pour  $C_U > 2$  la granulométrie est étalée,  $C_U < 2$  la granulométrie est serrée.

Plus la granulométrie est serrée plus la pente de la partie médiane de la courbe est exprimée. On définit aussi le coefficient de courbure :  $C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10}d_{60}}$

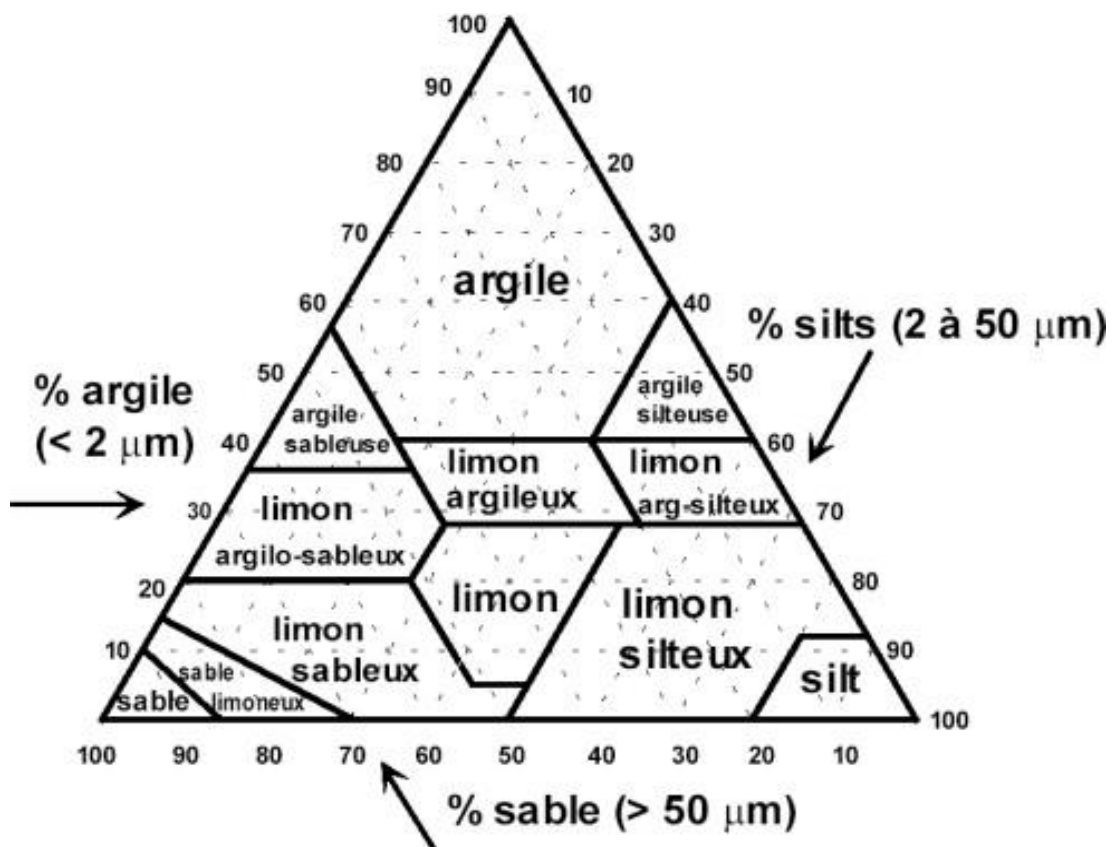


Figure 3 : Diagramme triangulaire des sols fins

### 1.2.2.2. Limites d'Atterberg

Les teneurs en eau qui définissent les différents états de consistance d'un sol sont appelées limites de consistance, ou limites d'Atterberg. Exprimées en pourcentage, elles incluent principalement la limite de plasticité ( $w_p$ ) et la limite de liquidité ( $w_L$ ). Ces paramètres sont utilisés pour identifier et classer les sols fins, dont les particules ne sont pas visibles à l'œil nu. Ils complètent utilement les résultats issus des analyses granulométriques, qu'elles soient effectuées par diffraction laser ou par sédimentation en colonne.

La limite de plasticité ( $w_p$ ) correspond à la teneur en eau séparant l'état plastique de l'état semi-solide ; elle varie en général de 0 % à 40 %, bien que théoriquement elle puisse atteindre 100 %. La limite de liquidité ( $w_L$ ), quant à elle, marque la transition entre l'état plastique et l'état liquide ; elle reste le plus souvent inférieure à 100 %. La différence entre ces deux valeurs constitue l'indice de plasticité ( $IP = w_L - w_p$ ), qui délimite l'intervalle dans lequel le sol présente un comportement plastique. Un indice élevé indique généralement une forte teneur en argile et une plus grande plage de plasticité.

Selon **Wray (1985)**, un sol est considéré non plastique si  $IP$  est compris entre 0 et 5, faiblement plastique entre 15 et 30, et très plastique si  $IP$  dépasse 35.

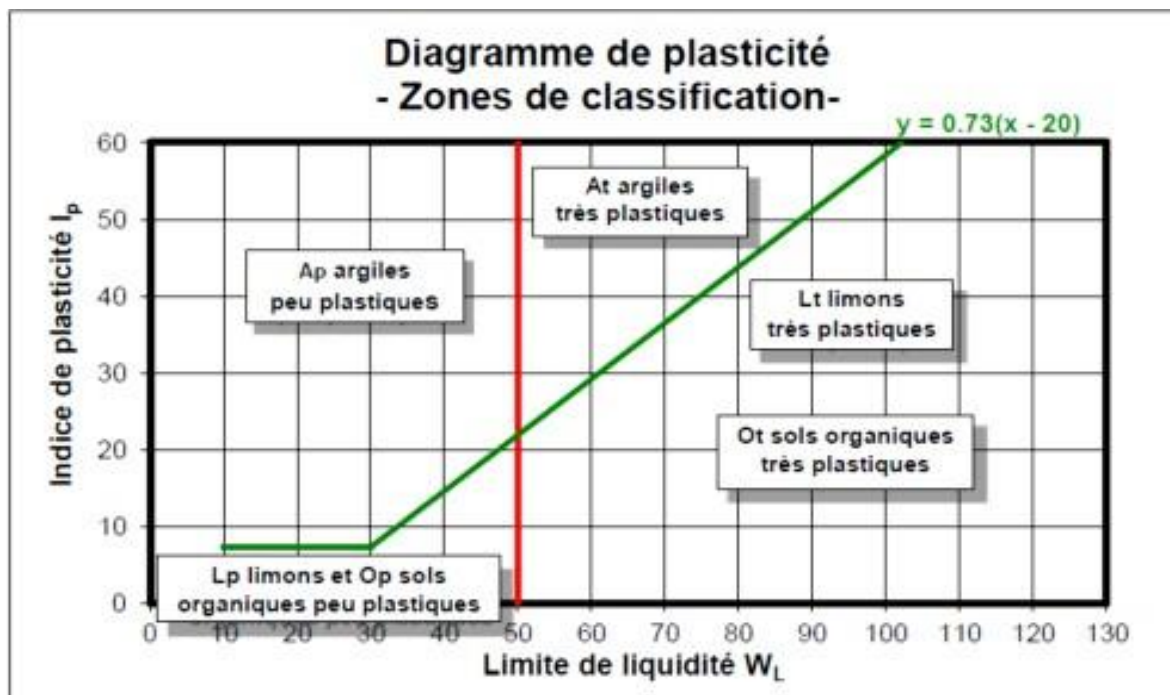


Figure 4 : Diagramme de plasticité -Zones de classification-

Ces limites d'Atterberg, associées aux différents états du sol, sont liées aux niveaux d'humidité de transition dans la consistance d'un sol (NF P 94-051, 1993).

- Limite de liquidité ( $W_L$ ) : La quantité d'eau à la limite entre les états liquide et plastique d'un sol.
- Limite de plasticité ( $W_P$ ) : Contenu en eau à la transition entre les états plastique et solide.

L'indice de plasticité ( $I_p$ ) est le résultat de la soustraction de la limite de liquidité  $W_L$  à la limite de plasticité  $W_P$ . L'indice qui détermine l'étendue du domaine plastique.  
 $IP = W_L - W_P$ .

Dans le cas des sols fins, la détermination de  $W_L$  et de l'indice IP permet de faire une classification basée sur le diagramme de Casagrande. Dans l'exemple des sols fins, la mesure de  $W_L$  et de l'indice IP permet de réaliser une classification selon le diagramme de Casagrande.

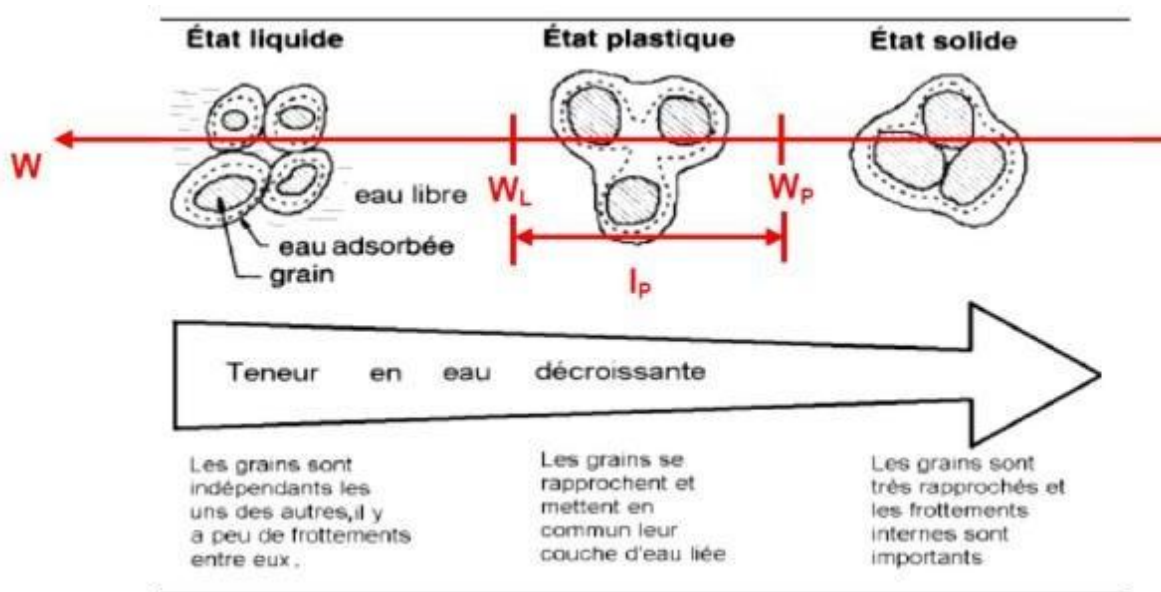


Figure 5 : Les états possibles d'un sol, (Léreau, 2006).

### 1.2.2.3. Matière organique

Les matières organiques possèdent à la fois une origine de débris végétaux et de micro-organismes. Selon **Busnot (1991)**, la fraction organique d'un sédiment est composée de substances non humiques majoritairement formées aux agents pathogènes, acides organiques, acides aminés, protéines et glucides.

Les substances humiques dont l'origine découle de l'évolution des matières organiques ayant subi des transformations par des procédés chimiques. L'interaction des matières organiques et des fractions minérales agissent ensemble de manière intense sur les géotechniques des sols. En effet, les matières organiques possèdent une forte capacité de rétention d'eau, ce qui fait augmenter les limites de consistance du sol. Il a également été prouvé qu'un sol qui possède une forte concentration en matière organique, sa limite de plasticité sera également augmentée (Keller, 1982 ; Odell et al., 1996). Husein et al., (1999) affirment que la plasticité et la liquidité sont directement liées à la quantité de matières organiques présentes dans le sol.

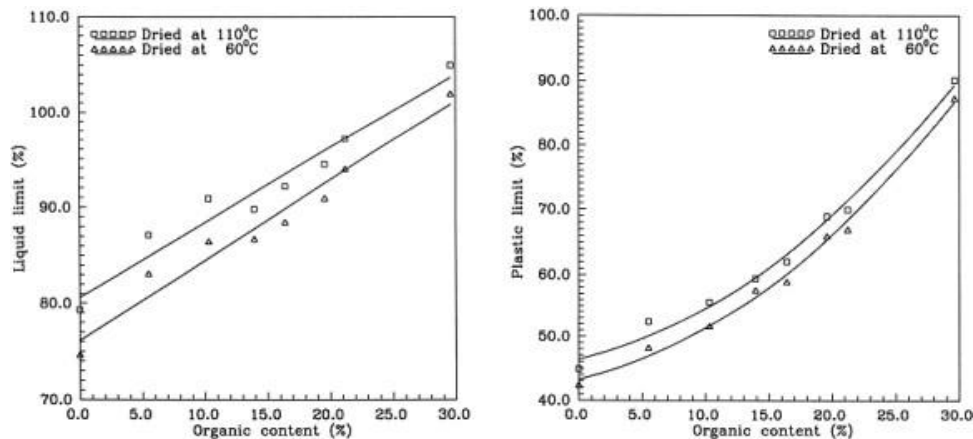


Figure 6 :Relation entre les limites d'Attenberg et la teneur en matière organique (Husein et al., 1999)

L'importance des matières organiques joue aussi un rôle dans le contrôle des propriétés de compactage. Certains écrivains ont signalé la diminution de la densité sèche du sol et l'augmentation de la capacité maximale d'hydratation lorsque la quantité de matières organiques est augmentée (Franklin et al., 1973; Holtz & Krizek, 1970; Husein et al., 1999).

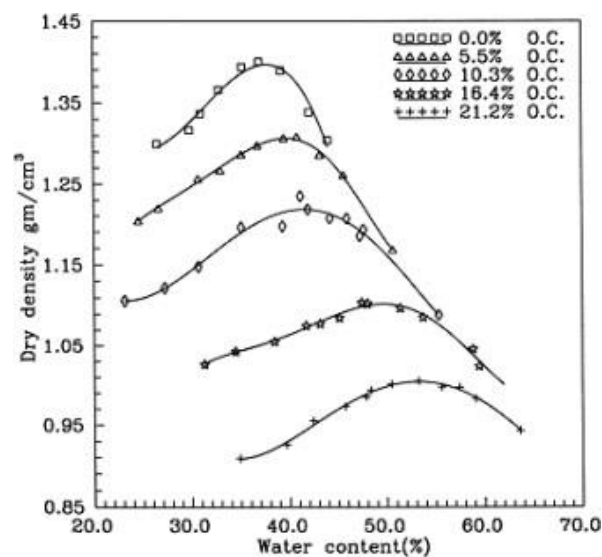


Figure 7 :Influence de la qualité de matière organique sur la caractéristique de compactage du sol (Hussein et al., 1999)

Par ailleurs, lors de leur manipulation avec de la chaux ou du ciment, ces substances organiques perturbent efficacement le fonctionnement optimal. Ainsi, les substances organiques ont pour mission de contrebalancer l'impact initial de la chaux sur les argiles (floculation) et d'empêcher la réaction pouzzolanique sur le long terme (GTS, 2000 ; Rey et al., 2000 ; Rey, 1999). En ce qui concerne le traitement au ciment, une prise retardée est causée par une interférence entre les matières organiques et les réactions chimiques qui se produisent lors de l'hydratation des ciments. Par conséquent, le durcissement du composite ne peut se faire correctement qu'après la fin de la prise hydraulique (Young, 1976 ; Clare et Sherwood, 1954 ; Peltier, 1957).

### 1.3. Problématique des sédiments de dragage

#### 1.3.1. Dragage

Étant donné les nombreux problèmes que pose la très importante quantité de sédiments apportée par les opérations de dévasement, et à ceux liés à leur rejet en mer (risques en termes de pollution) ou à leur stockage à surface (pollution des aquifères et des sols, risque d'ensemencement de zones non polluées), une autre solution doit être envisagée : celle de la valorisation de ces sédiments.

La récupération et le recyclage de ces sédiments doivent donc permettre, à très court ou moyen terme, leur valorisation dans le secteur du génie civil (techniques routières, fabrication de briques, coulis de comblement de réseaux, etc.) (Banoune, 2016).

#### 1.3.2. Les polluants dans les sédiments

La pollution apparaît aujourd'hui comme un sérieux sujet de préoccupation : une fraction importante des polluants engendrés par l'activité humaine et par les milieux reçoit une première chimiosorption dans la colonne d'eau des fleuves et des océans avant d'être en définitive piégée et accumulée dans des sédiments. Ces derniers servent alors de véritables puits éphémères ou stables pour des éléments contaminant, dont les métaux lourds. La pollution des sédiments a débuté entre le XIXe et le XXe siècles, en grande partie à cause des rejets industriels, urbains et agricoles. Les contaminants à l'origine de cette pollution sont schématiquement subdivisés en trois grandes catégories : les substances nutritives responsables de l'eutrophisation des milieux, les éléments traces métalliques (ETM) et les micropolluants organiques (hydrocarbures polycycliques aromatiques (HAP), pesticides, polychlorobiphényles (PCB), solvants chlorés...). On peut également y trouver d'autres organiques de



type pesticide, insecticides (type dichlorodiphényl-trichloroéthane (DDT) notamment), médicaments.

On peut qualifier un milieu aquatique de pollué lorsque son équilibre au sein de l'écosystème est modifié sur le long terme par l'importance des quantités introduites d'un plus grand nombre de substances toxiques d'origine naturelle ou anthropique. (**Hammadi, 2017**)

### 1.3.3. Gestion des sédiments

Dans ce sens, l'avenir de la gestion des sédiments à l'échelle du bassin versant et ses modalités doivent être appréhendés globalement à court et à plus long terme au regard de l'impact de l'ensemble des aménagements sur l'aval des cours d'eau.

L'objectif du programme de Gestion Intégrée des Sédiments (GIS) de l'EDF est de définir des modalités gestion du potentiel des ouvrages et leur efficacité à long terme compte tenu des conditions fonctionnelle, administrative, environnementale et économique. Puisse-t-on faire passer les crues liquides et solides, respecter les directives européennes en matière d'environnement (DCE) et répondre aux différents usages des cours d'eau, autres que l'hydro-électrique. Ces modalités de gestion seront établies à partir de stratégies d'exploitation des ouvrages hydro-électriques et de leur impact à l'amont comme à l'aval.

Les données du **CETMEF 2012** font état de 16,7 millions de tonnes de matériaux dragués sur la façade Manche Mer du Nord, 11,3 millions sur la façade Atlantique et 2,4 millions sur la façade Méditerranée. Environ 96% des sédiments dragués sont rejetés en mer à l'heure actuelle, le dépôt à terre n'étant limité qu'à la région Manche et restriction faite aux sédiments non contaminés. Les systèmes de valorisation des sédiments de dragage sont à ce jour encore peu développés (**Larbi, 2022**).

### 1.3.4. Impact sur l'environnement

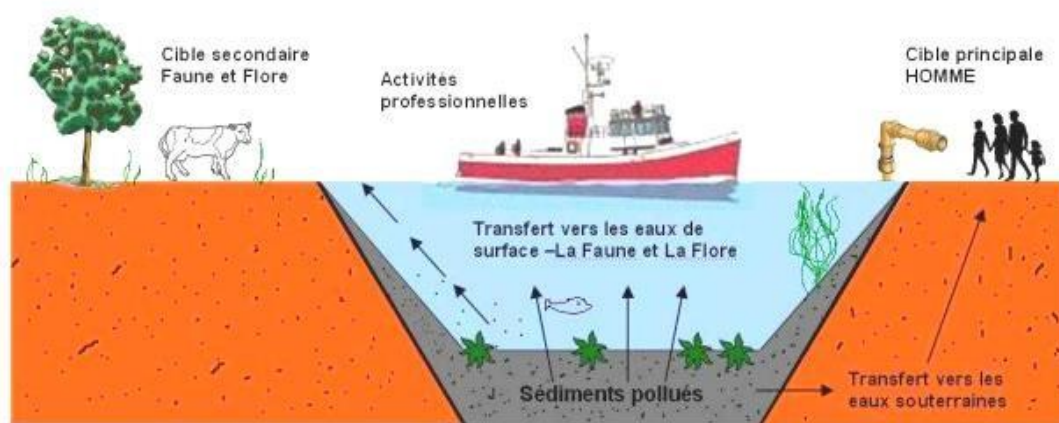


Figure 8 : Les inconvénients des sédiments sur les milieux naturels (Mazen, 2007)

Le dragage provoque des remaniements de sédiments et de déséquilibres géochimiques. Les contaminations remobilisées par le dragage peuvent créer une dégradation de la qualité physico-chimique de l'eau et donc de l'écosystème. Même si l'impact d'un dragage peut sembler spatialement et temporairement restreint, il n'est pas impossible que le dragage favorise des situations d'eutrophisation en raison d'une turbidité excessive, d'une présence de conditions hydrauliques (courant) défavorables, qui étend ses effets au-delà de la zone impactée. Par ailleurs, la recolonisation d'une zone draguée par la végétation peut prendre plusieurs années, et la remise en suspension de sédiments risque de créer des zones d'accumulation (potentiellement contaminée) à la suite de l'immersion en aval de la zone draguée. Ainsi, les conséquences d'un dragage sont manifestées par un épandage de turbidité, une concentration de matières en suspension, une dispersion d'éléments nutritifs, voire de polluants, la diminution de la teneur en oxygène dissous, la mortalité de la faune, la migration de polluants, le tout assumé par la solution couramment adoptée qui consiste à relarguer les sédiments dragués au large- ou vers les fonds marins. Pourtant, ce sont plusieurs centaines de millions de mètres cubes de sédiments côtiers dragués et immergés chaque année dans le monde (**Mazen, 2007**). Plusieurs techniques sont disponibles pour le traitement des sédiments, bien qu'il soit difficile d'en dresser une liste exhaustive en raison de leur diversité et de leur spécificité selon la nature des sédiments. De nombreuses méthodes sont encore en cours de développement. On peut cependant distinguer quatre grandes catégories.

Les prétraitements visent à préparer les sédiments avant leur stockage ou valorisation, en réduisant notamment leur teneur en eau par décantation, déshydratation, floculation ou séparation granulométrique (**Kribi, 2005**). Ce sont des techniques simples et peu coûteuses. Les traitements physico-chimiques ont pour but de transformer, immobiliser ou éliminer les polluants par des procédés comme l'adsorption, l'oxydoréduction ou les échanges ioniques (**Mechaymech, 2002 ; Kribi, 2005**).

