

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

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



Mémoire de Master

Présenté à l'Université 8 Mai 1945 de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil et d'Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : Géotechnique

Présenté par : BOUKEMMOUM Nour El Houda

NOUAOURIA Abdessalam

Thème : Valorisation des sédiments de barrages
Cas du barrage de Ain Dalia (Souk Ahras)

Sous la direction de : Pr. NOUAOURIA Mohamed Salah

Juillet 2019

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Il est primordialement de remercier «ALLAH EL KARIM» de nous avoir donné le courage, la patience et la santé tout au long de notre parcours de nous avoir permis d'aller jusqu'à la fin de notre modeste travail et de pouvoir le mettre en forme dans le présent manuscrit.

Nous tenons d'abord à exprimer toute notre gratitude à notre encadreur, Pr NOUAOURIA Mohamed Salah, pour tout le soutien, l'aide, l'orientation, pour son suivi notre parcours durant la période du travail, pour ses remarques judicieuses et constructives qui ont contribué à l'amélioration de ce mémoire. C'est à la fois un privilège et une expérience exceptionnelle d'avoir pu bénéficier de ses conseils qui nous ont guidés et nous guideront encore pendant les années à venir, que Dieu le protège.

Nous exprimons nos remerciements à tous les enseignants du département de Génie Civil pour leurs aides, leurs encouragements et leurs conseils tout au long de notre cursus universitaire, qu'ils puissent trouver ici l'expression de notre profond respect. A toutes les personnes du Laboratoire de Génie Civil et d'Hydraulique (LGCH) et particulièrement son Directeur Pr. NOUAOURIA Mohamed Salah.

Nous remercions aussi le Doctorant TOUAMRIA Sabri qui nous a beaucoup aidés dans la réalisation de ce travail.

Nos sentiments de reconnaissance vont également à toute personne qui nous a aidés de près ou de loin.

Dédicaces

Je dédie ce projet de fin d'étude ;

En premier lieu à mes parents qui m'ont aidée et soutenue durant toutes ces longues années d'étude,

A mon père, qui avec sa sagesse a su m'épauler et m'orienter vers l'aboutissement de mes études, qui m'a aidé en m'orientant pour le choix de ma filière universitaire,

A ma très Chère Mère, qui est pour moi une source de réconfort, qui avec son amour et sa patience m'a donnée le meilleur d'elle-même,

A mon frère Tamer et ma sœur Wiam qui m'ont soutenue moralement,

A Mr Guerroum Yassine qui m'apporta son soutien,

A toute la famille, les amis,

A toute la promotion Master 2 Géotechnique 2018 – 2019,

Surtout mon collègue Abdessalam,

Enfin, les mots les plus simples étant les plus forts.

BOUKEMOUM Nour El Houda

Dédicaces

Je dédie ce modeste mémoire de fin d'étude ;

En premier lieu à mes parents qui m'ont aidé et soutenu durant toutes ces longues années d'étude,

A mon père, qui avec sa sagesse a su m'épauler et m'orienter vers l'aboutissement de mes études, qui m'a aidé en m'orientant pour le choix de ma filière universitaire,

A ma très Chère Mère, qui est pour moi une source de réconfort, qui avec son amour et sa patience m'a donné le meilleur d'elle-même,

A mes frères : Lokmane ,Hatem et Soheyb et ma belle sœur Ahlem,

A toute la famille, les amis,

A toute la promotion Master 2 Géotechnique 2018 – 2019,

Surtout ma collègue Nour el houda,

Enfin, les mots les plus simples étant les plus forts.

NOUAOURIA Abdessalam

Résumé

La retenue du barrage de Ain Dalia est soumise à une forte sédimentation en raison de volumes considérables d'apports solides transportés chaque année par les rivières surtout lors de fortes crues. C'est ainsi, qu'un grand volume de vase s'est déposé réduisant ainsi sa capacité à moins de 45 %. Afin de prolonger la durée de vie de cet ouvrage, le dragage de la retenue est devenu une solution indispensable malgré les énormes quantités de vases extraites par les vannes de fond du barrage et qui ne trouvent aucune application, et leur stockage pose actuellement un problème qui menace l'environnement.

Dans ce travail, nous avons mené une étude de caractérisation du sédiment prélevé dans la retenue du barrage de Ain Dalia. Dans le cadre de valorisation de ce sédiment, des essais triaxiaux non consolidés non drainés ont été réalisés sur des échantillons traités par les fibres de Sisal et le sable normalisé.

Mots clés : Barrage, Ain Dalia, sédiments, vase, dragage, caractérisation, valorisation.

Abstract

The reservoir of the Ain Dalia dam is subjected to high sedimentation because of the considerable volumes of solid inputs transported each year by the rivers, especially during heavy floods. As a result, a large volume of silt was deposited, reducing its capacity to less than 45%. In order to extend the life of this structure, the dredging of the reservoir has become an indispensable solution despite the enormous quantities of vases extracted by the bottom valves of the dam and which find no application, and their storage poses a problem at present which threatens the environment.

In this work, we conducted a sediment characterization study of the Ain Dalia Dam reservoir. As part of the recovery of this sediment, undrained unconsolidated triaxial tests were performed on samples treated with Sisal fibers and standardized sand.

Key words: Dam, Ain Dalia, sediments, silt, dredging, characterization, valorization.

ملخص

يخضع زان سد عين ديا ترسيب عالٍ بسبب كميات كبيرة من مواد صلبة التي تنقلها الأنهار سنويًا ، خاصة أثناء الفيضانات غزيرة. نتيجة ذلك ، تم ترسيب كمية كبيرة من طمي ، مما يقلل من قدرتها على أقل من 45 ٪ من أجل إطالة عمر هذا الهيكل ، أصبح تجريف خزان حلاً لا غنى عنه على الرغم من كميات هائلة من طين مستخرجة من صمامات سفلية لسد والتي لا تجد أي تطبيق ، وتخزينها يمثل مشكلة في وقت حالي و يهدد البيئة. في هذا عمل ، أجرينا دراسة توصيف رواسب خزان سد عين ديا. كجزء من استعادة هذا رواسب ، تم إجراء تيارات ثلاثية محاور غير مجمعة على عينات عوجت بأباف سيزال و رمل معياري. كلمات مفتاحية: سد ، عين ديا ، رواسب ، طين ، تجريف ، توصيف .

Remerciements	I
Dédicaces	II, III
Résumé	IV
Abstract	V
ملخص	VI
Table des matières	VIII
Liste des figures	XII
Liste des tableaux	XV
Notations et Symboles	XVII

Table des matières

Introduction Générale	1
Chapitre 1 Les sédiments de barrages: Contexte général et bibliographique	
1 .1 Introduction	3
1.2 Les sédiments	3
1.3 Les Argiles	3
1.4 La vase	3
1.5 Bassin versant	4
1.6 Processus de sédimentation	4
1.6.1 L'érosion	5
1.6.2 Types d'érosion	5
1.6.2.1 Erosion en nappe	5
1.6.2.2 Erosion linière	5
1.6.3 Transport solide	6
1.6.3.1 Transport solide par charriage	7
1.6.3.2 Le Transport solide en suspension	7
1.7 Problèmes posés par la sédimentation	8
Réduction de la capacité	9
Sécurité de l'ouvrage	9
Blocage des vannes	9
Accélération de l'eutrophisation	10
Sédimentation dans les canaux d'irrigation	10
1.8 Techniques de dévasement	10
1.8.1 Soutirage	11
1.8.2 Dragage	11
1.8.2.1 Types de dragage	12

❖ Dragage hydraulique	12
❖ Dragage mécanique	13
❖ Dragage à l'Américaine	13
1.8.2.2 Différents moyens de dragage	14
1.8.2.3 Impact sur l'environnement	15
1.9 Les moyens de lutte contre l'envasement	15
1.10 Conclusion	16

Chapitre 2 Valorisation des sédiments de barrages

1 Introduction :	17
2.2 Valorisations des sédiments	17
2.2.1 Valorisation des sédiments en technique routière	17
❖ Définition de la structure de chaussée	17
❖ Utilisation des sédiments de barrages dans la construction des corps de chaussée	18
2.2.2 Valorisation dans le béton et mortier	20
2.2.3 Utilisation de la vase dans la fabrication de ciment	22
2.2.4 Couche étanche pour un bassin de lagunage	23
2.2.5 Valorisation des sédiments dans l'industrie des matériaux rouges	24
2.3 Exemple	26
2.4 Produits de traitement des sols	28
2.4.1 Types de fibres utilisées dans le domaine de la construction	28
2.4.2 Différents types de fibres	29
2.4.2.1 Les fibres naturelles	29
❖ Les fibres animales	29
❖ Fibres minérales	30
❖ Les fibres végétales	30

Classification des fibres végétales	30
Les Fibres de feuilles	31
B. Les fibres de tiges	31
C. Les fibres de bois	31
D. Les fibres de surface	31
2.4.2.2 Fibres artificielles	31
❖ Les fibres de caoutchouc	31
❖ Fibres de verre	33
2.5 Conclusion	34
Chapitre 3 Situation géographique et caractéristiques générales du barrage	
3.1 Introduction	35
3.2 Site du barrage de Ain Dalia	35
3.3 Caractéristiques techniques du Barrage de Ain Dalia	36
3.4 Le Bassin versant de Ain Dalia	37
3.5 Historique du barrage	38
3.6 Conclusion	39
Chapitre 4	
4.1 Introduction	40
4.2 Les essais d'identification	40
4.2.1 Analyse chimique et organique	40
4.2.2 Analyse granulométrique par lavage et sédimentométrie	41
4.2.3 L'essai au bleu de méthylène (VBS) selon la norme AFNOR NF P 94-068	44
4.2.4 Limites d'Atterberg	47
4.2.5 Retrait linéaire	50
4.2.6 Classification du matériau selon le GTR	51
4.2.7 Détermination de la masse volumique des particules solides des sols selon NF P 94-054	52
4.2.8 Proctor Normal selon la norme NF P 94-093	53

4.2.9 L'indice portant immédiat, CBR après immersion, CBR Immédiat selon la norme NF P94-078.	55
4.3 Essai de cisaillement en vue de valorisation des sédiments de barrage de Ain Dalia	59
4.3.1 Essais à l'appareil triaxial	59
4.3.2 Matériaux utilisés	61
➤ Sable normalisé	61
➤ Fibres de Sisal	63
4.3.3 Essais triaxiaux non consolidés non drainés	64
Echantillon 01 : Echantillon témoin du sédiment de barrage	64
Echantillon 02 : 99% Sédiment+1% de fibre	66
Echantillon 03 : 98% Sédiment+2% de fibre	68
Echantillon 04 : 90% Sédiment traité par 10% de sable normalisé	69
Echantillon 05 : 80% Sédiment traité par 20% de sable normalisé	71
Echantillon 06 : 70% Sédiment traité par 30% de sable normalisé	73
4.4 Analyse des résultats	75
4.4.1 Analyse des résultats des essais triaxiaux réalisés sur des échantillons témoins et du sol traité par les fibres de Sisal	75
4.4.2 Analyse des résultats des essais triaxiaux réalisés sur des échantillons témoins et du sol traité par le sable normalisé en trois différentes proportions	76
4.5 Conclusion	77
Conclusion générale et perspectives	78
Référence bibliographique	80
Annexe	82

Liste des figures

Chapitre 1

Figure1.1	Processus de sédimentation	4
Figure1.2	Modes de transport solide en hydraulique fluviale.	8
Figure1.3	Problèmes posés par la sédimentation	8
Figure1.4	dragage hydraulique	12
Figure1.5	Pompe hydraulique	12
Figure1.6	Dragage mécanique	13
Figure1.7	Dragage à l'Américaine	14
Figure1.8	Rejet de la vase draguée	15
Figure1.9	Entraînement de la vase en aval.	15
Figure1.10	Moyens de lutte contre l'envasement	16

Chapitre 2

Figure2.1	Différentes couche d'une chaussée	18
Figure2.2	Approche méthodologique de valorisation des sédiments de dragage en techniques routières	20
Figure2.3	Blocs de bétons réalisés avec des sédiments non-immérgeables traités	22
Figure2.4	Couche d'argile dans un bassin de lagunage	24
Figure2.5	Briques et tuiles	25
Figure2.6	Briques fabriquées avec un taux de substitution de 70% de sédiments	25
Figure2.7	Barrages étudiés	26
Figure2.8	Schéma général du processus de fabrication des briques	27
Figure2.9	Utilisation des vases de barrages les plus envasés.	28
Figure2.10	Les classes de fibres végétales	30
Figure2.11	Fibres des pneus de caoutchouc	32
Figure2.12	Fibres de caoutchouc découpé en morceaux	33
Figure2.13	Fibre de verre utilisée de type Cemfil	33

Chapitre 3

Figure3.1 Le barrage de Ain Dalia	35
Figure3.2 Vue géographique sur le barrage de Ain Dalia (wilaya de Souk Ahras)	36
Figure3.3 Le barraes de Ain Dalia en 2017, le niveau d'eau a chuté à plus de 92%	39

Chapitre 4

Figure 4.1 Analyse chimique et organique	40
Figure 4.2 Essai de sédimentation	42
Figure 4.3 les tamis dans d'ordre décroissant	42
Figure 4.4 Matériel utilisé pour la sédimentation	42
Figure 4.5 Courbe granulométrique	44
Figure 4.6 dispositif pour l'essai VBS	45
Figure 4.7 Les résultats de l'essai VBS	45
Figure 4.8 Classification du sol selon la valeur de bleu de méthylène	46
Figure 4.9 Limites d'Atterberg	47
Figure 4.10 Détermination de la limite de liquidité	48
Figure 4.11 Détermination de la limite de plasticité	48
Figure 4.12 les seuils d'Argilosité	49
Figure 4.13 Deux échantillons pour l'essai du retrait	50
Figure 4.14 Vue générale de l'essai de pycnomètre à l'eau	53
Figure 4.15 Vue générale de l'équipement de l'essai Proctor normal	54
Figure 4.16 Essai Proctor Normal	55
Figure 4.17 vue générale de l'appareil utilisé dans l'IPI et l'I.CBR après immersion, I.CBR Immédiat.	56
Figure 4.18 Résultats de l'essai IPI	57
Figure 4.19 Relation Force-enfoncement dans l'essai I.CBR après immersion	58

Figure 4.20 Relation Force-enfoncement dans l'essai I.CBR immédiat	59
Figure 4.21 Eléments principaux de l'appareil de triaxial.	60
Figure 4.22 Sable normalisé.	61
Figure 4.23 Courbe granulométrique du sable normalisé.	62
Figure 4.24 Fibre de Sisal.	64
Figure 4.25 Relation contrainte-déplacement vertical du sol témoin.	65
Figure 4.26 Détermination des paramètres de cisaillement du sol témoin.	66
Figure 4.27 Relation contrainte-déplacement vertical pour 1% de fibre.	66
Figure 4.28 Détermination des paramètres de cisaillement du sédiment traité par 1% de fibre.	67
Figure 4.29 Relation contrainte-déplacement vertical pour 2% de fibre.	68
Figure 4.30 Détermination des paramètres de cisaillement de sédiment traité par 2% de fibre.	69
Figure 4.31 Relation contrainte-déplacement vertical pour 10% de sable.	70
Figure 4.32 Détermination des paramètres de cisaillement de sédiment traité par 10% de sable	71
Figure 4.33 Relation contrainte-déplacement vertical pour 20% de sable	71
Figure 4.34 Détermination des paramètres de cisaillement de sédiment traité par 20% de sable	73
Figure 4.35 Relation contrainte-déplacement vertical pour 30% de sable	73
Figure 4.36 Détermination des paramètres de cisaillement de sédiment traité par 30% de sable	74
Figure 4.37 Résultats finaux des essais triaxiaux des échantillons du sol traité par les fibres de Sisal	75
Figure 4.38 Résultats finaux des essais triaxiaux des échantillons du sol traité par le sable normalisé	76

Liste des tableaux

Chapitre 2

Tableau 2.1 Propriétés physiques et mécaniques de certaines fibres	29
Tableau 2.2 Propriétés physiques et techniques des fibres	32
Tableau 2.3 Propriétés physico-mécaniques de la fibre de verre A.R	34

Chapitre 3

Tableau 3.1 Caractéristiques techniques du Barrage de Ain Dalia	36
Tableau 3.2 Le barrage de Ain Dalia en chiffres	37

Chapitre 4

Tableau 4.1 Analyse chimique et organique	40
Tableau 4.2 les données des essais d'analyse granulométrique et la sédimentométrie	43
Tableau 4.3 Tableau récapitulatif de l'essai VBS	46
Tableau 4.4 Classification du sol étudié	47
Tableau 4.5 Résultats de la limite de liquidité	47
Tableau 4.6 Résultats de la limite de plasticité	48
Tableau 4.7 Classification du sol en fonction de l'indice de plasticité	49
Tableau 4.8 les limites d'Atterberg de certaines argiles d'après (Monaco A. et chassefiere B. 1976)	49
Tableau 4.9 Résultat de retrait	50
Tableau 4.10 Classification des sols fins selon GTR	51
Tableau 4.11 Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature	52
Tableau 4.12 Résultats de l'essai Proctor Normal	54

Tableau 4.13 Résultats de l'indice portant immédiat	56
Tableau 4.14 Résultats de l'indice CBR après immersion	57
Tableau 4.15 Résultats de l'indice CBR immédiat	58
Tableau 4.16 Résultats de l'analyse granulométrique de sable normalisé	62
Tableau 4.17 Données de l'essai triaxial (UU) du sédiment de barrage témoin	65
Tableau 4.18 Résultats de l'essai triaxial témoin	65
Tableau 4.19 Données de l'essai triaxial (UU) du sédiment de barrage traité par 1% de fibre	67
Tableau 4.20 Résultats de l'essai triaxial pour 1% de fibre	67
Tableau 4.21 Données de l'essai triaxial (UU) du sédiment de barrage traité par 2% de fibre	68
Tableau 4.22 Résultats de l'essai triaxial pour 2% de fibre	68
Tableau 4.23 Données de l'essai triaxial (UU) du sédiment de barrage traité par 10% de sable	70
Tableau 4.24 Résultats de l'essai triaxial pour 10% de sable	70
Tableau 4.25 Données de l'essai triaxial (UU) du sédiment de barrage traité par 20% de sable	72
Tableau 4.26 Résultats de l'essai triaxial 20% de sable	72
Tableau 4.27 Données de l'essai triaxial (UU) du sédiment de barrage traité par 30% de sable	74
Tableau 4.28 Résultats de l'essai triaxial pour 30 % de sable	74
Tableau 4.29 Résultats finaux des essais triaxiaux traité par différents teneur en fibre	75
Tableau 4.30 Résultats finaux des essais triaxiaux traité par différents teneur en sable	76

Notations et symboles

V	Vitesse de l'écoulement sur le lit du cours d'eau.
W	Vitesse de chute des particules.
MS33	Mortiers à 33% de remplacement du sable par le sédiment traité.
MS66	Mortiers à 66% de remplacement du sable par le sédiment traité.
MS100	Mortiers à 33% de remplacement du sable par le sédiment traité.
CU	Essais triaxial consolidés-non drainés.
UU	Essais triaxial non consolidés-non drainés.
CD	Essais triaxial consolidés-drainés.
VBS	Essais de bleu de méthylène.
IP	Indice de plasticité.
L_p	Limite de plasticité.
L_L	Limite de liquidité.
G_s	Densité des grains solide.
W_{opt}	La teneur en eau optimum.
φ	Angle de frottement interne
C	Cohésion.
ρ_s	Masse volumique des particules solides.
ρ_w	Masse volumique de l'eau conventionnellement prise égale à 1g/cm^3 .
$\rho_{d\ max}$	Masse volumique sèche maximale.
ρ_h	Masse volumique humide.
σ_3	Contrainte principale mineure.
σ_1	Contrainte principale majeure.

Introduction Générale

Ces dernières années, l'envasement des barrages en Algérie devient de plus en plus inquiétant et fréquent. Plus de 32.106 m³ de vase se déposent chaque année au fond des retenues. Le barrage de Ain Dalia n'a pas échappé à ce problème, puisqu'il est envasé actuellement à plus de 45% de sa capacité initiale. C'est pourquoi il est d'une extrême urgence de procéder aux travaux de dragage afin de sauver cet ouvrage. Le dragage lui-même pose deux problèmes : économique dont le cout de l'opération est très élevé. L'autre problème c'est bien l'impact des sédiments évacués par le drague sur la faune et la flore d'un coté et sur la géométrie du cours d'eau en aval d'un autre coté. Mais devant la grande quantité de vase rejetée en aval du barrage de sérieux problèmes d'environnement sont apparus. Il serait alors plus judicieux de mener une réflexion pour une utilisation rationnelle de la vase qui peut être valorisée dans plusieurs domaines. Dans cette étude, nous avons mené une série d'analyses physiques et chimique sur un échantillon de vase prélevé dans la retenue du barrage de Ain Dalia.

Ce travail permet d'étudier le comportement mécanique du sédiment de dragage du barrage de Ain Dalia qui est situé sur l'Oued Medjerda, commune de Henancha, Daira de Mechroha, à une dizaine de kilomètre au sud de la ville de Souk-Ahras, permettant de constituer sur l'Oued Medjerda une retenue d'une capacité totale de 82 millions m³ (76,07 Hm³ après le dernier levé bathymétrique en Février 2004). Sa réalisation a débuté en février 1984 et sa mise en eau le 1^{er} mars 1988. Après 31 ans de sa mise en eau, le barrage de Ain Dalia à perdue environ de 102Hm³, soit un taux de 45%.

Le dragage du barrage de Ain Dalia devient donc une opération prioritaire pour récupérer le volume perdu. Mais devant la grande quantité de vase rejetée en aval de barrages dragué, de sérieux problèmes d'environnement sont apparus. L'étude des sédiments récupérés contribue dans la résolution de ces problèmes, d'un coté minimiser le cout élevé de l'opération de dragage et de l'autre coté régler les problèmes liés à l'environnement.

L'objectif de cette étude est le traitement des sédiments de dragage en vue de les utiliser comme matériau de construction.

Ce mémoire est scindé en une introduction générale, quatre chapitres.

Le premier chapitre présente un contexte général et bibliographique sur les sédiments de barrages.

Le deuxième chapitre expose la valorisation des sédiments de barrages.

Le troisième chapitre donne une idée générale sur la situation géographique et caractéristique générales du barrage de Ain Dalia.

Le quatrième chapitre est dédié à la présentation des essais de caractérisation des sédiments de barrage de Ain Dalia ainsi que les essais triaxiaux après le traitement avec différentes teneurs en fibre et sable.

Finalement, notre travail est clôturé par une conclusion générale contenant l'essentiel des résultats trouvés ainsi que les perspectives pour les futures recherches, une rubrique de références bibliographiques et en fin une annexe contenant les résultats des essais triaxiaux réalisés sur le sol étudié.

Chapitre 1 Les sédiments de barrages: Contexte général et bibliographique

1.1 Introduction

Dans de nombreux pays du monde, le transport des sédiments dans le réseau hydrographique des bassins versants et leurs dépôts dans les retenues pose aux exploitants des barrages des problèmes dont la résolution ne peut qu'être onéreuse. Non seulement la capacité utile est progressivement réduite au fur et à mesure que les sédiments se déposent dans le retenue mais encore l'enlèvement de la vase est une opération délicate et difficile, qui souvent exige que la retenue soit hors service, ce qui est pratiquement impossible dans les pays aride et semi- aride.

1.2 Les sédiments

D'un point de vue descriptif sommaire, les sédiments rencontrés sont essentiellement constitués de particules fines de la taille des argiles ; on peut rencontrer localement des passages beaucoup plus grossiers, allant jusqu'à des graves sableuses ou plus couramment des passages sableux.

1.3 Les Argiles

L'argile est une « Roche sédimentaire terreuse, imperméable, formée surtout de silicates d'aluminium et qui est imbibée d'eau malléable ». Elle peut être verte, rouge, jaune, brune, grise, blanche...etc. ainsi donc les terres exploitées pour la réalisation des produits dits de terre cuite peuvent être différentes selon le gisement et la composition chimique.

1.4 La vase

Le nom de vase est la désignation d'une large famille de sédiments fins, argileux de faible teneur en matière organique, avec une importante teneur en eau. Elle contient une phase minérale dont la granulométrie s'étend des sables, aux argiles et aux colloïdes, une phase organique et une phase liquide. La vase peut se présenter aussi bien à l'état de suspension (crème de vase) que de sol cohérent (sédiment cohésif) présentant alors un caractère plastique, compressible et thixotropique. Elle contient souvent l'habitat d'une faune riche et diversifiée (vers, mollusques, bactéries).

1.5 Bassin versant

Un bassin versant est l'ensemble des dénivellations du relief qui fusionnent en un système hydraulique unique délimitant un déversement superficiel.

Le bassin versant en un point ou plus précisément dans une section droite d'un cours d'eau est défini comme la surface topographique drainée par ce cours d'eau et ses affluents à l'amont de la dite section; tous les écoulements prenant naissance à l'intérieur de cette surface doivent traverser la section droite considérée pour suivre leur trajet vers l'aval.

1.6 Processus de sédimentation

La sédimentation des barrages est due directement aux forts taux d'érosion des bassins versants, dont les particules solides sont drainées directement par les cours d'eau et provoqueront à l'entrée des retenues des courants de densité. La figure 1.1 illustre le processus de sédimentation.

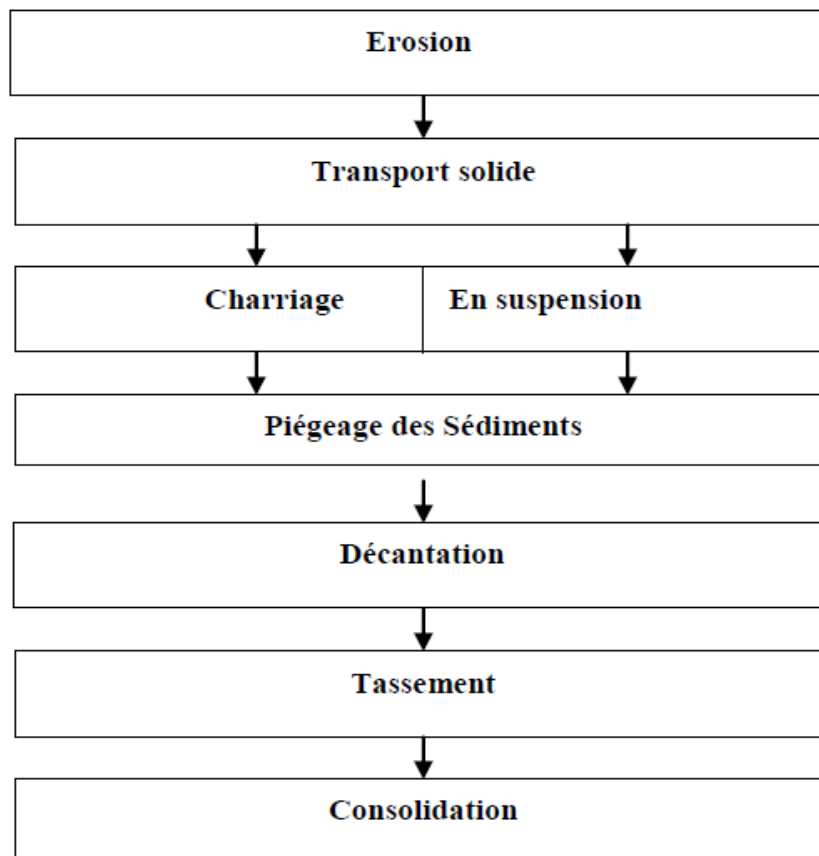


Figure 1.1 Processus de sédimentation

1.6.1 L'érosion

L'érosion est définie comme étant le détachement de fragments ou de particules de sol ou de roche de leur position initiale par l'eau et autres agents géologiques, tel que, le vent, la glace, etc.