Les traitements biologiques, tels que la phytoremédiation ou la bioremédiation, utilisent des plantes ou des microorganismes capables de dégrader ou fixer les contaminants organiques (**Mechaymech, 2002**).

Enfin, les traitements thermiques ne visent pas à éliminer les polluants, mais à réduire leur impact, notamment par inertie thermique ou immobilisation, en les piégeant dans une matrice stable (**Scordia, 2008**).

#### 1.4. Domaines d'application :

Après l'étude de la faisabilité des sédiments, on conclura la constitution minéralogique et granulométrique. Cela peut être introduit dans quelques domaines bénéficient parmi ces utilisations on distingue la production de briques cuites, de couche d'assise de chaussées, les mortiers et bétons (Colin, 2003 ; Mezazigh et al., 2012 ; Silitonga, 2010 ; Agostini, 2006 ; Dubois, 2006 ; Abriak, 2007 ; Behmanesh, 2008 ; Tran, 2009). Pour les sédiments contaminés par les métaux lourds, il faut s'assurer qu'ils ne présentent pas le risque de polluer l'environnement. On peut citer par exemple, le procédé de stabilisation / solidification Novosol (Lafhaj et al., 2007 ; Scordia et al, 2009 ). Et ce qu'on intéresse dans cette étude c'est les remblayages des tranchées.

##### 1.4.1. Matériaux auto compactant appliqués sur les remblayages des tranchées

Développés dans les années 1990, les matériaux autocompactants ont été conçus pour éliminer les contraintes de compactage associées aux matériaux traditionnels de remblayage. Leur particularité réside dans leur capacité à se mettre en place sans nécessiter de compactage ni de vibration, simplifiant ainsi considérablement leur mise en œuvre tout en offrant une portance suffisante à court terme. Ces matériaux sont généralement composés d'un liant fin (comme des cendres volantes), d'une faible proportion de ciment et d'une teneur en eau optimisée pour assurer à la fois une bonne Facilité de pompage et un enrobage uniforme des canalisations. Cette formulation permet une installation rapide et efficace, réduisant les contraintes techniques et les coûts liés aux méthodes de compactage conventionnelles (Bendahoua et Goudjil, 2015).

Le matériau à faible résistance contrôlée (CLSM) est un matériau en remblai cimentaire autocompactant et autonivelant utilisé en lieu et place d'un remblai compacté traditionnel .en lieu et place d'un remblai compacté classique . Les autres termes désignant ce type de remblai sont remblai fluide, remblai à densité contrôlée, mortier fluide, matériau de remblai autocompacté, sol-ciment ou mortier plastique ; Le CLSM a de nombreux champs d'applications qu'il doit notamment ses caractéristiques et ses propriétés qui lui sont propres. Ses caractéristiques et ses propriétés très variées, Ses principales applications du CLSM sont le remblayage de tranchées, les remblais structurels, les bases de chaussée, le remplissage des vides et l'assise de conduits. (Ling et al., 2018).



### 1.4.2. Remblayage des tranchées

#### Définition du remblayage

Les remblais formés lors des opérations d'ouverture de tranchées peuvent présenter des comportements défaillants, en particulier en matière de compactage, soit en raison d'une insuffisance de compactage, soit en raison de l'impossibilité de réaliser un compactage efficace en raison de la présence d'impétrants dans la tranchée. Tranchées devant être remblayées La multiplication des interventions en milieu urbain sur l'ensemble des réseaux, et donc l'ouverture de tranchées de plus en plus étroites, fait que l'on ne peut plus, sur un si petit espace généralement très encombré, compacter efficacement les types de matériaux traditionnels. Les matériaux autocompactants réexcavables apportent une solution efficace à ces problèmes. Les produits proposés actuellement par les fabricants peuvent être entamés à différentes échelles au cours de la réalisation du remblai de tranchées (MAR, 2014)



Figure 9 : Image illustrant une tranchée de route

#### En tant que :

- Matériau d'enrobage ;
- Matériau de remblai ;
- Matériau d'enrobage et de remblai ;
- Matériau de lit de pose, d'enrobage et de remblai.

## 1.5. Conclusion

Le premier chapitre a permis d'établir un état de l'art sur la valorisation des sédiments de dragage fluviaux, suscitant à la fois enjeux environnementaux et économiques. Les méthodes de caractérisation de ces sédiments ont ainsi été mises en avant, exposant les difficultés liées à leur volume à traiter et à la présence de polluant. Tout laisse à penser que, malgré ces difficultés, ces matériaux peuvent déjà envisager un potentiel de valorisation considérable notamment en génie civil. La suite de cette étude s'intéressera à une meilleure caractérisation des sédiments de dragage bruts pour mieux comprendre leur comportement pour une intégration finale efficace dans des techniques routières.

# C HAPITRE 2

**CARACTERISATION**

**DES SEDIMENTS**

## 2.1. Introduction

La première phase expérimentale est consacrée à la caractérisation des sédiments du bassin versant Oued Soummam, caractérisation nécessaire pour connaître les propriétés physico-chimiques qui les caractérisent et qui sont déterminantes en perspective de leur valorisation. Cette caractérisation consistera d'une part à déterminer l'origine géographique des sédiments dans le bassin, puis à procéder à leur analyse minéralogique afin d'identifier les phases minérales constitutives et, d'autre part, à une caractérisation physique avec une étude granulométrique, une évaluation de la teneur argileuse et de la matière organique. Cette approche méthodologique fournira une base solide de connaissance en vue de leur valorisation dont les modalités sont à définir ultérieurement.

## 2.2. Bassin versant de l'Oued Soummam

La vallée de la Soummam se situe dans la région de Bejaïa, à environ 230 kilomètres à l'est de la capitale, Alger. Du point de vue administratif, ce cours d'eau forme une barrière naturelle séparant la Basse Kabylie de la Haute Kabylie. L'oued Soummam, qui est le troisième plus grand fleuve d'Algérie, émerge de la jonction de deux affluents majeurs : l'oued Sahel, qui puise son eau du mont Djurdjura et du plateau de Bouira, et l'oued Bou Sellam, venant du plateau de Sétif, avec des contributions significatives de la structure hydrologique des hauts plateaux. Ce fleuve s'étend sur environ 80 kilomètres, du sud-ouest au nord-est, pour finalement déboucher dans le delta aboutissant à la mer Méditerranée près de Béjaïa. La zone de drainage de l'oued Soummam recouvre un vaste espace d'environ 8 800 kilomètres carrés à son embouchure.

Le bassin versant de l'oued Soummam se développe principalement sur un terrain montagneux, traversé par un réseau dense et bien alimenté de cours d'eau. Cette disposition géographique a encouragé une érosion intense, qui a sculpté des formes géomorphologiques profondes. Ces particularités soulignent un milieu particulièrement vulnérable aux mouvements de surface, avec des phénomènes érosifs prononcés ayant fortement façonné le paysage (**Mouni et al., 2009**).

Le bassin-versant de l'oued Soummam est entamé de plusieurs rivières dont le principal est l'oued Soummam. Sa moyenne de débit est estimée à 25 m<sup>3</sup>/s soit approximativement pendant la période (1961-1971). Le débit maximum enregistré en 1970 est de 115,9 m<sup>3</sup>/s en saison froide, au contraire le débit d'étiage est de 0,6 m<sup>3</sup>/s enregistré entre les mois de juillet et août. L'oued Soummam apporte annuellement 700x106 m<sup>3</sup>/an qui se dispersent dans la

Méditerranée. Les charges solides en suspension échantillonnées au niveau de cet oued à l'embouchure, se répartissent comme suit :

Tableau 2: Charges Solides en suspension dans les crues de l'Oued Soummam (Banoune, 2016)

étiage	Crue moyenne	Crue maximale
7 à 10 mg/l	1.8 g/l	12.7 g/l

À la sortie de l'estuaire, un apport solide en suspension a été mis en évidence, de l'ordre de 0,3 million de t/an (**Benslama, 1990**). L'empreinte humaine se révèle très présente du fait des exploitations agricoles et de l'étalement des zones d'habitation sur l'ensemble des versants, tout autant que l'extension des zones industrielles concentrées essentiellement en plaine. En effet, des zones industrielles se sont développées sur la périphérie de plusieurs agglomérations, essentiellement dans les secteurs agroalimentaires, textiles et de l'extraction de granulats alluvionnaires (sable et graviers). Tous ces chantiers portés sur le couloir de la vallée ont des conséquences écologiques très lourdes. Les cours d'eau, donc, mais aussi les sols et donc les sédiments sont touchés et des contenus importants de métaux lourds y sont souvent observés

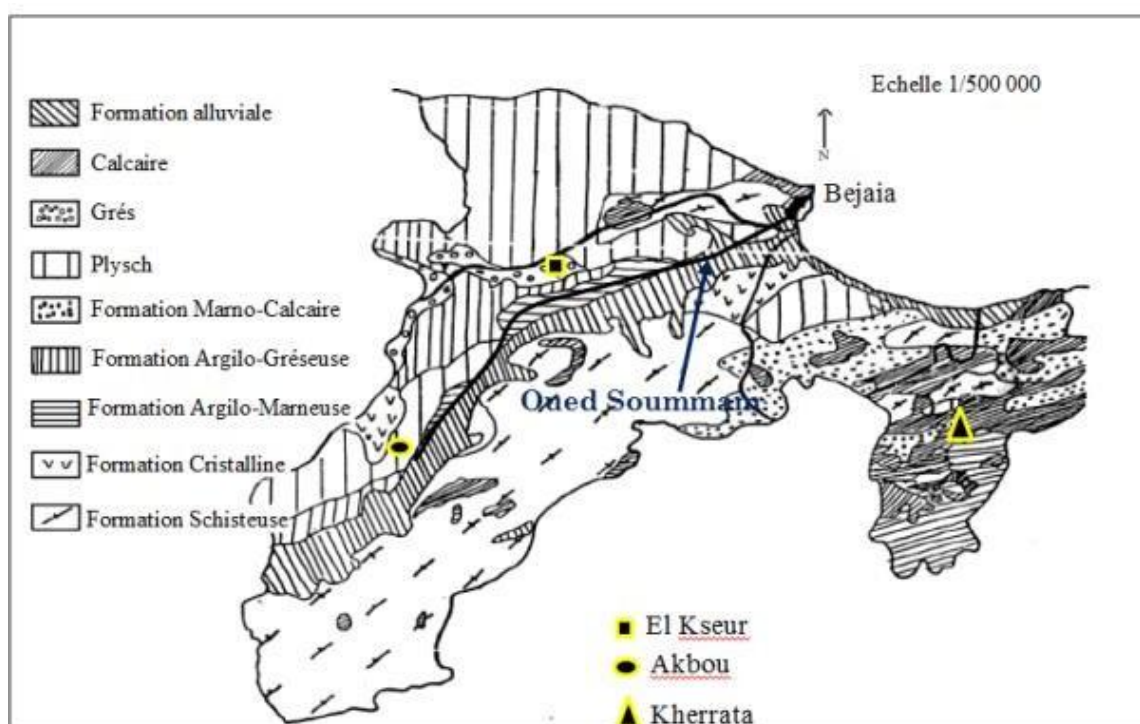


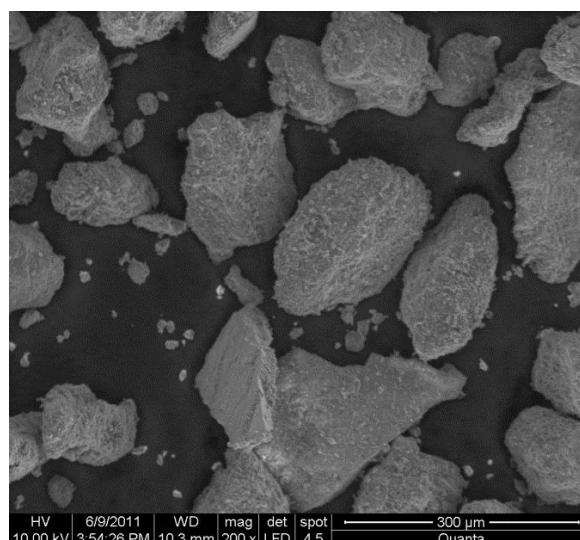
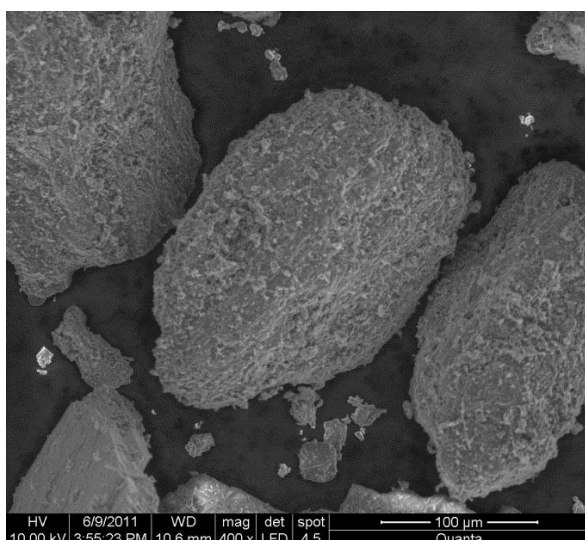
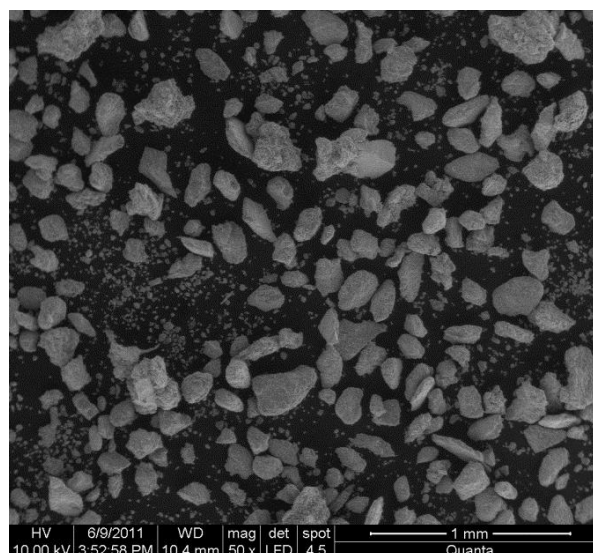
Figure 10 : Carte hydrogéologique de la wilaya de Bejaia (Mouni, 2004)



### 2.3. Observation MEB

L'examen effectué au moyen du microscope électronique à balayage (MEB) dévoile une microstructure sédimentaire complexe, marquée par des grains aux formes irrégulières et dépourvus de contours précis ainsi que de dimensions homogènes. Les sédiments exhibent des surfaces analogues, manifestant une texture rugueuse et poreuse, indicatrice de l'agglomération de particules fines. Cette observation met particulièrement en lumière la présence fréquente de particules recouvertes d'une couche de matériau plus fin, suggérant des processus actifs de sédimentation secondaire ou de modification superficielle. Ces attributs morphologiques traduisent à la fois les conditions de transport des sédiments et les phénomènes post-dépositionnels qui ont influencé ces matériaux.

Figure 11 : Observation des sédiments, photos prises avec un Microscope Electronique à Balayage (Banoune, 2016)



## 2.4. Caractérisation physico-chimique

Pour réaliser une analyse géotechnique complète des sédiments et des sols fins, il est essentiel d'adopter une approche méthodologique rigoureuse, basée sur l'examen de leurs caractéristiques intrinsèques. La recherche se concentrera principalement sur quatre critères essentiels : la teneur en eau, la composition organique, la distribution granulométrique et la proportion d'argile. Nous allons détailler ci-après le protocole expérimental mis en œuvre, incluant les dispositifs employés et les techniques d'analyse, afin de proposer une interprétation fiable et innovante des données recueillies.

## 2.5. Teneur en eau

Le taux d'humidité constitue un élément crucial lorsque l'on prépare les sédiments pour un traitement par stabilisation/solidification (S/S). Cette caractéristique, fortement impactée par les méthodes de dragage et les conditions de séchage utilisées, détermine précisément la quantité d'eau à retirer pour favoriser une réutilisation optimale des matériaux. Il est donc essentiel de l'évaluer au préalable afin d'ajuster les protocoles de traitement et d'améliorer le processus de valorisation.

La procédure de séchage naturel des sédiments dragués, en les laissant en plein air sur des lits de séchage, occasionne une diminution significative de leur teneur en humidité. Cette phase de déshydratation est une étape nécessaire pour la valorisation de ces sédiments dans un objectif de les transformer en matériaux stables et utiles.

Ainsi, nous avons pu procéder à des prélèvements manuels en surface de la rive droite de l'Oued de la Soummam.

La teneur en eau  $W$  exprimée en %, est évaluée par l'équation suivante :

$$W (\%) = \frac{\text{Poids d'eau}}{\text{Poids sec}} \times 100 = 29.61\%$$



Figure 12 : prélèvement manuel des sédiments

## 2.6. Teneur en matière organique

Les matières organiques présentes en quantité notable dans les sols impactent de manière significative leurs propriétés mécaniques et leur stabilité volumique. Ces substances organiques interagissent avec les minéraux argileux, établissent des complexes avec les métaux et les oxydes hydratés (qu'ils soient solubles ou non), et jouent un rôle essentiel dans la conservation de l'eau et la gestion des nutriments pour les plantes. Pour évaluer précisément cette teneur en matières organiques dans les sédiments analysés, nous avons utilisé la méthode normalisée de la perte au feu à 550°C (norme XP P 94-047, 1998), une technique analytique largement reconnue pour sa fiabilité dans ce type de caractérisations géotechniques.

### 2.6.1. Mode opératoire

D'après la norme française (XP P 94-047, 1998) il est nécessaire d'effectuer des préparations, elles consistent en :

- Procéder au séchage de l'échantillon à 50 °C dans une étuve. Le temps d'écart entre deux pesées d'un échantillon ayant subi un séchage est de 8 h minimum. On considère que l'évaporation de l'eau est terminée lorsqu'au cours de deux pesées successives la différence de masse de l'échantillon est inférieure à 2/ 1 000.
- Tamiser à travers un tamis de 2 mm
- Peser le passant au tamis de 2 mm. La quantité du tamisât doit peser au moins 200 g.
- Broyer les éléments passant au tamis de 2 mm.
- Prélever au moins deux prises d'essai, d'environ 50 g chacune et les déposer dans un creuset différent
- Peser chaque creuset et son contenu ( $m_1$ )

La calcination est la deuxième étape, où les creusets sont mis au four et la température élevée progressivement. Chaque prise d'essai est, dans le four, soumise à une température d'environ 450 °C à 550 °C pendant au moins 3 h.

Nous avons procédé à une calcination à 550 °C de six creusets pour chaque sédiment pendant 6 heures, nous avons calculé le pourcentage de matière organique en pourcentage de perte de masse due à la calcination, par la moyenne arithmétique des  $n$  valeurs mesurées pour chacun des deux sédiments. Après calcination, chaque creuset est pesé avec son contenu ( $m_2$ )

$$= \frac{1}{n} \sum (m_1 - m_2) / (m_1 - m_0)$$

$C_{MO}$  : est la teneur en matières organiques en (%) et  $m_0$ , la masse de creuset vide en (g).

Les valeurs de MO sont rapportées dans le **tableau 3**



Tableau 3: Teneur en matière organique des sédiments Soummam (Banoune, 2016)

Sédiments soummam	
<i>MO par perte au feu à 550°C (%)</i>	<b>3.9</b>

## 2.7. Analyse minéralogique (Diffraction des rayons X)

La composition minéralogique permet d'identifier les phases minérales présentes dans un sédiment donné et d'anticiper leur réactivité potentielle avec les liants.

La détermination de la nature des phases cristallines et de la nature des constituants (s'ils sont amorphes ou cristallisés) a été effectué par diffraction de rayons X, au laboratoire de Génie des Procédés de l'université de Bejaia, qui a montré que Quartz, Carbonate et Dolomite dominant les sédiments.

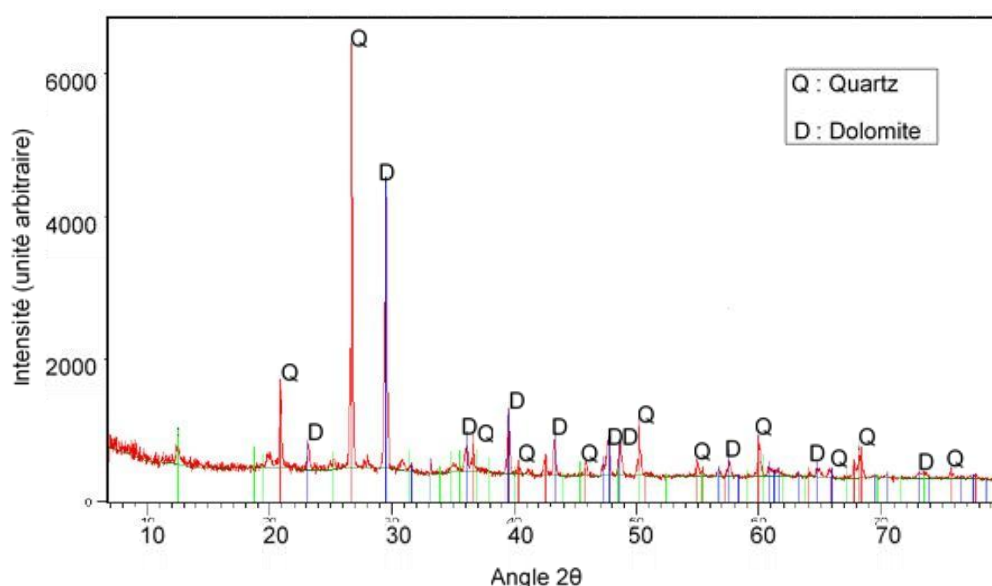


Figure 13 : Phases cristallines des sédiments (Banoune, 2016)

## 2.8. Masse volumique des particules solide ( $\rho_s$ )

La densité sèche est égale à la masse sur le volume occupé par le solide considéré. La connaissance de ce paramètre ainsi que celle de la teneur en eau et du degré de saturation, permet d'établir la porosité du matériau étudié. Le principe de mesure de la densité consiste à mesurer avec un pycnomètre la différence de masse entre le volume étudié avec du solide et le volume immergé dans un fluide inerte.

$$= \frac{M_1 + M_2 - M_3}{\rho_e}$$

Avec :

$M_1$  : la masse du pycnomètre rempli d'eau distillée jusqu'au niveau du trait repère (g) ;

$M_2$  : la masse d'un échantillon de sédiment sec (environ 50 g) (g) ;

$M_3$  : la masse d'ensemble eau-pycnomètre-échantillon (g) ;

$\rho_e$  : la masse volumique de l'eau (g/cm<sup>3</sup>) ;

$\rho_s$  : la masse volumique des particules solides (g/cm<sup>3</sup>).

### 2.8.1. Mode opératoire

La densité absolue  $\rho_s$  (ou densité des grains solides) du matériau prélevé dans la Soummam a été déterminée en ayant recours à un pycnomètre à eau. Connaissant le poids (masse) et le volume du pycnomètre à vide, le volume des grains solides contenus dans ce pycnomètre a été déterminé à partir de la masse d'un échantillon sec de 25 g. La masse d'eau déplacée après saturation est obtenue par différence. La balance utilisée a une précision de 0,1 g, et le pycnomètre est gradué jusqu'à 250 cm<sup>3</sup>.

La densité déterminée pour le sédiment de la Soummam est de 2,74 g/cm<sup>3</sup>, proche de celle des limons (2,72 g/cm<sup>3</sup>).

Tableau 4 : Masse volumique des particules solides des sédiments (Banoune, 2016)

Sédiments de la soummam	
(g/ )	2,74

## 2.9. Distribution granulométrique

La caractérisation granulométrique du sol commence par une analyse de la distribution de la taille des particules qui permet de distinguer les différentes fractions granulométriques (sable, limon, argile).

La distribution granulométrique est déterminée par un tamisage (pour la fraction supérieure à 0,08 mm) suivi d'une sédimentométrie (pour la fraction inférieure à 0,08 mm) conformément à la norme française **NF P 94-057 (1992)**.

### 2.9.1. Granulométrie par Tamisage

L'analyse granulométrique a été accomplie conformément à la norme française **NF P 94-056 (1996)** par tamisage à sec après lavage, utilisant une série de tamis standard avec des ouvertures allant de 0,08 mm à 5 mm (0,08 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 1,25 ; 2 ; 2,5 ; 5 mm). Cette

méthode permet de décrire avec exactitude la répartition granulométrique des particules qui dépassent 80  $\mu\text{m}$ . Le protocole expérimental s'est déroulé de la manière suivante :

Sécher et peser l'échantillon initial, puis le positionner sur une colonne de tamis agencés dans l'ordre croissant d'ouverture en commençant par le bas. Réaliser ensuite le tamisage mécanique. Enfin, peser avec précision les résidus retenus sur chaque tamis afin de déterminer les pourcentages en poids et de calculer les résidus cumulés. Cette approche normée fournit des données quantitatives essentielles pour le classement des sols et l'examen de leurs propriétés géotechniques.

### 2.9.2. Analyse Sédimentométrique

La méthode de sédimentométrie s'applique aux particules de la fraction de diamètre inférieur ou égal à 80  $\mu\text{m}$ . Le principe est décrit dans la norme française **NF P94-057 (1992)** qui repose sur la mesure de la densité d'une suspension contenant l'échantillon en fonction de la vitesse de décantation des particules. À l'aide d'un densimètre des lectures à 30 s, 1 min, 2 min, 5 min, 10 min, 20 min, 30 min, 120 min, 4 h et 24 h sont prises pour déterminer les pourcentages des particules dont le diamètre est déduit du temps de décantation. Cet essai est réalisé au laboratoire de travaux publics de l'Est (LTPE) de Sétif dans le cadre des travaux de thèse de doctorat de **Banoune, (2016)**.

Les résultats de l'analyse granulométrique des sédiments de la Soummam, complétés par ceux du sable de D'aokas, sont présentés sur la courbe suivante afin de comparer leurs distributions en tailles de particules.

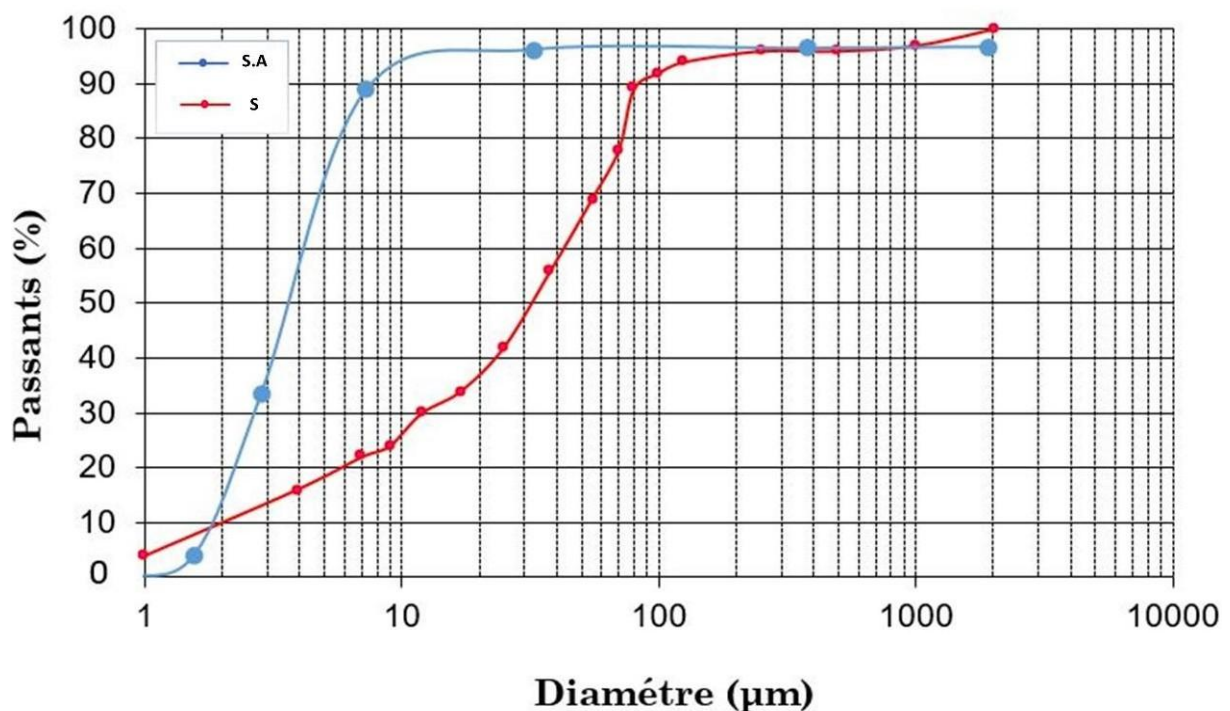


Figure 14 : Courbe granulométrique de l'échantillon, S.A (Sable d'Aokas), S( Sediments).

À partir de la répartition granulométrique du sédiment de la Soummam, les paramètres granulométriques caractéristiques ont été déterminés (**tableau 5**). Les propriétés physiques obtenues à partir de cet échantillon permettent de mieux caractériser le matériau prélevé sur ce site.

Tableau 5 : Caractéristique physique des sédiments (Banoune, 2016)

Paramètres	Sédiments de la Soummam
$\% < 2 \mu m$ ( <i>Argile</i> ) (%)	10
$2 \mu m < \% < 63 \mu m$ ( <i>Limon</i> ) (%)	61
$63 \mu m < \%$ ( <i>Sable fin</i> ) (%)	29

Tableau 6 : Paramètres granulométrique des sédiments (Banoune, 2016)

Paramètres	Sédiments de la Soummam
$2 \text{ à } 50 \mu m$ (%)	55
$> 50 \mu m$ (%)	35
$D_{\text{médian}}$ ou $D50$ ( $\mu m$ )	32
$< 80 \mu m$ (%)	89

En se référant au **tableau 6**, le positionnement des sédiments de la Soummam dans la classification triangulaire des sols fins montre qu'ils se situent dans le champ des limons silteux (**figure 15**) ; en effet, leur pourcentage de particules de diamètre inférieur à  $80 \mu m$ , soit 89 % et associé à un diamètre médian de  $32 \mu m$ , est réel alors que leur coefficient d'uniformité  $C_u$  est largement supérieur à 2 (**tableau 7**) ; cela indique donc une granulation hétérogène, ce comportement semble d'ailleurs être particulièrement accentué pour les sédiments de la Soummam.

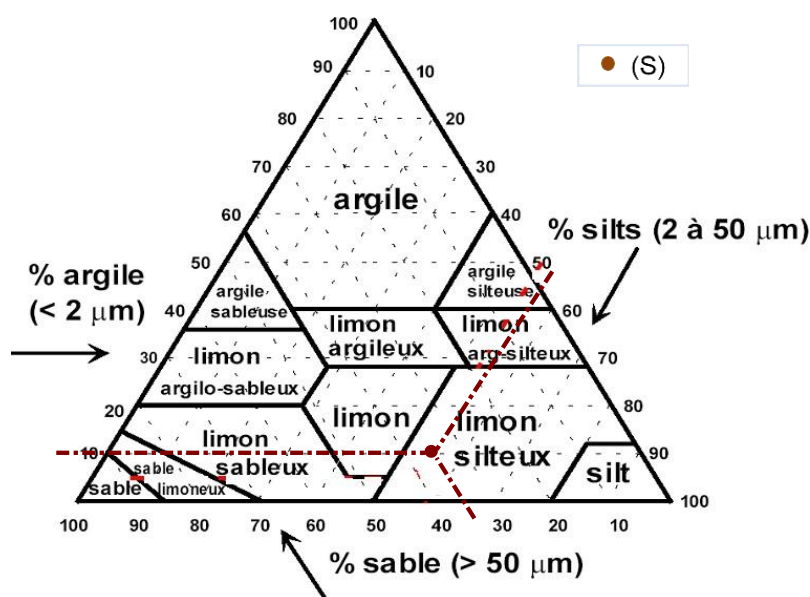


Figure 15 : Positionnement des sédiments dans la classification des sols fins

Nos observations nous amènent aussi à faire le constat d'un coefficient de courbure CC entre 1 et 3, qui montre la bonne graduation de la granulométrie et la répartition relativement continue de ses valeurs.

Tableau 7 : Coefficients d'uniformité et de courbure des sédiments (Banoune, 2016)

Paramètres	Sédiments de la soummam
$D_1(\mu m)$	2
$D_3(\mu m)$	12
$D_5(\mu m)$	32
$D_6(\mu m)$	44
	22
	1,64

## 2.10. Argilosité

Le pourcentage d'argile dans les sédiments est plus ou moins important et change d'un sédiment à un autre. De nombreux problèmes liés à la géotechnique, sont posés par les sols argileux, qui ont en effet la capacité de s'humidifier ou de se dessécher, et d'échanger les ions avec le milieu. Ce qui peut déclencher dans le cas de certains argiles, détériorant les propriétés

de résistance et de portance, des gonflements ou des retraits importants produisant des fissures très profondes, ainsi que des glissements de terrain (**Lautrin, 1989**).

L'argilosité des matériaux employés en technique routière peut être évaluée selon deux méthodes, la détermination de l'indice de plasticité IP ou la valeur au bleu de méthylène VBs dans le **GTS (2000)**. Dans le cadre de ce travail, les deux méthodes sont appliquées aux sédiments à l'étude.

### 2.10.1. Détermination des limites d'Atterberg

La détermination des limites d'Atterberg obéit à la norme **NF P 94-051 (1993)**, elles sont essentielles et sont un indicateur de nombreux paramètres physiques, dont la plasticité et la consistance et son potentiel retrait/gonflement (**Sabatini et al., 2002 ; Casey et al., 2013**). Ce sont des teneurs en eau pondérales (exprimées en %) qui correspondent à des transitions dans l'état de consistance d'un sol :

- la limite de liquidité ( $W_L$ ), correspond à la teneur en eau de passage d'un état liquide à l'état plastique ;
- la limite de plasticité ( $W_P$ ), correspond à la teneur en eau de passage d'un état plastique à l'état solide.

#### 2.10.1.1. Indice de plasticité

La plasticité du sol est une propriété engendrée par les matières très fines ou argileuses qu'il contient, en association à l'existence de couches d'eau adsorbée. La proportion d'argile et la nature des minéraux argileux influent sur les limites d'Atterberg ainsi que sur l'indice de plasticité du sol. L'indice de plasticité, noté  $I_P$ , est donné par la différence  $W_L - W_P$  (**figure 16**). Le **tableau 8** propose une classification des sols en fonction de la valeur de leur  $I_P$ .

Tableau 8: Degré de plasticité des sols (Magnan, 1997)

Indice de plasticité	Degré de plasticité
$0 < I_P < 5$	Sol non plastique (l'essai perd sa signification dans cette zone de valeurs)
$5 < I_P < 30$	Sol peu plastique
$30 < I_P < 50$	Sol plastique
$I_P > 50$	Sol très plastique



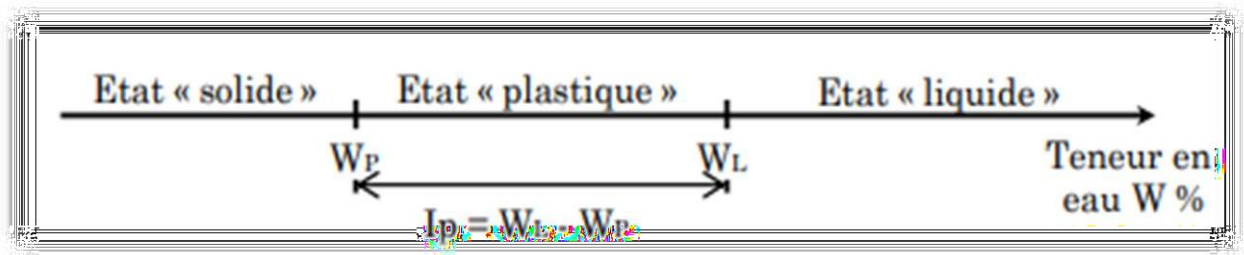


Figure 16 : Limites d'Atterberg et indice de plasticité

### 2.10.1.2. Limite de liquidité

La détermination des limites d'Atterberg se fait sur la fraction de sol qui passe au tamis 400  $\mu\text{m}$ . La détermination de la limite de liquidité est effectuée à l'aide de l'appareil de Casagrande qui est basé sur le principe du choc. Celui-ci consiste à faire chuter la coupelle normalisée de 10 mm sur le socle, ce qui provoque la fermeture progressive de la rainure pratiquée dans l'échantillon de sol. La teneur en eau qui correspond à la fermeture de la rainure sur 1 cm de longueur en 25 chocs (**figure 17**), correspond à la limite de liquidité (**figure 18**).

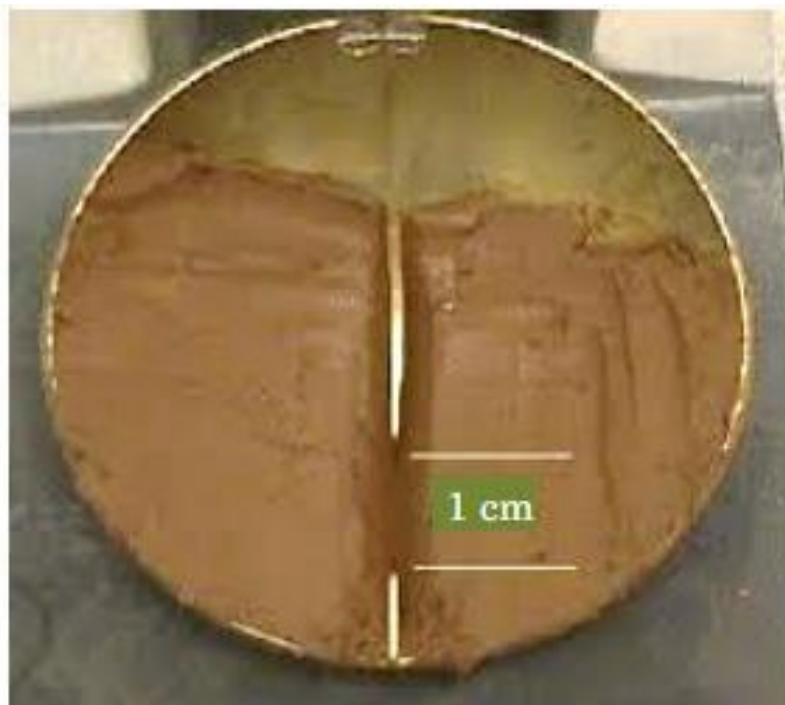


Figure 17 : Fermeture de la rainure (Banoune, 2016)

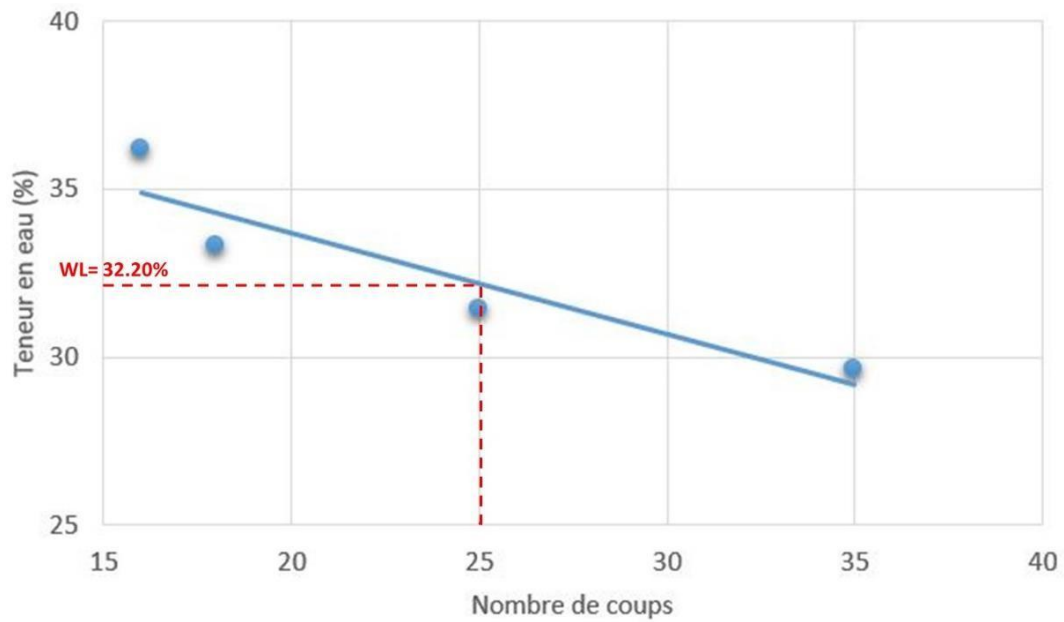


Figure 18 : Relation entre les Nombres de coups et la teneur en eau

### 2.10.1.3 Limite de plasticité

La limite de plasticité ( $W_p$ ) est évaluée par une technique manuelle qui consiste à modeler des cylindres de sol humidifié à divers niveaux d'humidité sur une surface propre, lisse et sèche (**Figure 19**). La valeur de  $W_p$  correspond précisément au taux d'humidité pour lequel le cylindre se fissure quand il est aminci jusqu'à un diamètre de 3 mm.

Cette méthode permet aussi de déterminer l'indice de consistance grâce à cette formule :

$$I_C = \frac{W_L - W}{I_P} \quad \text{Avec:}$$

$W_L$  : Limite de liquidité  
 $W$  : Teneur en eau initiale  
 $I_P$  : Indice de plasticité  
 $I_C$  : Indice de consistance.



Figure 19 :Rouleau de sol fin (Banoune, 2016)



L'étude des propriétés de plasticité des sédiments, effectuée à l'aide du diagramme de Casagrande, permet de classer ces matériaux dans la catégorie des sols à texture limoneuse et organique avec une plasticité relativement faible. Cette classification repose sur des résultats expérimentaux qui mettent en lumière des caractéristiques rhéologiques typiques de matériaux à faible cohésion, avec une plasticité limitée. La position des points sur le diagramme de plasticité confirme cette interprétation, indiquant un comportement mécanique intermédiaire entre les sols purement granulaires et les argiles très plastiques, ce qui est typique des dépôts sédimentaires peu consolidés. Ces observations sont cohérentes avec les valeurs obtenues lors des tests des limites d'Atterberg, et elles permettent de prévoir le comportement géotechnique de ces sédiments sous l'effet de contraintes mécaniques ou hydriques.

En outre, en se référant au **tableau 10** qui offre une catégorisation initiale du potentiel de dilatation d'un sol spécifique, on peut valider à l'aide du diagramme de plasticité de Casagrande que les deux sédiments montrent un potentiel faible de retrait et d'expansion.