Dans un bassin versant, l'arrachement des particules sédimentaires de leurs emplacement d'origine, leur déplacement et leur dépôt, dépendent de nombreuses caractéristiques de ce bassin, ces dernières peuvent être soit physiques soit hydrologiques et sont fortement interpellant :

- ✓ Les caractéristiques physiques d'un bassin qui influent sur l'érosion et le transport solide sont: Le relief, la nature géologique, le sol, la végétation, l'occupation des terres, la morphologie du réseau de drainage
- ✓ Les caractéristiques hydrologiques comprennent les facteurs climatiques tels que : la précipitation et la température ; le volume et l'intensité des précipitations jouent un rôle important dans le processus d'érosion par suite de leurs effets dans la dynamique de détachement des particules par l'écoulement.

1.6.2 Types d'érosion

Les chercheurs ont divisé le phénomène d'érosion en deux types principaux qui sont cités ci-dessous d'après Houaria M.(2018).

1.6.2.1 Erosion en nappe

Elle se produit lorsque l'écoulement et l'érosion se font sur toute la surface du sol, ce qui provoque une usure homogène non perceptible dans la majorité des cas.

Ce type d'érosion entraine des conséquences morphologiques et pédologiques fâcheuses suites à un décapage de l'horizon superficiel diminuant insidieusement sa réserve en élément fertilisant.

1.6.2.2 Erosion linière

Elle se produit lorsque la concentration des eaux conduit à la formation de chenaux de dimension croissante : griffes (quelques centimètres des profondeurs), rigoles (incision dans la couche labourée), ravines (incision dépassant la couche labourée).

Du point de vue quantitatif, ce type d'érosion reste dans les mêmes proportions que l'érosion en nappe. (Sabah T., 2007).

❖ Erosion en griffes et rigoles

Elle se produit lorsque l'écoulement d'eau se concentre et choisit son passage, dès qu'une griffe s'établit, l'eau de ruissellement tend à se réunir, et plus elle se creuse plus il y a appel d'eau dans rigole. Ainsi, le phénomène de creusement s'accélère de lui-même.

❖ Erosion par ravinement

Les ravines suivent la ligne de plus grande pente des versants puisque le ruissellement provenant des versants peut atteindre 50 à 80 % durant les averses exceptionnelles tombant sur les terres battues ou compactées, l'essentiel du transport solide provient des ravines et oueds (Arabi M., 1991). Lorsque le sol est peu perméable, saturé et couvert, le ruissellement est abondant. Ce dernier creuse des ravines et augmente les pointes de crues des oueds, ce qui favorise le sapement des berges et les glissements de terrain, et par conséquent l'envasement des barrages, la destruction des infrastructures et la dégradation des terres.

1.6.3 Transport solide

Le transport solide représente l'entraînement de granulat sous l'action d'un écoulement fluide ; il existe dans différents phénomènes physiques, naturels ou industriels, et constitue un écoulement à surface libre ou en charge.

Le transport solide dans les cours d'eau constitue la seconde phase de l'érosion, il relève essentiellement du ruissellement et met en jeu diverses formes d'écoulement de l'eau dans la nature.

Les matériaux alluvionnaires constituant le lit des cours d'eau proviennent de l'élaboration des éléments de surface, en général des matériaux meubles du bassin versant, si l'on ne tient compte que de l'érosion en nappe évaluée au maximum à 20 t/ha/an, cette ablation est de l'ordre de 1.3mm/an, (Bouvard M., 1984 et Chebbani R., 1999).

L'érosion des berges du lit des cours d'eau affluents, d'après les travaux effectués sur le fleuve de Sénégal, la Garonne et sur des rivières des Etat Unis, ce type d'érosion produit 20 à 30% du tonnage total des sédiments exportés (Bouanani A., 2004), il est évalué à 31 % de la charge total pour la haute Tafna en Algérie (Megnounif A., 2003).

Généralement, deux modes de transport solide sont considérés, le transport solide par charriage et le transport solide en suspension, Il n'existe pas une délimitation nette entre ces deux modes de transport ; il y a des auteurs qui considèrent un troisième mode caractéristique

intermédiaire, la saltation, où les particules se déplacent par des bonds, en alternant la charriage et suspension (Bouanani A., 2004).

1.6.3.1 Transport solide par charriage

Le transport solide par charriage, représente la progression de sédiments grossiers (sables, graviers, galets et blocs) qui se déplacent par roulement ou glissement, au voisinage immédiat du fond du cours d'eau, et parcourent des distances relativement petites et discontinues dans le temps et dans l'espace, leur vitesse est inférieure à celle de l'écoulement. (Figure 11). Les mesures sur terrain du transport solide par charriage sont très onéreuses à cause de perturbations de l'écoulement. De ce fait, les évaluations de ce type de transport sont difficiles à mener en l'absence de base de données. Les chercheurs se contentent généralement d'études sur modèles réduits pour déterminer la proportion du charriage par rapport à la suspension ou au transport total pour quelques bassins versant le taux de charriage a été estimé 12.5% de la suspension (Bouanani A., 2004).

Le débit charrié dans les retenues Algérienne est estimé entre 10 à 15 % du débit en suspension (Remini B., 2003).

1.6.3.2 Le Transport solide en suspension

Le transport solide en suspension représente le transport des sédiments fins (argiles limons, sable fins), maintenus en suspension sur toute la hauteur de la masse liquide du cours d'eau, sous l'action des fluctuations; les particules se déplacent au sein de l'écoulement avec une vitesse de même ordre de grandeur que celle du fluide. (Figure 1.1).

Les sédiments se déplacent sur des grandes distances et le débit solide croit de l'amont vers l'aval. Quelques valeurs indicatives, permettent de délimiter les deux modes de transport, ces valeurs utilisent le rapport entre vitesse de l'écoulement 'V' sur le lit du cours d'eau, et la vitesse W de chute des particules (Bouanani A., 2004).

$V/W > 0.1$ début de transport solide par charriage

$V/W > 0.4$ début de transport en suspension

La concentration d'éléments en suspension des Oueds Algériens dépasse souvent 100g/l pendant les premières pluies d'automne. (Remini B., 2003).

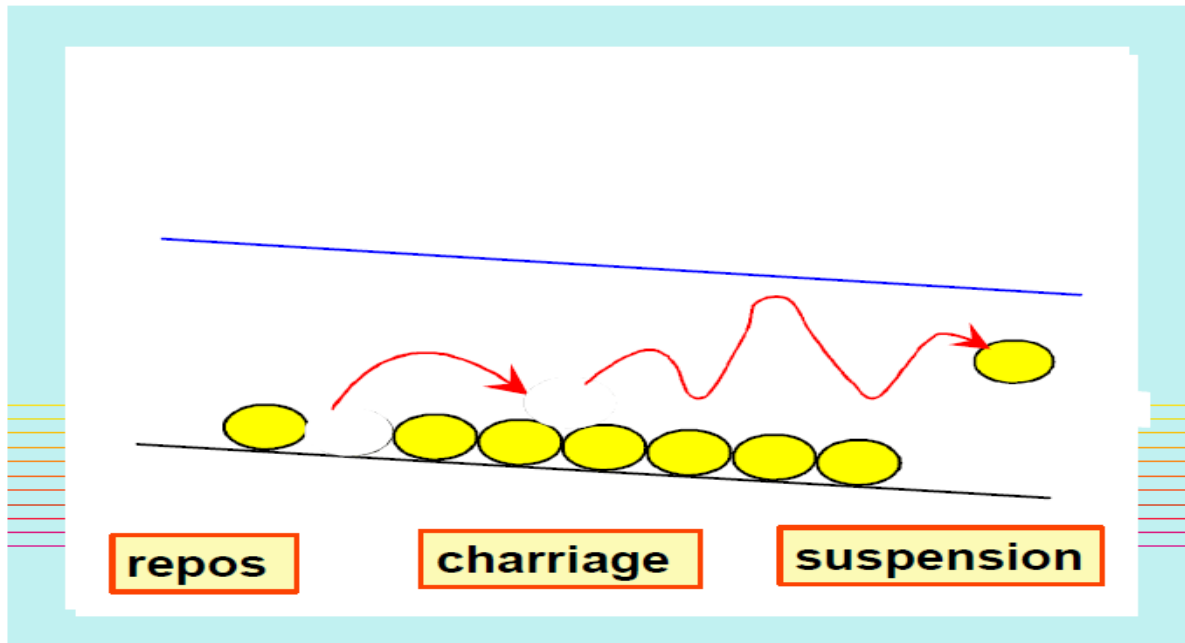


Figure 1.2 Modes de transport solide en hydraulique fluviale. (Sedib A., 2004)

1.7 Problèmes posés par la sédimentation

La sédimentation dans les barrages pose d'énormes problèmes au niveau du réservoir lui même, mais aussi en amont et en aval du réservoir. Elle entraîne la réduction de la capacité utile du barrage, le blocage des organes de vidange, la sédimentation peut mettre la stabilité de l'ouvrage en danger.

Elle peut aussi accélérer l'eutrophisation du lac. Les sédiments en suspension dans l'eau distribuée par les canaux, à partir des barrages, se déposent dans ces ouvrages, réduisent leur débitance, et rendent difficile leur exploitation (voir figure 1.3), et elle a même un impact sur la qualité de l'eau.

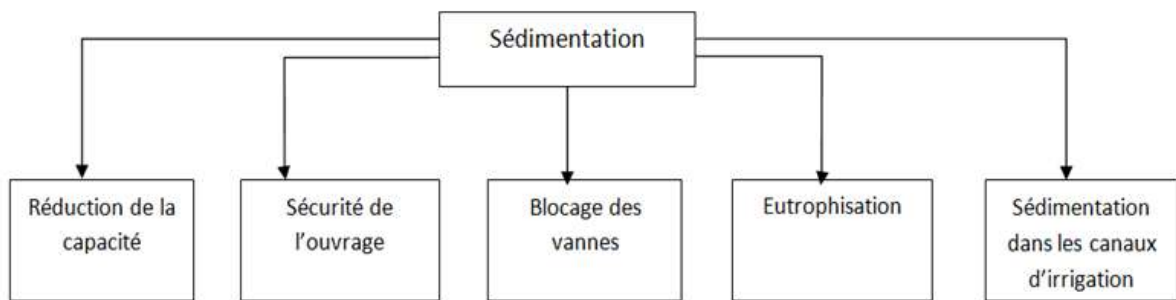


Figure 1.3 Problèmes posés par la sédimentation

- **Réduction de la capacité**

La réduction de la capacité de stockage de l'eau est sans aucun doute la conséquence la plus dramatique de l'envasement. Chaque année, le fond vaseux évolue et se consolide avec occupation d'un volume considérable de la retenue.

- **Sécurité de l'ouvrage**

L'envasement pose un problème sur la stabilité de l'ouvrage. On sait que pour une variation linéaire de la hauteur de la vase, la poussée progresse au carré de la hauteur (Oumrani N., 2009),

La sédimentation des retenues a un impact sur la sécurité des barrages, par la mise en danger de la stabilité de l'ouvrage du fait de l'augmentation de la force hydrostatique produite par le remplacement accéléré du volume d'eau par la vase. Ceci se traduit par l'accroissement de la masse spécifique qui peut atteindre $1,8 \text{ t/m}^3$. Ce cas a été signalé aux barrages de Zardézas, et de K'sob.

(Oumrani N., 2009) ont signalé que si le taux de comblement d'une retenue dépasse 50% de la capacité initiale et la vase est en contact de l'ouvrage, dans ce cas, il faut prendre au sérieux la stabilité du barrage. C'est le cas des barrages de Oued El Fodda, et de Foum El Gherza.

- **Blocage des vannes**

La présence des courants de densité dans une retenue accélère la sédimentation, et peut avoir comme impact l'obturation des organes de vidange. La non maîtrise du mécanisme des courants de densité peut avoir un effet néfaste sur les vannes de fond. En effet, l'ouverture tardive des vannes de fond, par rapport à l'arrivée des courants de densité, favorise la consolidation des vases près des pertuis de vidange et rend plus difficile leurs manœuvres. Comme exemple, on peut citer le cas du barrage d'Oued El Fodda dont la vanne de fond a été bloquée depuis 1948 suite à la consolidation rapide de la vase. Actuellement, elle se trouve sous 40 m de hauteur de vase. La vanne du barrage de Foum El Gherza s'est obturée durant la période 1981-1989. Celle du barrage de Zardézas a été bloquée durant les années 90.

- Des exemples ont été donnés par (Remini B., 2003)

- Barrage de Oued el Fodda (Chlef): la vanne de fond a été bloquée depuis 1949 et se trouve maintenant sous plus de 40 m de vase.

- Barrage Chambon (France) : la vanne a été obturée en 1955, la solution adoptée a été la construction d'une nouvelle vanne de vidange, achevée en 1962.

➤ Barrage Foum el Gherza (Biskra): la vanne de fond a été bloquée de 1982 à 1989.

- **Accélération de l'eutrophisation**

Une fois déposées, les particules solides se tassent, et se consolident suivant leur nature, et les conditions physico-chimiques du milieu. Du fait de l'eutrophisation qui en résulte, la qualité de l'eau se dégrade très sérieusement.

Plusieurs cas ont été signalés dans la région de l'Afrique du nord. En effet, les déficits en oxygène, enregistrés près du fond du barrage El Khattabi (Maroc) au cours de la saison d'été, ont provoqué une activité de biodégradation dans les zones profondes (2001).

- **Sédimentation dans les canaux d'irrigation**

Un autre problème délicat posé par la sédimentation qui s'étend cette fois-ci à l'aval du barrage. En effet, l'irrigation par l'eau chargée provoque le dépôt des sédiments dans les canaux. La section mouillée diminue avec le temps et par conséquent le débit d'écoulement. Ce problème impose leur entretien, et leur dévasement d'une manière périodique.

Selon Badraoui A. et Hajji A. (2001) au Maroc, plusieurs canaux d'irrigation s'ensavent à chaque opération d'irrigation. C'est le cas du canal de la rocade qui alimente les périmètres du Haouz central, et la ville de Marrakech. Les périmètres de Habra, dans l'ouest algérien, s'ensavent à chaque opération d'irrigation. Il arrive souvent que les siphons se bouchent par la consolidation de la vase, et le curage devient donc indispensable, et d'une manière régulière.

1.8 Techniques de dévasement

Avant dévasement, les sédiments se présentent à l'état consolidé sous forme de couches juxtaposées, emprisonnant des formations plus grossières. Dans cet état consolidé la vase aura des caractéristiques différentes selon ses propriétés et le milieu dans lequel s'effectue le tassement.

Les opérations de dévasement peuvent s'effectuer suivant deux techniques en fonction de la nature et du degré de consolidation des sédiments piégés : remobilisation des sédiments par des opérations de chasse durant les périodes des crues. Dans le cas contraire, ce sont les actions mécaniques par dragage qui donnent des résultats plus satisfaisants. Néanmoins c'est l'opération la plus coûteuse.

Les techniques de dévasement des barrages peuvent être résumées globalement par les deux moyens suivants :

- l'utilisation des moyens de vidange dont est équipé le barrage (les soutirages).

Dans ce cas, l'état avancé de consolidation des sédiments, ou bien celui où les vases sont encore en suspension, ne permettent pas l'utilisation efficace de cette technique;

- l'utilisation d'un moyen d'enlèvement des matériaux adapté à leur état de consolidation en place dans la cuvette de la retenue (le dragage).

1.8.1 Soutirage

Selon Remini B. (2002), le moyen le moins coûteux reste l'évacuation des sédiments par les pertuis de vidange du barrage qu'il préfère appeler « technique de soutirage ».

Cette technique qui peut contribuer effectivement à augmenter la durée de vie d'un réservoir nécessite la bonne connaissance des écoulements divers dans la retenue, en plus de la dotation des ouvrages à annexer au barrage dès sa conception initiale. En effet, un système de batteries de vannes spécialement conçues pour l'entraînement des sédiments est nécessaire. Son application est conseillée à certains sites qui favorisent l'apparition de courants de densité. Ces courants de densité sont très concentrés en sédiments, qui nécessitent l'ouverture des vannes de fond et de dégager le maximum de sédiments avec une perte d'eau minimum.

1.8.2 Dragage

Le dragage est une opération ayant pour objet le prélèvement de matériaux, notamment boues, limons, sables et graviers, au fond d'un cours d'eau ou d'un plan d'eau à l'aide de moyens mécanique, hydraulique ou pneumatique dans le but d'aménagement ou d'entretien, c'est-à-dire tous travaux nécessaires pour rétablir un cours d'eau dans sa largeur et sa profondeur naturelle. Cela exclut un approfondissement ou un élargissement du lit.

D'après Musa 1981, dans sa thèse, définit les dragages comme étant «des terrassements effectués sous l'eau avec des engins flottants au moyen de procédé mécanique ou par aspiration». En fait, les procédés peuvent être mécaniques, hydrauliques ou pneumatiques. Cette définition correspond assez bien à l'idée que l'on se fait aujourd'hui du dragage dans notre environnement très industrialisé.

Le dragage peut également être défini de façon générale comme l'ensemble des actions caractérisées par un prélèvement de matière par excavation sous l'eau par un déversement de ces produits dans la veine de l'eau, coté aval de la retenue ou sur le rivage.

L'opération de dragage peut se décomposer en plusieurs étapes : Etudes préalables et caractérisation des sédiments, choix de la filière de destination, extraction des boues, transport des matériaux de dragage, et traitement, mais selon certains auteurs, la récupération d'une capacité de stockage par dragage est une opération très coûteuse qui n'est pas économique

pour les grandes retenues. Depuis les années 2000, plus de 20 millions de m³ de vase ont été extraits de nos barrages.

Un nombre important de barrages ont été récupérés par la technique de dragage et leur durée de vie se trouvent prolongée de plusieurs années.

1.8.2.1 Types de dragage

Différentes techniques de dragage ont été développées selon Benasla M.(2015). Il est courant de classer les équipements de dragage selon leur principe général de fonctionnement, trois catégories peuvent être recensées :

❖ Dragage hydraulique

Cette technique nécessite une drague suceuse refouleuse et une conduite flottante et terrestre pour l'évacuation du produit dragué (vase et eau) jusqu'à la zone de rejet. Les figures 4.1 et 1.5 montrent cette technique de dragage.

Les matériaux sont désagrégés par jets d'eau sous pression ou par rotation d'un outil et mis en suspension pour être aspirés et évacués par des pompes vers les points de stockage.

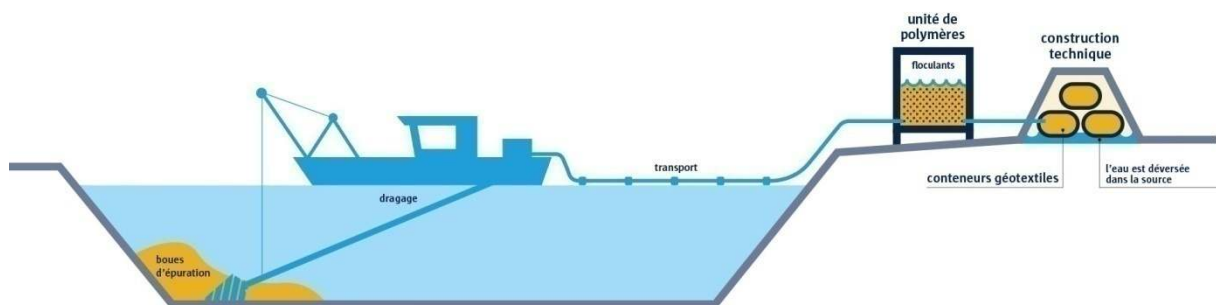


Figure 1.4 dragage hydraulique



Figure 1.5 Pompe hydraulique

❖ Dragage mécanique

Il consiste au dragage par des moyens comme le montre la figure 1.6:

- **Drague à godets** : C'est une technique qui nécessite un tapis roulant pour l'évacuation des produits dragués de la retenue jusqu'à la zone de rejet,
- **Benne preneuse** : C'est un engin qui sera mis sur un ponton flottant et nécessite des chalands pour évacuer le produit dragué,
- **Matériel de terrassement** : Il consiste au dragage avec un matériel tel que bulls, pelles hydrauliques, chargeurs hydrauliques et camions pour le transport de vases,

NB: Cette solution de dragage ne peut être réalisée que si la retenue est vide.

Toutefois la technique de dragage la plus appropriée nécessite au préalable la résolution des problèmes:

- l'extraction et le transport des vases de la retenue en utilisant un volume d'eau minimum ;
- la définition et localisation de la zone de rejet susceptible de recevoir les matériaux dragués de la retenue,
- l'exploitation en continu de la retenue d'eau en même temps que le dévasement.



Figure 1.6 Dragage mécanique

❖ Dragage à l'Américaine

C'est une technique particulière qui consiste à provoquer la remise en suspension des sédiments au moyen d'une hélice ou d'air comprimé dans les cours d'eau ou chenaux à fort courant, comme l'illustre la figure 1.7. Les sédiments sont repris dans le flux et se redéposent le plus souvent en aval. Dans certains cas, une conduite de refoulement peut assurer le transfert des sédiments à plusieurs kilomètres du lieu de dragage.

Le dragage à l'américaine consiste à rejeter en continu dans la veine d'eau les matériaux dragués afin d'utiliser le courant naturel pour évacuer les produits. Elle se pratique pour des fleuves et rivières à fort débit.



Figure 1.7 Dragage à l'Américaine

1.8.2.2 Différents moyens de dragage

- Tapis roulant
- Chalands vidés par des bennes preneuses au niveau des rives
- Chalands vidés directement en amont dans la retenue
- Transport hydraulique par conduites flottantes et terrestres en utilisant un volume minimum d'eau,
- Par engins de terrassement,

Pour l'épandage de la vase dans l'oued ou dans la zone de rejet, il est important de :

- veillez à ne pas obstruer l'oued de façon à assurer l'écoulement de l'eau durant les chasses de vidange de fond ou les déversements du barrage;
- identifier les zones de rejet le long de l'oued;
- définir les aires de stockage de préférence sur les rives de la retenue pour la récupération des eaux après décantation;

Dans tous les cas de figure, l'exploitation de la retenue durant le dévasement reste le problème le plus déterminant du fait que l'on ne peut se permettre d'arrêter les prélèvements d'eau pour l'Alimentation en Eau Potable des agglomérations, l'irrigation des périmètres et l'alimentation les zones industrielles.

C'est ainsi qu'après examen soigné de ces questions, il en ressort que le dévasement hydraulique est toujours plus avantageux que le dévasement mécanique notamment par :

- les délais d'exécution;
- le coût du m³ à dévasser;
- le matériel non encombrant;
- l'exploitation en continu de la retenue.

1.8.2.3 Impact sur l'environnement

Le dragage remanie les sédiments et modifie les équilibres géochimiques (Samara, 2007) avec une remobilisation des contaminants pouvant nuire à l'écosystème. Les conditions hydrauliques favorisent la propagation des contaminants au-delà de la zone concernée.

A l'ouest algérien, la plaine de l'Habra qui s'étend sur une centaine de kilomètres en aval du barrage de Fergoug a subi des dégradations irréversibles suite aux dépôts des sédiments charriés lors des opérations de dragage, transformant de vastes aires fertiles en marais (Semcha, 2006). Les figures 1.8 et 1.9 sont deux exemples de la pollution de l'environnement par les sédiments dragués (Marouf H, 2018).



Figure 1.8 Rejet de la vase draguée
(Barrage de Fergoug)



Figure 1.9 Entraînement de la vase en aval
(Plaine de la Mactaa)

1.9 Les moyens de lutte contre l'envasement

Les ouvrages hydrauliques qui souffrent directement des conséquences de l'érosion et le transport solides (envasement ou sédimentation) étant les barrages qui voient leurs capacités diminuées sous l'effet de ces phénomènes, les moyens de lutte contre l'envasement des retenues peuvent être classés en deux genres : les moyens préventifs et les moyens curatifs.

En résumé, les moyens de lutte contre l'envasement dans les organigrammes selon (Remini B, 2003) sont indiqués dans la figure 1.10.

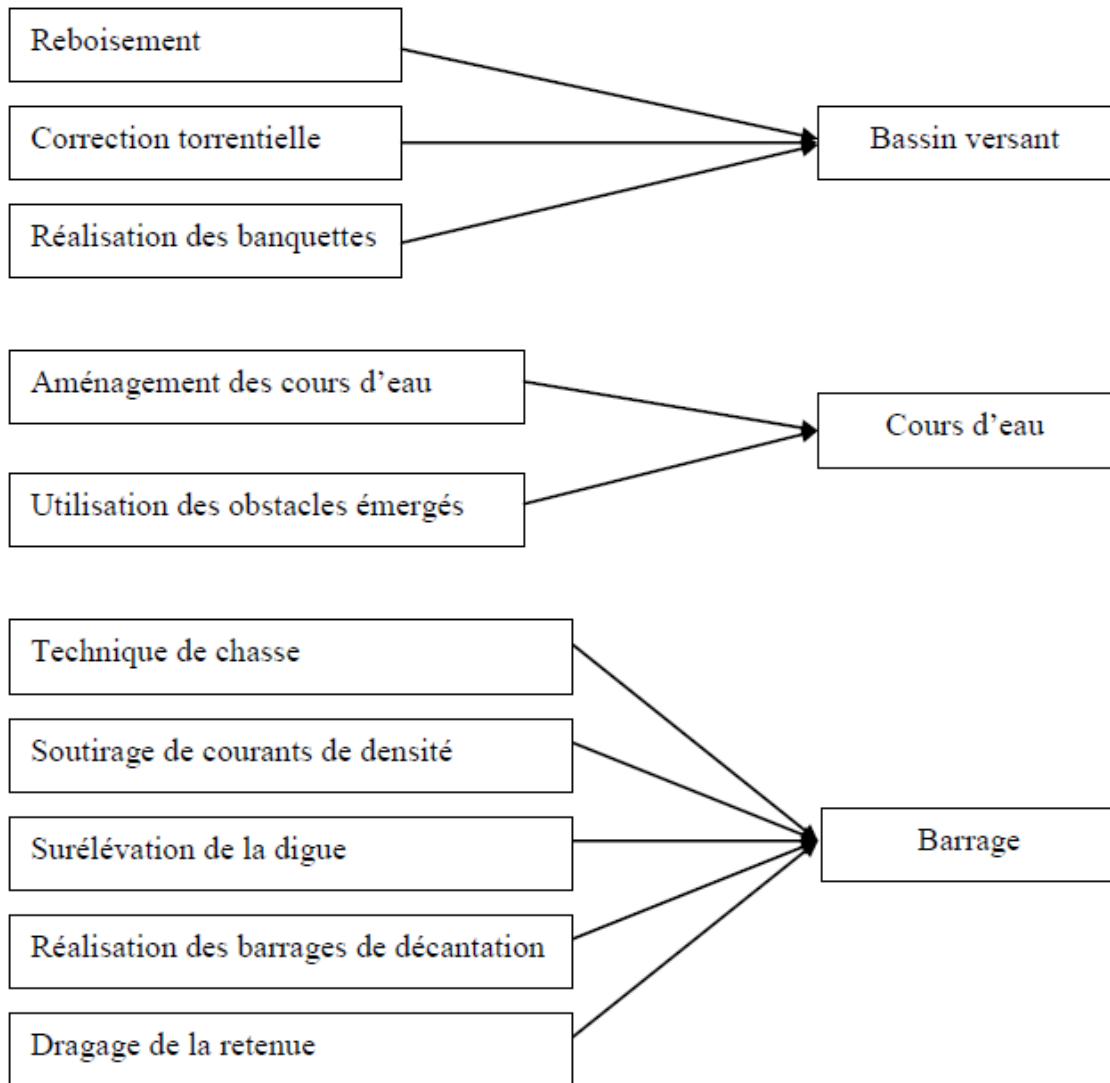


Figure 1.10 Moyens de lutte contre l'envasement

1.10 Conclusion

A la fin de ce premier chapitre, la sédimentation est un phénomène naturel très complexe qu'il faut étudier de l'amont à l'aval du barrage, il est devenu actuellement une réelle menace pour l'infrastructure hydraulique, tant au niveau de la réduction rapide de la capacité utile du barrage qu'à celui de la sécurité de l'ouvrage lui-même.