Tableau 9: Valeur des limites d'Atterberg et de l'indice de plasticité

Paramètres	Sédiments soummam
$W_L(\%)$	32,20
$W_P(\%)$	23,38
$I_p(\%)$	8,82
Plasticité	Limon de faible plasticité
$I_c$	0,29
Consistance	molle

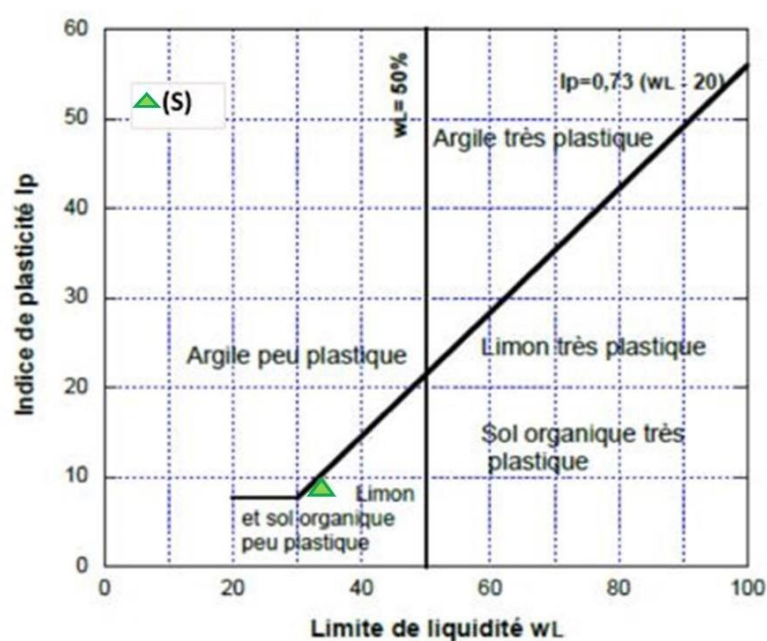


Figure 20 : Classification des sédiments de la soummam (S) selon casagrande

Tableau 10 : (a):Potentiel de gonflement d'après snethen(1980) ; (b)Potentiel de gonflement selon le BRE(1980)

a		b		
IP	Potentiel de gonflement	IP	%< 2 $\mu$ m	Potentiel de gonflement
>35	Très élevé	> 35	> 95	Très élevé
22 – 48	Elevé	22 – 35	60 – 95	Elevé
22 – 32	Moyen	18 - 22	30 – 60	Moyen
< 18	Faible	< 18	<30	Faible

### 2.10.2 Essai du bleu de Méthylène

La détermination de la teneur en argile d'un sol peut être effectuée par l'évaluation de son aptitude à adsorber le bleu de méthylène, une méthode fondée sur l'appréciation de la surface spécifique des particules fines. Cette technique permet de mesurer un paramètre déterminant, variant typiquement de 0,3 m<sup>2</sup>/g pour des matériaux inertes à plus de 40 m<sup>2</sup>/g dans le cas de la montmorillonite. Comme l'ont illustré **Yukselen et Kaya (2008)**, cette valeur constitue un indicateur pertinent : plus l'indice de bleu de méthylène est élevé, plus les sédiments montrent une capacité d'échange cationique significative et un potentiel de gonflement accentué.

Il y a une corrélation directe entre la quantité de bleu de méthylène adsorbée par les particules d'un sol et sa proportion en argile. En effet, la molécule de bleu de méthylène bénéficie d'une capacité élevée d'adsorption sur la surface des particules solides. D'ailleurs, les particules d'argile possèdent une surface spécifique nettement plus importante que les autres particules fines, principalement en raison de leur structure cristalline en feuillets. Le Guide des terrassements routiers (**GTR, 2000**) propose une typologie des sols basée sur leur valeur au

Tableau 11:Classification des sols en fonction de la valeur au bleu de méthylène

VBS (g/100 g)	Appréciation du sol / type de sol
0,1	Le sol est insensible à l'eau
0,2	Seuil à partir duquel apparaît la sensibilité à l'eau
1,5	Seuil distinguant les sols sablo-limoneux des sols sablo-argileux
2,5	Seuil distinguant les sols limoneux peu plastiques des sols limoneux de plasticité moyenne
6	Seuil distinguant les sols limoneux des sols argileux
8	Seuil distinguant les sols argileux des sols très argileux

bleu (**tableau 11**). Cette classification illustre la corrélation entre la valeur au bleu et la vulnérabilité des sols vis-à-vis de l'eau.

### 2.10.3 Mode opératoire

La détermination de la valeur au bleu de méthylène (VBM) a été réalisée conformément à la norme **NF P 94-068 (1998)**. Un échantillon sec de masse  $m$  (g), extrait de la fraction inférieure à 5 mm du sol, a été dispersé dans 100 ml d'eau déionisée à l'aide d'un agitateur à hélices. La suspension a d'abord été soumise à une agitation intense à  $700 \pm 100$  tours/min pendant 5 minutes, suivie d'une agitation modérée à  $400 \pm 100$  tours/min. Le titrage a ensuite été effectué par ajouts successifs de 5 cm<sup>3</sup> de solution de bleu de méthylène jusqu'à atteindre une saturation complète des sites d'adsorption des argiles. Le point de saturation a été identifié par le test de la tache sur papier filtre, où l'apparition d'une auréole colorée persistante (**Figure 21**) a signalé la conclusion de l'essai. Les résultats, consignés dans le **tableau 12**, permettent d'évaluer la surface spécifique des particules argileuses ainsi que leur potentiel d'activité, paramètres essentiels pour appréhender le comportement géotechnique du matériau étudié.

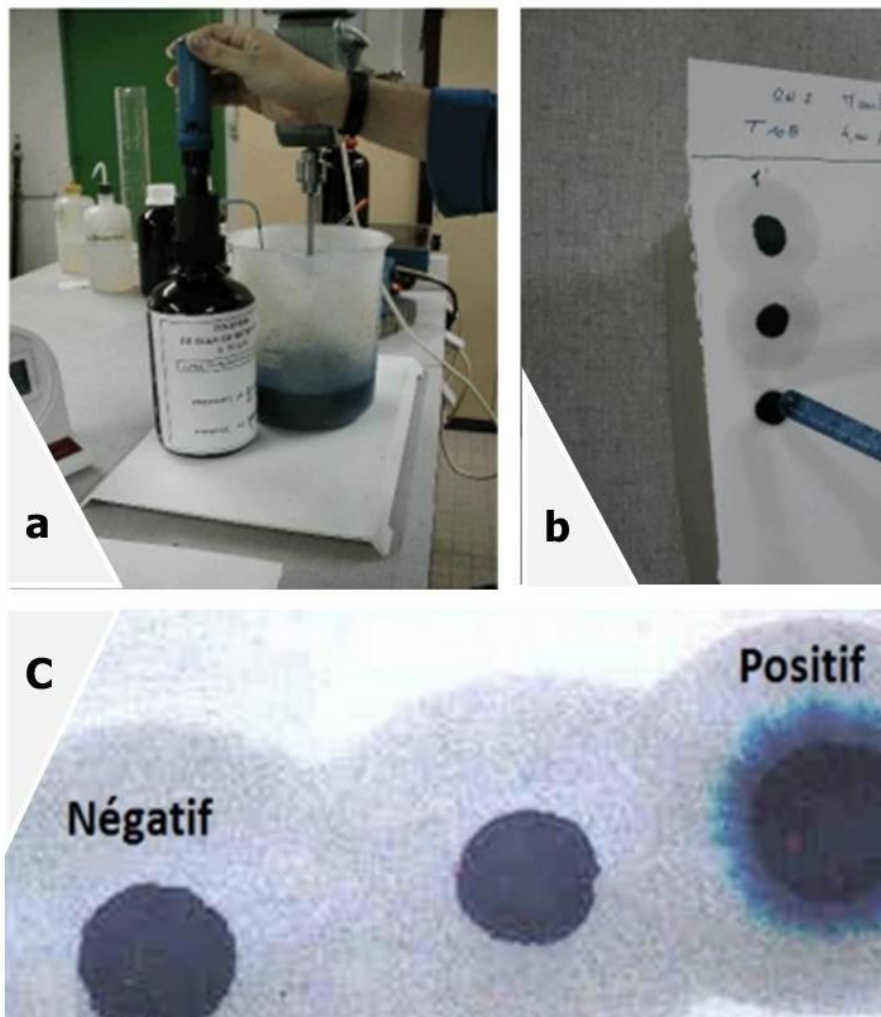


Figure 21 : (a) Exécution de l'essai au bleu de méthylène; (b) Test de la tache; (c) Conclusion de l'essai (Banoune, 2016)

La valeur du bleu de méthylène « VBS » est définie par l'équation :

$$= \frac{\text{volume de bleu de méthylène (cm}^3\text{)}}{\text{masse sèche de la prise d'essai (g)}} * 100$$

Tableau 12: Valeur au bleu (VBS) des sédiments

Paramètres	Sédiments (S)
Masse sèche de prise d'essai (g)	10
Volume du bleu ajouté V (cm <sup>3</sup> )	42,5
Valeur du bleu du sol VBS	4,25
Nature	Sols limoneux peu plastique

Les sédiments montrent une plasticité et une teneur en argile réduites. Les tests au bleu de méthylène confirment une faible activité argileuse.

#### 2.10.4 Classification selon le GTR

Sur le tableau récapitulatif des résultats de la caractérisation des sédiments (**tableau 12**), on constate un fort pourcentage de particules fines (inférieures à 80 µm) et une faible argilosité, mesurée par l'indice IP et confirmée par la valeur du bleu. Une classification d'après le Guide français pour la classification des matériaux routiers (**GTR, 2000**) fournira plus d'informations sur le type de valorisation possible (**figure 22**).

Effectivement, en raison d'une proportion de matière organique variant de 3 % à 10 %, les sédiments examinés sont catégorisés comme des sols organiques appartenant à la classe F, et plus précisément dans la sous-classe F<sub>11</sub>.

Sous l'angle de la granulométrie, les deux genres de sédiments s'inscrivent dans la catégorie des sols fins, correspondant à la classe A. Cette classification se base sur des matériaux dont le diamètre maximal ne dépasse pas 50 mm, avec une proportion de particules fines, passant à 80 µm, supérieure à 35 %. La détermination de la sous-classe repose sur la réactivité du constituant argileux (VBS) et les caractéristiques plastiques (IP). On parle donc de la catégorie A<sub>2</sub>, associée à des limons faiblement plastiques et contenant peu d'argile pour les deux types de sédiments. Ce profil est avantageux pour des applications en géotechnique, en raison des nombreux soucis posés par les sols argileux.

Tableau 13: Synthèse sur les caractéristiques des sédiments brut

paramètre	Sédiments de Soummam
<i>Granulométrie</i>	
$\% < 2 \mu m$ (Argile)	10
$2 \mu m < \% < 63 \mu m$ (Limon)	61
$\% > 63 \mu m$ (Sable fin)	29
Coefficient d'uniformité Cu	22
Coefficient de courbure Cc	1,64
<i>Limites d'Atterberg</i>	
Wl (%)	32,20
Wp (%)	23,38
IP (%)	8,82
% MO par perte au Feu (%)	3,9
$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,74
VBS	4
Minéraux principaux	Quartz, dolomite

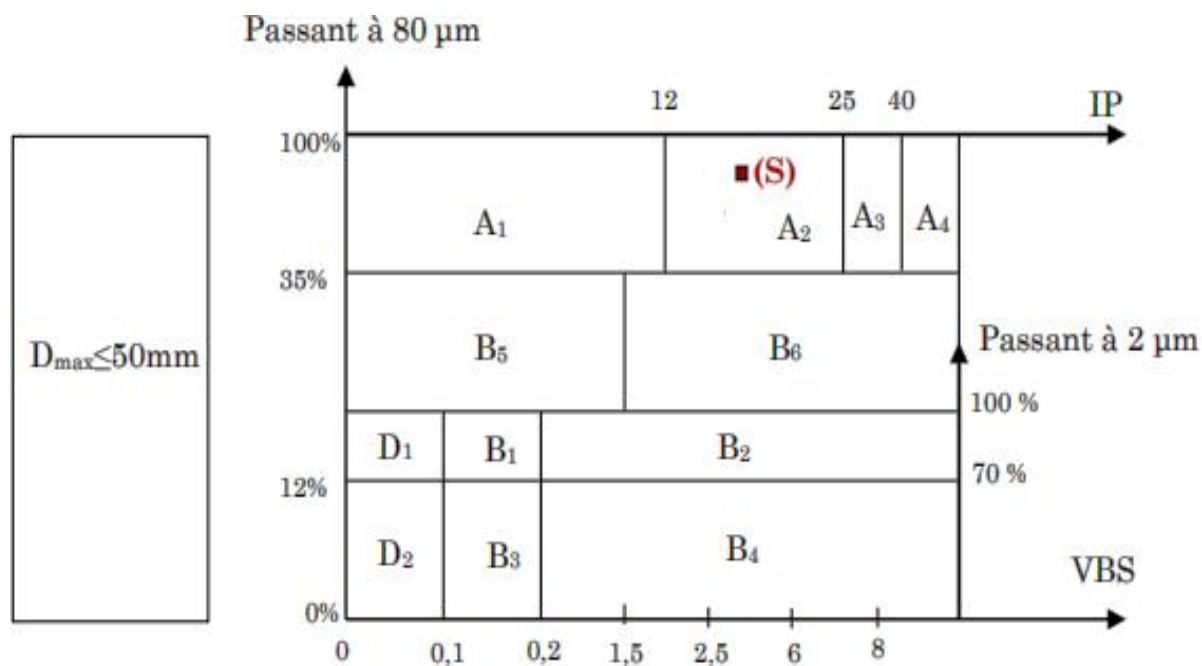


Figure 22 :Classification des sédiments selon GTR(2000)

## 2.11 Conclusion

L'analyse des sédiments de l'Oued Soummam a permis d'identifier leurs caractéristiques physico-minéralogiques, avec l'objectif d'une exploitation dans le domaine de la construction routière. Les tests de granulométrie, sédimentométrie et au bleu de méthylène indiquent un matériau principalement limoneux, peu plastique et avec une quantité réduite d'argile. La composition minéralogique, dominée par le quartz et la dolomite,

Ces sédiments, classés A2 selon la norme **GTR (2000)** et F11 en raison de leur faible teneur en matière organique et de leur plasticité modérée, montrent un bon potentiel pour l'utilisation dans les routes. Cependant, leur portance naturelle limitée implique une stabilisation par incorporation de ciment pour se conformer aux normes du génie civil.

Ces constats ouvrent la porte à une exploitation efficace de ces matières, sous réserve de renforcer leur capacité mécanique de manière appropriée. Les recherches futures se concentreront sur l'amélioration des techniques de stabilisation au ciment pour assurer une utilisation fiable et pérenne dans les infrastructures routières.



# C HAPITRE 3

**MATERIEL ET**

**METHODES**



### 3.1. Introduction

Cette partie décrit les matériaux utilisés ainsi que les méthodes expérimentales mises en œuvre pour étudier les sédiments collectés. L'objectif est de démontrer la démarche rigoureuse qui a permis d'évaluer les propriétés physiques et mécaniques des échantillons, en vue de leur valorisation potentielle. La présentation commence par la description du site de prélèvement et des matériaux collectés, puis se poursuit par les différentes techniques d'analyse employées, telles que la détermination de la teneur en éléments fins, ainsi que les tests de comportement mécanique, etc. Chaque étape méthodologique a été choisie en fonction de sa pertinence pour une valorisation complète et fiable des sédiments.

### 3.2. Description du site de prélèvement

Ce travail porte sur l'étude d'un sédiment fluvial provenant de l'Oued de la Soummam à embouchure avec la mer, plus exactement sous le pont de Scala, dans la ville de Bejaia, au nord de l'Algérie.

Les prélèvements ont été réalisés à deux reprises, le 5 mars et le 18 avril 2025, à environ 1,5 mètre des berges de l'Oued Soummam, toujours au même emplacement (**figure 23**). Le choix de ce site est motivé par la représentativité de l'échantillon, l'embouchure de la rivière recevant les crues ayant traversé l'ensemble des zones industrielles et des agglomérations situées en amont. Le sédiment collecté présente des caractéristiques physiques, granulométriques et minéralogiques spécifiques. Par conséquent, certaines des conclusions de cette étude pourraient ne pas être généralisables à des sédiments provenant d'autres sites.

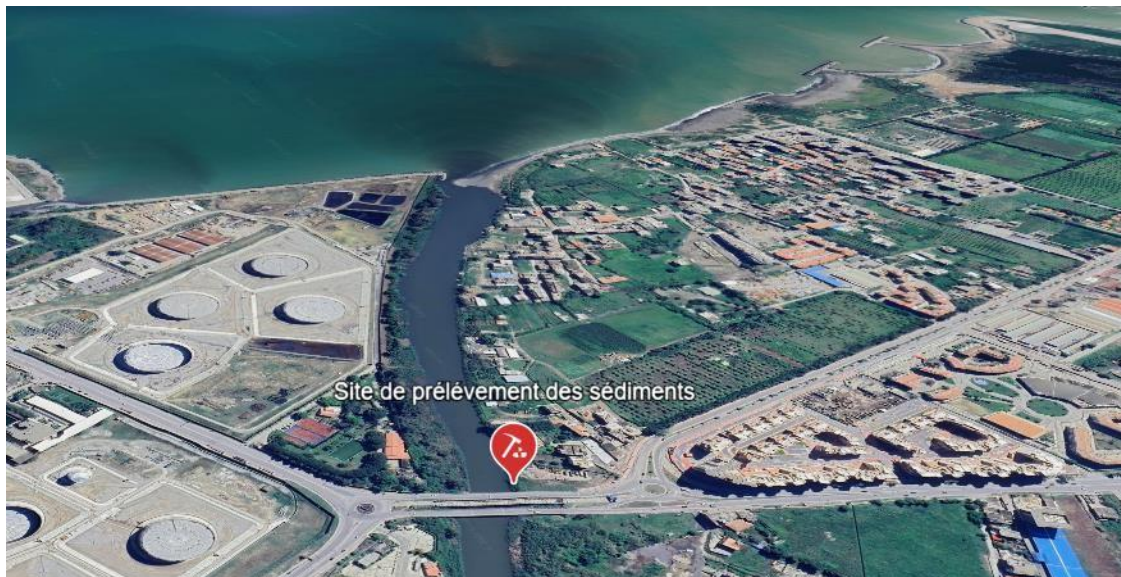


Figure 23 : Vue Satellite du site de prélèvement des sédiments

### 3.3. Protocole d'échantillonnage et de préparation des sédiments

Pour réaliser les échantillonnages, nous avons utilisé des pelles, des sachets de collecte, ainsi qu'une hache pour faciliter l'extraction. Avant le prélèvement, la végétation ainsi que la couche superficielle du sol ont été soigneusement enlevées (**Figure 24**) afin d'accéder directement à la couche contenant les sédiments. Lors de chaque campagne d'échantillonnage, six sachets de 10 kg chacun ont été remplis, assurant ainsi un volume suffisant de sédiment pour les différentes analyses à effectuer.

Après la collecte, les sédiments ont été étalés à l'air libre et exposés au soleil (**Figure 25**) pour un premier séchage naturel. Lors de chaque manipulation en laboratoire, les échantillons ont été tamisés à l'aide d'un tamis de 2 mm de diamètre, à l'exception des analyses de la limite d'Atterberg, pour lesquelles un tamis de 0,4 mm a été utilisé. Afin de garantir un séchage complet et constant, les sédiments ont ensuite été placés dans une étuve à 105 °C avant chaque traitement analytique.



Figure 24 : Collection des sédiments



Figure 25 : Séchage à l'air libre



### 3.4. Limite Atterberg

#### 3.4.1. But de L'essai

Les limites d'Atterberg sont des paramètres géotechniques qui sont les teneurs en eau conventionnelles qui délimitent les états de consistance des sols fins. Cet essai, est réalisé uniquement sur la fraction qui passe au tamis d'ouverture 400 $\mu$ m. les méthodes de détermination des limites de liquidité et de plasticité d'un sol sont définies dans la norme (NF p 94-051).

**La limite de liquidité (wl) :** c'est la teneur en eau de passage d'un état liquide à l'état plastique.

**La limite de plasticité (wp) :** c'est la teneur en eau de passage d'un état plastique à l'état solide.

**La limite de liquidité (wl) :** Est déterminée expérimentalement par l'appareil de casagrande. Le principe consiste à mesurer la quantité d'eau nécessaire pour que le sol, contenu dans une coupelle et enlevé en son centre sur une largeur de rainure normalisée, se referme sur une distance de 1 cm après 25 chocs.

#### 3.4.2. Matériel pour déterminer la limite de liquidité

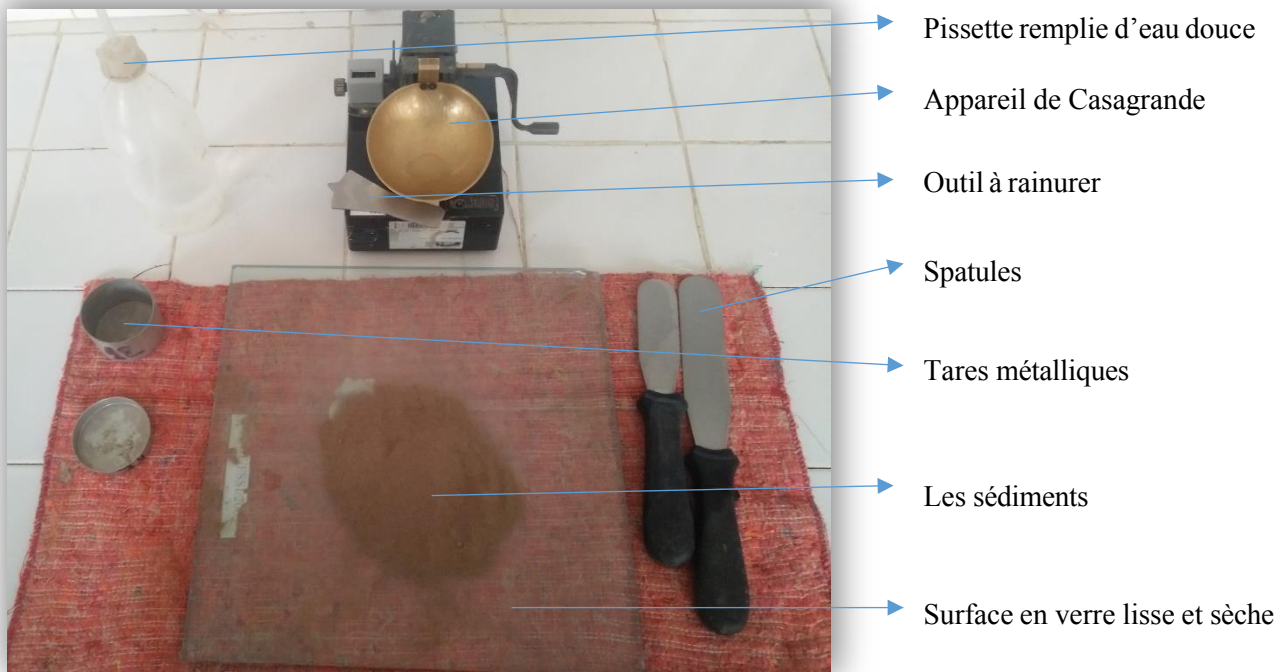


Figure 26 : Matériel d'analyse de la limite d'Atterberg

### 3.4.3. Matériel pour déterminer la limite de plasticité

- Une plaque lisse (marbre ou autre matériau) pour le malaxage et la confection des rouleaux de sol.
- Boîtes de pétri.
- Spatules.
- Balance.
- Étuve.