Le dragage constitue la phase ultime qui traduit clairement les insuffisances des autres moyens de lutte contre la sédimentation utilisés en amont. Le dragage en Algérie étant un dragage d'entretien des retenues de barrages, il doit s'inspirer des moyens et méthodes utilisés dans le monde malgré la particularité des sites et du climat. L'adoption des techniques de dragage doit passer par la caractérisation et l'identification de la vase pour le choix des moyens de vidange.

Chapitre 2 Valorisation des sédiments de Barrages

2.1 Introduction

Le traitement des vases est l'ensemble des processus utilisés pour améliorer leurs propriétés physiques et mécaniques. Ce traitement peut se faire de deux façons différentes: soit par stabilisation de la vase en lui ajoutant d'autres produits qui améliorent certaines propriétés, soit par une dépollution. Dans tous les cas l'objectif du traitement est la valorisation de la vase.

La valorisation des sédiments rejetés s'impose comme solution aux difficultés de stockage et à la nuisance de l'environnement.

La transformation des vases et leur utilisation sont des questions peu développées et restent à l'ordre du jour pour de nouvelles réglementations en adéquation avec les notions de protection de l'environnement et le développement durable.

2.2 Valorisations des sédiments

La transformation des vases et leur utilisation sont des questions peu développées et restent à l'ordre du jour pour de nouvelles réglementations en adéquation avec les notions de protection de l'environnement et le développement durable.

2.2.1 Valorisation des sédiments en technique routière

Les sédiments de dragage peuvent être valorisés en tant que couche de forme dans la construction des chaussées.

❖ Définition de la structure de chaussée

La structure d'une chaussée routière est composée de plusieurs couches superposées, dont généralement seule celle sur laquelle circulent les véhicules est visible. Mais en fait, jusqu'à quatre couches il y a une couche intermédiaire dite «couche de forme» qui transmettent les efforts induits par le trafic jusqu'au sol support.

Au sens géométrique du terme : c'est la surface aménagée de la route, sur laquelle circulent normalement les véhicules.

Au sens structural: Structures multicouches, elle est l'ensemble des couches de matériaux disposés sur le terrain préparé et devant supporter la circulation des véhicules. Elle comprend les largeurs des différentes couches.

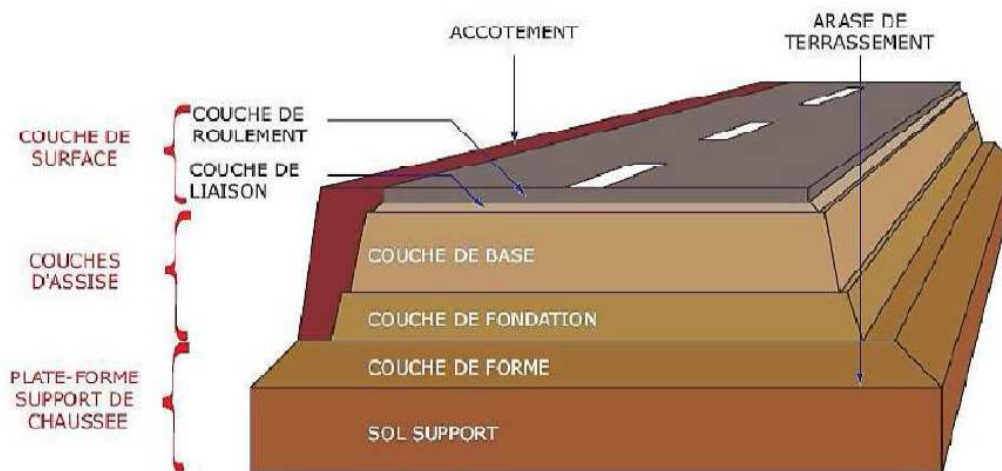


Figure 2.1 Différentes couche d'une chaussée

❖ **Utilisation des sédiments de barrages dans la construction des corps de chaussée**

Les projets d'infrastructures dans le domaine des travaux publics nécessitent d'importantes quantités de matériaux. Les matériaux naturels se font rares et coûteux.

Confrontées à la nécessité de trouver des granulats en grande quantité et à faible coût, les entreprises routières se sont rapidement intéressées aux matériaux de recyclage.

Ce sujet a été étudié par plusieurs chercheurs. Tous les résultats ont donné des avis favorables sur l'utilisation des sédiments dans la construction des routes. Avant qu'ils soient utilisables, les sédiments doivent être traités pour que leurs caractéristiques physico-mécaniques soient satisfaisantes vis-à-vis des critères géotechniques de la construction routière. Les sédiments se caractérisent par une importante teneur en eau (jusqu'à 200%), en sels (pour les sédiments marins), en argile, en matière organique et parfois en métaux lourds. Ce sont les principaux facteurs qui empêchent l'utilisation des sédiments sans traitement.

Après une identification des caractéristiques physiques, chimiques, minéralogiques et environnementales, le potentiel d'utilisation des sédiments bruts en techniques routières est évalué. Pour améliorer les propriétés mécaniques des sédiments, le ciment, la chaux et les cendres volantes sont employés dans cette étude.

Pour améliorer, en particulier, les performances mécaniques des sédiments étudiés vis-à-vis des contraintes imposées pour une utilisation en assise de chaussée, des correcteurs granulométriques peuvent être utilisés.

La méthode expérimentale pour l'étude de la formulation de matériaux pour une utilisation en assise de chaussée est conforme à la méthode de préparation des échantillons pour l'étude du comportement mécanique des matériaux dans le domaine des travaux routiers. Les mélanges granulaires déduits sont ensuite traités au ciment et/ou à la chaux pour améliorer leurs performances mécaniques. Sur la base de cette démarche, les mélanges développés remplissent les conditions d'utilisation en couches d'assise de chaussées sur le plan mécanique. L'impact sur l'environnement des mélanges développés est également exploré au travers d'essais de lixiviation, Seklaoui O.(2016). La figure 2.2 montre une approche méthodologique de valorisation des sédiments de dragage en techniques routières.

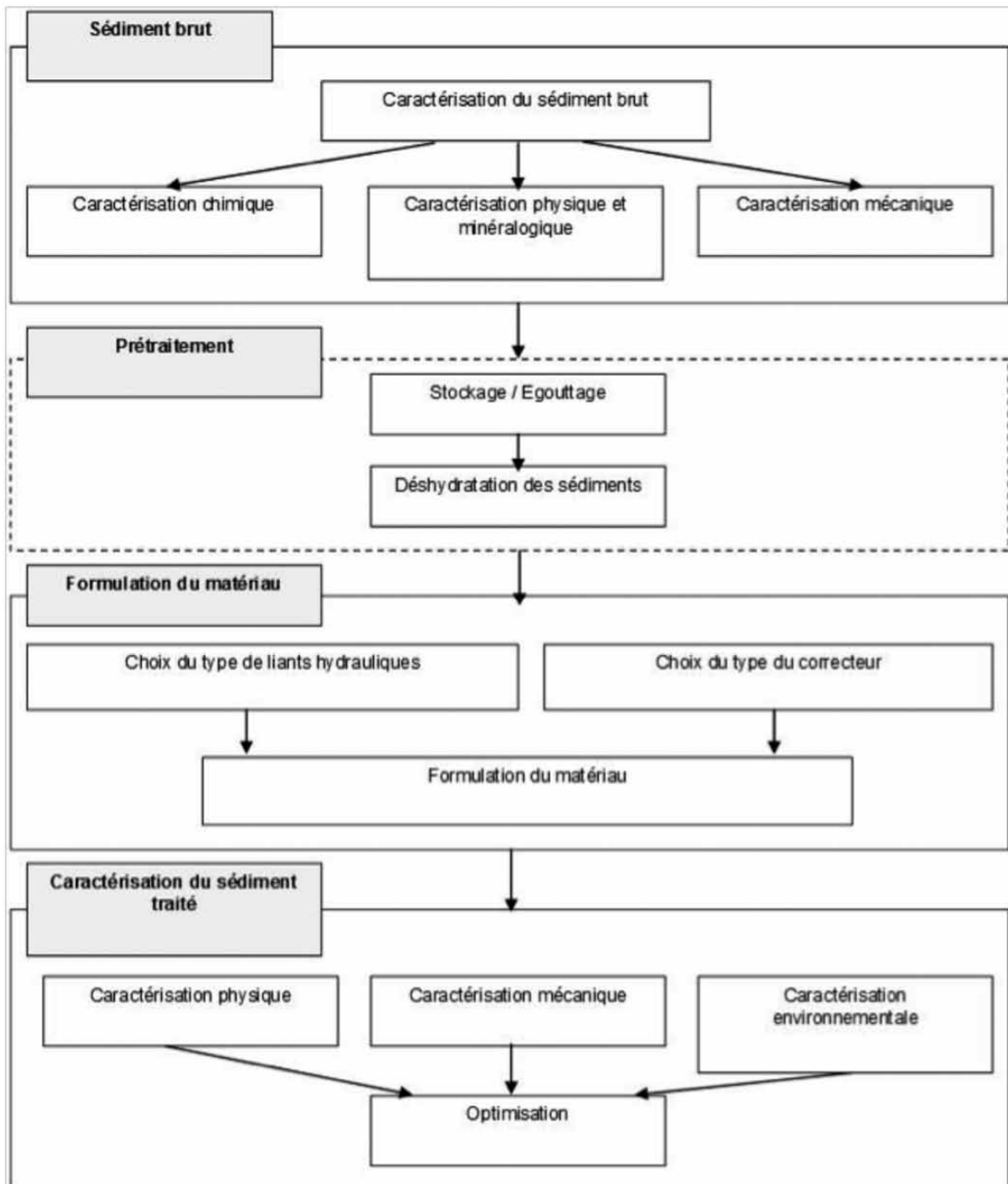


Figure 2.2 Approche méthodologique de valorisation des sédiments de dragage en techniques routières

2.2.2 Valorisation dans le béton et mortier

La production du béton présente un des gros consommateurs de matériaux et les granulats constituent un des matériaux de base de cette filière. En effet, les granulats sont des matériaux régulièrement utilisés dans la fabrication du béton. Ils proviennent très majoritairement de carrières terrestres et sont issus de gisements alluvionnaires dont la ressource s'épuise. De plus, l'exploitation des carrières devient difficile. Dans ce contexte,

l'utilisation des sédiments de dragage sous forme de granulats est amenée à se développer pour répondre aux besoins croissants de la filière de fabrication de béton à base de sédiment.

Achour R. (2013) a étudié la durabilité de deux blocs en béton à base de sédiment marin. Cette étude est divisée en trois étapes.

La première étape est consacrée à une caractérisation non destructive et destructive des deux bétons contenant 12,5% et 20% de sédiment associé à une caractérisation microstructurale. La seconde concerne la durabilité de ces bétons face aux attaques sulfatiques externes, à la soumission aux cycles gel/dégel et à la réaction alcali-granulats afin d'évaluer l'effet de l'incorporation des sédiments dans les bétons et le comportement de ces derniers. Enfin, la troisième étape traite du volet impact environnemental par des essais de lixiviation sur les deux types de bétons.

Agostini F. (2006) a étudié des sédiments contaminés. Dans son travail, il a utilisé un processus de traitement appelé le processus Novosol. Les produits traités ont été ensuite utilisés dans les mortiers en remplacement des granulats naturels. Quatre types de mortier ont été réalisés : mortier de référence MR, mortiers à 33% ; 66% ; 100 % de remplacement du sable par le sédiment traité. La résistance à la compression, le module d'Young, la perméabilité au gaz, la porosité, la masse volumique ont été mesurés sur divers échantillons à l'âge de 28, 60 et 90 jours. Les résultats ont montré que lorsque la quantité de sédiment dans le mélange augmente, la porosité augmente et la masse volumique diminue. La valeur de la perméabilité intrinsèque du mélange MS33 est très proche de celle du mortier de référence MR ; en revanche les valeurs correspondant à MS66 et MS100 sont plus grandes de trois (03) fois par rapport aux deux premiers. Des mesures de retrait ont aussi été effectuées. Elles ont montré qu'à l'âge de 110 jours, la déformation de MS100 est jusqu'à neuf (09) fois supérieure à celle de MR. Pour les substitutions inférieures, les déformations finales sont trois à six fois supérieures à celle du mortier de référence. De larges fissures ont été observées rapidement sur l'échantillon MS100. Ce phénomène n'a pas été observé ni sur MS33 ni sur MS66. En ce qui concerne la résistance à la compression, les résultats montrent que l'introduction des sédiments traités dans les mortiers conduit à l'amélioration de la résistance à la compression. Une augmentation de 20% est obtenue pour MS33. Selon la courbe de compression en fonction du taux de substitution, la valeur optimale se trouve avoisiner les 33%. Hors de cette zone, la résistance diminue, mais elle est encore plus grande que celle du mortier de référence. Les auteurs ont conclu que le processus Novosol permet de traiter efficacement les sédiments dragués et contaminés puisqu'il fixe les métaux lourds dans la matrice d'apatite et élimine les

combinaisons organiques et que le produit obtenu peut être utilisé comme du sable avec un taux de substitution optimal d'environ 33%.

Ben Allal L. et al. (2011) ont étudié la valorisation des sédiments de dragage des ports de Tanger et Larache (Maroc) dans les mortiers par substitution du sable. Les valeurs de résistances à la compression obtenues ont confirmé qu'une substitution partielle du sable par des sédiments de dragage des ports de Tanger et de Larache dans les mortiers est satisfaisante pour un dosage de 20%.

En Algérie, des études de valorisation des vases de dragage de barrages ont été faites, Belas N. et al. (2011) ont valorisé la vase issue du barrage de Fergoug en tant que matériau de construction entrant dans la composition des bétons en l'utilisant, après calcination pour la rendre active, en dosages définis substituables au ciment (10,15 et 20% de vase par rapport au dosage en masse du ciment). Les bétons ainsi confectionnés sont testés vis-à-vis du comportement mécanique en compression et du retrait.

A noter que le port de Dunkerque expérimente avec ses partenaires, l'incorporation de sédiments dans du béton pour la réalisation de bloc de protection des digues (voir figure 2.3).



Figure 2.3 Blocs de bétons réalisés avec des sédiments non-immérgeables traités
(droite : Port de Dunkerque , gauche : Rade de Toulon)

2.2.3 Utilisation de la vase dans la fabrication de ciment

Les chercheurs de plusieurs universités dans le monde collaborent entre eux pour pouvoir construire à bon marché à partir des déchets naturels ou industriels ou à partir d'autres matériaux locaux en abondance tels que la pouzzolane naturelle de Béni-Saf, les fines calcaires de carrières ou encore les boues de dragage utilisées partiellement en substitution au ciment conventionnel.

La production du ciment Portland, le plus commun des matériaux de construction, a un coût énergétique élevé, calciné à de hautes températures, sa production coûte chère et dégage

des gaz à effet de serre portant un énorme préjudice à l'environnement. Le besoin d'un produit de substitution est urgent, la réduction des coûts d'un logement est cependant liée à la baisse des matériaux de construction. Le ciment à base de ces additions fournit une solution opportune.

Les blocs en béton d'argile expansée sont produits pour l'essentiel selon la même technique que les blocs en béton de granulats courants.

Les granulats sont simplement remplacés par de l'argile expansée de manière à abaisser la masse volumique et la conductivité thermique.

L'argile expansée est fabriquée à partir de billes d'argile broyée auxquelles on fait subir une cuisson à une température de 1100 à 1200 °C. La combustion des composants naturels de l'argile ou des composants organiques ajoutés produit des gaz responsables de l'expansion des billes, avec formation d'une structure finement poreuse à l'intérieur de celles-ci et d'une peau relativement dure en surface.

Le phénomène de l'envasement des barrages en Algérie constitue un enjeu d'envergure nationale. Ces barrages se transforment beaucoup plus en réceptacles de vase que d'eau. A cet effet, les possibilités d'utilisation des sous produits issus des opérations de dragage sont réelles et touchent de nombreuses applications. La fraction solide des vases des barrages constitue un matériau économique local très attractif du fait de sa granularité fine économisant les étapes coûteuses de concassage et tamisage dans les applications en Génie Civil. L'utilisation de ces matériaux en tant que matière première contribue souvent à la protection de l'environnement des sites suite au rejet des matériaux dragués. Il s'est avéré que les caractéristiques physicochimique et minéralogique de la fraction solide des vases extraites du barrage de Fergoug ont montré plusieurs voies pour leur utilisation et leur exploitation en tant que matière première et non comme déchet stocké dans la nature.

2.2.4 Couche étanche pour un bassin de lagunage

Les bassins de décantation d'une station d'épuration par lagunage nécessitent une étanchéité pour éviter l'infiltration des eaux usées vers les eaux souterraines et la pollution de la nappe par la suite. Pendant la réalisation et après l'étape de terrassement et l'évacuation des déblais, ces bassins sont couverts par les rouleaux de géomembrane.

Ce dernier est imperméable mais coûte très cher. L'utilisation de la vase de barrages peut servir à minimiser le coût de réalisation et jouer le même rôle d'étanchéité des bassins de décantation qu'un tapis en géomembrane.

Le même cas pour les centres d'enfouissement techniques ou ce qu'on appelle les décharges publiques. Les déchets sont remblayés dans des bassins qui doivent être étanches pour protéger les eaux souterraines.

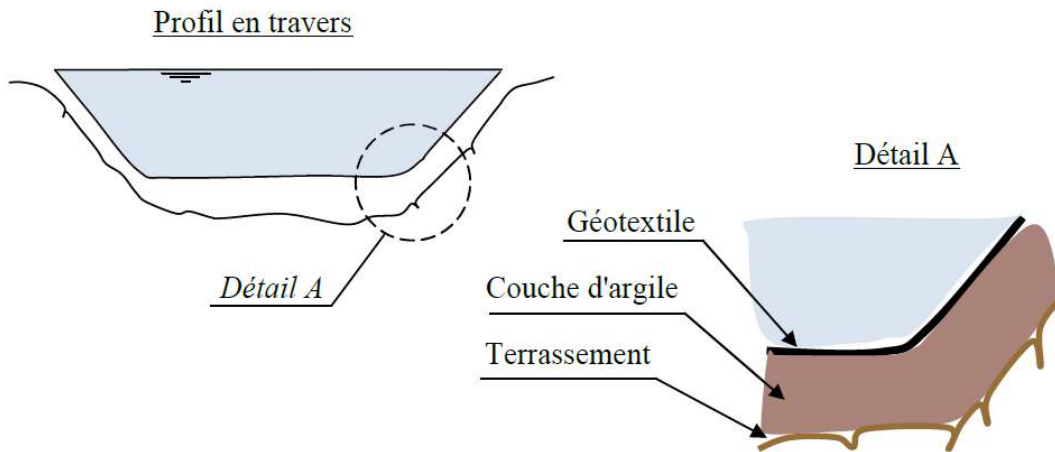


Figure 2.4 Couche d'argile dans un bassin de lagunage

2.2.5 Valorisation des sédiments dans l'industrie des matériaux rouges

Les matériaux rouges sont essentiellement les briques et les tuiles (voir figure 2.4), les éléments pour les planchers, les conduits de fumée, les bardages, les carreaux rustiques, ... etc. Les mélanges de production des matériaux rouges sont composés de l'argile, sable, calcaire, feldspath et d'autres ajouts.

Comme la nature de la vase de la plus part des barrages est une argile, elle peut être utilisée comme matière première dans l'industrie des matériaux rouges. Selon sa composition minéralogique et chimique, la vase est utilisée seule ou en la mélangeant avec une autre argile.

La composition chimique (% en éléments majeurs) des sédiments bruts et la composition chimique des argiles utilisées pour la fabrication des produits de terre cuite sont comparables (Alviset, 1994). Cette analogie de composition a orienté les recherches vers la valorisation des sédiments comme matière première dans les briques.

Alviset (1994) a rapporté qu'il s'agit d'une étude de faisabilité pour ce type de valorisation. Les sédiments ont été utilisés dans la fabrication de briques par substitution partielle de l'argile entrant dans la formulation. La confection des briques a été réalisée au sein même de la briqueterie Al Andalous de Tanger (Maroc).

La figure montre l'aspect des briques obtenues en substituant 70% de l'argile utilisée par les sédiments de dragage.



Figure 2.5 Briques et tuiles



Sédiment de Larache



Sédiment de Tanger

Figure 2.6 Briques fabriquées avec un taux de substitution de 70% de sédiments

2.3 Exemple

Les analyses physiques, chimiques et minéralogiques ont été réalisées sur des échantillons de vase prélevée au niveau de la conduite de vidange de 11 barrages de la figure 2.7.

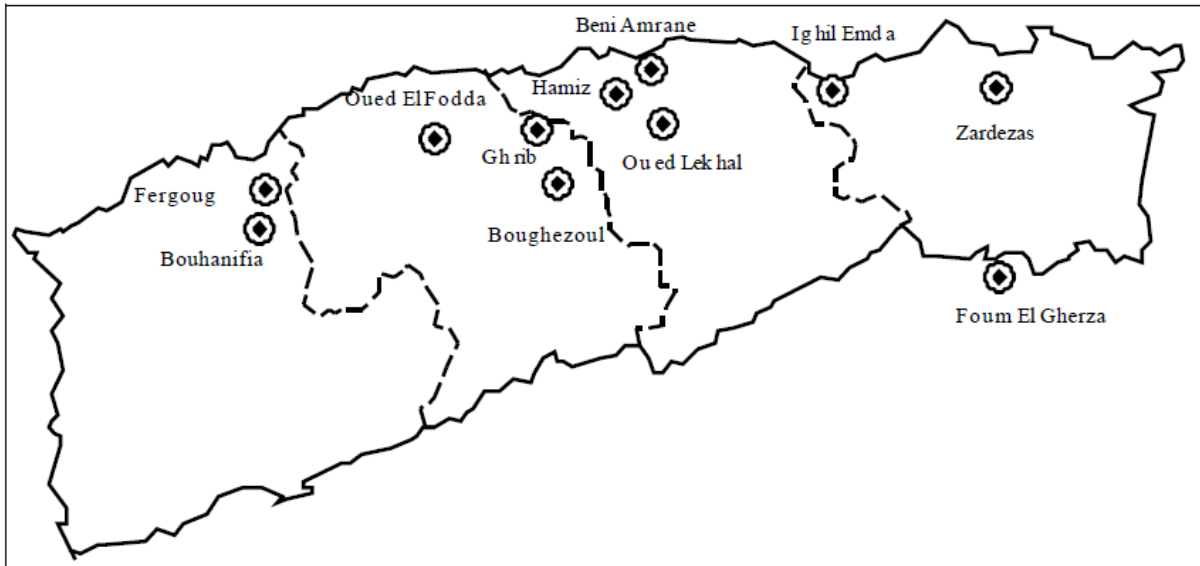


Figure 2.7 Barrages étudiés.

Cette étude s'est orientée vers l'utilisation de la vase pour la fabrication de la brique. Le processus de la fabrication peut être schématisé selon la figure 2.8.

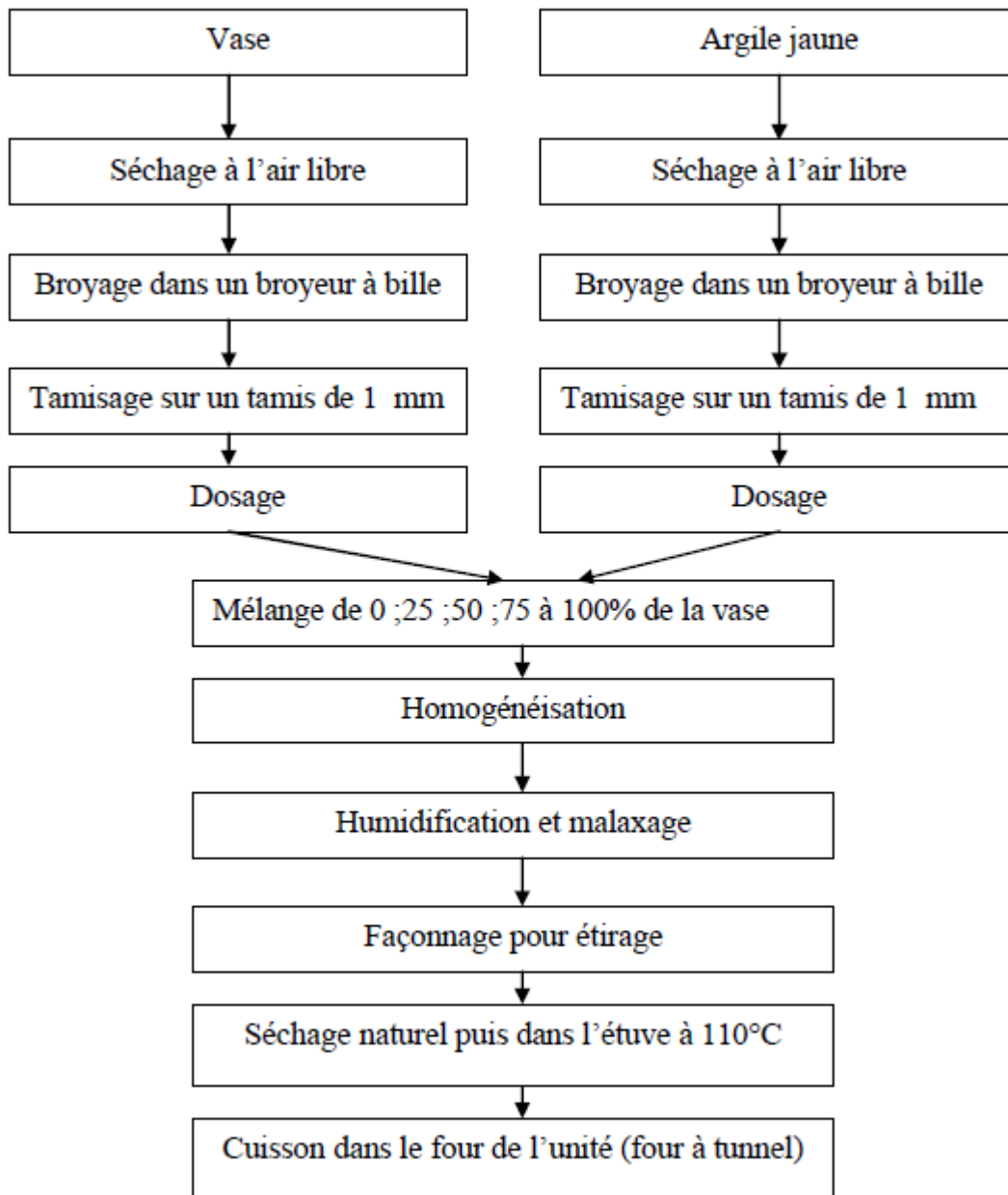


Figure 2.8 Schéma général du processus de fabrication des briques

En se basant sur les résultats des analyses physiques, minéralogiques et chimiques des vases de 11 barrages, Remini (2006) a établi une première carte de réutilisation de la vase dans différents domaines.

La figure 2.9 présente les domaines de valorisation de la vase de chaque barrage.

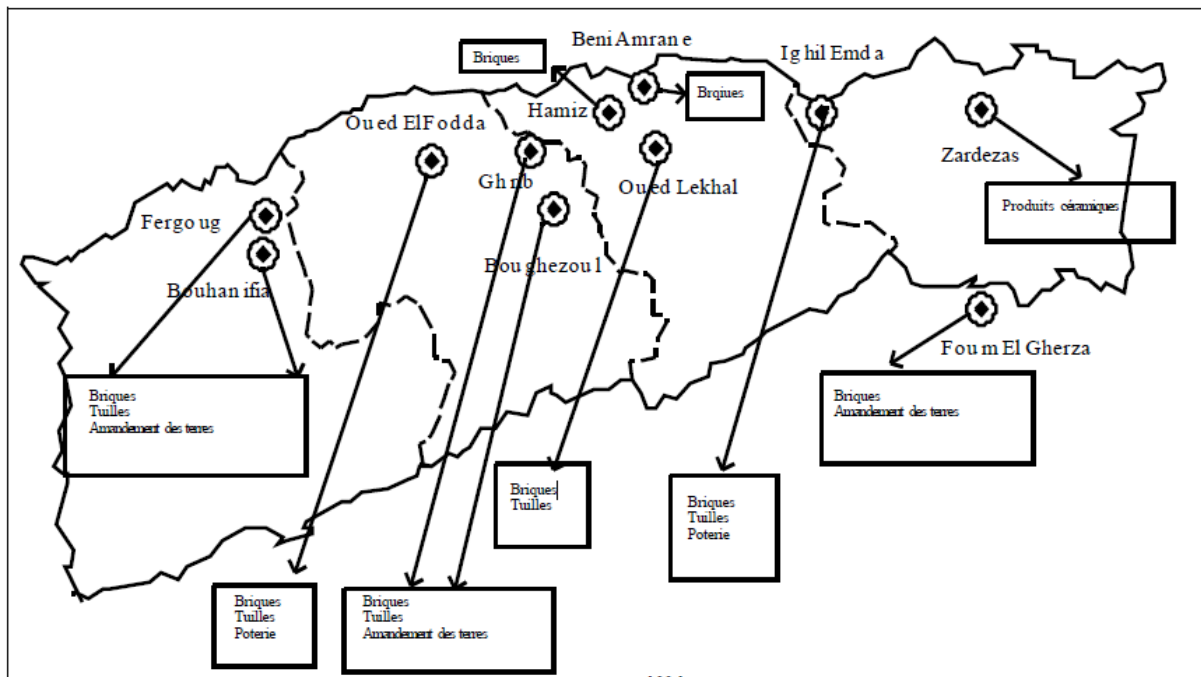


Figure 2.9 Utilisation des vases de barrages les plus envasés.

Les résultats obtenus par Remini (2006) sont très encourageants pour l'utilisation de la vase comme matière première pour la fabrication de la brique, puisque elle présente les mêmes caractéristiques que celle de l'argile jaune utilisé par l'ensemble des briqueteries d'Algérie.

2.4 Produits de traitement des sols

Plusieurs types de produits de traitement sont actuellement utiliser pour améliorer les caractéristiques mécaniques des sols. Nous citons ici les fibres.

La stabilisation par armature à l'aide de fibres est très employée dans le monde en construction en terre. Les fibres sont principalement employées pour la confection des blocs moulés par pétrissage, avec des terres plutôt argileuses présentant souvent un important retrait Layeb A et Halbaoui A.(2017).

2.4.1 Types de fibres utilisées dans le domaine de la construction

Plusieurs types de fibres sont utilisés dans la construction, parmi eux nous citons :

- Les fibres métalliques (acier, fonte) ;
- Les fibres organiques (polypropylènes, polyesters, polyamides et polystyrènes) ;
- Les fibres minérales (amiante, verre, carbone) ;
- Les fibres végétales (Jute, sisal, coir, bois, bambou, palmier) ;

e. Les fibres animales (poil, laine, soie).

Le tableau 2.1 résume quelques propriétés de fibres industrielles. Il met en évidence la nature très variée de ces fibres.

Tableau 2.1 Propriétés physiques et mécaniques de certaines fibres

Fibre	Diamètre en μm	Masse volumique (g/cm^3)	Module d'élasticité en GPa	Résistance à la traction en GPa	Allongement de rupture en %
Acier	5-500	7.8	200	1-3	3-4
Verre	5-20	2.6	80	1.5-3	2-3.5
Polypropylène	10-200	0.9	5-10	0.4-0.75	15-25
Amiante	0.02-20	2.5-3.4	200	3	2.3
Polyester	-	1.4	8	0.7-0.85	11-13
Carbone	5-9	1.7-2.0	250-400	2-3	0.5-1.5
Cellulose	14-45	1.5	20-40	0.15-0.5	8-12
Jute	18-2000	1.45	-	0.35	3-4
Sisal	10-50	1.5	15.2	0.8	3
Coir	20-700	1.08	2.8	0.17	37.7

2.4.2 Différents types de fibres

Plusieurs types des fibres sont utilisés dans la construction, elles peuvent être classées par famille :

2.4.2.1 Les fibres naturelles

On peut subdiviser les fibres naturelles en trois grands groupes selon leur origine : les fibres animales, Les fibres végétales et fibres minérales.

❖ Les fibres animales

Composées de substances organiques, les fibres animales, ou protéiniques, se présentent sous forme de poils ou de plumes ou de soies tel que : la laine, le crin, la bourre, les velours, l'édrédon...etc.

❖ Fibres minérales

Outre les fibres d'amiante, le règne minéral fournit aussi les métaux (or, argent, cuivre, aluminium) dont on fabrique des fils.

Les textiles qui en sont alors composés sont appelés des "lurex" ou des "lamés".

❖ Les fibres végétales

L'utilisation des fibres naturelles d'origine végétale dans la construction remonte à la période où l'on fabrique des briques renforcées par la paille ou des roseaux. Dans le temps moderne (depuis l'année 70), le premier composite liant avec les fibres végétales c'était le plâtre.

Plusieurs ouvrages sont réalisés avec du plâtre renforcé de fibres végétales. Actuellement, le monde connaît de récents développements dans le domaine de renforcement du béton avec des fibres végétales. Suite aux problèmes de santé posés par les fibres d'amiante, plusieurs recherches sont orientées vers la substitution de l'amiante par des fibres végétales

▪ Classification des fibres végétales

Les fibres végétales sont classées en quatre groupes (figure 2.10): les fibres de feuilles, de tiges, de bois et de surface.

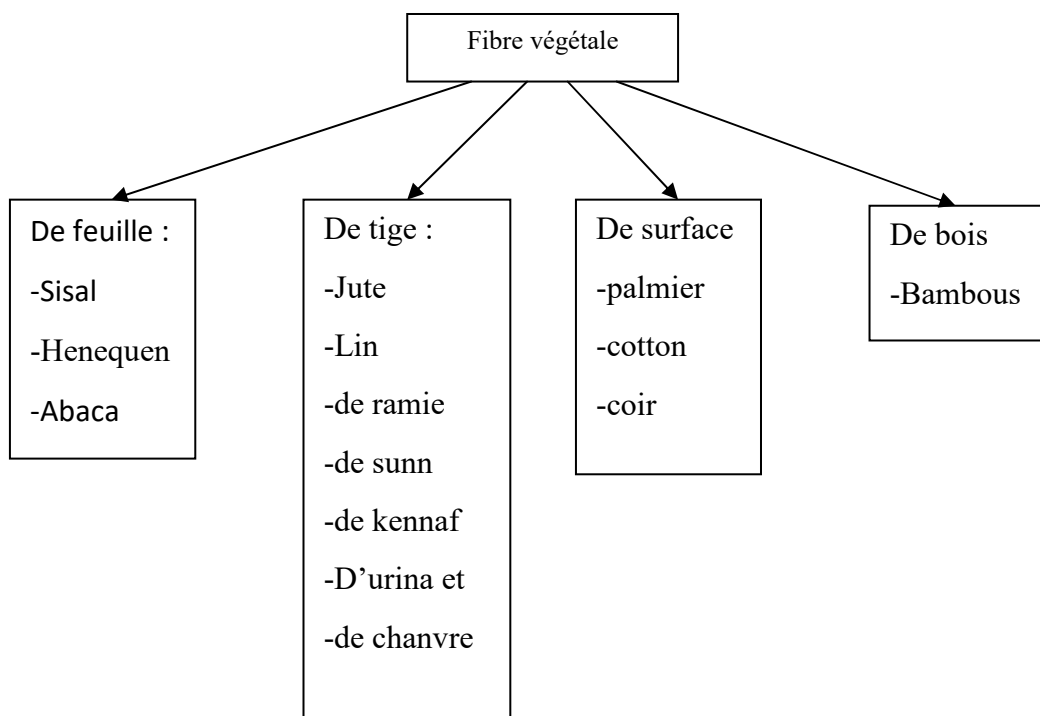


Figure 2.10 Les classes de fibres végétales

A. Les Fibres de feuilles : Ces fibres sont dures et rigides; les fibres de feuille les plus cultivées sont: la fibre de Sisal, de Henequen et d'Abaca. De ce fait, plusieurs chercheurs tels que Nilsson et Ayyar et al. ont montré l'efficacité du renforcement du béton par les fibres de feuille.

B. Les fibres de tiges : Les fibres de tiges sont commercialisées sous forme de paquet de coir et en toute longueur, séparées individuellement par un processus de défilage. Une fois séparées, elles sont utilisées dans la fabrication des cordes ou de textile ou bien dans le renforcement du béton. Les fibres de tiges les plus utilisées sont les fibres de jute, de lin, de ramie, de Sun, de Kennaf, d'Urena et de Chanvre.

C. Les fibres de bois : Les fibres de bois proviennent du broyage des arbres tels que les bambous ou les roseaux. Elles sont généralement courtes. Plusieurs chercheurs ont montré l'efficacité de ces fibres dans le renforcement des bétons.

D. Les fibres de surface : Les fibres de surface entourent en général la surface de la tige de fruits ou de grains. Les fibres de surface des grains constituent le groupe le plus important dans cette famille de fibres. Nous citons entre autre le coton et la noix de coco. Par ailleurs, les fibres de palmier, qui entourent son tronc, appartiennent à cette famille de fibres.

2.4.2.2 Fibres artificielles

❖ Les fibres de caoutchouc

Le caoutchouc est un matériau qui peut être obtenu soit par la transformation du latex sécrété par certains végétaux (par exemple, l'hévéa), soit de façon synthétique à partir de monomères issus de combustibles fossiles.

Les fibres de caoutchouc sont extraites des roues des voitures et ce, pour une utilisation dans plusieurs domaines tels que la construction (voir figure 2.11).



Figure 2.11 Fibres des pneus de caoutchouc

Les fibres de caoutchouc sont utilisées sous forme de bandes de 150 mm et plus petites, puis Broyé en ferraille. La longueur des fibres de caoutchouc utilisées était comprise entre 20 et 40 mm. Leur épaisseur et largeur étaient d'environ 0,25 mm et 0,35 mm respectivement (figure 2.11). Les spécifications du produit des fibres polymères sont données dans le tableau (2.2) suivant:

Tableau 2.2 Propriétés physiques et techniques des fibres de caoutchouc

Type de polymère	
Longueur en mm	20-40 mm
Section	Rectangulaire
Epaisseur	0.25 mm
Largeur	0.35 mm
Masse volumique	1.15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$



Figure 2.12 Fibres de caoutchouc découpé en morceaux

❖ **Fibres de verre**

Le verre utilisé comme renfort dans les composites se présente généralement sous forme de fils (simples, tressés, tissés...).

Les fibres de verre sont produites essentiellement sous deux formes : les fibres d'isolation (souvent désignées sous le nom de "laine de verre") et les fibres textiles. Elles sont destinées à des usages très différents. La composition des fibres de verre est constituée principalement de silice, de chaux et d'alumine.



Figure 2.13 Fibre de verre utilisée de type Cemfil (A.R)

Le tableau 2.3 montre les propriétés physico-mécaniques de la fibre de verre A.R.

Tableau 2.3 Propriétés physico-mécaniques de la fibre de verre A.R

Propriétés	Fibres A. A.
Masse volumique (ρ)	2.68 g/cm ³
Contrainte à la rupture en traction : Filament vierge	3000 MPa
Module d'élasticité en traction	73000 MPa
Allongement à la rupture	4.3%
Coefficient de dilatation linéique	5x10 ⁻⁶ m/m/°C
Comportement au feu	Incombustible
Point de ramollissement (Softening point)	773 °C

2.5 Conclusion

Des quantités importantes sont évacuées périodiquement par les vannes de fond des barrages et posent de graves problèmes à l'aval de l'ouvrage. Au lieu de rejeter la vase issue du dragage dans le milieu naturel comme un déchet, on la donne une valeur par la réutiliser dans le domaine de génie civil.

D'après les travaux déjà réalisés dans ce domaine, le traitement et l'étude de la vase en vue de sa valorisation a donné de très bons résultats. La réutilisation de la vase vise deux objectifs: éviter les problèmes d'ordres écologiques posés par le rejet des sédiments dans la nature d'un coté et de faire l'économie.

Chapitre III Situation géographique et caractéristiques générales du barrage

3.1 Introduction

Le bassin de Medjerda situé dans une région à vocation agricole, et en plus il est trop aggloméré, ce qui demande la construction des barrages. Cette compte quatre barrages, à savoir le barrage de Teffech (en exploitation), le barrage sur l'oued Djedra et le barrage sur l'oued El Ghanem (en projet), en fin le barrage de Ain Dalia qui est notre projet d'étude.

3.2 Site du barrage de Ain Dalia

Le barrage de Ain Dalia est situé à d'Oued Medjerda, Commune de Henancha Daira de Mechroha, à une dizaine de kilomètre au sud de la ville de Souk-Ahras, permet de constituer sur l'Oued Medjerda une retenue d'une capacité totale de 82 millions m³ (76,07 Hm³ après le dernier levé bathymétrique en Février 2004). Sa réalisation a débuté en février 1984 et sa mise en eau le 1^{er} mars 1988.

L'objectif du barrage est d'assurer l'alimentation en eau potable des principaux centres urbains de la wilaya de Souk Ahras ainsi que quelques communes des wilayas limitrophes (l'Ouenza, El Aouinet, Tebessa et Oum El Bouagui)

Les ressources en eaux superficielles du barrage sont fournies principalement par l'Oued de Medjerda qui prend naissance du côté de Khemissa, il traverse la wilaya de Souk Ahras sur une longueur de 113.6 km avant de se déverser dans le territoire tunisien. (voir la figure 3.1)



Figure 3.1 Barrage de Ain Dalia

La figure 3.2 donne une vue générale du barrage de Ain Dalia



Figure 3.2 Vue géographique sur le barrage de Ain Dalia (wilaya de Souk Ahras)

3.3. Caractéristiques techniques du Barrage de Ain Dalia

Le tableau 3.1 présente les différentes entreprises Nationales et étrangères intervenant dans le barrage de Ain Dalia (wilaya de Souk Ahras).

Tableau 3.1 Caractéristiques techniques du Barrage de Ain Dalia

Maître d'ouvrage	Agence Nationale des Barrages et Transferts
Bureau d'études	Tractebel, Bruxelles (France)
Surveillance des travaux	Energo Project, Belgrade (Yougoslavie)
Entreprises	Travaux de Génie Civil <u>LESI, SpA and Astaldi (France)</u>
Equipement hydromécanique :	SDEM HYDRO (société d'étude et de montage), France
Appareils d'auscultation	Geotechnical Instruments, Grande Bretagne
Equipements électrique	ENFR (Entreprise Nationale des forages et de reprise) Algérie

Description du barrage de Ain Dalia

Type : remblai à noyau et recharges en enrochements

Niveau crête : 715.50 m NGA

Hauteur au dessus du fond de la vallée : 55 m

Longueur de la crête : 30 m

Largueur de la crête : 9 m

Nature des fondations : Marnes + Grès

Retenue

Capacité totale	82,00 millions de m ³
Volume annuel régularisable :	45,00 millions de m ³
Envasement moyen annuel	0,75 millions de m ³ /an

Hydrologie

Superficie du bassin versant : 193 K m²

Pluviométrie inter annuelle moyenne sur le BV : 700 mm

Apport inter annuel moyen : 50.00 millions de m³ (1.6 m³/sec)

Hauteur totale : 40.60 m

Diamètre : 11.20 m

Niveau des prises : 686.00 – 693.90 – 701.8 m NGA

Nous présentons dans le tableau 3.2 caractéristiques en chiffres du barrage de Ain Dalia

Tableau 3.2 Le barrage de Ain Dalia en chiffres

Le barrage en chiffres	
Année de construction	1984
Année de Mise en eau	1988
Capacité	82,0 million m ³
Capacité dernier levé (2004)	76.08 million m ³
Apport moyen annuel	50.00 hm ³
Envasement annuel	0.75 hm ³ /an
Surface du bassin versant	193 km ²
Hauteur	62 m
Longueur	300 m
Côte retenue Normale (R.N)	710 m
Côte Plus Hautes Eaux (P.H.E)	712 m
Déversoir à seuil libre	365 m ³ /s

3.4 Le Bassin versant de Ain Dalia

Le sous bassin versant de Medjerda est l'un parmi les cinq sous bassins qui constituent le grand bassin de Medjerda-Mellegue, ce dernier situe au Sud-Est du Nord d'Algérie, d'une

superficie de 7870 Km² (partie Algérienne); le sous bassin d'intérêt prend le code 12 01 d'après l'ABH;

La région d'étude est située dans le territoire de la wilaya de Souk-Ahras entre les méridiens de 7°37'Est et 8°25' et les parallèles 36°05' et 36°27 'Nord. Elle est bordée au Nord par le bassin des côtiers constantinois Est, à l'Est par la Tunisie, à l'Ouest par le bassin de Seybouse et au Sud par les sous bassins de Mellegue amont (12 04) et Mellegue aval (12 05). Le bassin de Medjerda est drainée par l'oued Medjerda et ses affluents, alimentant le barrage de Ain Dalia dont l'eau est destinée à l'alimentation en eau potable de la ville de Souk-Ahras et d'autre villes limitrophes tel que: Taoura, Drea, Ouled-Driss, Zaarouria, Henancha, Kheddara (à Bordj M'Raou) et Ouillen (à Boukebch)

3.5 Historique du barrage

L'ouvrage le plus important dans ce bassin est celui de Ain Dalia (1987 par l'ANB); il est réalisé en aval de l'Oued Medjerda dans un sous bassin d'une superficie de 193 km², ce barrage mobilise 82 Mm³, dont un volume régularisable de 45 Hm³. Ce barrage représente la principale source d'alimentation en eau potable du chef lieu de la wilaya de Souk-Ahras; avec un volume actuel prélevé autorisé à 75000 Hm³/j, et d'autre partie du débit régularisée est transférée vers le Nord de la Wilaya de Tébessa où l'eau est utilisée pour les besoins ménagers.

En 2017, le niveau d'eau a chuté à plus de 92% comme le montre la figure 3.3.

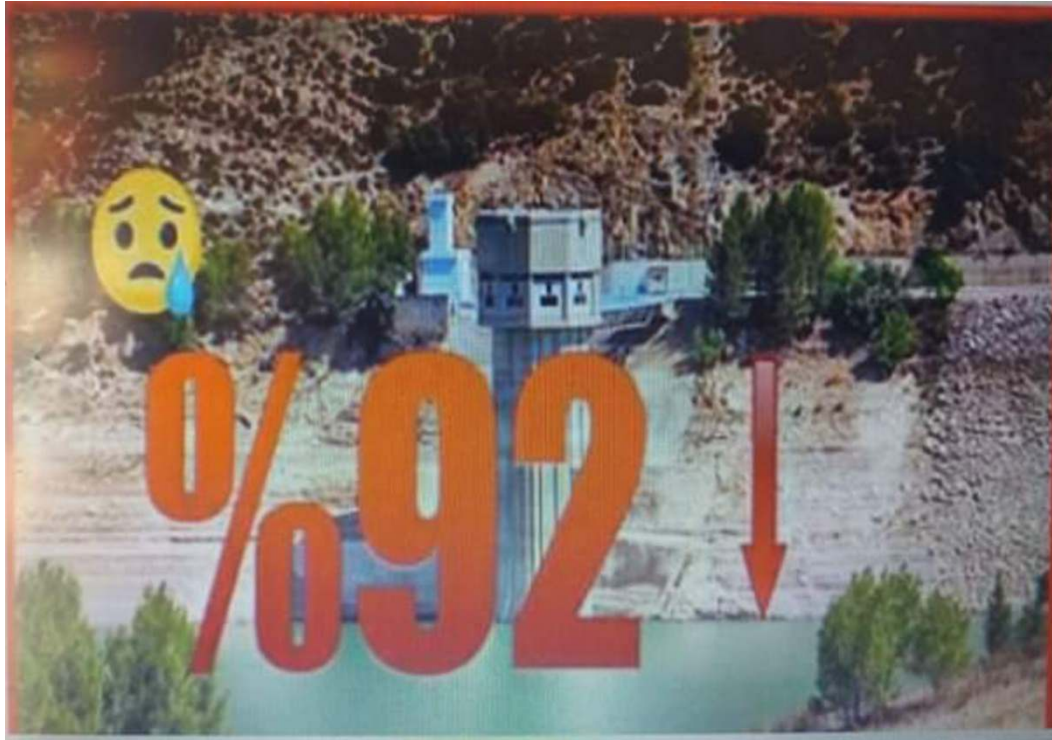


Figure 3.3 Le barrage de Ain Dalia en 2017, le niveau d'eau a chuté à plus de 92%

3.6 Conclusion

La région du barrage de Ain Dalia est essentiellement caractérisée par des formations sédimentaires dont l'âge le plus ancien est le Trias jusqu'au Quaternaire, constituée généralement par des calcaires, des grés, des marnes, des cailloutis et des alluvions.

Le bassin de la Medjerda est caractérisé par des ressources en eau, superficielles et souterraines très importantes, cette richesse naturelle doit permettre une activité humaine très remarquable, particulièrement dans le domaine d'agriculture et aussi industrielle, ce qui fait la mobilisation de ces ressources est obligatoire pour satisfaire les différents secteurs d'utilisation.

Chapitre IV Caractérisation des sédiments de barrage de Ain

Dalia (Souk Ahras)

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons une description détaillée du sédiment dragué et son utilisation. Nous présenterons ici les différentes techniques de caractérisation du sédiment ainsi que la méthodologie d'étude. Cette méthodologie sert à bien tracer le chemin qui mène à la faisabilité ou non de ce matériau.

Notre recherche a ciblé principalement les sédiments du barrage de Ain Dalia dans le but d'assurer la faisabilité technique de l'utilisation de ces déchets dans les travaux routiers et la fabrication des briques.

4.2 Essais d'identification

Dans les études géotechniques, les essais d'identifications sont des tâches principales. Ces essais sont effectués comme suit :

4.2.1 Analyse chimique et organique

Les résultats finaux de l'analyse chimique et organique sont présentés dans le tableau 4.1 et la figure 4.1.

Tableau 4.1 Analyse chimique et organique

Conductivité (1/5 mS/cm)	CE	1,66	Très salé
pH eau (1/2.5)	PH	7,91	Alcalin
C/N 4,15 Faible	C/N	4,15	Faible
Carbonates	CaCO ₃	8,39	%
Matière organique	MO	1,07	%
Azote Total	N	0,15	%
Phosphore (Olsen) (normale 1,6%)	P	0,05	%
Potassium échangeable	K	0,4	meq/100gr
Magnésium échangeable	Mg	7,9	meq/100gr
Calcium échangeable	Ca	41,6	meq/100gr
Sodium échangeable	Na	3	meq/100gr
C.E.e (mS/cm)		11,6	Très salé

Sable 8%

Limons 80%

Argile 12%

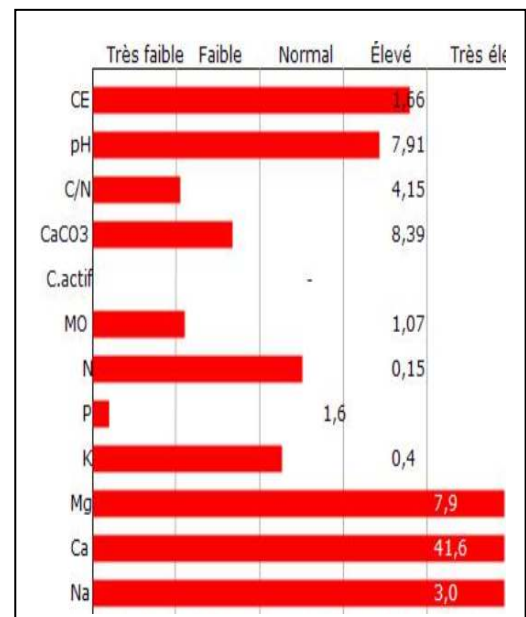


Figure 4.1 Analyse chimique et organique

4.2.2 Analyse granulométrique par lavage et sédimentométrie

La composition granulométrique influence de façon primordiale les comportements physique et mécanique du sol et toutes les propriétés liées à la teneur en eau et aux fluctuations de celle-ci (compacité, plasticité, portance, capacité de rétention, perméabilité, capillarité).

La composition granulaire du sol est déterminée à travers deux essais: l'analyse granulométrique et la sédimentométrie selon les normes NF P18-560 et NF P94-057 successivement.

L'analyse granulométrique consiste à séparer les grains agglomérés d'une masse connue de matériau par brassage sous l'eau, à fractionner ce sol, une fois séché, au moyen d'une série de tamis et à peser successivement le refus cumulé sur chaque tamis. La masse de refus cumulé sur chaque tamis est rapportée à la masse totale sèche de l'échantillon soumis à l'analyse.

La fraction fine de taille inférieure à $80\mu\text{m}$ est reprise pour faire l'essai de sédimentométrie. Cet essai permet de fournir la distribution des tailles des particules fines par le biais de la vitesse de décantation qui est liée à leurs dimensions. La loi de Stokes donne dans le cas des grains sphériques de même masse volumique, la relation entre le diamètre des grains et leur vitesse de sédimentation. Par convention, cette loi est appliquée aux éléments d'un sol pour déterminer des diamètres équivalents de particules. Les particules passant $80\mu\text{m}$ séparés du reste du sol par tamisage sont mises en suspension dans de l'eau additionnée d'un défloculant. Les particules décantent à différentes vitesses en relation avec leur taille. La distribution pondérale de la taille des particules est calculée à partir de la masse volumique de la solution qui évolue au fur et à mesure qu'elle se décante. Les figures 4.2, 4.3 et 4.4 montrent les différents matériels utilisés dans l'analyse granulométrique.