#### 3.4.3.1. Mode opératoire

- La réalisation de l'essai est effectuée en 2 étapes

Recherche de la teneur en eau (WL) pour laquelle une rainure de dimension normalisée pratiquée dans un sol placé dans une coupelle se referme sur 1cm lorsque la coupelle et son contenu ont été soumis à 25 chocs répétés. (Appareil de Casagrande : limite de liquidité).

Recherche de la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol de dimension fixée est confectionné manuellement et fissuré. (Petits rouleaux : limite de Plasticité).

### 3.4.4. Déterminations l'affaissement au cône d'Abrams

#### 3.4.4.1. Mode opératoire

Pour la conduite de cet essai, on utilise une plaque et un cône d'Abrams. La plaque est en acier, elle présente une surface dure et non-absorbante, Le cône d'Abrams est un cône en acier galvanisé dont la base a un diamètre intérieur de 20cm, un diamètre intérieur de 10 cm à son sommet et 30cm de hauteur. On utilise une tige en acier lisse, de diamètre 16 mm et terminaison arrondie, on a fait plusieurs essais avec des pourcentages différents de l'ajout de ciment (0%,2%,4%,6%), L'essai s'effectue selon les étapes suivantes :

Le cône d'Abrams est placé puis fixé sur la plaque. On remplit le cône avec du matériau frais, Le cône est arasé par une tige, On lève le cône immédiatement, de manière verticale et douce, en le tournant un peu pour le démouler, On mesure l'affaissement du matériau frais.

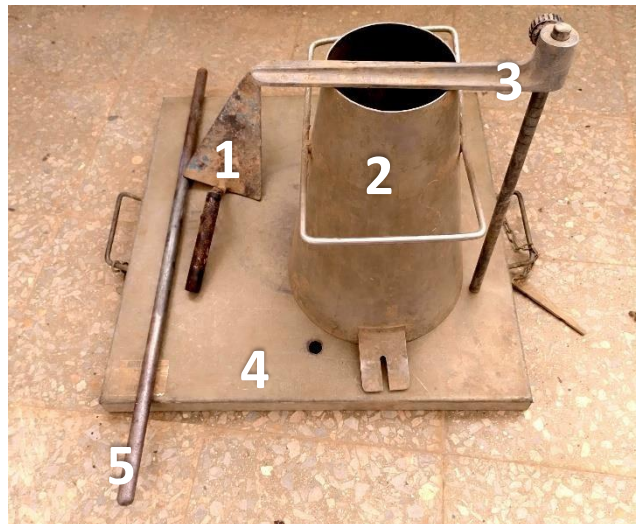


Figure 27 : Matériel de l'essai de l'affaissement : (1) Truelle, (2) Cone d'Abrams en acier galvanisé, (3) Reglet de mesure, (4) Plaque en acier, (5) Tige en Acier

### 3.5. Test CBR

#### 3.5.1. Rapport de Portance de Californie

##### 3.5.1.1. Principe

L'objectif est de déterminer les indices de portance immédiat (CBR) en mesurant les forces appliquées sur le perforateur pour qu'un cylindre pénètre à une vitesse constante dans un échantillon de matériau compacté dans un moule CBR. Indices principaux peuvent être déterminé : l'Indice de Portance Immédiat ( $IPI_{24h}$ ), il caractérise différents aspects de la résistance du sol.

##### 3.5.1.2. Matériels Utilisés

- Moule CBR.
- Compacteur Proctor modifié.
- Règle araser.
- Balance.
- Poinçon CBR (diamètre du piston =  $19,3 \text{ cm}^2$ , vitesse de profondeur  $1,27 \text{ mm/min}$ , force max  $50 \text{ kn}$ ).
- Comparateur de l'enfoncement et support associé.
- Disques de papier filtre.

##### 3.5.1.3. Mode Opératoire

Le test CBR ( $IPI$ ) est effectué en laboratoire selon les normes françaises (NF P 94-078).

#### 3.5.2. Préparation des moules Cbr

Dans le processus de création du moule CBR ( $IPI_{24h}$ ), nous avons préparé  $4 \text{ kg}$  de matériau (sédiment) en soustrayant le pourcentage d'ajout de ciment. Nous avons défini la teneur en eau pour chaque ajout. Nous avons effectué trois essais de moule CBR avec des pourcentages de ciment de ( $2\%=0,08\text{KG}$  ;  $4\%=0,16\text{KG}$  et  $6\%=0,24\text{KG}$ ). Après avoir mélangé les sédiments avec le ciment. Pour remplir les moules, nous avons utilisé du papier filtre et appliqué des vibrations légères.



Figure 28 : Appareil de testage CBR

### 3.5.3. Traitement des résultats CBR

Les courbes effort-pénétration susceptibles d'être obtenues pourront présenter une forme similaire à celle illustrée sur la figure ci-jointe. Si la courbe passe par l'origine, sans inflexion notable, elle sera considérée comme idéale, et les valeurs mesurées pourront être directement utilisées dans les formules de calcul de l'IPI. En revanche, si une déviation est observée à l'origine, une correction sera appliquée conformément aux recommandations de la norme **NF P94-078**. Cette correction, réalisée à l'aide du graphique de référence (**Figure 29**), permettra d'ajuster les valeurs de pénétration afin que l'indice portant calculé reflète fidèlement le comportement réel du matériau étudié, sachant que l'indice recherché est par convention la plus grande des 2 valeurs suivantes :

$$\frac{\text{Effort de pénétration à 2,5 mm d'enfoncement (en kN)}}{13,35} \times 100$$

$$\frac{\text{Effort de pénétration à 5 mm d'enfoncement (en kN)}}{19,93} \times 100$$

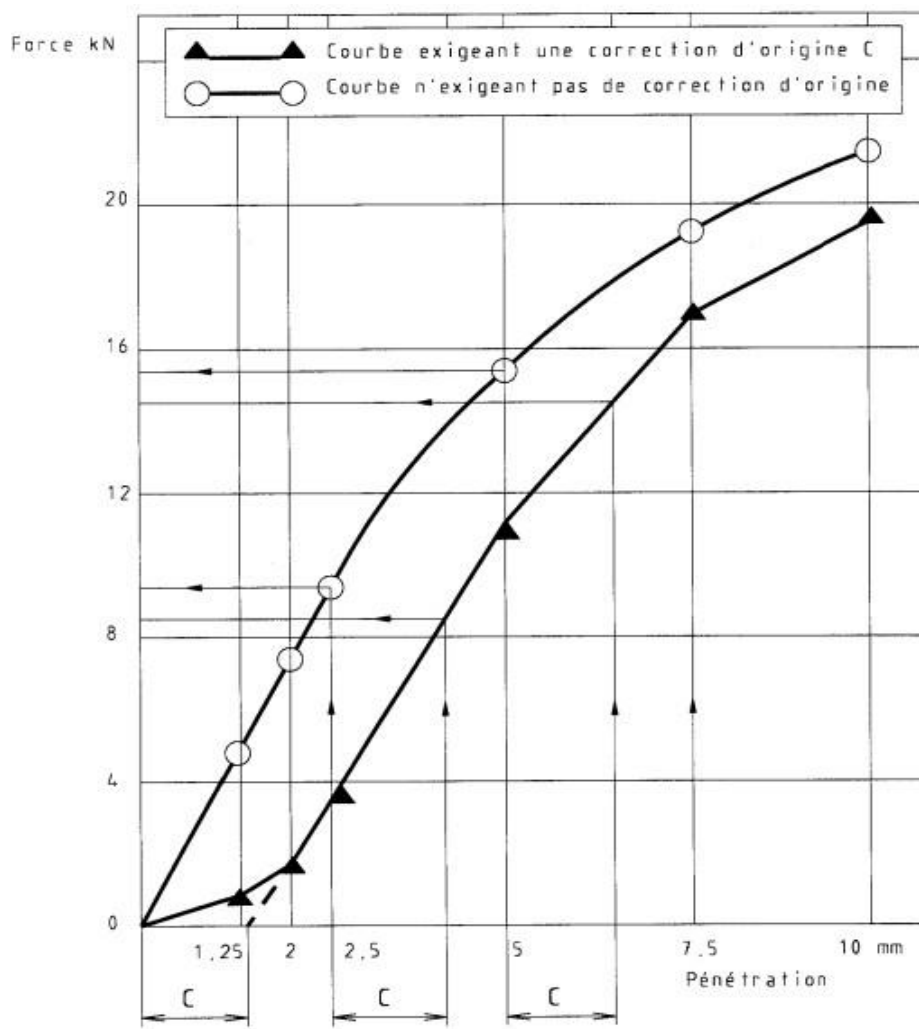


Figure 29 : Tracés des courbes effort-pénétration



### 3.6. Réalisation et conservation des éprouvettes

#### 3.6.1. Préparation des éprouvettes

Des éprouvettes cylindriques normalisées d'éclatement (diamètre 5 cm, hauteur 10 cm) et aussi (diamètre 5 cm, hauteur 5 cm) (**Figure 30**). Ont été moulées dans des fûts en (pvc) pour évaluer la résistance à la compression à 28 jours. Quatre formulations différentes de matériaux. Ont été testées afin de comparer leurs performances.



Figure 30 : Eprouvettes après moulage



Figure 31 : Tourneur fraiseur de moulage

##### 3.6.1.1. Conditions de conservation

Un mode de conservation distinct a été appliqué pour simuler les conditions réelles de mise en œuvre :

Le cas essorable désigne une condition expérimentale conçue pour simuler le comportement d'un matériau autocompactant situé dans un sol réceptif perméable, permettant une évacuation partielle de l'eau par drainage. Dans ce cadre, le matériau développe ses caractéristiques mécaniques principalement par densification hydraulique, résultant de la migration de l'eau vers le sol environnant. **Scordia (2008)** reproduit ce cas en laboratoire en perforant le fond des moules et en les situant sur une plaque de plâtre, afin de reproduire le drainage naturel que l'on observe sur site. Cette configuration permet d'analyser l'influence du drainage sur divers paramètres tels que la capacité portante, l'affaissement ou la résistance mécanique.



### 3.6.1.2. simulation de mode de drainage

Les fûts ont été perforés à leur base et placés sur des plaques de plâtre afin de reproduire les conditions de drainage rencontrées dans des sols perméables.



Figure 32 :

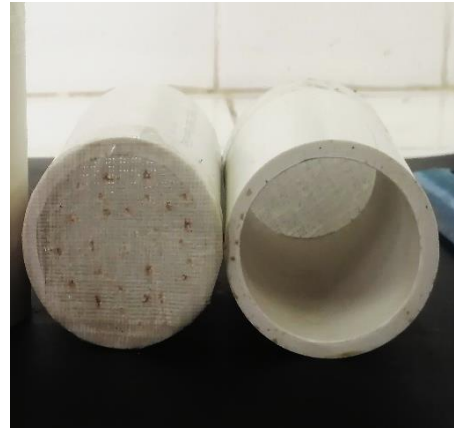


Figure 33 :

Eprouvettes a différentes dimension s Eprouvettes perforée pour le cas essorable

### 3.6.2. Procédure expérimentale

Avant moulage, la consistance des sédiments a été contrôlée par essai d'affaissement au cône d'Abrams. Après coulage, les éprouvettes ont été soigneusement astiquées pour obtenir des surfaces planes et régulières. Un entreposage en conditions contrôlées (température et humidité constantes) a été maintenu pendant toute la durée de maturation jusqu'aux essais mécaniques.

### 3.7. Assurance qualité

La méthodologie adoptée suit les prescriptions des normes en vigueur relatives aux essais sur les sédiments. Bien que le nombre exact d'éprouvettes par série ne soit pas précisé dans ce document, une répétition minimale de quatre exemplaires par condition est généralement recommandée pour garantir la représentativité des résultats.

# C HAPITRE 4

**RESULTATS ET**

**DISCUSSION**

## 4.1. Introduction

La présente section détaille les résultats obtenus à travers une série d'essais normés portant sur :

- Les limites d'Atterberg, pour estimer l'évolution de la plasticité des matériaux ;
- L'essai d'affaissement au cône d'Abrams, pour évaluer leur fluidité en conditions fraîches ;
- Le test CBR pour mesurer l'indice portant ;
- La résistance à la compression simple à 28 jours, indicateur clé pour la durabilité ;
- Enfin la résistance à la traction, qui renseigne sur la cohésion interne des mélanges.

L'ensemble des résultats est discuté en lien avec les normes en vigueur et les exigences fonctionnelles des remblais urbains. Une attention particulière est portée à l'évolution des performances selon le taux de ciment ajouté et à l'influence des paramètres expérimentaux tels que l'humidité, le temps de cure et la granulométrie. Ces éléments permettront de dégager des formulations optimales et des recommandations concrètes pour une valorisation durable et sécurisée de ces matériaux alternatifs.

## 4.2. limites d'atterberg

La suite des résultats de Les limites d'Atterberg avec des ajouts permettent de caractériser le comportement plastique des matériaux fins, comme les sédiments. Leur interprétation aide à évaluer la cohésion, la sensibilité à l'eau et la capacité du matériau à être utilisé en remblayage de tranchées. L'analyse des sédiments du Soummam permet ainsi d'estimer leur aptitude à l'autocompaction et leur stabilité à l'état plastique.

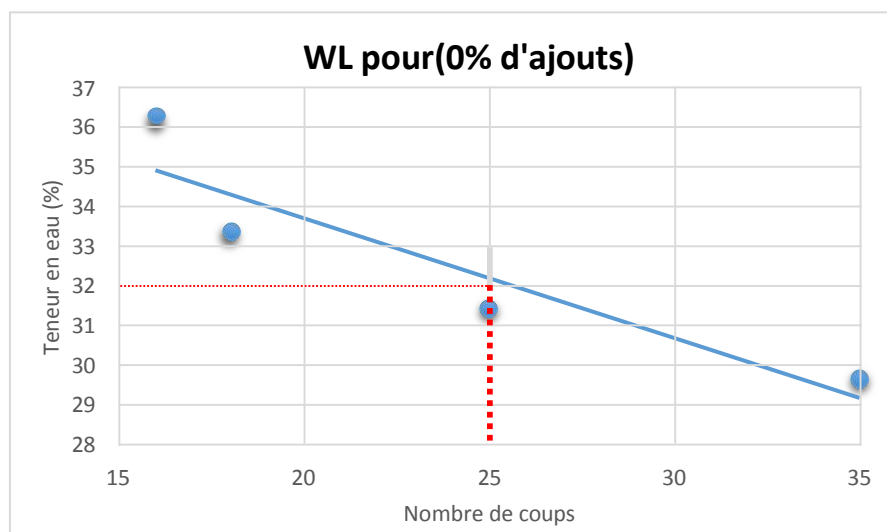


Figure 34 : courbe de WL(sédiments sans ajouts)

Les tests effectués sur les sédiments de l'oued Soummam ont permis de mesurer l'impact de l'ajout progressif de ciment sur leurs propriétés de plasticité. Sans ciment, la limite de liquidité est de 32,2 %, la limite de plasticité de 23,38 %, avec un indice de plasticité de 8,82 et un indice de consistance de 0,29. Cela révèle un sol peu plastique, probablement limoneux avec une faible présence d'argiles actives. La faiblesse de l'indice de consistance indique un matériau souple, peu résistant à la déformation, typique des sols en état plastique mou (Casagrande, 1948 ; NF P 94-051, 1993).

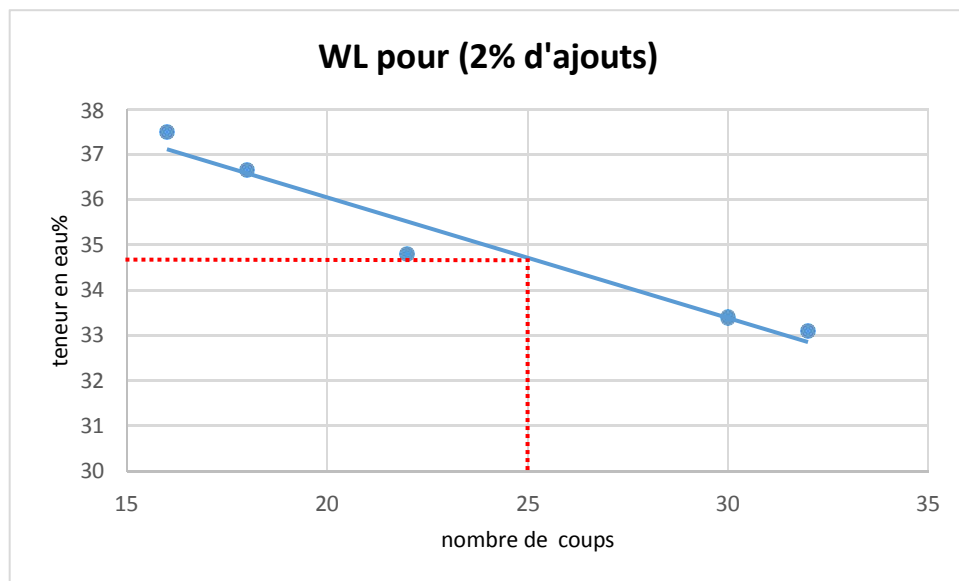


Figure 35: courbe de WL (sédiments +2% de ciment)

En ajoutant 2 % de ciment, on remarque que la limite de liquidité augmente à 34,72 % et la limite de plasticité à 27,85 %, tandis que l'indice de plasticité baisse à 6,87. L'indice de consistance s'élève à 0,74. Cela montre que le sol devient progressivement plus rigide, indiquant que le ciment réagit avec les fines argileuses pour créer des liaisons cimentaires, ce qui réduit sa plasticité et améliore sa cohésion. C'est typique des sols stabilisés par des liants hydrauliques, comme le soulignent **Bell (1996)** et **Sherwood (1993)**.

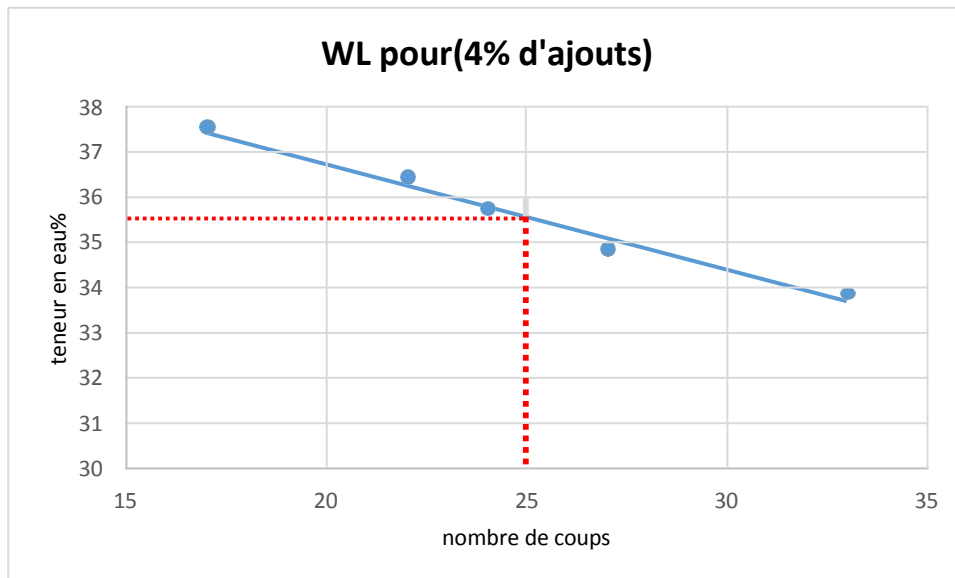


Figure 36 : courbe de WL (sédiments+4% de ciment)

Avec 4 % de ciment, cette tendance se confirme, avec une limite de liquidité à 35,57 %, une limite de plasticité à 29,05 %, un indice de plasticité de 6,52 et un indice de consistance de 0,91. Le sol devient plus stable, adoptant un comportement proche de celui d'un matériau dur, recherché dans les travaux de terrassement et construction de routes. La diminution continue de l'indice de plasticité indique un sol moins sensible à l'humidité, ce qui est favorable pour ses propriétés mécaniques et sa durabilité.

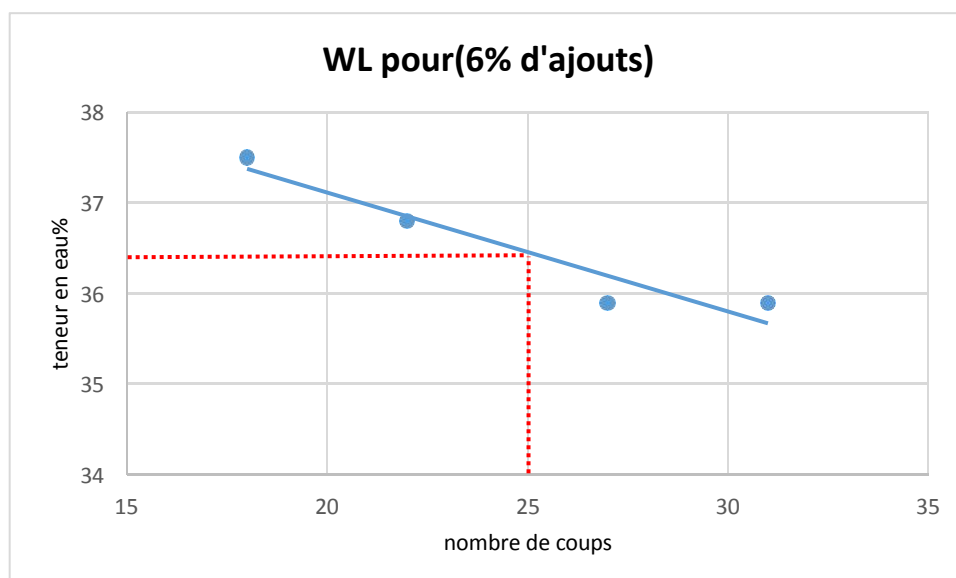


Figure 37: courbe de WL (sédiments+6% de ciment)

Quand le ciment atteint 6 %, la limite de liquidité grimpe à 36,46 %, la limite de plasticité à 32,38 %, tandis que l'indice de plasticité diminue à 4,08. L'indice de consistance

atteint 1,68, traduisant un comportement similaire à un sol sec et rigide. À ce niveau, le matériau présente des qualités géotechniques considérablement améliorées, capable de soutenir de lourdes charges, même dans des conditions d'humidité défavorables; **Houlsby, (1997)**.