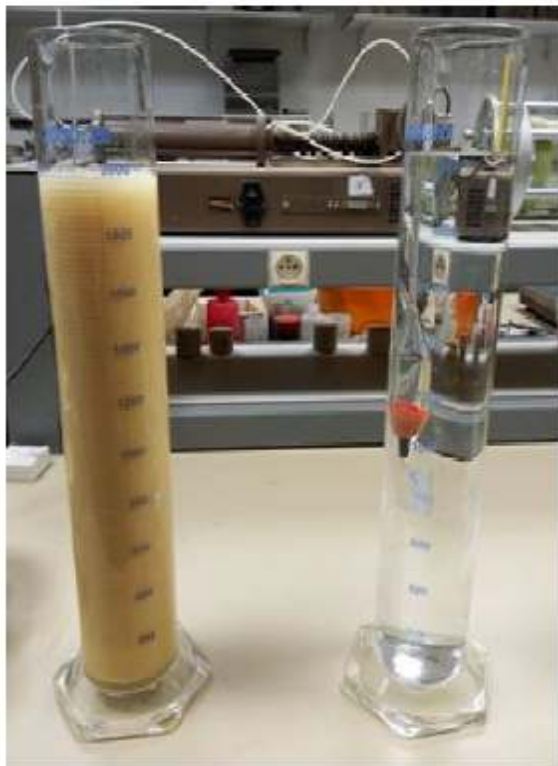


Figure 4.2 Essai de sédimentation



Figure 4.3 Tamis dans l'ordre décroissant

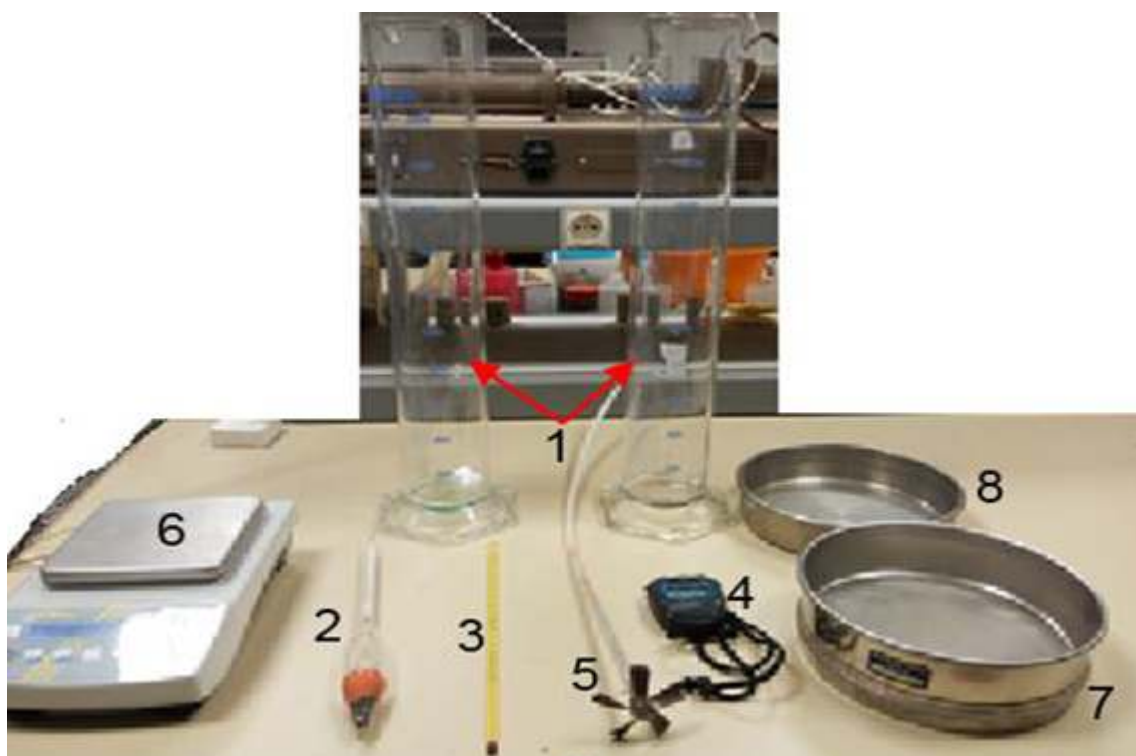


Figure 4.4 Matériel utilisé pour la sédimentation

Le matériel nécessaire (figure 4.4) est cité ci-dessous :

- deux éprouvettes cylindriques graduées en verre transparent (1)
- un densimètre (2) ;
- un chronomètre (4) ;
- une balance de précision de 0.01g (6) ;
- Un bac pour recueillir le tamisât (8) ;
- un thermomètre (3) ;
- un agitateur manuel (5) ;
- un tamis de diamètre 80µm (7) ;
- un agitateur mécanique;

Tableau 4.2 les données des essais d'analyse granulométrique et la sédimentométrie

masse de l'échantillon du sol		500g			
Diamètre des tamis (mm)	Masse des refus (g)	Refus cumulés	Pourcentage des refus %	Masse des tamisât (g)	Pourcentages des tamisât cumulés (%)
1	0			500	100,00%
0,5	16,5	16,5	0,033	483,5	96,70%
0,212	22	38,5	0,077	461,5	92,30%
0,125	23,5	62	0,124	438	87,60%
0,08	17,5	79,5	0,159	420,5	84,10%
0,0627	Analyse granulométrique par sédimentation				77,38%
0,044					74,01%
0,0312					67,29%
0,021					62,24%
0,0148					57,20%
0,011					48,80%
0,007					43,74%
0,005					37,01%
0,003					30,30%
0,0013					11,77%
0					1,00%

La figure 4.5 illustre l'analyse granulométrique du sédiment du barrage de Ain Dalia.

Nous pouvons noter que ce sol présente une courbe étalée.

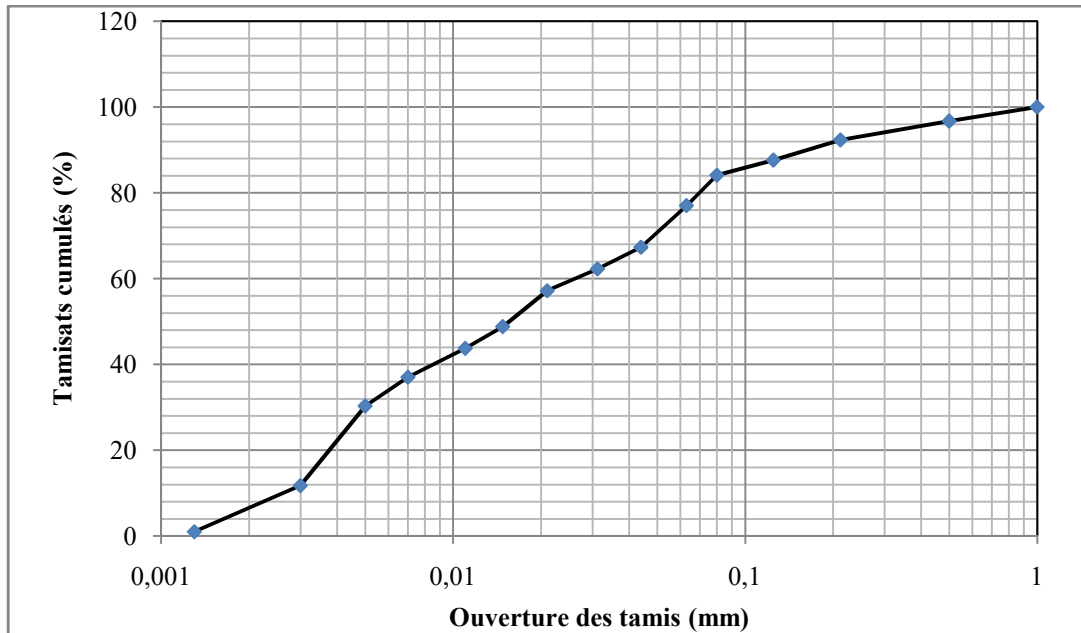


Figure 4.5 Courbe granulométrique du sédiment du barrage de Ain Dalia.

A partir de la courbe granulométrique, on peut déterminer :

- Coefficient d'uniformité C_u (coefficient de Hazen)
- $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = 15.38$ (4.1)

Avec D_y : ouverture des tamis laissant passer $y\%$ du poids des grains.

D_{10} est appelé diamètre efficace.

$C_u < 2$ granulométrie uniforme ou serrée

$C_u > 2$ granulométrie étalée

- Coefficient de courbure C_c
- $C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10}D_{60}} = 0.35$ (4.2)

Le coefficient C_c permet d'apprécier la forme de la courbe granulométrique. C'est un autre paramètre permettant d'estimer la distribution granulométrique de l'échantillon. Un coefficient $1 < C_c < 3$: sol bien classé présentant un étalement granulométrique réduit.

4.2.3 Essai au bleu de méthylène (VBS) selon la norme AFNOR NF P 94-068

L'essai au bleu de méthylène dit aussi l'essai de la tache est effectué selon la norme (NF P94-068). Cet essai permet d'apprécier globalement l'activité de la fraction argileuse d'un sol en mesurant la surface interne et externe des grains argileux.

Pour ce faire, on fixe sur les grains d'argile des molécules de bleu de méthylène et par test simple, on évalue la quantité de bleu fixé. On en déduit la valeur au bleu du sol, ou VBS, qui est un indicateur essentiel dans la classification des sols. Les figures 4.6 et 4.7 montrent les différentes étapes de l'essai au bleu de méthylène.



Figure 4.6 dispositif pour l'essai VBS



Figure 4.7 Les résultats de l'essai VBS

Les résultats de l'essai de bleu de méthylène sont résumés dans le tableau 4.3.

Tableau 4.3 Tableau récapitulatif de l'essai VBS

Poids sol (g)	50
Fraction 0/1 (mm)	100%
Volume bleu (cm ³)	275
Masse bleu (g)	1,22
VBS	5,5

B : masse de bleu introduite (solution à 10/l) : $B = V \cdot 0,01$

$$VBS = \frac{B}{m_0} * C * 100 \quad \text{Si : } D_{\max} > 5\text{mm} \quad (4.3)$$

$$VBS = \frac{B}{m_0} * 100 \quad \text{Si : } D_{\max} < 5\text{mm} \quad (4.4)$$

$$VBS = \frac{B}{m_0} * 100 = \frac{2,75}{50} * 100 \quad (4.5)$$

Donc **VBS = 5,5**

La valeur de bleu (VBS) s'exprime par la quantité de bleu en grammes consommée par 100 grammes de fines. La figure 4.8 montre la classification du sol selon la valeur de bleu de méthylène.

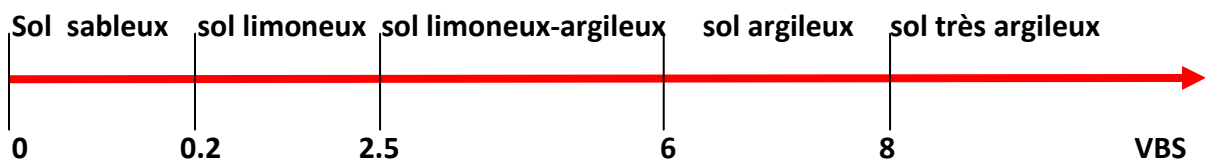


Figure 4.8 Classification du sol selon la valeur de bleu de méthylène

D'après les résultats trouvés et rapportés au tableau 4.4, le sol étudié est considéré comme sol limoneux argileux.

Tableau 4.4 Classification du sol étudié

Echantillon	Valeur du Bleu méthylène VBS	Classification du sol
Sédiment du sol étudié	5,5	Sols limoneux-argileux

4.2.4 Limites d'Atterberg

Le diagramme montré à la figure 4.9 donne une idée sur la variation de la consistance d'un sol fin selon la variation de la teneur et les limites de liquidité, limite de plasticité et limite de rétrécissement correspondantes.

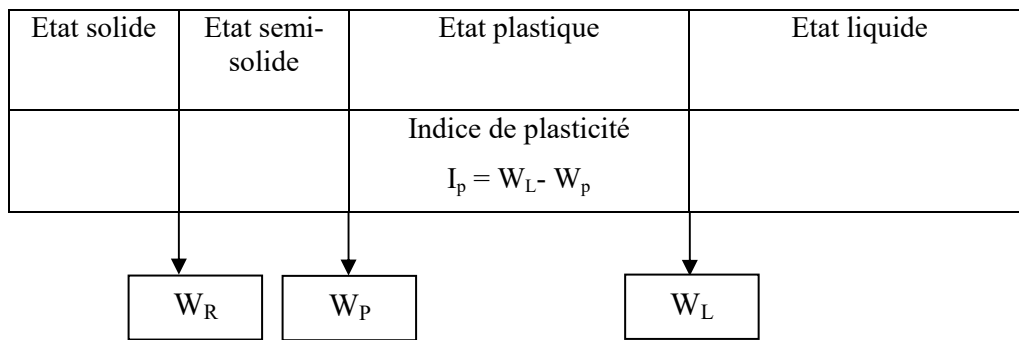


Figure 4.9 Limites d'Atterberg

Nous avons déterminé la limite de liquidité par l'essai de pénétration à cône (NF P94-052-1). Cet essai consiste à mesurer, après un temps fixé, l'enfoncement d'un cône, sous son propre poids, dans un échantillon de sol remanié. Il est réalisé sur la fraction passant au travers du tamis d'ouverture 400µm.

Cet essai est effectué uniquement sur les éléments fins du sol et consiste à faire varier la teneur en eau de l'élément en observant sa consistance. Il permet également de faire une classification du sol.

Le tableau 4.5 résume l'ensemble des résultats obtenus à l'essai de pénétromètre à cône.

Tableau 4.5 Résultats de la limite de liquidité

	Pénétration (mm)	W (%)
Essai 1	9,03	37
Essai 2	18,57	51
Essai 3	34,27	59

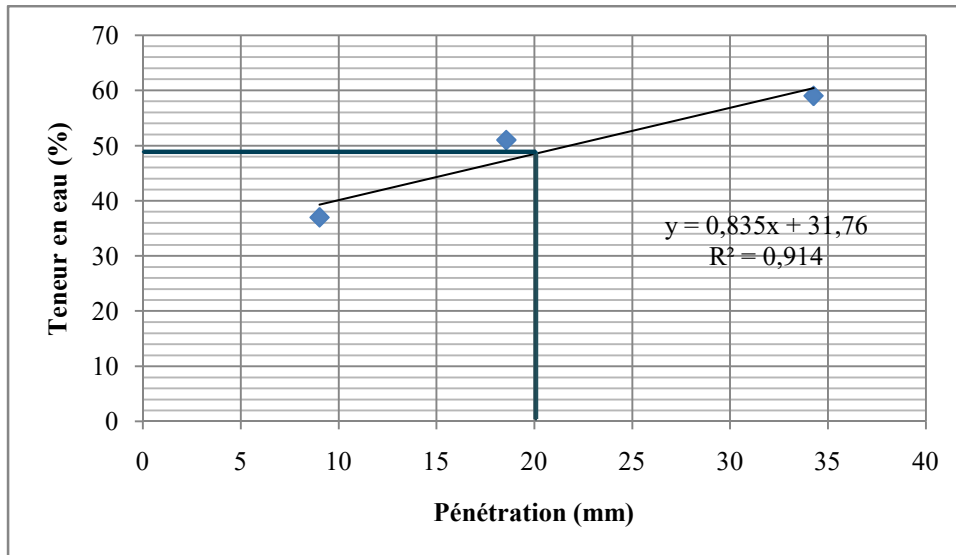


Figure 4.10 Détermination de la limite de liquidité

La limite de liquidité est la teneur en eau qui correspond à une pénétration de 20mm

Donc : $W_L = 48,46\%$.

Concernant la limite de plasticité W_P , l'essai consiste à la recherche de la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol, de dimension fixée et confectionné manuellement, se fissure, (norme NF P94-051). Il est effectué, comme pour la limite de liquidité, sur la fraction passant au travers du tamis d'ouverture 400 μ m. La figure 4.11 et le tableau 4.6 et montrent les échantillons sur lesquels sont effectués les essais de limite de plasticité et les résultats correspondants.

Tableau 4.6 Résultats de la limite de plasticité

Poids humide (g)	Poids sec (g)	w (%)
1,9	1,6	18,75%
2,1	1,8	16,67%
2,8	2,4	16,67%
1,7	1,4	21,43%



Figure 4.11 Détermination de la limite de plasticité

La limite de plasticité est la moyenne des teneurs en eau correspondant qui est égale à $W_P = 18,38\%$.

I_p est l'indice de plasticité ; c'est la différence entre les deux limites de liquidité et de plasticité, il caractérise la largeur ou la zone où le sol étudié a un comportement plastique.

$$I_p = W_L - W_p = 48,46 - 18,38 = 30,08\%$$

D'après ce qui est trouvé, on peut donner la classification du sol étudié comme le montre le tableau 4.7.

Tableau 4.7 Classification du sol en fonction de l'indice de plasticité

Indice de plasticité	Etat du sol
0-5	Non plastique
5-15	Peu plastique
15-40	Plastique
>40	Très plastique

Le diagramme de la figure 4.12 montre les différents intervalles d'argilosité.



Figure 4.12 les seuils d'Argilosité

Ce sol est une argile plastique (voir tableau 4.7 et figure 4.12).

Le tableau 4.8 montre les résultats des limites d'Atterberg pour quatre différents minéraux d'argile.

Tableau 4.8 Limites d'Atterberg de certaines argiles d'après (Monaco A. et Chassefière B. 1976)

	Smectite	Attapulгите	Illite	Kaolinite
WL	100 à 1000	150 à 270	60 à 90	30 à 75
WP	50 à 100	100 en moyenne	25 à 60	20 à 40
IP	75 à 125	20 en moyenne	25 à 50	10 à 40

D'après le tableau 4.8, on note que le sol étudié est une argile de type Kaolinite.

4.2.5 Retrait linéaire

Le retrait linéaire est la teneur en eau pondérale conventionnelle de dessiccation d'un sol remanié, au dessous de laquelle la longueur de l'échantillon est supposée ne plus varier. Elle est déterminée par la norme BS 1377. Après le séchage de l'échantillon dans un endroit à l'abri du courant d'air pour plusieurs jours, la longueur finale est mesurée.

Le Moule pour la confection d'éprouvettes est un demi-cylindre de 140 mm de longueur et de 12,5 mm de rayon, comme le montre la figure 4.13. Cet essai permet la mesure de la limite du retrait linéaire du sol et indique les propriétés plastiques du sol argileux.



0 jour



Après 9 jours

Figure 4.13 Deux échantillons pour l'essai du retrait

Le tableau 4.9 résume les longueurs initiales et finales des deux échantillons du sol étudié.

Tableau 4.9 Résultat de l'essai du retrait

N° de l'échantillon	Longueur initiale (mm)	Longueur finale (mm)	Retrait linéaire (%) $SL = \left(\frac{L_0 - L_1}{L_0}\right) \times 100$
1	14	11,02	21,29
2	14	11,31	19,22
Retrait linéaire moyen			20,26 ≈ 20

4.2.6 Classification du matériau selon le GTR

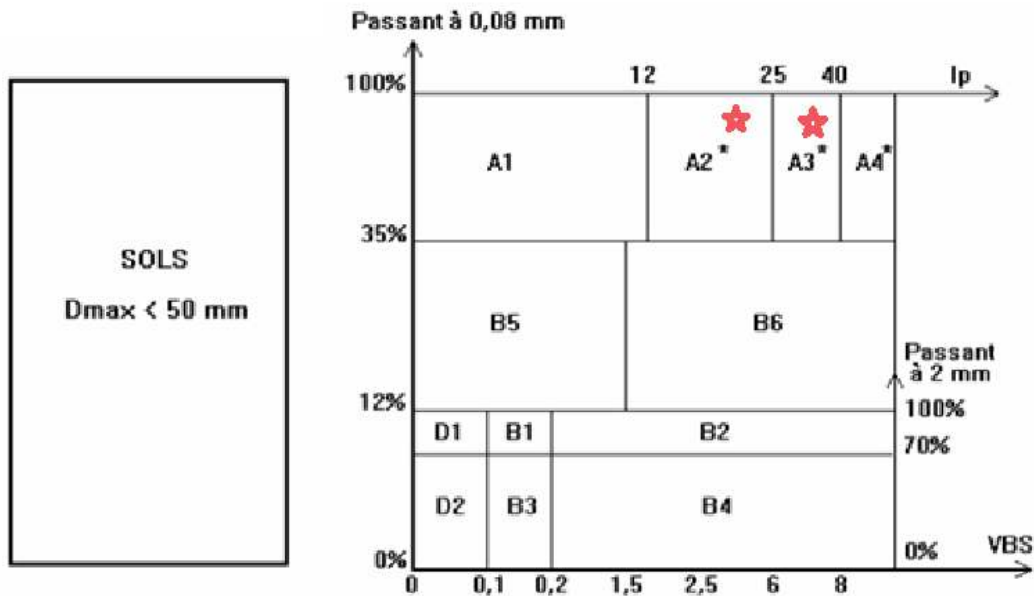
En tenant compte des résultats de limites d'Atterberg et du bleu de méthylène, le sol en question peut être classifié selon GTR, comme le montre le tableau 4.10.

Tableau 4.10 Classification des sols fins selon GTR

Classe A		Classification des sols fins			
Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique	
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Paramètres d'état	Sous classe fonction de l'état
D _{max} ≤ 50 mm et Tamisat à 80 μm > 35%	A Sols fins	VBS ≤ 2,5 ⁽¹⁾ OU I_p ≤ 12	A₁ Limos peu plastiques, loess, silts alluvionnaires, sables fins peu pollués, arènes peu plastiques...	IPI ⁽¹⁾ ≤ 3 OU W_n ≥ 1,25 W_{OPN}	A₁ th
				3 < IPI ⁽¹⁾ ≤ 8 OU 1,10 ≤ W_n < 1,25 W_{OPN}	A₁ h
				8 < IPI ≤ 25 OU 0,9 W_{OPN} ≤ W_n < 1,1 W_{OPN}	A₁ m
				0,7 W_{OPN} ≤ W_n < 0,9 W_{OPN}	A₁ s
				W_n < 0,7 W_{OPN}	A₁ ts
		12 < I_p ≤ 25 ⁽¹⁾ OU 2,5 < VBS ≤ 6	A₂ Sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques arènes...	IPI ⁽¹⁾ ≤ 2 OU I_c ⁽¹⁾ ≤ 0,9 OU W_n ≥ 1,3 W_{OPN}	A₂ th
				2 < IPI ⁽¹⁾ ≤ 5 OU 0,9 ≤ I_c ⁽¹⁾ < 1,05 OU 1,1 W_{OPN} ≤ W_n < 1,3 W_{OPN}	A₂ h
				5 < IPI ≤ 15 OU 1,05 < I_c ≤ 1,2 OU 0,9 W_{OPN} ≤ W_n < 1,1 W_{OPN}	A₂ m
				1,2 < I_c ≤ 1,4 OU 0,7 W_{OPN} ≤ W_n < 0,9 W_{OPN}	A₂ s
				I_c > 1,3 OU W_n < 0,7 W_{OPN}	A₂ ts
		25 < I_p ≤ 40 ⁽¹⁾ OU 6 < VBS ≤ 8	A₃ Argiles et argiles mameuses, limons très plastiques...	IPI ⁽¹⁾ ≤ 1 OU I_c ⁽¹⁾ ≤ 0,8 OU W_n ≥ 1,4 W_{OPN}	A₃ th
				1 < IPI ⁽¹⁾ ≤ 3 OU 0,8 ≤ I_c ⁽¹⁾ < 1 OU 1,2 W_{OPN} ≤ W_n < 1,4 W_{OPN}	A₃ h
				3 < IPI ≤ 10 OU 1 < I_c ≤ 1,15 OU 0,9 W_{OPN} ≤ W_n < 1,2 W_{OPN}	A₃ m
				1,15 < I_c ≤ 1,3 OU 0,7 W_{OPN} ≤ W_n < 0,9 W_{OPN}	A₃ s
				I_c > 1,3 OU W_n < 0,7 W_{OPN}	A₃ ts
		I_p > 40 ⁽¹⁾ OU VBS > 8	A₄ Argiles et argiles mameuses, très plastiques...	Valeurs seuils des paramètres d'état, à définir à l'appui d'une étude spécifique	
A₄ th					
A₄ h					
A₄ m					
				A₄ s	

Deux cas de classification peuvent être se présentés et cela peut être clairement montré au tableau 4.11.

Tableau 4.11 Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature



Ce sol est de classe **A2** selon VBS et de classe **A3** selon l'IP, nous pouvons alors dire que c'est **un sol argileux**.

4.2.7 Détermination de la masse volumique des particules solides des sols selon NF P 94-054.

La masse volumique des grains solides d'un sol donné peut être déterminée de deux façons différentes : pour un sol grenu la densité est déterminée en utilisant l'Agitateur à retournement, par contre pour sol fin cette masse volumique est déterminée en se servant du Pycnomètre à l'eau.

Méthode du pycnomètre à l'eau

La masse volumique des particules solides du sol (ρ_s) est le rapport de la masse de ces particules solides (m_s) par leur volume (V_s).

$$\rho_s = m_s / V_s \quad (4.6)$$

L'échantillon de sol est séché à l'étuve puis pesé. Le volume des particules est déduit par pesée à l'aide d'un pycnomètre en substituant de l'eau de masse volumique connue aux particules solides.

La masse volumique des particules solides est déterminée à partir de la formule suivante :

$$\rho_s = \rho_w (m_2 - m_1) / (m_4 + m_2 - m_1 - m_3) \quad (4.7)$$

Avec:

m_1 : masse du pycnomètre vide ;

m_2 : masse du pycnomètre contenant la prise d'essai ;

m_3 : masse du pycnomètre, du sol et de l'eau ;

m_4 : masse du pycnomètre plein d'eau ;

ρ_w : masse volumique de l'eau conventionnellement prise égale à 1 g/cm^3 .

$$\rho_s = 1 \times \frac{245,8 - 220,8}{(815 + 245,8 - 220,8 - 829,8)} \quad (4.8)$$

$$\rho_s = 2,45098 \text{ g/cm}^3$$

$$G_s = \rho_s / \rho_w \implies G_s = 2,45$$

Le sédiment de barrage de Ain Dalia est de densité des grains solides égale à 2,45.



Figure 4.14 Vue générale de l'essai de pycnomètre à l'eau

4.2.8 Proctor Normal selon la norme NF P 94-093

La présente norme détermine les caractéristiques de compactage d'un sol qui sont la teneur en eau optimale (W_{opt} en %) et la masse volumique sèche maximale ($\rho_{d \max}$).

Le principe de l'essai Proctor consiste à humidifier un matériau à plusieurs teneurs en eau et à le compacter avec une dame normalisée, pour chacune des teneurs en eau, selon un procédé et une énergie conventionnelle. Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérée, on détermine la masse volumique sèche du matériau et on trace la courbe de variation de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau.

La figure 4.15 présente une vue générale de l'équipement de l'essai Proctor normal.



Figure 4.15 Vue générale de l'équipement de l'essai Proctor Normal

Les résultats de l'essai Proctor Normal sont rapportés au tableau 4.12.

Tableau 4.12 Résultats de l'essai Proctor Normal

N° de l'essai	Teneur en eau (%)	Masse du Moule(g)	Masse du Sol Humide+Moule (g)	Masse du sol humide(g)	ρ_h (g/cm^3)	ρ_d (g/cm^3)
1	8	4978	6476	1498	1,498	1,38703704
2	10	4978	6575,7	1597,7	1,5977	1,45245455
3	12	4978	6666,7	1688,7	1,6887	1,50776857
4	14	4978	6734,6	1756,6	1,7566	1,54087719
5	16	4978	6795,8	1817,8	1,8178	1,56706897
6	18	4978	6838,3	1860,3	1,8603	1,57652542
7	20	4978	6873,7	1895,7	1,8957	1,57975
8	22	4978	6871,6	1893,6	1,8936	1,55213115
9	24	4978	6865,5	1887,5	1,8875	1,52217742

Les résultats de l'essai Proctor Normal sont illustrés à la figure 4.16.

La teneur en eau optimale est de 20% et la masse volumique sèche maximale correspondante est de 1,58 g/cm³. Pour qu'on puisse trouver facilement pour chaque valeur de teneur une masse volumique sèche maximale, une courbe de tendance est annexée à cette figure.

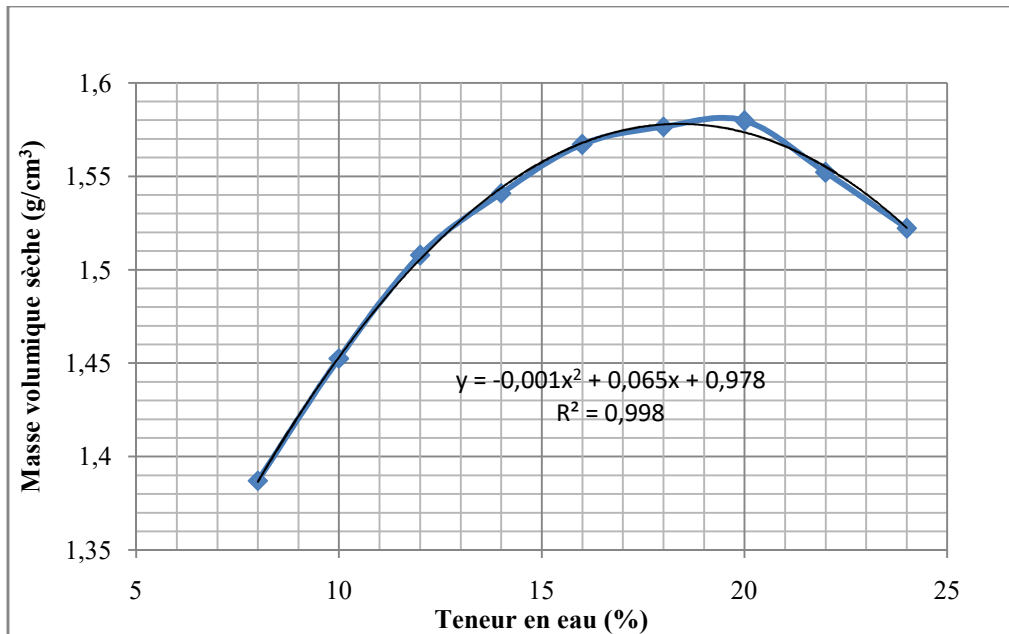


Figure 4.16 Essai Proctor Normal

Pour estimer la résistance au poinçonnement du sol étudié, nous avons conduit trois différents essais, à savoir : L'IPI, le CBR Immédiat et le CBR après immersion.