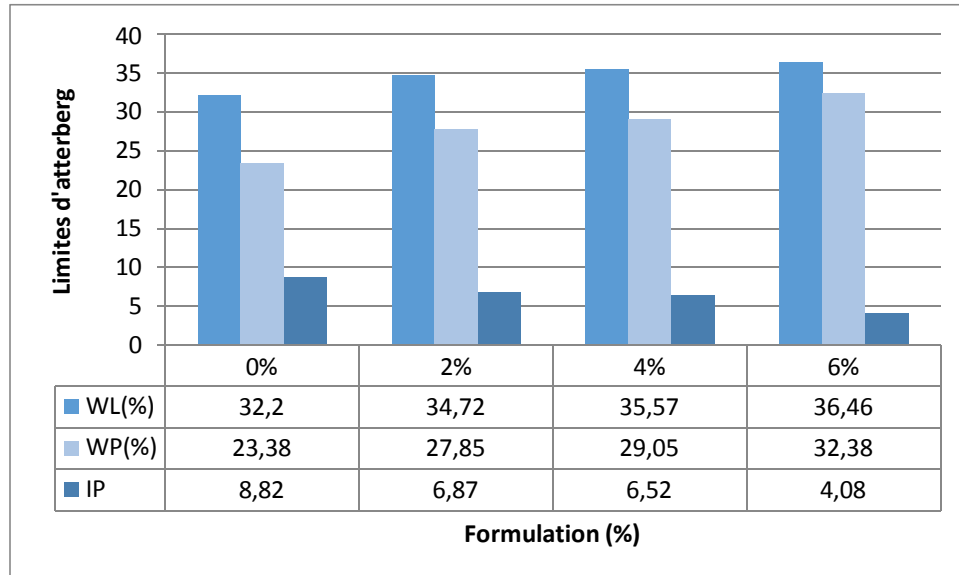


Figure 38: Les limites de liquidité, de plasticité et l'indice de plasticité pour chaque formulation.

Tableau 14: Evolution de l'indice de consistance pour chaque ajout

Taux de ciment(%)	0%	2%	4%	6%
Indice de consistance	0.29	0.74	0.91	1.68

Globalement, les résultats démontrent que l'ajout progressif de ciment améliore nettement les propriétés de consistance des sédiments fluviaux. La plasticité diminue constamment et la consistance passe d'un état plastique mou à un état rigide, permettant ainsi une utilisation efficace de ces matériaux dans le génie civil, notamment pour la construction routière.

#### 4.3. Test d'affaissement (cône d'Abrams)

Dans le cadre de la valorisation des sédiments de l'oued Soummam pour des remblais autocompactants, des tests d'affaissement ont été réalisés pour mesurer la fluidité des mélanges.

Le protocole est basé sur la norme **scordia**, qui définit la méthode d'essai d'étalement au cône d'Abrams, utilisée pour évaluer la consistance des matériaux autoplacants. L'objectif est de s'assurer que les formulations s'écoulent correctement sans compactage mécanique, essentiel pour les remblais en milieu urbain.

Tableau 15: Résultats de l'essai de l'affaissement en fonction du taux de ciment

Taux de ciment	0%	2%	4%	6%
Teneur en eau (%)	43	42	43	44
Affaissement (cm)	19	16	16	18

Les tests d'affaissement effectués sur les sédiments fluviaux de l'oued Soummam avec divers pourcentages de ciment (**Tableau 15**) montrent que ces matériaux sont satisfaisants pour répondre aux critères de fluidité requis pour les utilisations en remblai autocompactant. Sans ajout de liant, l'affaissement est mesuré à 19 cm pour une teneur en eau de 43 %, ce qui situe le mélange dans l'intervalle cible de 16 à 20 cm considéré comme optimal pour permettre sa mise en œuvre par simple écoulement,

Etat fluide :  $16\text{cm} \leq \text{affaissement} \leq 20\text{ cm}$  [**Autocan, 2002**]. Procédé pour remblayage de tranchées, Euro-via, (pp. 1–4).

Selon les recommandations de Scordia dans ses recherches sur les STN. Bien que le matériau ait une bonne fluidité à ce stade, l'absence de liant limite sa cohésion initiale, ce qui peut affecter la portance à court terme.

L'ajout de 2 % de ciment stabilise le mélange tout en conservant un affaissement à 16 cm pour une teneur en eau de 42 %, ce qui constitue une amélioration notable de la structuration du squelette granulaire sans exposer la fluidité. Cette formulation est en accord avec les recommandations de Scordia, qui observe dans ses essais qu'une quantité modérée de liant combinée à une teneur en eau adaptée permet d'obtenir les performances hydrauliques souhaitées tout en préservant les avantages pratiques du matériau autocompactant.

La formulation avec 4 % de ciment montre un affaissement similaire de 16 cm pour une teneur en eau de 43 %, indiquant une stabilité du comportement rhéologique et une bonne maîtrise de la consistance.



En revanche, l'ajout de 6 % de ciment provoque une légère augmentation de l'affaissement à 18 cm, même si la teneur en eau est légèrement supérieure, à 44 %. Cela reste cependant dans la plage cible et permet de maintenir un matériau suffisamment fluide pour assurer un remplissage uniforme des tranchées. Cette évolution peut être expliquée par la formation de structures floculées favorisée par la présence accrue de liant, comme mentionné également par Scordia dans ses analyses des formulations riches en ciment. Il apparaît donc que les mélanges testés respectent globalement les critères de fluidité requis, tous les affaissements mesurés se situant dans la fourchette de 16 à 20 cm, garantissant à la fois une application simple et un bon enrobage des canalisations.



Figure 39 : Illustration sur l'application de l'essai.

La relation entre teneur en eau et affaissement observée dans les résultats confirme l'importance d'un réglage précis des paramètres de formulation, ce que souligne également Scordia dans ses essais en laboratoire effectués avec Eurovia. Ces résultats permettent de conclure que les sédiments de la Soummam ont un réel potentiel de valorisation en tant que matériaux autocompactants, avec des comportements conformes aux exigences pratiques du terrain et aux conditions expérimentales établies dans la littérature spécialisée (Scordia, 2008).

#### 4.4. CBR (indice portant immédiat)

Les résultats des essais de portance immédiate (IPI), obtenus à partir de courbes effort/pénétration réalisées selon la norme française, ont permis d'évaluer la performance mécanique de différentes formulations de sédiments fluviaux stabilisés par du ciment, en vue de leur utilisation comme matériaux auto-compactants pour le remblayage de tranchées. Le but

était de repérer une formule capable d'assurer simultanément une portance conforme et une application facile. Tout en valorisant un déchet environnementalement sensible. Tous les mélanges ont été soigneusement préparés avec une humidité initiale de 42 %, sélectionnée pour garantir une bonne maniabilité du matériau et reproduire les conditions réelles d'un matériau fluide pouvant être compacté naturellement sous son propre poids, sans recourir à la vibration. Ce niveau élevé d'humidité, bien que bénéfique pour encourager la compacité automatique, représente également un défi pour le développement de la rigidité au début, surtout durant les premières étapes de séchage.

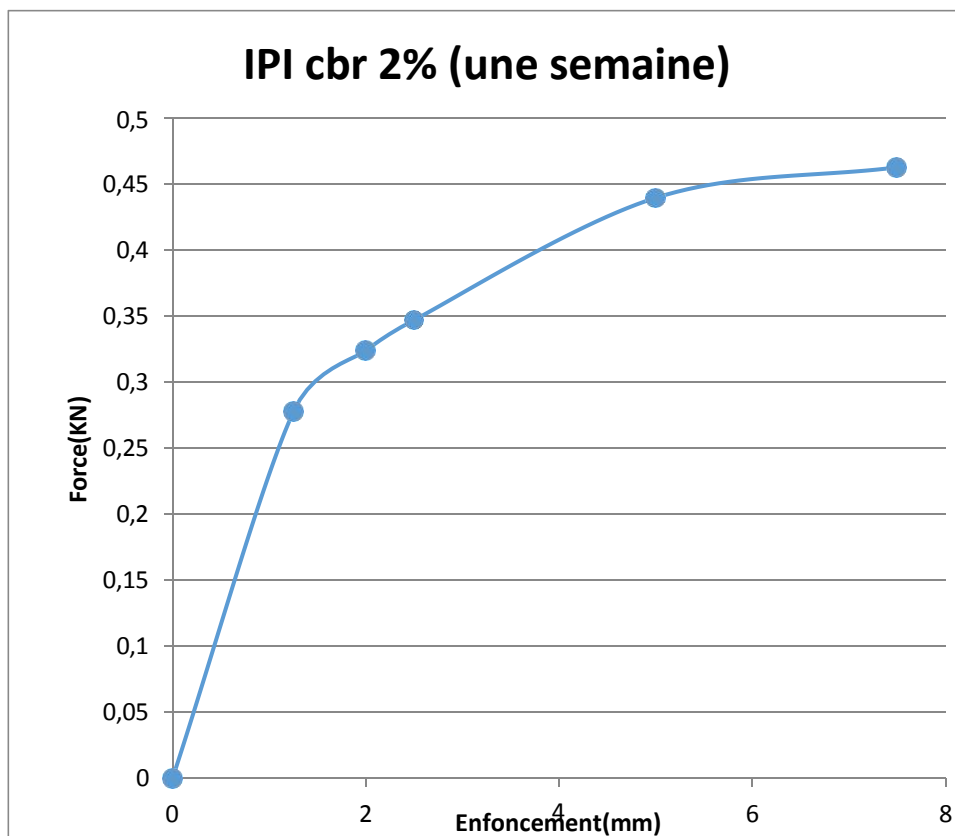


Figure 40 : courbe d'IPI (2%C)

La première formulation, composée de 98 % de sédiments et 2 % de ciment, après sept jours de séchage à l'air libre, a présenté un IPI de seulement 2,6 % à 2,5 mm de pénétration et 2,21 % à 5 mm. Ces valeurs traduisent une rigidité insuffisante pour envisager un usage même en remblai de tranchée faiblement sollicité. La teneur en eau mesurée en fin d'essai, de 30,44 %, témoigne d'un taux de dessiccation relativement modéré après une semaine, insuffisant pour permettre une prise efficace du ciment à faible dosage. Cette observation est cohérente avec les travaux de **Zentar et al. (2012)**, qui ont montré que des formulations similaires nécessitent au moins 4 % de liant hydraulique et un séchage prolongé pour atteindre un niveau minimal de

portance. En effet, avec une humidité initiale aussi élevée, la dilution des ions nécessaires à l'hydratation du ciment freine la cristallisation des phases cimentaires, ce qui retarde le développement de la rigidité.

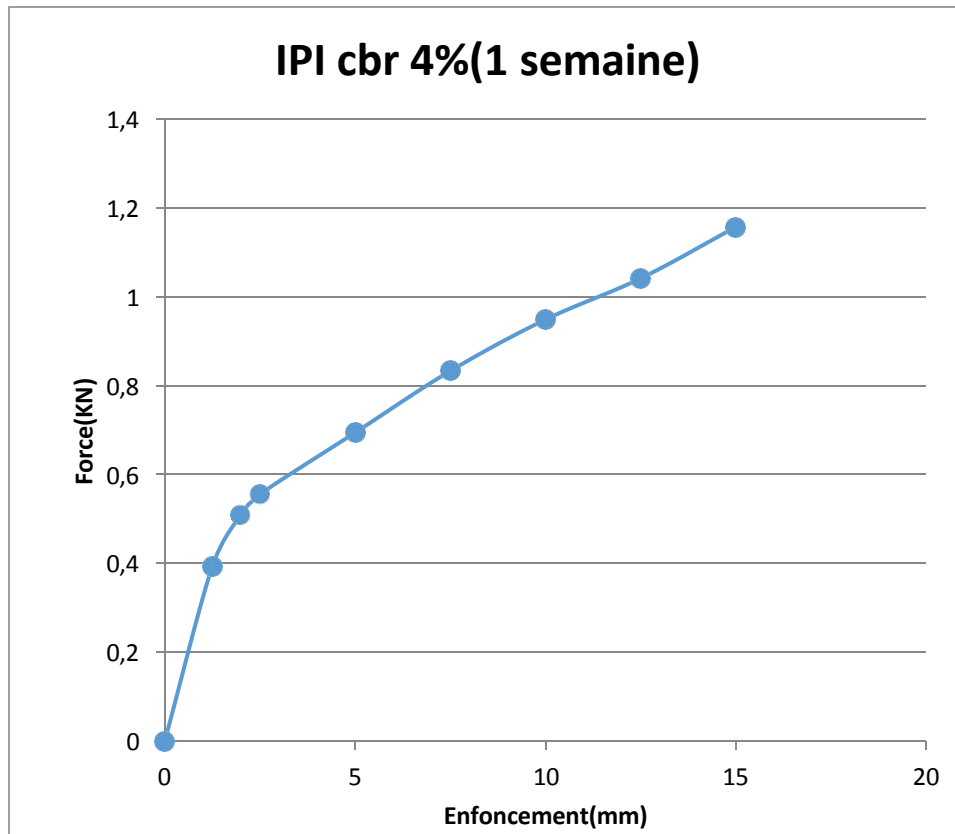


Figure 41 : courbe d'IPI (4%C)

L'augmentation du dosage en ciment à 4 % dans la seconde formulation conduit à une amélioration mesurable des performances mécaniques. L'IPI atteint 4,16 % à 2,5 mm et 3,48 % à 5 mm, avec une humidité résiduelle élevée de 32,38 %. Bien que l'hydratation du ciment semble amorcée, ces valeurs demeurent nettement inférieures au seuil de 10 % requis pour considérer le matériau comme apte à un usage en remblai, même faiblement sollicité. Cette progression limitée, malgré le doublement du taux de liant, souligne l'effet inhibiteur d'une humidité initiale trop élevée, qui freine la formation efficace du réseau cimentaire. Ces constats rejoignent ceux de **Per Lindh, Polina Lemenkova(2023)**, qui ont montré, dans le cadre de formulations de CLSM à base de matériaux fins, qu'un rapport eau/liant trop important compromet significativement le développement des résistances mécaniques et la stabilité à court terme, indépendamment des conditions de compactage.

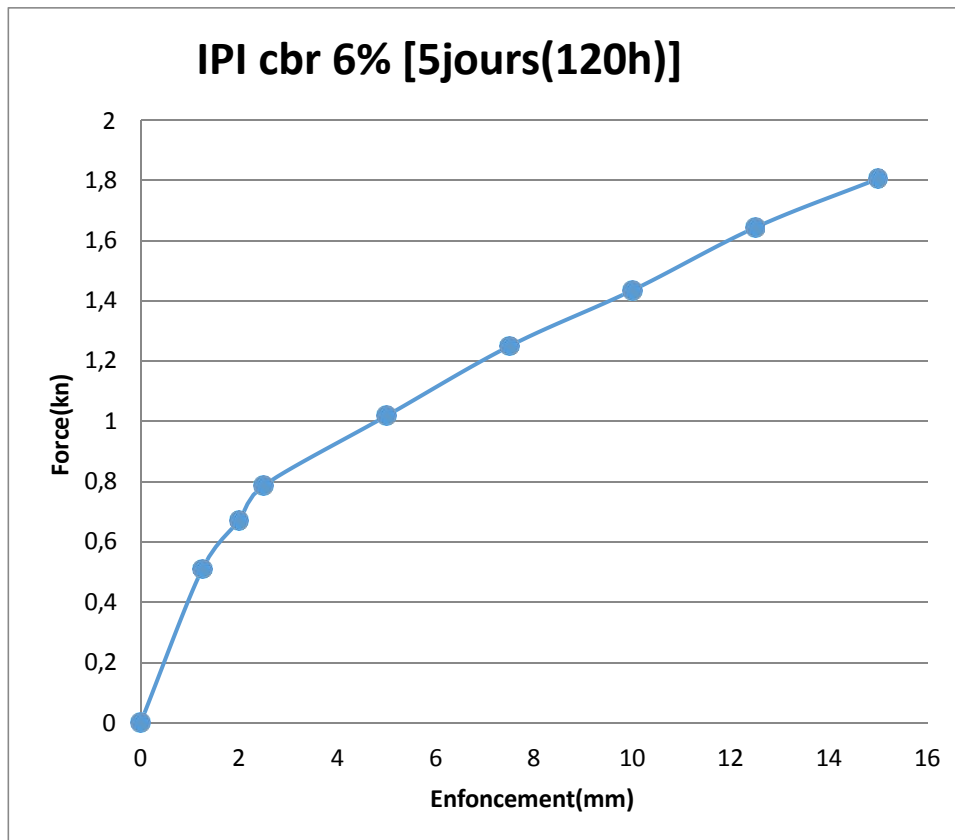


Figure 42 : Courbe d'IPI (6%C)

La formule composée de 94 % de sédiments et 6 % de ciment, durcie en cinq jours, représente le meilleur compromis de cette étude avec un IPI de 5,895 % à 2,5 mm et 5,11 % à 5 mm. Ces valeurs illustrent une rigidité accrue comparée aux mélanges avec moins de ciment, mais n'atteignent pas l'IPI cible de 10 % nécessaire pour le remblai de tranchées. Une humidité résiduelle élevée de 34,73 % retarde la prise du ciment et réduit la cohésion entre les grains. Ces constatations confirment le projet SEDIMATERIAUX (CEREMA, 2020), où des mélanges avec 6 à 8 % de ciment avaient également un IPI au-dessus de 5 % après une semaine à température ambiante, sans atteindre 10 %. Cela souligne le besoin d'un traitement supplémentaire pour renforcer ces matériaux très humides, via ajout de liant, optimisation du séchage ou emploi d'additifs spécifiques.

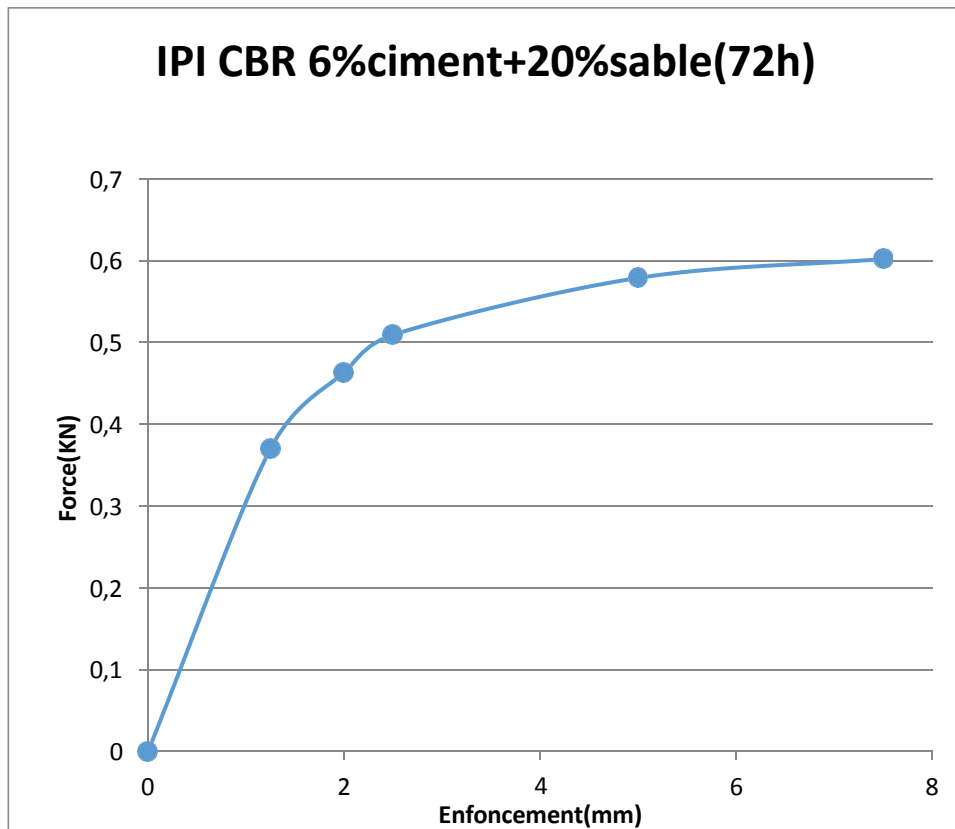


Figure 43 : Courbe d'IPI(6%C+20%S)

L'incorporation de 20 % de sable dans une quatrième formule, avec 6 % de ciment et 74 % de sédiments, n'a pas amélioré les performances. Les IPI de 3,81 % à 2,5 mm et 2,9 % à 5 mm révèlent une diminution de portance malgré une granulométrie favorable en apparence. Une humidité finale de 36,18 % et un séchage de 72 heures étaient apparemment insuffisants pour de bonnes liaisons cimentaires. Le sable, mal intégré à la matrice, peut déstructurer et réduire la cohésion, notamment lorsque la granulométrie du sable est serrée et mal graduée avec  $C_u = 1,80$  ;  $C_c = 1,01$ .

On constate une meilleure portance avec du sable propre et bien si le ratio eau/liant est respecté. L'analyse transversale des quatre formulations souligne que la teneur en eau initiale de 42 %, bien que bénéfique pour assurer la fluidité requise pour un matériau auto-compactant, constitue un facteur limitant pour la portance immédiate, surtout en l'absence de cure thermique ou chimique.