4.2.9 L'indice portant immédiat, CBR après immersion, CBR Immédiat selon la norme NF P94-078.

On peut produire ce phénomène en compactant le matériau dans les conditions de l'essai Proctor dans un moule CBR puis on mesure les forces à appliquer sur un piston cylindrique pour le faire pénétrer à une vitesse constante de 1,27mm/min, dans une éprouvette de ce matériau.

L'indice portant immédiat (IPI) est obtenu lorsque l'on effectue l'essai de poinçonnement, sans surcharge aussitôt après la confection de l'éprouvette.

Il caractérise l'aptitude du sol à permettre la circulation des engins de chantier directement sur sa surface lors des travaux ($H = 0 \Rightarrow$ pas de surcharges).

La figure 4.16 montre une vue générale de l'appareil utilisé dans l'IPI, l'I.CBR après immersion et l'I.CBR Immédiat.



Figure 4.17 Vue générale de l'appareil utilisé dans l'IPI, l'I.CBR après immersion et l'I.CBR Immédiat.

Le tableau 4.13 présente les résultats de l'indice de portance immédiat.

Tableau 4.13 Résultats de l'indice portant immédiat

Enfoncement (mm)	Lecture	Force (kN)
0	0	0
0,625	31	0,79751123
1,25	63	1,620748628
2	90	2,315355183
2,5	101	2,598343039
5	137	3,524485112
7,5	160	4,116186992
10	181	4,656436535

La figure 4.18 illustre la relation Force-enfoncement dans l'essai IPI, nous pouvons clairement noter que cette ne nécessite pas une correction.

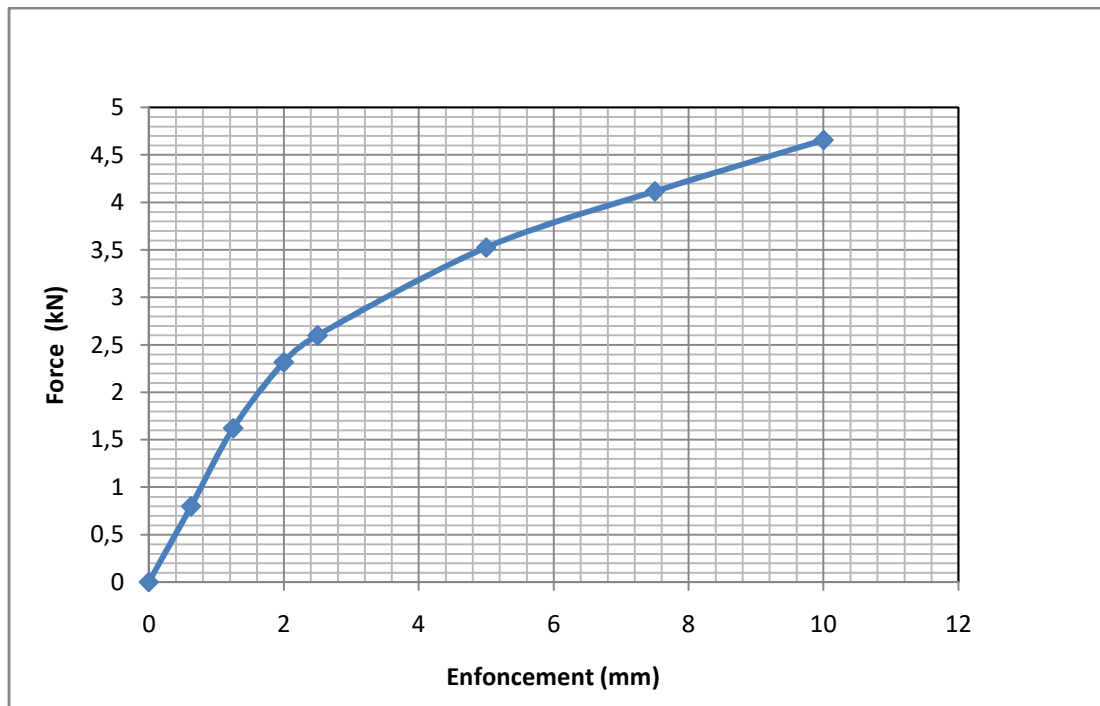


Figure 4.18 Relation Force-enfoncement dans l'essai IPI

Les valeurs particulières des deux forces ayant provoqué deux enfoncements conventionnels (2,5 mm et 5mm) sont rapportées aux valeurs des forces observées sur un matériau de référence pour les mêmes enfoncements (13,35 kN et 19,93 kN).

$$\text{IPI} = \text{Max} (19,46 ; 17,66) = 19,46\%.$$

L'indice CBR après immersion est mesuré après 4 jours d'imbibition dans l'eau.

Dans ce cas, l'éprouvette est soumise aux surcharges annulaires.

Il caractérise l'évolution de la portance d'un sol support (ou constituant de chaussée) compacté à différentes teneurs en eau et soumis à des variations de régime hydrique.

Tableau 4.14 Résultats de l'indice CBR après immersion

Enfoncement (mm)	Lecture	Force (kN)
0	0	0
0,625	20	0,514523374
1,25	40	1,029046748
2	60	1,543570122
2,5	71	1,826557978
5	80	2,058093496
7,5	83	2,135272002
10	88	2,263902846
12,5	89	2,289629014

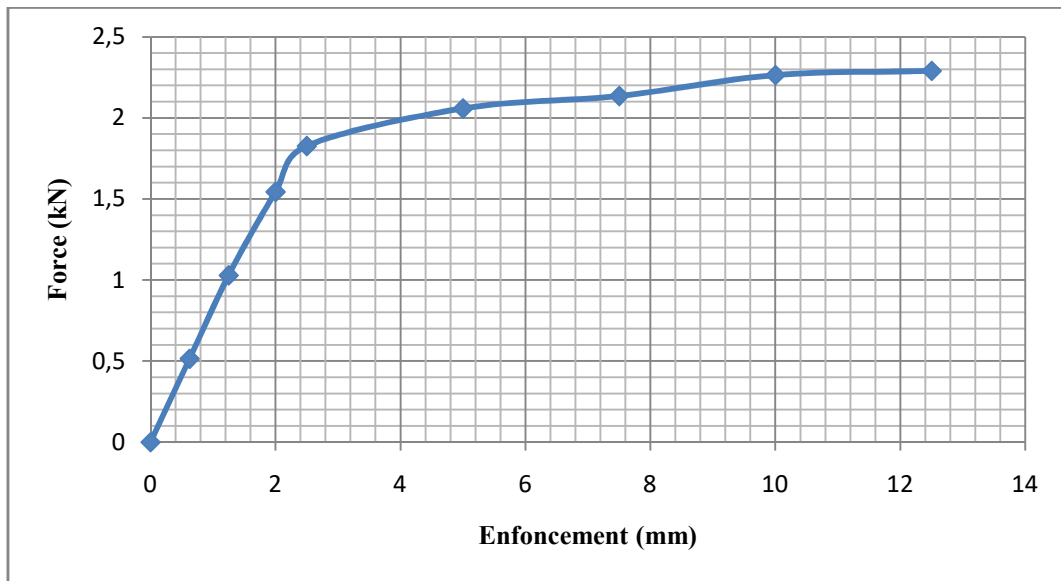


Figure 4.19 Relation Force-enfoncement dans l'essai I.CBR après immersion

I.CBR après immersion = max (13,68 ; 10,33) = 13,68

L'indice CBR immédiat mesure la résistance au poinçonnement d'un sol compacté généralement à l'énergie Proctor modifié à sa teneur en eau à l'optimum (W_{opt}). En sus, dans la mesure où le matériau est support ou constituant d'une structure de chaussée, l'éprouvette de sol testé sera surchargée en tête par des disques annulaires représentant l'équivalent de la contrainte imposée par la chaussée sur la plate-forme.

Il caractérise l'évolution de la portance d'un sol support (ou constituant de chaussée) compacté à différentes teneurs en eau.

Tableau 4.15 Résultats de l'indice CBR immédiat

Enfoncement (mm)	Lecture	Force (kN)
0	0	0
0,625	23	0,59170188
1,25	45	1,157677592
2	75	1,929462653
2,5	91	2,341081352
5	118	3,035687907
7,5	139	3,575937449
10	152	3,910377642

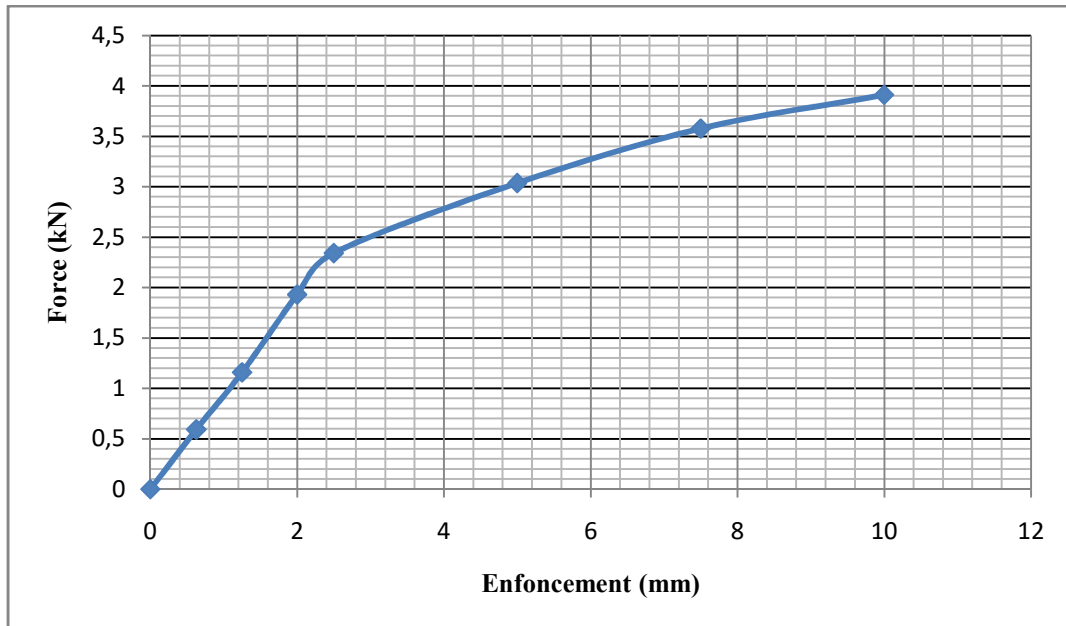


Figure 4.20 Relation Force-enfoncement dans l'essai I.CBR immédiat

I.CBR immédiat = $(16,79 ; 15,23) = 16,79$

Commentaire :

A titre comparatif, nous remarquons que l'indice de portance immédiat (IPI) a atteint une valeur de 19,46%, par contre l'indice CBR immédiat a marqué une valeur de 16,79. Finalement l'indice CBR après immersion a atteint une valeur plus faible que les deux premières valeurs, à savoir 13,67%.

4.3 Essais de cisaillement en vue de valorisation des sédiments de barrage de Ain Dalia

Avant toute valorisation d'un sédiment de barrage, la détermination de sa résistance au cisaillement est une tâche primordiale. Dans ce mémoire, nous avons réalisé différents essais de cisaillement à l'appareil triaxial qui se trouve au niveau du Laboratoire de Génie Civil et d'Hydraulique (LGCH), de l'université 8 Mai 1945 Guelma.

4.3.1 Essai à l'appareil triaxial

Dans cet essai, l'éprouvette de sol est placée dans une cellule dite «triaxiale».

L'éprouvette cylindrique d'un élancement h/d au moins égal à 2, h désignant la hauteur et d le diamètre. A la base et au sommet de l'éprouvette sont disposées des plaques drainantes reliées à l'extérieur à des dispositifs permettant soit d'assurer le drainage et de connaître les

variations de volume, soit de mesurer la pression interstitielle dans l'éprouvette. La figure 4.2 présente en détail les principaux éléments de l'appareil triaxial.

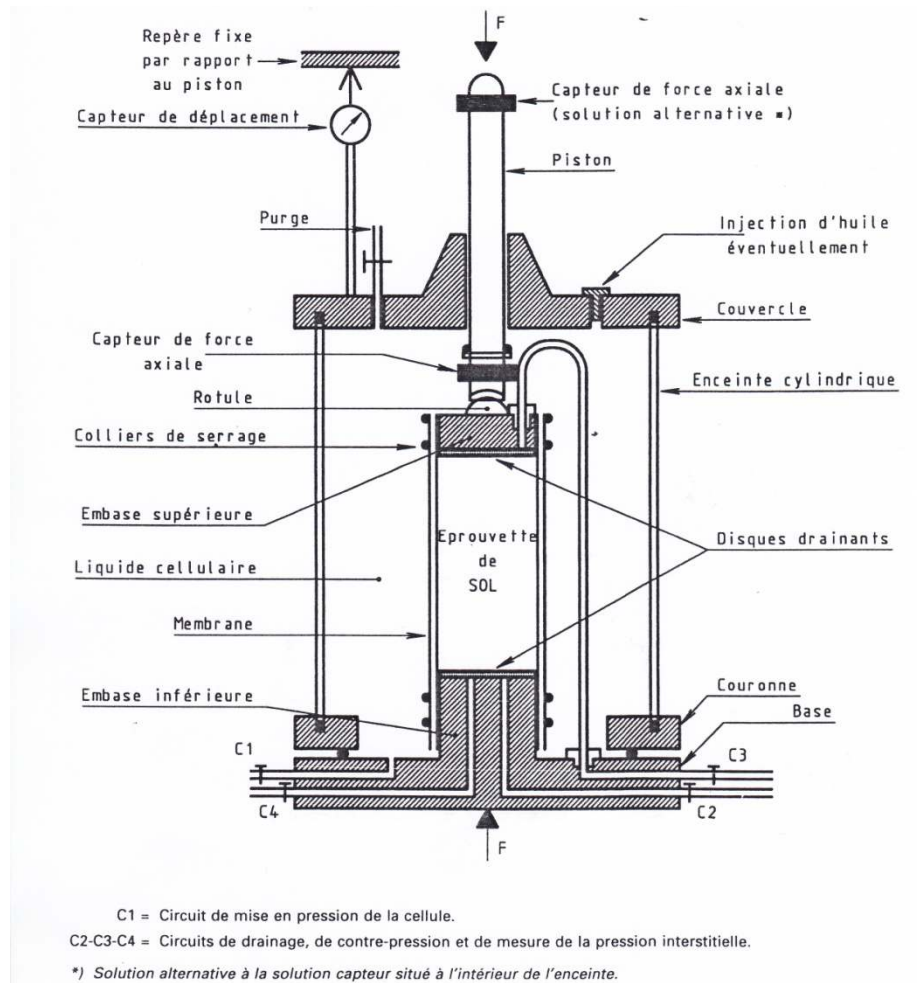


Figure 4.21 Eléments principaux de l'appareil de triaxial

▪ Types d'essais

Différentes modalités d'essais peuvent être définies, selon que les phases successives de l'essai sont exécutées avec ou sans drainage. On distingue les principaux types d'essais suivants :

Essais non consolidés-non drainés (UU) : la première étape de l'essai est effectuée à drainage fermé, de même que le cisaillement.

Essais consolidés-non drainés (CU) : au cours de l'étape de consolidation, le drainage est ouvert et l'on attend que les contraintes effectives deviennent égales aux contraintes totales appliquées (surpressions interstitielles nulles). Au cours de l'étape de cisaillement, le drainage est fermé et l'on peut, si nécessaire, mesurer la pression interstitielle pendant le chargement jusqu'à la rupture (on parle alors d'essais CU avec mesure de u).

Essais consolidés-drainés (CD) : la première étape est identique à celle des essais CU. Le cisaillement est exécuté en condition de drainage ouvert, on augmentant la charge suffisamment lentement pour que la surpression interstitielle reste négligeable tout au long de l'essai.

4.3.2 Matériaux utilisés

Les matériaux utilisés dans ce projet sont le sédiment de barrage de Ain Dalia et le sable normalisé en différentes proportions:

➤ **Sable normalisé**

Le sable utilisé dans cet essai est un sable normalisé passé sur un tamis de **2mm**. Ce sable est produit de la Société Nouvelle de Littoral (SNL), installée à LEUATE, (France), comme le montre la figure 4.22.



Figure 4.22 Sable normalisé

Pour mieux connaître ce sable avant son utilisation, nous avons réalisé une analyse granulométrique et déterminé C_u et C_c . Les résultats sont illustrés au tableau 4

16 et à la figure 4.23. Ce sable, comme l'indique son nom rentre bien dans le fuseau des sables pour les bétons.

Tableau 4.16 Résultats de l'analyse granulométrique de sable normalisé

Ouverture des tamis(mm)	Masse des refus partie(g)	Masse des refus cumulés(g)	Pourcentage des refus cumulés(%)	Tamisats cumulés(%)
	Ri(g)	Rn(g)	$(Rn/M2)*100$	$100-(Rn/M2)*100$
2	1,1	1,1	0,222	99,778
1,4	111,03	112,13	22,653	77,347
1	63,49	175,62	35,479	64,521
0,71	80,05	255,67	51,651	48,349
0,5	89	344,67	69,630	30,370
0,355	46,43	391,1	79,010	20,990
0,25	26,09	417,19	84,281	15,719
0,18	20,09	437,28	88,339	11,661
0,125	32,24	469,52	94,853	5,147
0,09	18,8	488,32	98,651	1,349
0,063	5,68	494	99,798	0,202
Passant 0,063	0,39	494,39	99,877	0,123

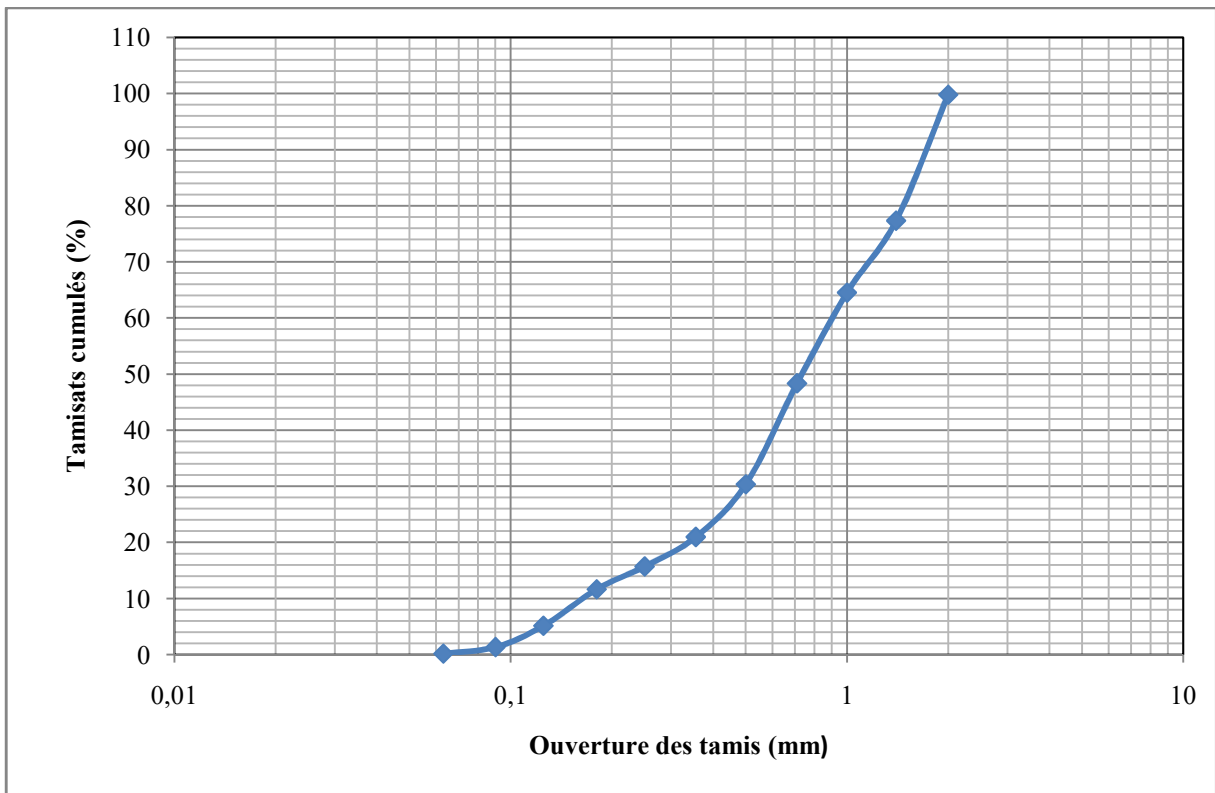


Figure 4.23 Courbe granulométrique du sable normalisé

Le coefficient d'uniformité est de $C_u = \frac{0,90}{0,15} = 6$ (4.9)

Le coefficient de courbure est de $C_c = \frac{(0,5)^2}{0,9 \times 0,15} = 1,85$ (4.10)

Le sable de référence présente un coefficient d'uniformité C_u égale à 6 et un coefficient de courbure C_c égal à 1.85, compris entre 1 et 3, donc les deux conditions sont vérifiées, ce qui donne un sable propre bien gradué.

Sédiment + sable normalisé : le mélange de deux sols a été effectué par malaxage manuel à l'état sec tout d'abord, puis à une teneur en eau optimale de 20% de la quantité entière.

Les différents pourcentages du sable utilisé :

10% de sable + 90 % de sédiment

20% de sable + 80% de sédiment

30% de sable + 70 % de sédiment

➤ **Fibres de Sisal**

Les fibres de Sisal sont issues de l'Agave Sisalana, une plante originaire du Mexique qui s'accommode dans la plupart des types de sols saufs ceux les sols argileux, très salins et humides, elle pousse dans des climats chauds et arides souvent impropres aux autres cultures.

Sisal est également le nom des fibres extraite des feuilles de cette plante, situées à l'intérieur de ses feuilles dans le sens de la longueur, sont plus abondantes vers la surface. Il faut donc défibrer immédiatement la récolte afin d'éviter de les abîmer durant le nettoyage. Elles sont très résistantes, épaisses et solides, utilisées dans le secteur de la construction (pour le durcissement du béton), mais aussi en tant que matériaux composites pour l'industrie automobile et navale, substituant et améliorant la fibre de verre, comme elles servent à la fabrication de cordage, de tissus grossiers ,de tapis dans les plastiques et dans les produits de papier.



Figure 4.24 Fibre de Sisal

Les différents pourcentages en masse de fibre utilisée sont:

0% de fibre + 100% de sédiment (échantillon témoins)

1% de fibre + 99% de sédiment

2% de fibre + 98% de sédiment.

4.3.3 Essais triaxiaux non consolidés non drainés

Les essais réalisés sur le sédiment de barrage de Ain Dalia sont au nombre de 18. Avant d'avoir entamé ces essais, nous avons réalisé des essais préliminaires pour bien maîtriser l'essai triaxial qui est parmi les essais de cisaillement principaux en mécanique des sols, car il offre une gamme de différents types d'essais tels que l'essai UU, CD et CU.

Les essais conduits sur le sol en question sont cités de la manière suivante :

a- **Echantillon 01** : Echantillon témoins du sédiment de barrage

Après la mise en place de l'échantillon dans l'appareil triaxial, nous procédons directement à la rupture de chaque spécimen du même échantillon sous une contrainte de confinement de $\sigma_3 = 100 \text{ kPa}$, $\sigma_3 = 200 \text{ kPa}$, $\sigma_3 = 300 \text{ kPa}$ respectivement. Les relations déviateur-Déplacement vertical sont rapportées dans la figure 4.25.

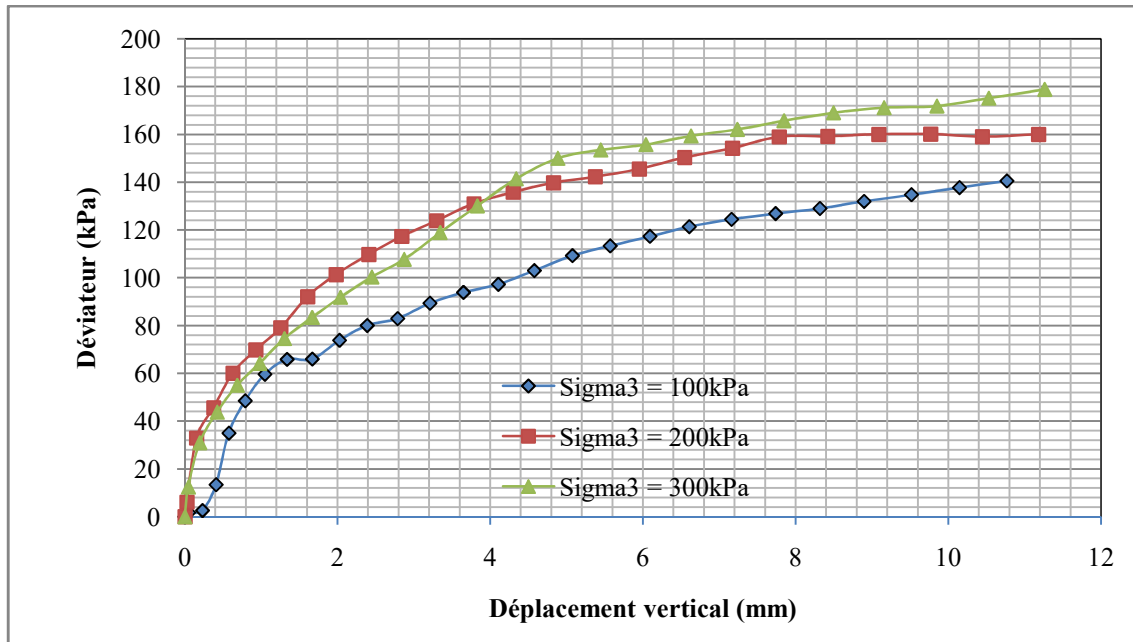


Figure 4.25 Relation déviateur-déplacement vertical du sol témoins

Les détails des trois essais sont indiqués aux tableaux 4.17 et 4.18.

Tableau 4.17 Données de l'essai triaxial (UU) du sédiment de barrage témoin

Sample properties:		Test results:	
Length =	100 mm	Cell pressure	Additional axial load at failure
Diameter =	50 mm	σ_3 (kPa)	(N)
Vertical deformation =	9 mm	Test 1	100 300,93
		Test 2	200 348,34
		Test 3	300 374,14

Tableau 4.18 Résultats de l'essai triaxial

	Cell pressure σ_3 (kPa)	Deviator stress ($\sigma_1 - \sigma_3$) (kPa)	Major Princ.stress σ_1 (kPa)
Test 1	100	139,5	239,5
Test 2	200	161,4	361,4
Test 3	300	173,4	473,4

La figure 4.26 présente les résultats des trois essais. D'après les cercles de Mohr montrés à cette figure, nous avons déterminé une cohésion $c = 57$ kPa et un angle de frottement interne $\varphi = 4,6^\circ$.