La formulation à 6 % de ciment, sans ajout de sable, émerge comme la plus équilibrée, atteignant un IPI fonctionnel tout en conservant une consistance fluide. Elle représente une base prometteuse pour le développement d'un matériau de remblai valorisant les sédiments fluviaux, à condition d'en optimiser la granulométrie et la gestion de l'humidité. Des pistes

d'amélioration pourraient inclure l'utilisation de liants complémentaires, ou encore l'incorporation d'adjuvants réducteurs d'eau pour améliorer simultanément la compacité et la résistance. Ces stratégies, déjà explorées dans plusieurs études citées, pourraient renforcer le potentiel de réutilisation de ces sédiments dans le cadre d'une économie appliquée aux travaux routiers.

L'histogramme ci-dessous représente l'évolution de la teneur en eau des sédiments en fonction des pourcentages de ciment ajoutés et sable. Les valeurs de la série  $W_r$  (après séchage) varient de 30,44 % à 36,18 %, tandis que la série  $W_i$  (avant séchage) est à 42 % pour toutes les formulations compte tenu du fait qu'elle affirme la fluidité exigées. La teneur à l'état naturel est de 29,61 %. Cette représentation met en évidence l'effet du traitement sur la réduction de l'humidité, selon les différents ajouts

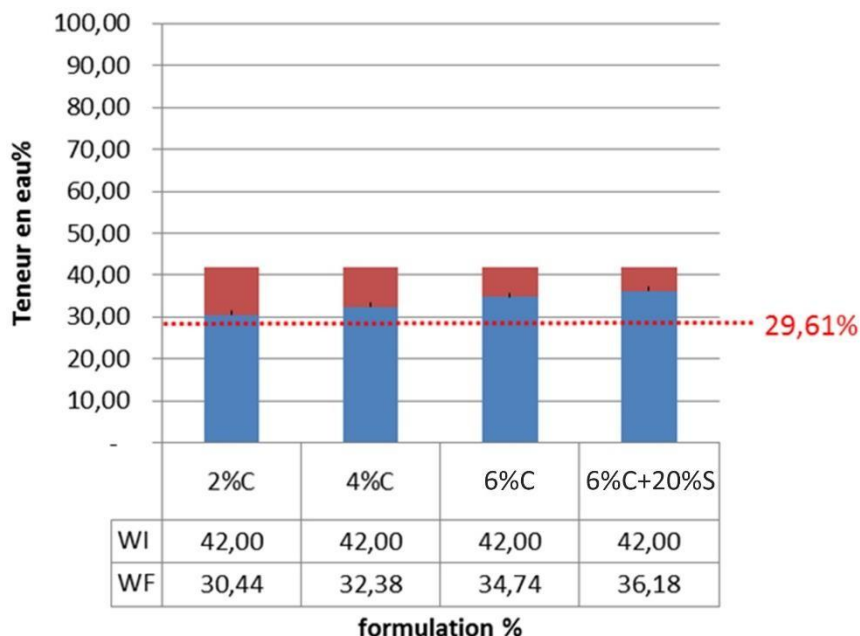


Figure 44 : Représentation de l'évolution de la teneur en eau

L'Indice Portant Immédiat (IPI) mesuré sur les sédiments reste en dessous de 10 %. Cette faible performance s'explique principalement par un léger affaissement du matériau dans le moule CBR pendant que ça sèche. Ce retrait crée un espace entre les sédiments et le piston (**figure 45**), ce qui diminue la force mesurée pendant la pénétration et fausse l'indice obtenu. De plus, on a remarqué que la quantité d'eau finale est proche de la quantité initiale **figure 44**, ce qui montre que les sédiments relâchent très peu d'eau en séchant. Ce faible changement en eau limite le développement des pressions internes et peut influencer la réponse mécanique pendant l'essai. Ainsi, l'IPI ne représente pas fidèlement la capacité réelle de support des

sédiments testés. On recommande alors l'incorporation d'un correcteur granulométrique bien gradué et étalée avec moins de fines. Ceci permettrait la libération de l'excès d'eau nécessaire initialement à la fluidité du matériau.



Figure 45 : Observation de retrait

#### 4.5.1. Résultats des essais en compression simple

Lorsqu'il s'agit de valoriser des matériaux alternatifs tels que les sédiments dragués dans le domaine de la construction routière, notamment pour des applications en remblai de tranchées ou en mélange autocompactant, il est essentiel d'évaluer leur résistance mécanique à long terme. Les essais de compression permettent d'estimer la capacité de ces matériaux traités à atteindre une résistance adéquate tout en conservant une facilité d'excavation. Selon les recommandations du **LCPC-SETRA (2007)**, la résistance à la compression simple après 28 jours ( $R_{c28}$ ) devrait se situer entre 0,7 et 2 MPa. Cette plage est considérée comme optimale pour garantir une puissance mécanique suffisante tout en assurant une maniabilité et une flexibilité résiduelle du matériau, caractéristiques essentielles pour des ouvrages temporaires ou facilement ré-excavables.



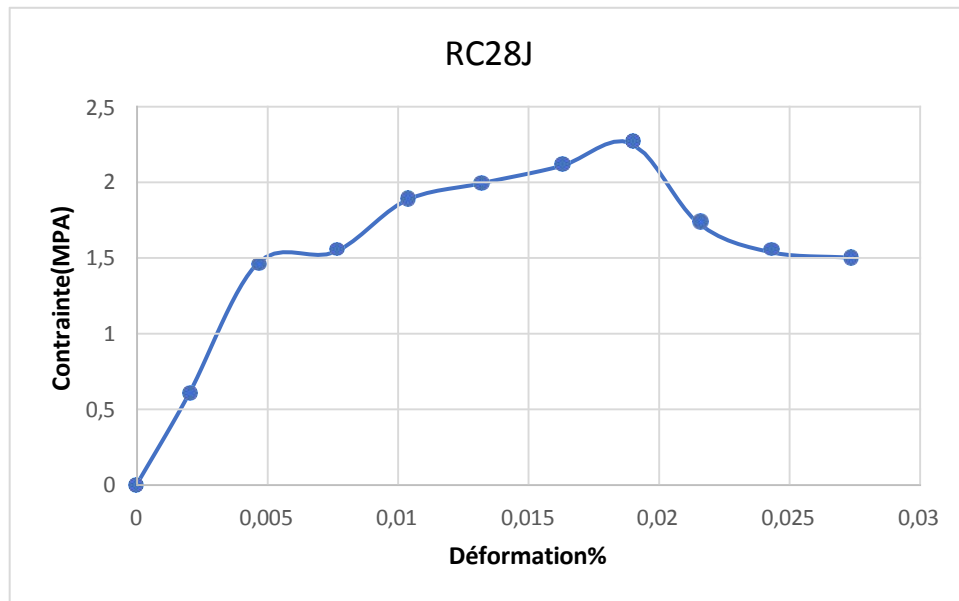


Figure 46 : Courbe contraintes-déformation (2%)

La première courbe indique que, après 28 jours, l'échantillon avec 2 % de ciment atteint une résistance à la compression de 2,25 MPa. Cette valeur dépasse légèrement la plage recommandée par le **LCPC-SETRA (2007)**, qui préconise des valeurs allant de 0,7 à 2 MPa pour les matériaux utilisés dans le remblayage de tranchées qui se compactent d'eux-mêmes. Ce niveau de résistance offre une solidité mécanique adéquate tout en préservant une maniabilité suffisante, essentielle pour des constructions temporaires ou facilement ré-excavables.

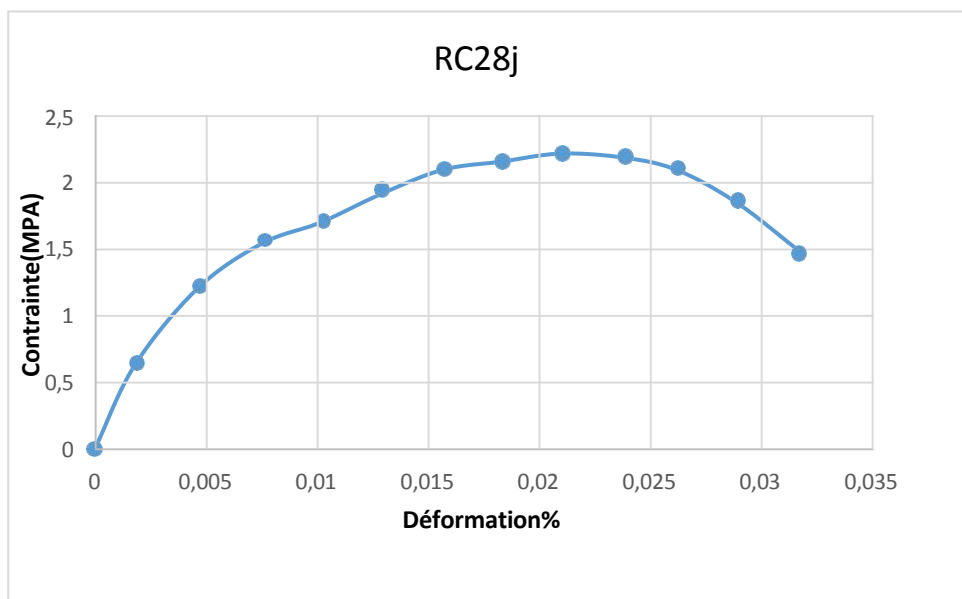


Figure 47 : Courbe contraintes-déformation(4%)

La deuxième courbe affiche une résistance de 2,22 MPa après 28 jours pour l'échantillon contenant 4 % de ciment. Ce chiffre est assez proche de celui observé pour le mélange à 2 %, et dépasse légèrement la plage idéale définie pour les remblais qui peuvent être à nouveau excavés. Ce résultat confirme que l'ajout de ciment améliore généralement la résistance, mais dans ce cas précis, la différence avec le mélange à 2 % est très minime.

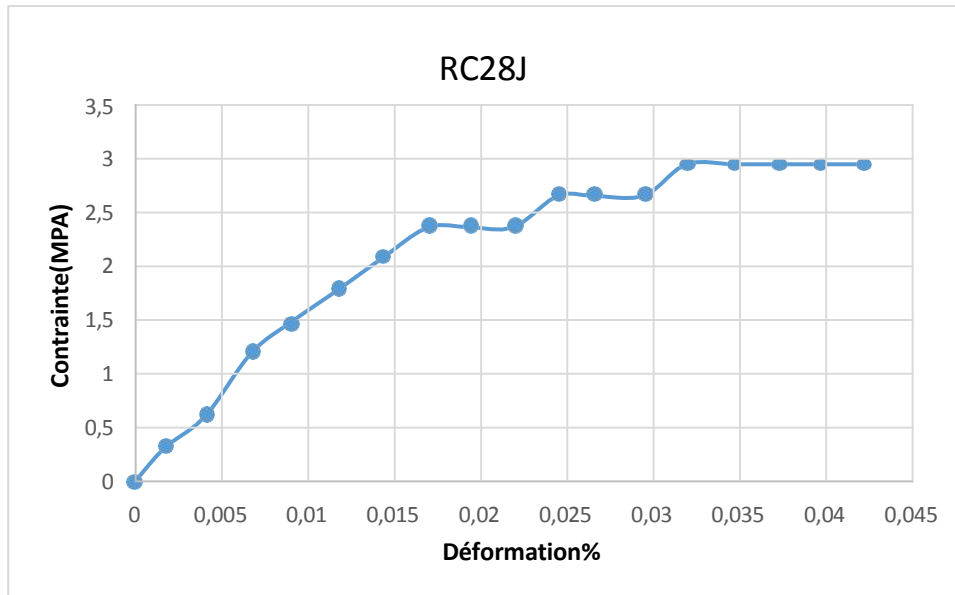


Figure 48 : Courbe contraintes-déformation(6%)

La troisième courbe indique une résistance maximale de 2,94 MPa pour l'échantillon contenant 6 % de ciment. Cette performance mécanique nettement plus élevée reflète l'influence directe du taux de liant. Toutefois, une telle valeur dépasse largement la plage de résistance recommandée pour des matériaux de tranchée autocompactants, ce qui peut poser problème pour des interventions futures. Ce type de formulation serait donc mieux adapté aux structures permanentes nécessitant une forte stabilité.

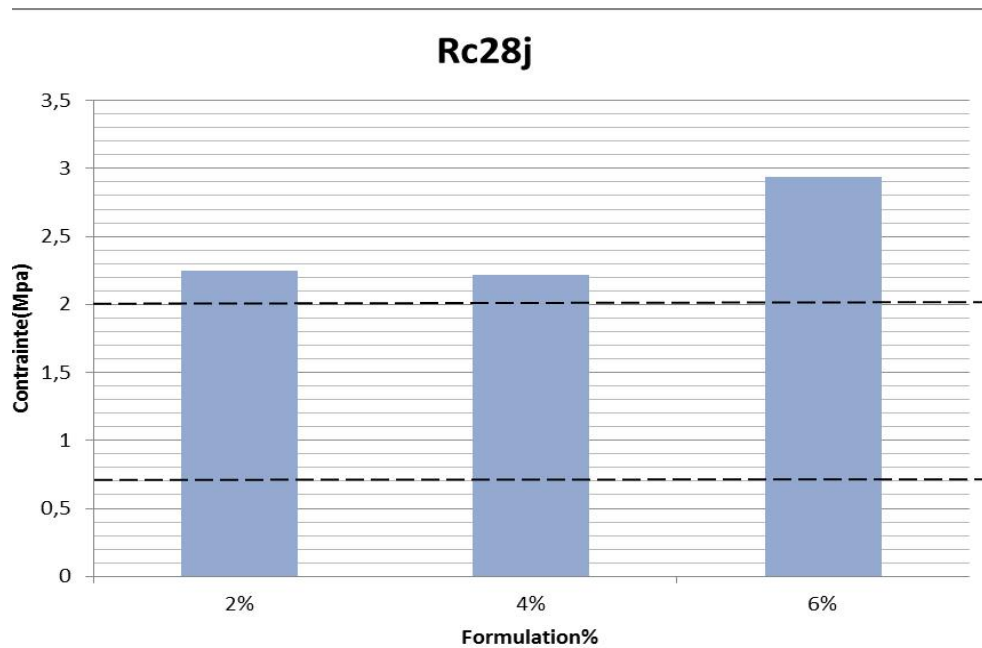


Figure 49 : Variation de la contrainte maximale en fonction du pourcentage de ciment ajouté

L'ensemble des résultats confirme le potentiel des sédiments fluviaux du Soummam comme matériau autocompactant pour le remblayage de tranchées. Les résistances à 28 jours pour les dosages à 2 % et 4 % de ciment sont proches (2,25 MPa et 2,22 MPa respectivement) **figure 49**, ce qui suggère que l'augmentation du liant n'a pas entraîné une amélioration significative des performances dans ce cas. Cette observation s'explique probablement par des conditions expérimentales différentes : l'échantillon à 2 % a bénéficié d'une meilleure conservation et d'un diamètre de perforation légèrement plus grand, favorisant un comportement plus essorable et donc une contrainte finale plus favorable. Cela souligne l'importance de maîtriser non seulement le dosage en liant, mais aussi les conditions de conservation et de préparation pour assurer la fiabilité des résultats.

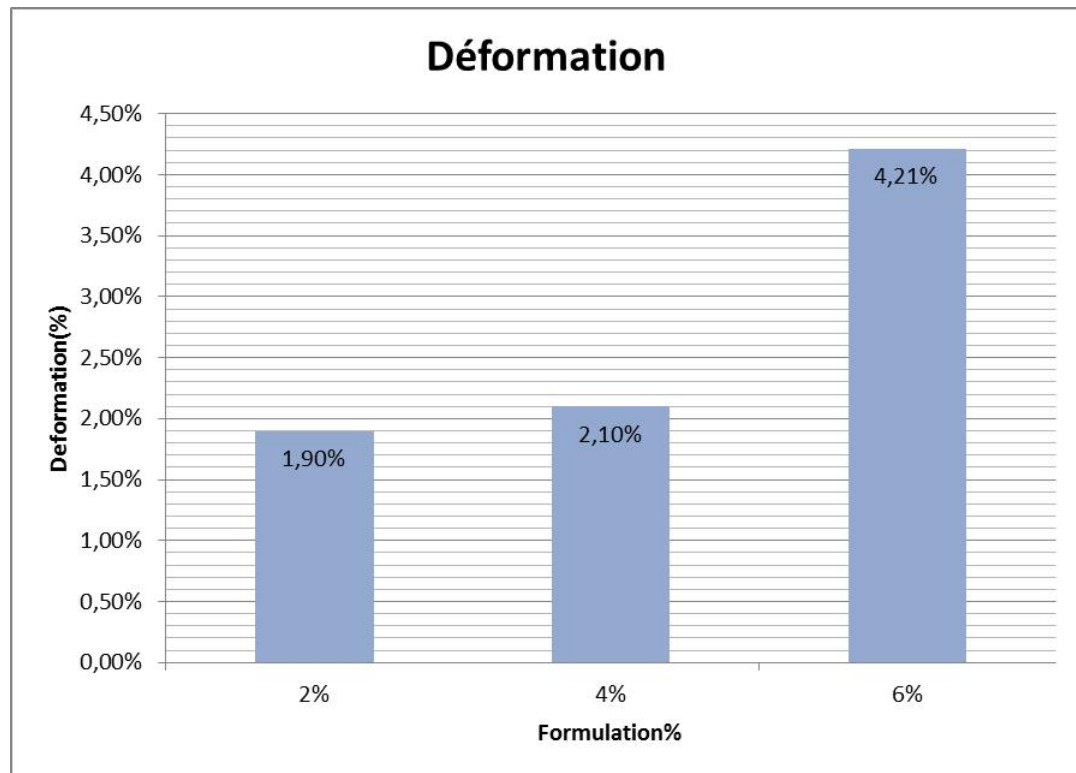


Figure 50 :Variation de la déformation en fonction du pourcentage de ciment ajouté

#### 4.5.2. Résultats des essais en traction

L'évaluation de la résistance à la traction des éprouvettes à 28 jours permet de juger la cohésion des mélanges à base de sédiments du Soummam avec ajout de ciment, destinés au remblayage de tranchées. Selon **AutoCAN (2002)**, une résistance supérieure à 0,25 MPa est requise pour garantir l'aptitude de ces matériaux à être utilisés comme matériau autocompactant dans ce type d'ouvrage.

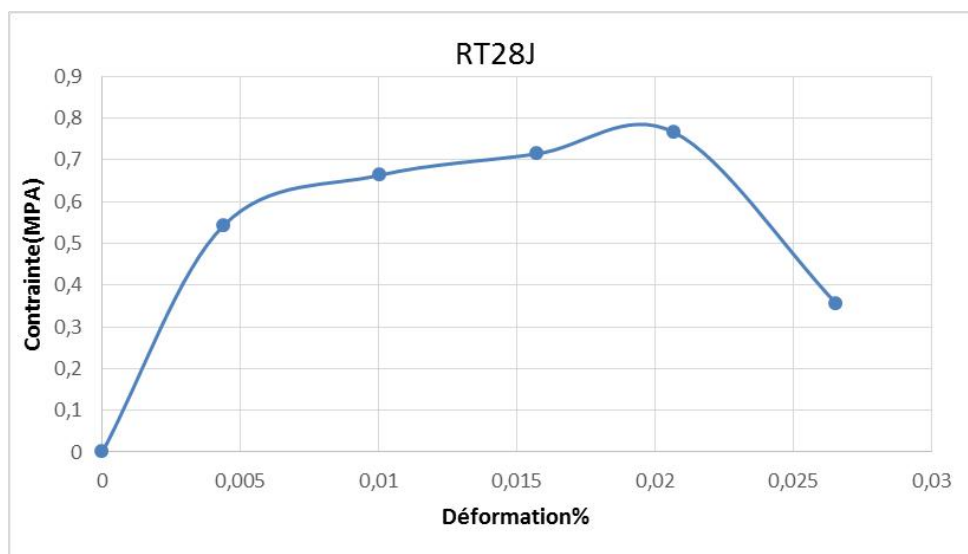


Figure 51 : Courbe contrainte-déformation(2%)

L'échantillon avec 2 % de ciment affiche une résistance à la traction de 0,76 MPa, très au-dessus du seuil de 0,25 MPa recommandé par **AutoCAN (2002)**. Ce résultat est surprenant pour un tel dosage, suggérant des conditions expérimentales optimales, comme en matière de conservation ou de forme de l'éprouvette. Cette valeur révèle une excellente cohésion interne du mélange, surpassant même les formulations plus riches en liant.

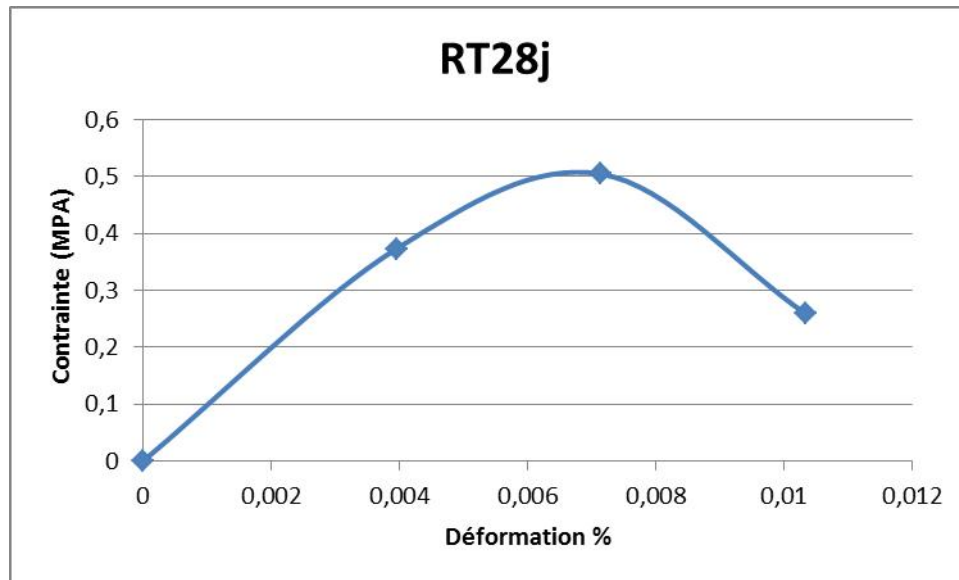


Figure 52 : Courbe contrainte-déformation (4%)

L'échantillon à 4 % de ciment atteint une résistance à la traction de **0,54 MPa**, inférieure à celle de l'échantillon à 2 %, mais toujours bien au-dessus du seuil exigé par AutoCAN. Cette valeur reste satisfaisante pour une application en remblayage de tranchée, garantissant une cohésion suffisante pour la stabilité tout en assurant une certaine souplesse du matériau. Cependant, la baisse par rapport à 2 % soulève des questions sur l'homogénéité des mélanges ou la qualité de la cure.