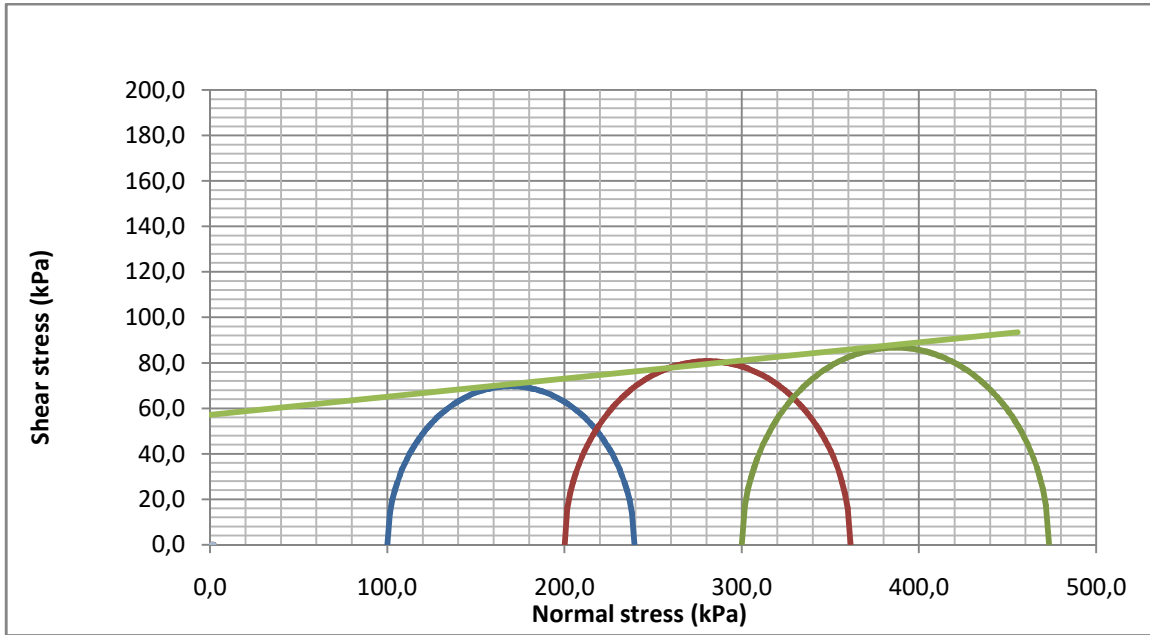


Figure 4.26 Détermination des paramètres de cisaillement de l'échantillon témoin

b- **Echantillon 02**: 99% Sédiment + 1% fibre

Les relations déviateur-Déplacement vertical sont illustrées dans la figure 4.27.

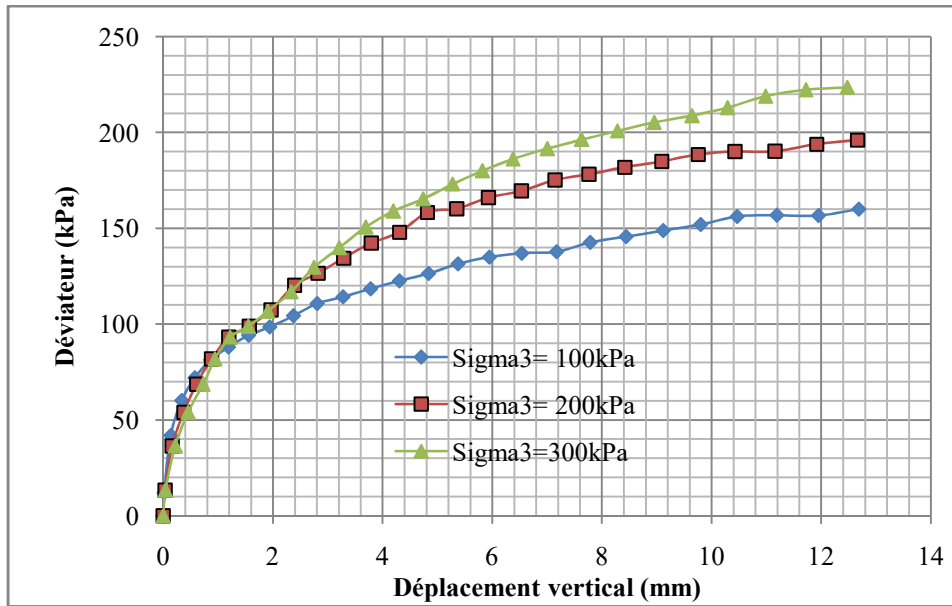


Figure 4.27 Relation déviateur-déplacement vertical pour 1% de fibre

Pour plus de détails, les données et résultats des trois essais sont indiqués aux tableaux 4.19 et 4.20.

Tableau 4.19 Données de l'essai triaxial (UU) du sédiment de barrage traité par 1% de fibre

Sample properties:		Test results:	
Length =	100 mm	Cell pressure	Additional axial load at failure (N)
Diameter =	50 mm	σ_3 (kPa)	
Vertical deformation =	10 mm	Test 1	100 152
		Test 2	200 189
		Test 3	300 213

Tableau 4.20 Résultats de l'essai triaxial pour 1% de fibre

	Cell pressure σ_3 (kPa)	Deviator stress $(\sigma_1 - \sigma_3)$ (kPa)	Major Princ.stress σ_1 (kPa)
Test 1	100	69,7	169,7
Test 2	200	86,6	286,6
Test 3	300	97,6	397,6

La figure 4.28 présente les résultats des trois essais. D'après les cercles de Mohr montrés à cette figure, nous avons déterminé une cohésion $c = 20$ kPa et un angle de frottement interne $\varphi = 4,5^\circ$.

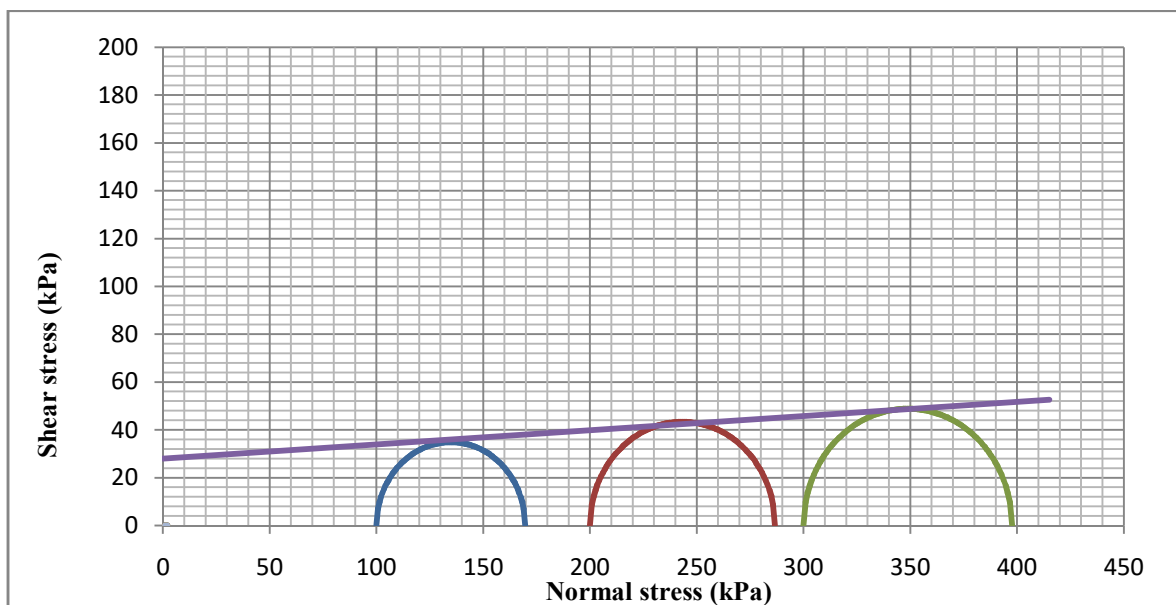


Figure 4.28 Détermination des paramètres de cisaillement du sédiment traité par 1% de fibre

c- **Echantillon 03** 98% Sédiment traité + 2% fibre

Les relations déviateur-Déplacement vertical sont montrées dans la figure 4.29.

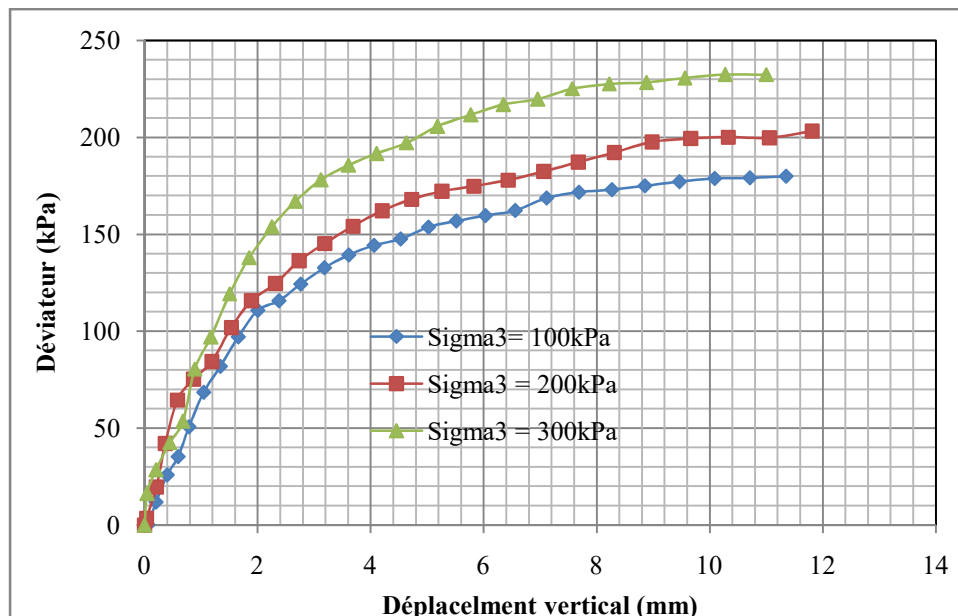


Figure 4.29 Relation déviateur-déplacement vertical pour 2% de fibre

Tous les détails concernant les trois essais triaxiaux sont illustrés dans les tableaux 4.21 et 4.22.

Tableau 4.21 Données de l'essai triaxial (UU) du sédiment de barrage traité par 2% de fibre

Sample properties :		Test results :	
		Cell pressure	Additional axial load at failure
		σ_3 (kPa)	(N)
Length =	100 mm	Test 1	390,35
Diameter =	50 mm	Test 2	438,16
Vertical deformation =	10 mm	Test 3	499,37

Tableau 4.22 Résultats de l'essai triaxial pour 2% de fibre

	Cell pressure σ_3 (kPa)	Deviator stress $(\sigma_1 - \sigma_3)$ (kPa)	Major Princ.stress σ_1 (kPa)
Test 1	100	178,9	278,9
Test 2	200	200,8	400,8
Test 3	300	228,9	528,9

Les cercles de Mohr sont montrés à la figure 4.30. D'après cette figure, nous avons déterminé les paramètres cisaillement, à savoir la cohésion $c = 66 \text{ kPa}$ et l'angle de frottement interne $\varphi = 6,9^\circ$.

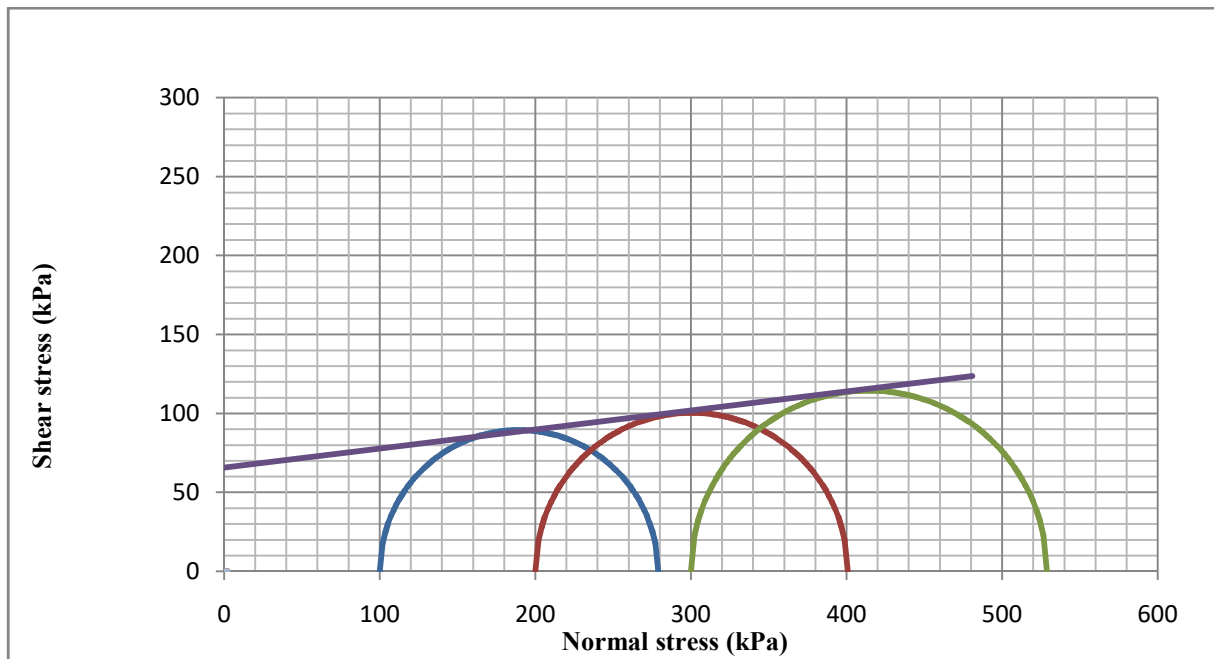


Figure 4.30 Détermination des paramètres de cisaillement de sédiment traité par 2% de fibre
Maintenant, nous procédons à un deuxième type de traitement en utilisant le sable normalisé en trois différentes teneurs : 10%, 20% et 30% respectivement.

d- **Echantillon 04** : 90% Sédiment traité par 10% sable normalisé

Les résultats des trois essais sont rassemblés dans la figure 4.31.

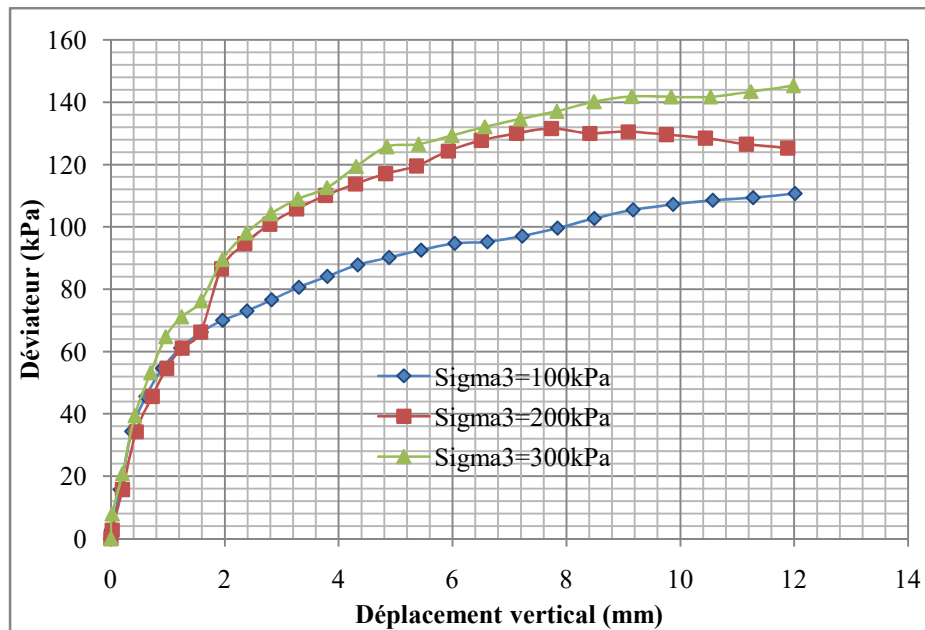


Figure 4.31 Relation déviateur-déplacement vertical pour 10% de sable.

Tous les détails concernant les trois essais triaxiaux sont illustrés dans les tableaux 4.23 et 4.24.

Tableau 4.23 Données de l'essai triaxial (UU) du sédiment de barrage traité par 10% de sable

Sample properties:		Test results:	
Length =	100 mm		Cell pressure σ_3 (kPa)
Diameter =	50 mm	Test 1	100
Vertical deformation =	10 mm	Test 2	200
		Test 3	300
			Additional axial load at failure (N)
			233,52
			281,96
			308,57

Tableau 4.24 Résultats de l'essai triaxial pour 10% de sable

	Cell pressure σ_3 (kPa)	Deviator stress $(\sigma_1 - \sigma_3)$ (kPa)	Major Princ.stress σ_1 (kPa)
Test 1	100	107,0	207,0
Test 2	200	129,2	329,2
Test 3	300	141,4	441,4

Les cercles de Mohr sont montrés à la figure 4.30. D'après cette figure, nous avons déterminé les paramètres cisaillement, à savoir la cohésion $c = 42$ kPa et l'angle de frottement interne $\phi = 4,5^\circ$.

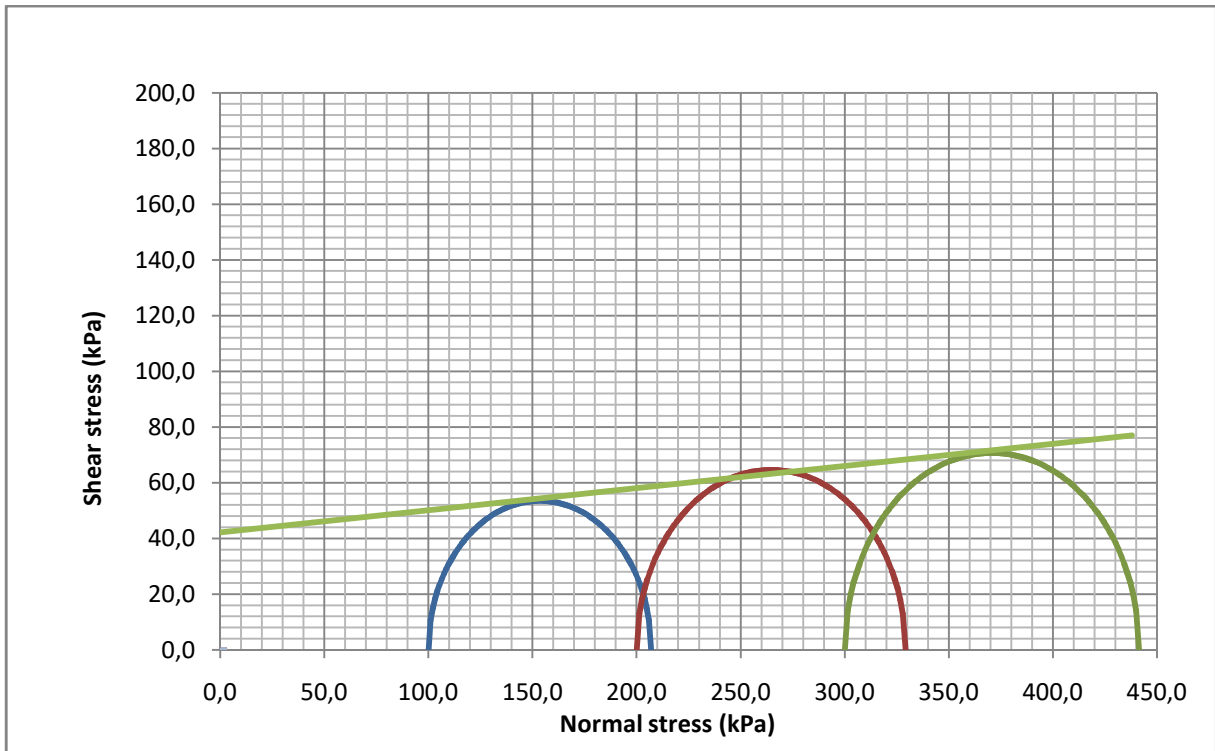


Figure 4.32 Détermination des paramètres de cisaillement de 90% sédiment + 10% de sable.

e- **Echantillon 05** : 80% Sédiment traité par 20% sable normalisé

Les relations déviateur-déplacement vertical pour les trois différents essais sont montrées dans la figure 4.33.

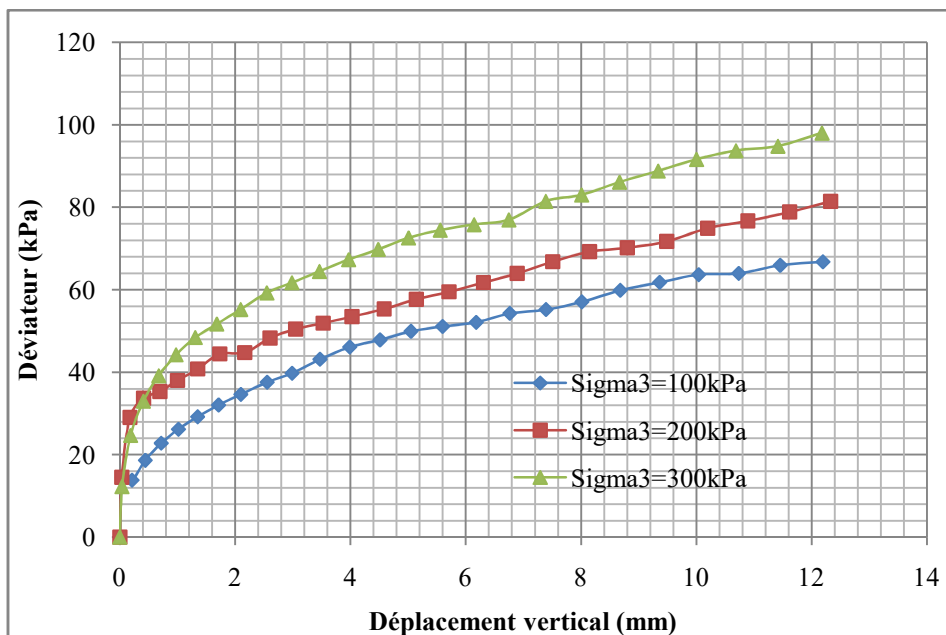


Figure 4.33 Relation contrainte-déplacement vertical pour 20% de sable

Encore une fois, les données et résultats des trois essais sur le sédiment traité par 20% de sable sont indiquées dans les tableaux 4.26 et 4.27.

Tableau 4.25 Données de l'essai triaxial (UU) du sédiment de barrage traité par 20% de sable

Sample properties:		Test results:	
		Cell pressure σ_3 (kPa)	Additional axial load at failure (N)
Length =	100 mm		
Diameter =	50 mm	Test 1	100 139
Vertical deformation =	10 mm	Test 2	200 164
		Test 3	300 200

Tableau 4.26 Résultats de l'essai triaxial pour 20% de sable

	Cell pressure σ_3 (kPa)	Deviator stress ($\sigma_1 - \sigma_3$) (kPa)	Major Princ.stress σ_1 (kPa)
Test 1	100	63,7	163,7
Test 2	200	75,2	275,2
Test 3	300	91,7	391,7

Une synthèse des résultats est présentée à la figure 4.34. D'après cette figure, nous avons déterminé une cohésion $c = 24$ kPa et un angle de frottement interne $\phi = 3,4^\circ$.

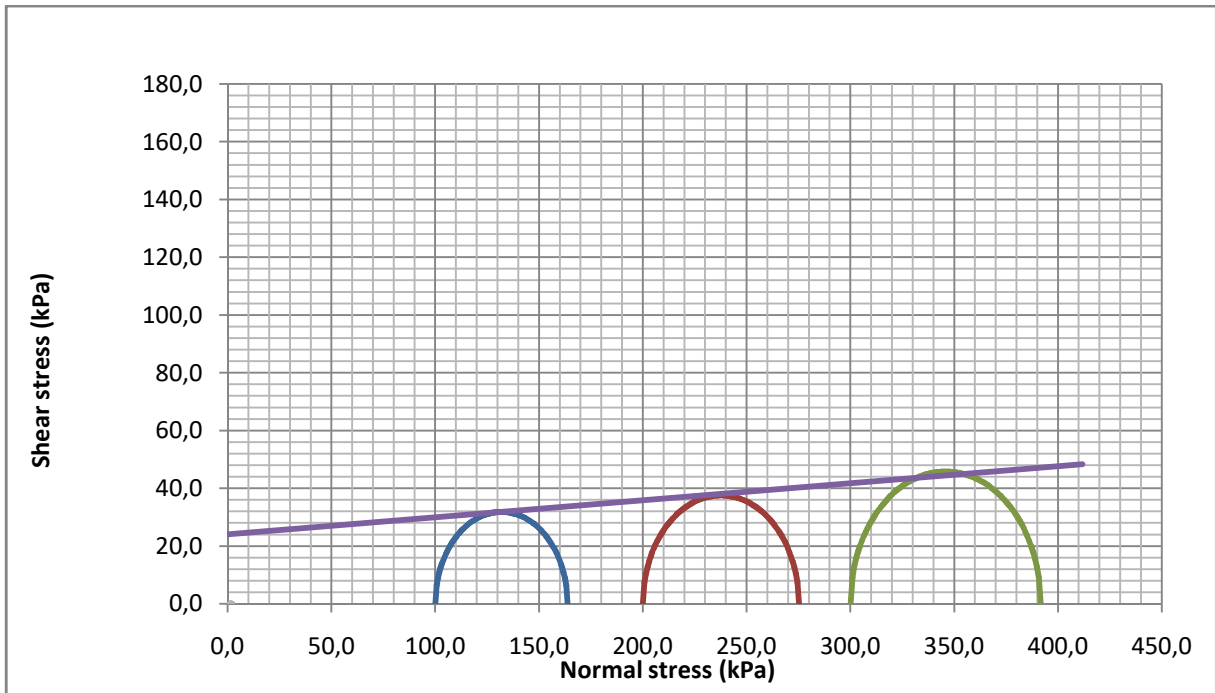


Figure 4.34 Détermination des paramètres de cisaillement de 80% sédiment + 20% de sable.

f- **Echantillon 06** : 70% Sédiment traité par 30% sable normalisé

La figure 4.35 montre les résultats des relations déviateur- déplacement vertical.

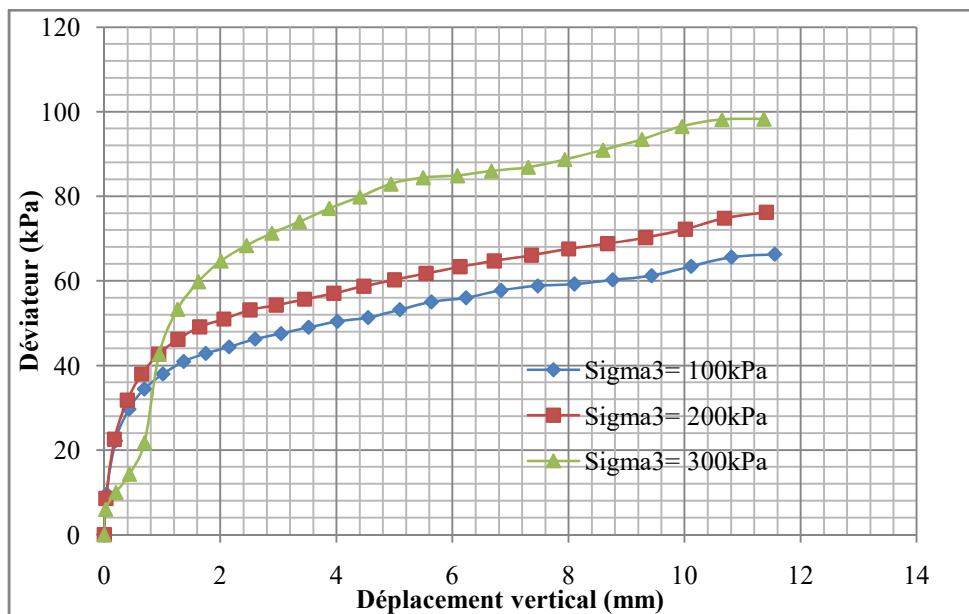


Figure 4.35 Relation déviateur-déplacement vertical pour 30% de sable

Tous les détails nécessaires pour les trois essais sont illustrés dans les tableaux 4.28 et 4.29.

Tableau 4.27 Données de l'essai triaxial (UU) du sédiment de barrage traité par 30% de sable

Sample properties:		Test results:	
Length =	100 mm	Cell pressure	Additional axial load at failure
Diameter =	50 mm	σ_3 (kPa)	(N)
Vertical deformation =	10 mm	Test 1	100 138,6
		Test 2	200 157,51
		Test 3	300 210,48

Tableau 4.28 Résultats de l'essai triaxial pour 30% de sable

	Cell pressure σ_3 (kPa)	Deviator stress ($\sigma_1 - \sigma_3$) (kPa)	Major Princ. stress σ_1 (kPa)
Test 1	100	63,5	163,5
Test 2	200	72,2	272,2
Test 3	300	96,5	396,5

D'après les cercles de Mohr montrés à la figure 4.36, nous avons déterminé une cohésion $c = 20$ kPa et un angle de frottement interne $\varphi = 4,5^\circ$.

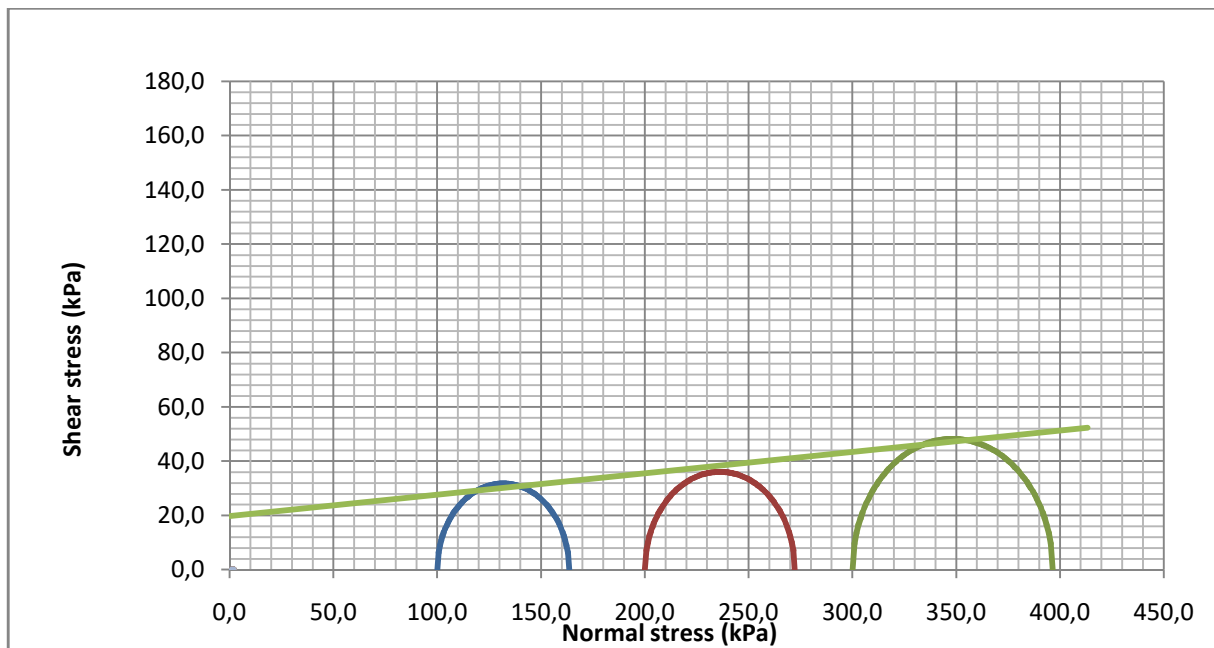


Figure 4.36 Détermination des paramètres de cisaillement de sédiment traité par 30% de sable

4.4 Analyse des résultats

Maintenant, nous procédons à l'analyse des résultats d'essais triaxiaux réalisés sur différents échantillons.

4.4.1 Analyse des résultats des essais triaxiaux réalisés sur des échantillons témoins et du sol traité par les fibres de Sisal.

Nous avons rassemblé les résultats réalisés sur ce jeu d'échantillons afin d'étudier l'effet de l'ajout de fibre de Sisal sur les paramètres de cisaillement. Pour cela, nous avons dressé le tableau 4.29. Pour mieux illustrer les résultats, un histogramme est présenté à la figure 4.37.

Tableau 4.29 Résultats finaux des essais triaxiaux traité par différents teneur en fibre

	Témoins	1% de fibre	2% de fibre
C (kPa)	57	28	66
ϕ (°)	4,6	3,4	6,9

Vue le manque du temps alloué à la réalisation de ce mémoire de Master et aux difficultés rencontrées durant le travail expérimental, nous nous sommes contentés de réaliser un faible nombre d'essais triaxiaux au Laboratoire de Génie Civil et d'Hydraulique de l'Université 8 Mai 1945 Guelma.

Les résultats du premier jeu d'essais indiquent que la cohésion et l'angle de frottement interne diminuent avec 1% de Sisal, ensuite ils augmentent avec 2% de Sisal.

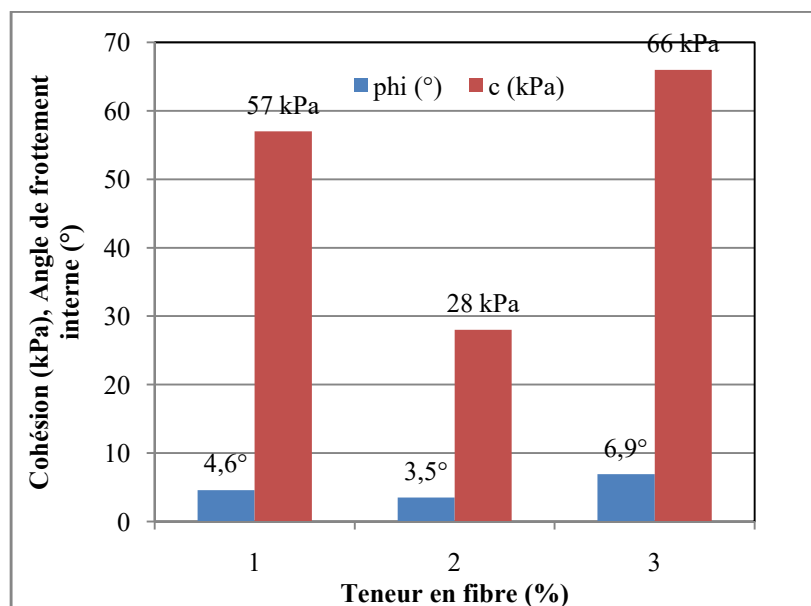


Figure 4.37 Résultats finaux des essais triaxiaux des échantillons du sol traité par les fibres de Sisal

4.4.2 Analyse des résultats des essais triaxiaux réalisés sur des échantillons du sol traité par le sable normalisé en trois différentes proportions.

Les résultats des essais triaxiaux sur des échantillons du sol traité par le sable normalisé sont présentés au tableau 4.30 et à la figure 4.38.

Nous notons clairement que la valeur de la cohésion diminue avec l'augmentation de la teneur en sable, ce qui est très logique car le sol devient de plus pulvérulent. Par contre pour l'angle de frottement interne, nous remarquons qu'il reste pratiquement inchangé, et demande encore plus d'essais avec plus de teneurs en sable (exemple : 40 % et 50%) pour mieux expliquer l'effet de l'ajout de sable sur ce dernier paramètre.

Tableau 4.30 Résultats finaux des essais triaxiaux traité par différents teneur en sable

	Témoin	10% de sable	20% de sable	30% de sable
C (kPa)	57	42	24	20
ϕ (°)	4,6	4,5	3,4	4,5

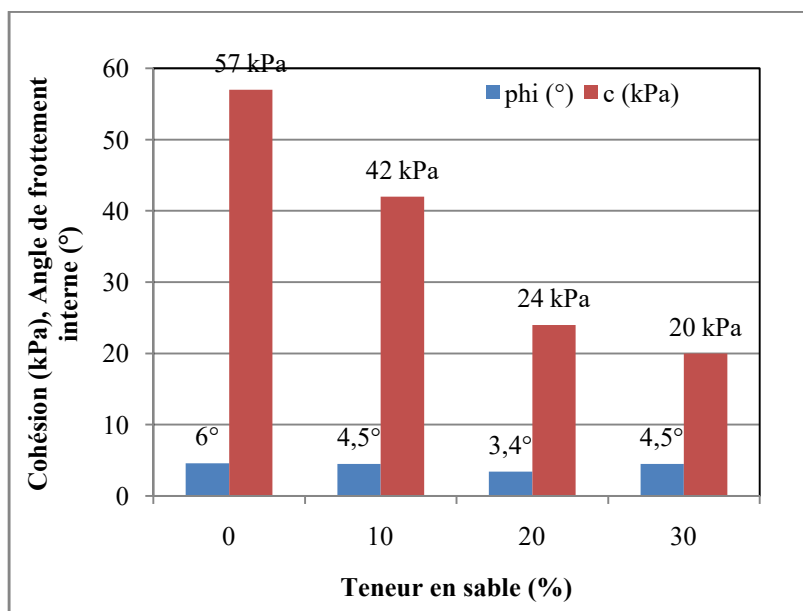


Figure 4.38 Résultats finaux des essais triaxiaux des échantillons du sol traité par le sable normalisé

4.5 Conclusion

En vue de valorisation de sédiment de barrage de Ain Dalia, nous avons conduit des essais triaxiaux non consolidés non drainés sur ce sol non traité, ensuite nous avons procédé à son traitement en deux façons, à savoir par les fibres de Sisal et par le sable normalisé respectivement.

Les résultats du sol traité par les fibres de Sisal indiquent que la cohésion et l'angle de frottement interne diminuent avec 1% de Sisal, ensuite ils augmentent avec 2% de Sisal.

Concernant le sol traité par le sable normalisé, nous notons clairement que la valeur de la cohésion diminue avec l'augmentation de la teneur en sable, ce qui est très logique car le sol devient de plus pulvérulent. Par contre pour l'angle de frottement interne, nous remarquons qu'il reste pratiquement inchangé, et demande encore plus d'essais avec plus de teneurs en sable (exemple : 40 % et 50%) pour mieux expliquer l'effet de l'ajout de sable sur ce dernier paramètre.

Conclusion générale et perspectives

L'envasement est un phénomène naturel très complexe qu'il faut étudier de l'amont à l'aval du barrage, il est devenu actuellement une réelle menace pour l'infrastructure hydraulique, tant au niveau de la réduction rapide de la capacité utile du barrage qu'à celui de la sécurité de l'ouvrage lui-même.

Le dragage constitue la phase ultime qui traduit clairement les insuffisances des autres moyens de lutte contre la sédimentation utilisés en amont. Le dragage en Algérie étant un dragage d'entretien des retenues de barrages, il doit s'inspirer des moyens et méthodes utilisés dans le monde malgré la particularité des sites et du climat. L'adoption des techniques de dragage doit passer par la caractérisation et l'identification de la vase pour le choix des moyens de vidange.

Des quantités importantes sont évacuées périodiquement par les vannes de fond des barrages et posent de graves problèmes à l'aval de l'ouvrage. Au lieu de rejeter la vase issue du dragage dans le milieu naturel comme un déchet, on lui donne une valeur par son réutilisation dans le domaine de Génie Civil.

D'après les travaux déjà réalisés dans ce domaine, le traitement et l'étude de la vase en vue de sa valorisation a donné de très bons résultats. La réutilisation de la vase vise deux objectifs: éviter les problèmes d'ordres écologiques posés par le rejet des sédiments dans la nature d'un côté et de faire l'économie par la vente de cette vase.

Le bassin de Medjerda situé dans une région à vocation agricole, et en plus il est trop aggloméré, ce qui demande la construction des barrages. Cette région compte quatre barrages, à savoir le barrage de Teffech (en exploitation), le barrage sur l'oued Djedra et le barrage sur l'oued El Ghanem (en projet), en fin le barrage de Ain Dalia qui est notre projet d'étude.

En vue de valorisation de sédiment de barrage de Ain Dalia, nous avons conduit des essais triaxiaux non consolidés non drainés sur ce sol non traité. Ensuite, nous avons procédé à son traitement en deux façons, à savoir par les fibres de Sisal et par le sable normalisé respectivement.

Les résultats du sol traité par les fibres de Sisal indiquent que la cohésion et l'angle de frottement interne diminuent avec 1% de Sisal, ensuite ils augmentent avec 2% de Sisal.

Concernant le sol traité par le sable normalisé, nous notons clairement que la valeur de la cohésion diminue avec l'augmentation de la teneur en sable, ce qui est très logique car le sol devient de plus pulvérulent. Par contre pour l'angle de frottement interne, nous remarquons

qu'il reste pratiquement inchangé, et demande encore plus d'essais avec plus de teneurs en sable (exemple : 40 % et 50%) pour mieux expliquer l'effet de l'ajout de sable sur ce dernier paramètre.

Afin de mieux valoriser le sédiment de Ain Dalia, il serait intéressant de réaliser des essais de compression et de flexion sur des éprouvettes confectionnées par le sol en question en vue de son utilisation dans la fabrication des briques.

Références bibliographiques

1 - Achour R. *Valorisation et caractérisation de la durabilité d'un matériau routier et d'un béton à base de sédiments de dragage*, Thèse délivré conjointement par Mines Douai, l'Université Lille 1 et l'Université de Sherbrooke, 2013.

2 - Agostini F. *Inertage et valorisation des sédiments de dragage marins*, Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lille, 2006.

3 - Alviset L. *Matériaux de Terre Cuite "Techniques de l'Ingénieur" 1994.*

4 - Belas N., Belaribi O., Mebrouki A., Bouhamou N. *Valorisation des sédiments de dragage dans les bétons, INVACO2 : Séminaire International, Innovation & Valorisation en Genie Civil & Matériaux de Construction, Rabat – Maroc / 23-25 Novembre 2011.*

5 - Benasla M. *Caractérisation de la vase de dragage du barrage de l'Oued Fodda et valorisation en tant que matériau de construction*, Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2015.

6 - Ben allal L. Ammari M., FRAR I., Azmani A., Belmokhtar N. *Caractérisation et valorisation des sédiments de dragage des ports de Tanger et Larache (Maroc).* Revue Paralia, Volume 4 pp 5.1-5.13, 2011.

7 - Bouanani A. *Production et transport des sédiments en suspension dans l'Oued Skik (Tafna Nord-Ouest Algérie)*, 2004.

8 - GTR. *Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme.* Editions du SETRA-LCPC, Fascicules I & II, 2000, 98.

9 - Houaria M. *Etude des propriétés physico-chimiques des sédiments du Barrage de Sidi M'Hamed Benaouda (W .Relizane) en vue de leur Valorisation*, mémoire de magister, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2015.

10 - Layeb A., Halbaoui A. *Caractérisations physico-mécaniques d'un bloc de terre stabilisé avec la chaux à base des fibres (déchet de pneu usés - Verre)*, mémoire de master académique, 2017.

11 - Marouf H. *Valorisation des sédiments issus du dragage du barrage de Bouhanifia et du port d'Oran*, Thèse de doctorat, Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, 2018.

12 - Oumrani N. *Influence des sédiments sur la stabilité d'un barrage en exploitation cas du barrage CHEURFAS II*, Thèse université de Tlemcen, 2009.

13 - Remini B. *Valorisation de la vase des barrages quelques exemples Algériens*, Laboratoire de Recherche en Hydraulique Souterraine et de Surface Chercheur au laboratoire LARHYSS, Biskra, Algérie, 2006.

14 - Remini W., Remini B. *La sédimentation dans les barrages de l'Afrique du nord*, Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 02, pp. 45-54, Juin 2003.

15 - Samara M. *Valorisation des sédiments fluviaux pollués après inertage dans la brique cuite*, Thèse de doctorat Laboratoire de Mécanique de Lille France, 2007.

18 - Seklaoui O. *Valorisation des sédiments du barrage d'El Mardja Sidi Abed : Etude technico-économique*, Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeride Tizi-Ouzou, 2016.

17 - Semcha A. *Valorisation des sédiments de dragage : Applications dans le BTP, cas du barrage de Fergoug*. Thèse de l'université de Reims Champagne-Ardenne, 2006.

Annexe

Echantillon 01 : Echantillon témoins du sédiment de barrage

100kPa		200kPa		300kPa	
DEPL VER (mm)	Déviateur (kPa)	DEPL VER (mm)	Déviateur (kPa)	DEPL VER (mm)	Déviateur (kPa)
0	0	0	0	0	0
0,0466	1,751195788	0,0265	6,130315942	0,0456	12,43345155
0,2291	2,622048375	0,1527	32,88755413	0,1941	30,95050615
0,4083	13,43549363	0,3754	45,55630461	0,4232	43,78995038
0,5748	35,01306788	0,6279	60,06367634	0,6851	54,98493801
0,7902	48,49504406	0,927	69,77504967	0,9789	64,18968403
1,0468	59,6390886	1,2547	79,06163424	1,3035	74,52767292
1,3364	65,85782735	1,6058	92,05346322	1,6663	83,380766
1,6673	65,98259421	1,9792	101,3214495	2,0375	91,8242486
2,0237	73,80914541	2,4087	109,7715692	2,449	100,3239729
2,3854	80,03601564	2,8394	117,2856637	2,8722	107,716363
2,7842	82,94790801	3,2965	123,8474778	3,3432	118,8932803
3,2085	89,36572318	3,7844	130,9767327	3,83	130,067108
3,6465	93,85999119	4,2999	135,8083385	4,3392	141,4005997
4,1037	97,27880906	4,8271	139,729138	4,8833	149,9529554
4,5736	102,9856487	5,3744	142,2420889	5,4465	153,4483367
5,0742	109,2638029	5,9503	145,4967544	6,0373	155,6966247
5,5674	113,3287413	6,5443	150,3099012	6,6281	159,3125342
6,0893	117,3094383	7,1701	154,1837015	7,2358	162,0419979
6,6047	121,41389	7,7821	158,9830959	7,8468	165,6879797
7,1574	124,4365158	8,4185	159,1549308	8,4959	169,0098907
7,7344	126,8969266	9,0878	160,0063983	9,1578	171,1285641
8,3156	128,9886946	9,7655	160,1237174	9,8504	171,8215555

Echantillon 02: 99% Sédiment + 1% fibre

FIB100		FIB200		FIB300	
DEPL VER (mm)	Déviateur (kPa)	DEPL VER (mm)	Déviateur (kPa)	DEPL VER (mm)	Déviateur (kPa)
0	0	0	0	0	0
0,0148	12,08685072	0,0328	13,31096624	0,0413	13,31096624
0,1357	41,99133564	0,1644	36,38226939	0,2216	36,38226939
0,3351	60,06803015	0,3691	53,93670781	0,456	53,93670781
0,577	71,94112542	0,6035	68,61042155	0,7254	68,61042155
0,8612	81,2857354	0,8824	81,7884302	0,9429	81,7884302
1,1921	88,11168057	1,1943	93,13305487	1,2208	93,13305487
1,5581	94,16923068	1,5697	98,81138522	1,5507	98,81138522
1,9452	98,60926168	1,9664	107,3475411	1,906	106,7240733
2,3748	104,334135	2,3907	120,2190548	2,3324	116,8727419
2,8044	110,688112	2,8266	126,6669872	2,746	129,6653942
3,2774	114,2144609	3,2902	134,5315593	3,2095	139,8999927
3,7791	118,5090524	3,7929	142,262022	3,6943	150,6745114
4,3063	122,5542342	4,3052	148,0417568	4,1981	158,9491636
4,8387	126,3759516	4,8122	158,4297403	4,738	165,3957964
5,3765	131,4654465	5,351	160,1896957	5,2757	173,0950263
5,9471	134,9560894	5,9312	165,9645823	5,8209	180,0197754
6,539	137,0539147	6,5305	169,4926298	6,3778	186,1712979
7,1733	137,7504723	7,1457	175,2075024	7,0036	191,6066937
7,7853	142,657973	7,7651	178,239363	7,6304	196,3053985
8,4397	145,6569052	8,4185	181,9546654	8,2806	200,8668877
9,1164	148,8768743	9,0857	184,9270038	8,952	205,3009488
9,8005	152,0249851	9,7518	188,6339096	9,6446	208,8024458
10,468	156,2317437	10,427	190,0471664	10,293	212,9615847

Echantillon 03 98% Sédiment traité + 2% fibre

FIB2-100kPa		FIB2-200kPa		FIB2-300kPa	
DEPL VER (mm)	Déviateur (kPa)	DEPL VER (mm)	Déviateur (kPa)	DEPL VER (mm)	Déviateur (kPa)
0	0	0	0	0	0
0,0625	0,17508154	0,0307	3,678136894	0,0466	16,32636697
0,2004	11,9032503	0,211	19,60754722	0,2057	28,55245576
0,4019	25,86557076	0,3669	42,06871876	0,4444	42,46454604
0,5939	35,3815833	0,5833	64,61832274	0,6777	53,6628824
0,787	50,75379246	0,8655	75,20182575	0,8877	80,42082091
1,0447	68,48231026	1,1868	84,31086535	1,172	96,96018604
1,3428	81,93121113	1,5326	101,7830878	1,5029	119,2452156
1,6588	97,00359937	1,8922	115,6802414	1,8508	137,9088759
2,0067	110,7379202	2,3154	124,5914075	2,256	153,7812377
2,379	115,787557	2,7365	136,3274549	2,6675	166,947798
2,7619	124,3637157	3,1905	145,3572696	3,1215	178,0481734
3,1798	132,648113	3,6847	154,2320499	3,6062	185,6034874
3,6126	139,3173561	4,2002	162,1373793	4,1058	191,6955834
4,0581	144,2207634	4,721	168,0997253	4,6319	197,1637087
4,528	147,5317192	5,2609	172,1278656	5,1824	205,6571042
5,0233	153,7529074	5,8283	174,8916707	5,77	211,6502766
5,5133	156,7670572	6,4361	178,0240278	6,3491	216,9094152
6,033	159,691244	7,063	182,3657821	6,9569	219,7438186
6,5581	162,2357023	7,675	187,1521345	7,5689	225,0977451
7,1149	168,7594035	8,3071	192,1346946	8,2223	227,5273444
7,6845	171,7642039	8,9753	197,5926906	8,8788	228,2950452
8,27	173,086052	9,6616	199,4255846	9,5587	230,5539018
8,8502	175,0280469	10,322	200,1697019	10,271	232,3766262
9,4622	177,1828897	11,057	199,7751306	10,999	232,3365891
10,089	178,7914358	11,806	203,1921469		

Echantillon 04 : 90% Sédiment traité par 10% sable normalisé

100kPa		200kPa		300kPa	
DEPL VER (mm)	Déviateur (kPa)	DEPL VER (mm)	Déviateur (kPa)	DEPL VER (mm)	Déviateur (kPa)
0	0	0	0	0	0
0,0053	2,803060803	0,0222	2,802587061	0,0222	7,895699644
0,1644	15,74228898	0,2036	15,73610784	0,1994	20,82085569
0,3659	34,38873753	0,4433	34,3620229	0,4189	39,44334828
0,6098	45,6232916	0,7223	45,57165049	0,6957	53,17206502
0,9026	54,68783159	0,9768	54,64688363	0,9588	64,74761689
1,2229	61,08782445	1,2462	61,07341477	1,2409	71,13875059
1,5825	66,2099595	1,5729	66,21641786	1,5835	76,23643907
1,9633	70,07901041	1,9367	86,58844518	1,9537	89,51032819
2,3907	73,02050792	2,3493	94,61124113	2,379	98,01387106
2,8213	76,61424153	2,7863	100,8288809	2,8118	104,2334781
3,2976	80,64280632	3,2605	105,7580066	3,2827	108,9707857
3,8003	84,10000263	3,7653	110,0987719	3,7929	112,6059261
4,3328	87,82570612	4,2946	113,8518849	4,3073	119,3940707
4,8865	90,15189918	4,8239	117,0573908	4,8462	125,7358338
5,4486	92,60064519	5,3616	119,5490782	5,4009	126,4967792
6,0362	94,65787799	5,928	124,4357388	5,9874	129,3331769
6,6143	95,22201585	6,5072	127,7655554	6,5697	132,1350988
7,2263	97,0366586	7,1234	130,0130459	7,1902	134,6711331
7,8415	99,62319766	7,7386	131,5770705	7,8298	137,1378009
8,4927	102,7650753	8,4121	130,0800128	8,4843	140,1873204
9,1726	105,5041454	9,0867	130,5992943	9,1472	141,860885
9,8727	107,216134	9,756	129,6240359	9,8398	141,7255879
10,569	108,5837215	10,444	128,4670099	10,529	141,7406601

Echantillon 05 : 80% Sédiment traité par 20% sable normalisé

100kPa		200kPa		300kPa	
DEPL VER (mm)	Déviateur (kPa)	DEPL VER (mm)	Déviateur (kPa)	DEPL VER (mm)	Déviateur (kPa)
0	0	0	0	0	0
0,0424	14,53674847	0,0328	14,53674847	0,0392	12,25907437
0,2121	13,81170272	0,175	29,03264939	0,1866	24,65741827
0,4423	18,66339176	0,4136	33,67420516	0,4094	32,97752721
0,717	22,78704168	0,6936	35,31928488	0,6745	39,15489132
1,0161	26,18661179	1,0012	37,9851789	0,9758	44,2405621
1,3512	29,20919105	1,3512	40,78924351	1,3099	48,41395441
1,714	32,02881882	1,732	44,41933864	1,6832	51,67266559
2,1011	34,64713388	2,1658	44,73759108	2,0958	55,23133524
2,5572	37,55891277	2,606	48,29015802	2,5509	59,24388993
2,991	39,77121906	3,0504	50,44540063	2,9868	61,69703458
3,4737	43,12458742	3,5267	51,88818652	3,463	64,43832455
3,9902	46,09008407	4,0273	53,46701208	3,9711	67,29850114
4,5142	47,84602272	4,5852	55,32891841	4,4834	69,78112891
5,0519	49,90216748	5,1431	57,66796967	5,0095	72,56151541
5,6014	51,10412237	5,7095	59,47074277	5,56	74,45509119
6,1815	52,10439567	6,3056	61,71993308	6,1465	75,79996887
6,767	54,22997422	6,8933	63,94148868	6,749	76,94751391
7,3949	55,16207001	7,5074	66,76146966	7,3896	81,45280469
8,0154	57,04638413	8,147	69,19623861	8,0101	83,00178853
8,6837	59,83241215	8,8035	70,1418623	8,6699	86,08664495
9,3657	61,76799111	9,4855	71,67844638	9,3402	88,78933546
10,044	63,67033439	10,195	74,89087366	10,004	91,60978462

Echantillon 06 : 70% Sédiment traité par 30% sable normalisé

100kPa		200kPa		300kPa	
DEPL VER (mm)	Déviateur (kPa)	DEPL VER (mm)	Déviateur (kPa)	DEPL VER (mm)	Déviateur (kPa)
0	0	0	0	0	0
0,0392	9,631984371	0,0286	8,582363896	0,0233	5,955311019
0,1941	22,20744829	0,175	22,56156877	0,2015	9,966123258
0,4242	29,65816759	0,3966	31,76044432	0,4348	14,30381154
0,6904	34,45076837	0,6459	37,94739505	0,6926	21,74847237
1,0118	37,98111175	0,9386	42,69531201	0,9471	42,69164852
1,3693	40,95460192	1,2706	46,184537	1,2643	53,27603334
1,7501	42,86208195	1,6461	49,11081289	1,6228	59,80812556
2,1521	44,40091462	2,0619	50,95974291	2,0131	64,71727756
2,6007	46,24506856	2,5116	53,1195072	2,4522	68,36296916
3,0451	47,56272522	2,9635	54,23267659	2,8871	71,28868512
3,5224	49,01927085	3,4524	55,65135476	3,3655	73,9847122
4,0199	50,44455893	3,9573	57,04339477	3,8788	77,12710246
4,5481	51,3388263	4,4749	58,74088039	4,406	79,88892359
5,0944	53,20611961	5,0021	60,25083316	4,9416	82,93760656
5,6406	55,04859138	5,5441	61,72594423	5,4953	84,44281396
6,2367	56,01437693	6,1338	63,3154536	6,0861	84,90046202
6,8402	57,77521168	6,7204	64,71598942	6,6737	86,00472578
7,4734	58,8437124	7,3642	66,05314787	7,3069	86,88502496
8,1035	59,24819684	8,0038	67,53261549	7,937	88,70971192
8,7611	60,2650829	8,6741	68,79915482	8,5946	90,95838429
9,4336	61,24650841	9,3307	70,21212579	9,266	93,47034885
10,116	63,46369027	10,014	72,20425298	9,9554	96,5490953
10,811	65,6263839	10,688	74,79368151	10,646	98,1573946