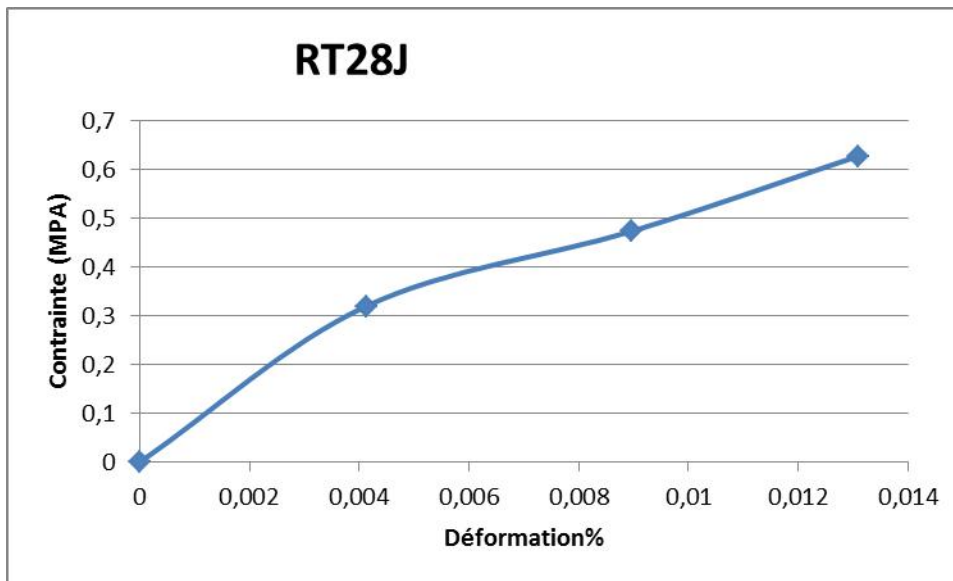


Figure 53 : Courbe contrainte-déformation (6%)

La formulation à 6 % de ciment donne une résistance de **0,63 MPa**, supérieure à celle de 4 %, mais toujours inférieure à celle obtenue avec 2 %. Cette progression non linéaire ne suit pas la logique attendue d'un gain de résistance proportionnel à l'augmentation du liant. Toutefois, la valeur reste largement conforme à l'exigence de 0,25 MPa, confirmant l'efficacité du traitement même à dosage élevé.

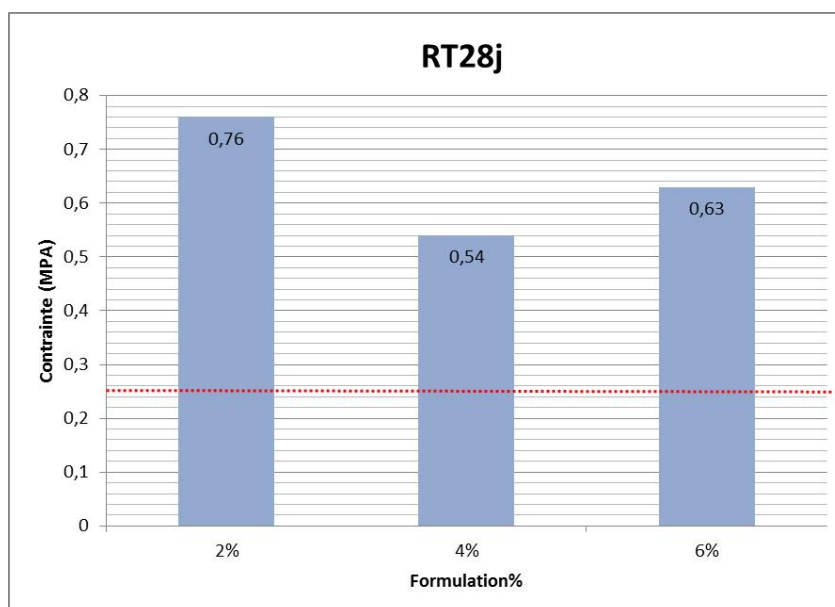


Figure 54 : Variation de la contrainte maximale en fonction du pourcentage de ciment ajouté

L'ensemble des résultats de traction montre que les trois formulations testées dépassent largement le seuil requis de 0,25 MPa pour un matériau autocompactant conforme aux exigences d'**AutoCAN (2002)**. Cependant, on note que la formulation à 2 % de ciment présente la résistance la plus élevée (0,76 MPa), ce qui est inhabituel. Cette anomalie peut s'expliquer par des conditions de conservation plus favorables, un léger retrait bénéfique dans le moule ou des caractéristiques géométriques spécifiques de l'éprouvette, similaires aux observations faites pour la compression. Cela confirme une fois de plus l'importance du contrôle rigoureux des paramètres de mise en œuvre et de cure, surtout lorsqu'il s'agit de matériaux alternatifs comme les sédiments fluviaux.



Figure 55: rupture d'éprouvette



Figure 56 : appareil d'écrasement



## Conclusion générale

La présente étude a mis en lumière le potentiel tangible de valorisation des sédiments de dragage de l'oued Soummam en tant que matériaux autocompactants, destinés spécifiquement au remblayage de tranchées routières. En s'appuyant sur une démarche expérimentale structurée, les analyses physico-chimiques et mécaniques ont révélé des caractéristiques favorables à leur réutilisation, notamment une texture limoneuse homogène, une faible plasticité, et une bonne réactivité aux liants hydrauliques.

L'incorporation progressive de ciment a permis d'améliorer sensiblement la portance, la plasticité et la résistance à la compression des mélanges. Une formulation optimale à 6 % de ciment a été identifiée, offrant un compromis efficace entre rigidité, stabilité et faisabilité technique. Les essais de traction ont confirmé une cohésion interne conforme aux exigences normatives pour les matériaux autocompactants, avec des résistances supérieures au seuil de 0,25 MPa.

Toutefois, certaines limites subsistent, notamment une portance immédiate parfois insuffisante, qui appelle à des ajustements granulométriques, à l'utilisation d'adjuvants adaptés ou encore à une meilleure maîtrise des conditions de cure. Ces résultats soulignent l'importance d'un raffinement des protocoles de traitement pour garantir une performance optimale sur le terrain.

Au-delà de l'approche technique, ce travail s'inscrit dans une démarche de gestion durable des sédiments fluviaux, en transformant un résidu souvent perçu comme un déchet en ressource pour le génie civil. Cette valorisation contribue à réduire la pression sur les ressources naturelles, tout en apportant une solution locale, économique et écologique aux besoins en matériaux de remblayage.

Enfin, cette étude ouvre la voie à de nouvelles perspectives de recherche, notamment en matière d'optimisation des formulations, d'intégration de liants alternatifs ou géo-sourcés, et d'évaluation à long terme des performances en conditions réelles, incluant la durabilité, la stabilité environnementale et le comportement hydromécanique des mélanges.



# Liste des Références

## Références

1. Abriak N.E., Zentar R., Tran Ngoc T. (2007). Amélioration de la performance mécanique des sédiments marins pollués pour une valorisation en technique routière. Colloque SOMAPRO 2007 Sols et matériaux à problèmes, 9-11 février 2007, pp 255-262, Tunisie.
2. Agostini F. (2006). Inertage et valorisation des sédiments de dragage marin. Thèse de doctorat, école centrale de Lille, France.
3. Azrar. Contribution à la valorisation des sédiments de dragage portuaire : technique routière, béton et granulats artificiels. PhD thesis, Lille 1, 2014.
4. banoune, b. (2016). comportement mécanique et durabilité des matériaux routiers à différents dosages en sédiments fins (doctoral dissertation, amiens).
5. Behmanesh J. (2008). Etude de la durabilité d'un sédiment, traité au ciment et additifs. Thèse de doctorat, Université de Caen, France.
6. Bell F.G. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soils. Engineering Geology, Vol. 42, pp 223-237.
7. Bendahoua, Y. & Goudjil, B. (2015). Gestion Et Caractérisation De Sédiment De Dragage De Barrage De Bouhanifia [Mémoire de Master, Université Ibn Khaldoun - Tiaret].
8. berteau, i., martin, s., & vassiliadis, a. (1993). le curage des cours d'eau et les éléments-traces toxiques. le courrier de l'environnement de l'inra, 20, 27–35.
9. BRE, Building Research Establishment (1980). Low-rise buildings on shrinkable clay soils: Part 1. BRE Digest 240, HMSO, London
10. Busnot I. (1991). Les substances humiques : complexants naturels», Thèse de doctorat, Université de Caen, France.
11. Casey B., Germaine J.T., Flemings P.B., Reece J.S., Gao B., Betts W. (2013). Liquid limit as a predictor of mudrock permeability. Marine and Petroleum Geology, Vol. 44, pp. 256 – 263.
12. cemagref (2004). gestion des sédiments en rivière : enjeux, techniques et perspectives. éditions brgm.
13. CEREMA. (2020). SEDIMATERIAUX – Valorisation des sédiments de dragage en techniques routières. Centre d'Études et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement. <https://www.cerema.fr>
14. CETMEF. (2012). Enquête « dragage » 2009 : Analyse des données. Centre d'Études Techniques Maritimes et Fluviales.
15. Clare K.E., Sherwood P.T. (1954). The effect of organic matter on the setting of soilcement mixtures. J. Appl. Chem. n°4, Nov. pp 625-630
16. Colin D. (2003) Valorisation de sédiments fins de dragage en technique routière. Thèse de doctorat, Université de Caen, France.
17. Collins, I. F., & Houlsby, G. T. (1997). *Application of thermomechanical principles to the modelling of geotechnical materials. Proceedings of the Royal Society of London.*

- Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 453(1960), 1975–2001.  
en.wikipedia.org+11
18. Dong Xing Wang, Nor Edine Abriak, Rachid Zentar, Weiya Xu. Solidification/stabilization of dredged marine sediments for road construction. *Environmental Technology*, 2012, 33 (1), pp.95-101. (10.1080/09593330.2011.551840). (hal-04095972)
  19. Dubois V. (2006). Etude du comportement physico-mécanique et caractérisation environnementale des sédiments marins – Valorisation en technique routière. Thèse de l'Université d'Artois, 190 p.
  20. g. schneider, "boues de curage des cours d'eau," 2001
  21. GTR (2000). Réalisation des remblais et des couches de forme, guide technique. Fascicule I et II, édition LCPC, SETRA, Paris.
  22. GTS (2000). Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques, Application à la réalisation des remblais et des couches de forme, édition LCPC, SETRA, Paris.
  23. Hammadi, A. (2017). Détermination De Quelques Métaux Lourds Dans Les Sédiments. Impact Sur L'environnement. [Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar - Annaba].
  24. Husein A.I., Ahmed S.A., Osama T.A. (1999). Effects of organic matter on the physical and the physicochemical properties of an illitic soil. *Applied Clay science*, Vol. 14, pp 257 – 278
  25. Keller G.H. (1982). Organic matter and geotechnical properties of submarine sediments. *Geomarine Letters*, Vol. 2, pp 191-198.
  26. Lafhaj Z., Saliceto A., Cohen S.L., Coudray Y., Huynh T.T., Le Guen B., Anguoni F. (2007). The use of the Novosol process for the treatment of polluted marine sediment. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 148, pp 606–612
  27. Larbi Sihem. Caractérisation et Valorisation des Sédiments Marins pour la Fabrication des Matériaux de Construction. PhD thesis, USTO-MB, 2022.
  28. Lautrin D. (1989). Utilisation pratique des paramètres dérivés de l'essai au bleu de méthylène dans les projets de génie civil. *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, 160, pp 29-41.
  29. Le Guern C., Conil P., Clozel B., Albrecht M., Levacher D., Proulhac N., Schwartz C., Baticle P. (2004) - Aide à la gestion alternative au rejet en mer de sédiments contaminés provenant du dragage de sites portuaires – rapport final, BRGM/RP-53470-FR, 235 p., 48 tab., 55 fig., 7 an .
  30. Lérau J. (2006). Cours de Géotechnique 1, Chapitre 1, 3ème année Ingénierie de la construction, Département de Sciences et Technologies, INSA Toulouse. pp 6-8.
  31. Lindh, P., & Lemenkova, P. (2023). Utilising Pareto efficiency and RSM to adjust binder content in clay stabilisation for Yttre Ringvågen, Malmö. *Acta Polytechnica*, 63(2), 140-157.
  32. Ling, T. C., Kaliyavaradhan, S. K., & Poon, C. S. (2018). Global perspective on application of controlled low-strength material (CLSM) for trench backfilling—An overview. *Construction and Building Materials*, 158, 535-548.

33. Magnan J.P. (1997). Description, identification et classification des sols. Techniques de l'ingénieur, Construction, fascicule C208.
34. mar - guide de bonnes pratiques - 25-04-2014
35. mazen samara. valorisation des sediments fluviaux pollues apres inertage dans la brique cuite. matériaux. ecole centrale de lille, 2007. français. ffnnt : 2007ecli0019ff. fftel-00713676.)
36. Mezazigh S., Silitonga E., Lei X., Bai X. (2012). Etude de la durabilité des sédiments de dragage du port d'Honfleur traités au ciment et additifs. XIIèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, Cherbourg, pp.1075-1084. Doi:10.5150/jngcgc.2012.118-M
37. Miraoui, M. (2010). Prétraitement et traitement des sédiments de dragage en vue d'une valorisation dans le génie civil (Doctoral dissertation, Université de Picardie).
38. Mouni L. (2004). Etude et caractérisation physico-chimique des rejets dans l'oued Soummam. Mémoire de magister, Université Bejaia, Algérie
39. Mouni, L., Merabet, D., Arkoub, H., & Moussaceb, K. (2009). Etude et caractérisation physico-chimique des eaux de l'oued Soummam (Algérie). Sécheresse, 20(4), 360-366.
40. Odell R.T., Thornburn T.H., Mckenzie L.J. (1960). Relationship of Atterberg limits to some other properties of Illinois soils. Proceedings of the Soil Science Society of America 24 (4), 297–300.
41. Peltier R. (1957). La stabilisation des sols. Revue Générale des Routes et Aérodrômes n°304, Mai. Pp 37-60.
42. Rey F. (1999). Etude physico-mécanique et environnementale du composite vase-chaux et additifs. Thèse de Doctorat, Université de Caen/Basse-Normandie.
43. Rey F., Levacher D., Quenec'h J. (2000). La valorisation par solidification/stabilisation à base de chaux et additifs de vases de dragage : résultats et perspectives. VIème Journées Nationales Génie Civil-Génie côtier, Caen, pp 377-386
44. Sabatini P.J., Bachus R.C., Mayne P.W., Schneider J.A., Zettler T.E. (2002). Geotechnical Engineering Circular N°5-Evaluation of Soil and Rock Properties, Technical Manual, GeoSyntec Consultants, 386 pages
45. Scordia P.Y., Lafhaj Z., Skoczylas F., Mongouin T. (2009). Characterization and valorization of polluted and treated river sediments in road. European Journal of Environmental and Civil Engineering. Vol. 7, No. 4, pp 451- 469.
46. SETRA. (2006). Traitement des sols à la chaux et aux liants hydrauliques – Guide technique (édition LCPC-SETRA, 240 p.). SETRA.
47. Sherwood, P. (1993) Soil Stabilization with Cement and Lime. <https://trid.trb.org/view/389479>
48. Silitonga E. (2010). Valorisation des sédiments marins contaminés par solidification/stabilisation à base de liants hydrauliques et de fumée de silice. Thèse de Doctorat, Université de Caen, France.
49. Snethen D.R. (1980). Expansive Soil in Highway Subgrades, Report FHWA-TS-80-236.

50. Tran N.T. (2009). Valorisation de sédiments marins et fluviaux en technique routière. Thèse de doctorat, Ecole des mines de Douai, France.
51. wray, wk, 1985. atterberg limits. measuring engineering properties of soil. prentice-hall, usa, englewood cliffs, nj chapter 4.
52. Young J.F. (1976). Reaction mecanismes of organic admixtures with hydrating cement compounds. Tranport research record. n°564. pp 1-9.
53. Yukselen Y., Kaya A. (2008). Suitability of the methylene blue test for surface area, cation exchange capacity and swell potential determination of clayey soils. Engineering Geology, Vol. 102, pp. 38 - 45.

**Normes :**

- NF P 94-051, AFNOR (1993). Détermination des limites d'Atterberg–Limite de liquidité à la coupelle-Limite de plasticité au rouleau. Norme expérimentale, France.
- NF P 94-078, AFNOR (1997). Indice CBR après immersion-Indice CBR immédiat-Indice portant immédiat. Norme expérimentale, France.

## Résumé :

Le fleuve Soummam, située dans la région de Béjaïa, accumule un grand volume de sédiments fins en raison de l'érosion et de l'activité humaine. Ces sédiments, souvent considérés comme des déchets, peuvent être revalorisés en génie civil après un traitement approprié. Cette étude explore le potentiel des sédiments dragués de la Soummam pour une utilisation comme matériaux autocompactants de remblayage de tranchées.

Des ajouts progressifs de ciment (2 %, 4 % et 6 %) ont été évalués quant à leur influence sur la plasticité, la fluidité (cône d'Abrams), l'indice portancier immédiat (CBR), la résistance à la compression et la résistance à la traction à 28 jours. Les résultats montrent une amélioration significative de la plasticité et des performances mécaniques avec l'augmentation du taux de ciment, en particulier à 6 %, où le matériau passe d'une consistance molle à rigide et atteint une résistance à la compression supérieure à 2,9 MPa. Cependant, la résistance à la traction la plus élevée a été observée de manière inattendue à 2 % de ciment, soulignant la sensibilité de ces formulations aux conditions de cure et à la teneur en humidité.

Bien que tous les seuils de performance ne soient pas atteints (par exemple, un CBR de 10 %), les sédiments traités présentent des caractéristiques favorables à leur réutilisation dans le remblayage urbain de tranchées, à condition d'appliquer des optimisations supplémentaires, telles qu'un apport de sable ou des additifs chimiques. Ce travail soutient une gestion durable des sédiments et promeut les principes de l'économie circulaire dans les projets d'infrastructures routières.

## Mots-clés :

Sédiments dragués

Remblayage autocompactant

Stabilisation au ciment

Caractérisation géotechnique

Réutilisation durable



## **Abstract:**

The **Soummam River**, located in the Bejaïa region, accumulates a large volume of fine sediments due to erosion and human activity. These sediments, often considered waste, can be reused in civil engineering after appropriate treatment. This study explores the potential of Soummam dredged sediments for use as self-compacting trench backfill materials.

Incremental additions of cement (2%, 4%, and 6%) were evaluated for their influence on plasticity, fluidity (Abrams cone), immediate bearing index (CBR), compressive strength, and tensile resistance at 28 days. Results show a significant improvement in plasticity and mechanical performance with increasing cement content, particularly at 6%, where the material shifts from a soft to a rigid consistency and reaches compressive strength above 2.9 MPa. However, the highest tensile resistance was unexpectedly observed at 2% cement, highlighting the sensitivity of these formulations to curing conditions and moisture content.

Although not all performance thresholds (e.g., 10% CBR) were met, the treated sediments exhibit characteristics suitable for reuse in urban trench backfilling, provided further optimizations are made, such as sand correction or the addition of chemical additives. This work supports sustainable sediment management and promotes circular economy principles in road infrastructure projects.

## **Keywords:**

Dredged sediments

Self-compacting backfill

Cement stabilization

Geotechnical characterization

Sustainable reuse

## ملخص

نهر الصومام، الواقع في منطقة بجاية، يتراكم فيه حجم كبير من الرواسب الدقيقة نتيجة للتعرية والنشاط البشري. وغالبًا ما تُعتبر هذه الرواسب نفايات، إلا أنه يمكن إعادة استخدامها في مجال الهندسة المدنية بعد معالجتها بشكل مناسب. تهدف هذه الدراسة إلى استكشاف إمكانية استخدام راسب نهر الصومام المجمعة من أعمال الجرف كمادة لردم الخنادق ذاتية الانضغاط.

تم تقييم تأثير الإضافات المتزايدة من الإسمنت (2%، 4%، و6%) على اللدونة، والسيولة (مخروط أبرامز)، ومؤشر التحمل الفوري (CBR)، ومقاومة الضغط، ومقاومة الشد بعد 28 يومًا. أظهرت النتائج تحسنًا ملحوظًا في اللدونة والأداء الميكانيكي مع زيادة نسبة الإسمنت، خاصة عند 6%، حيث يتحول السلوك من طري إلى صلب وتصل مقاومة الضغط إلى أكثر من 2.9 ميجاباسكال. ومع ذلك، لوحظت أعلى مقاومة للشد بشكل غير متوقع عند نسبة 2% من الإسمنت، مما يبرز حساسية هذه التركيبات لظروف المعالجة ومحتوى الرطوبة.

وعلى الرغم من أن بعض معايير الأداء مثل CBR بنسبة 10 (%) لم تتحقق، فإن الرواسب المعالجة تُظهر خصائص مناسبة لإعادة استخدامها في ردم الخنادق الحضرية، بشرط إدخال تحسينات إضافية مثل تصحيح الرمال أو استخدام إضافات كيميائية. يدعم هذا العمل إدارة مستدامة للرواسب ويعزز مبادئ الاقتصاد الدائري في مشاريع البنية التحتية للطرق.

## الكلمات المفتاحية:

رواسب الجرف ردم ذاتي

بيت الانضغاط تثبيت بالإسمنت

توصيف جيوتكنيكي برك إعادة

استخدام مستدامة